



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Χημικών Μηχανικών

# Εισαγωγή στη Χημική Μηχανική

*Ισοζύγια μάζας με αντίδραση*

Επ. Καθ. Κυριάκος Λαμπρόπουλος

### Βασικές έννοιες

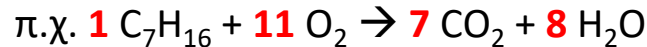
- ❖ Στοιχειομετρία
  - Στοιχειομετρικοί συντελεστές
  - Στοιχειομετρική αναλογία
- ❖ Μη στοιχειομετρική αναλογία
  - Περιοριστικό αντιδρών
  - Αντιδρών σε περίσσεια
- ❖ Μετατροπή (κλάσμα ή βαθμός μετατροπής)
- ❖ Απόδοση αντίδρασης
- ❖ Εκλεκτικότητα
- ❖ Έκταση αντίδρασης  $\xi$

## 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

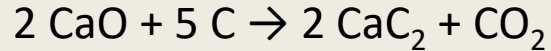
Στοιχειομετρικές αναλογίες: a/b, a/c, a/d, b/c, b/d, c/d

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

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1



Το καρβίδιο του ασβεστίου ( $\text{CaC}_2$ ) παρασκευάζεται κατά τη θέρμανση οξειδίου του ασβεστίου ( $\text{CaO}$ ) και άνθρακα ( $\text{C}$ ) σε υψηλή θερμοκρασία.



Διατίθενται 1150 kg  $\text{CaO}$ . Πόσα kg  $\text{C}$  απαιτούνται για την πλήρη αντίδραση του  $\text{CaO}$  και πόσα kg  $\text{CaC}_2$  θα παραχθούν;

MB:  $\text{CaO}$  56,  $\text{CaC}_2$  64

Hint:

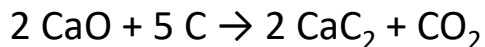
- *Don't panic, υπάρχουν και πιο δύσκολα πράγματα στη ζωή*
- *Ξαναδείτε την αντίδραση, 2 αντιδρώντα, 2 προϊόντα*
- *Αναγνωρίστε τους στοιχειομετρικούς συντελεστές*
- *Σκεφτείτε τις στοιχειομετρικές αναλογίες*
- *Αφού δίνονται MB μάλλον θα χρειαστεί να μετατρέψουμε βάρη σε mole και το αντίστροφο*



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

Το καρβίδιο του ασβεστίου ( $\text{CaC}_2$ ) παρασκευάζεται κατά τη θέρμανση οξειδίου του ασβεστίου ( $\text{CaO}$ ) και άνθρακα ( $\text{C}$ ) σε υψηλή θερμοκρασία.

ΛΥΣΗ



Διατίθενται 1150 kg  $\text{CaO}$ . Πόσα kg  $\text{C}$  απαιτούνται για την πλήρη αντίδραση του  $\text{CaO}$  και πόσα kg  $\text{CaC}_2$  θα παραχθούν; ΜΒ:  $\text{CaO}$  56,  $\text{CaC}_2$  64

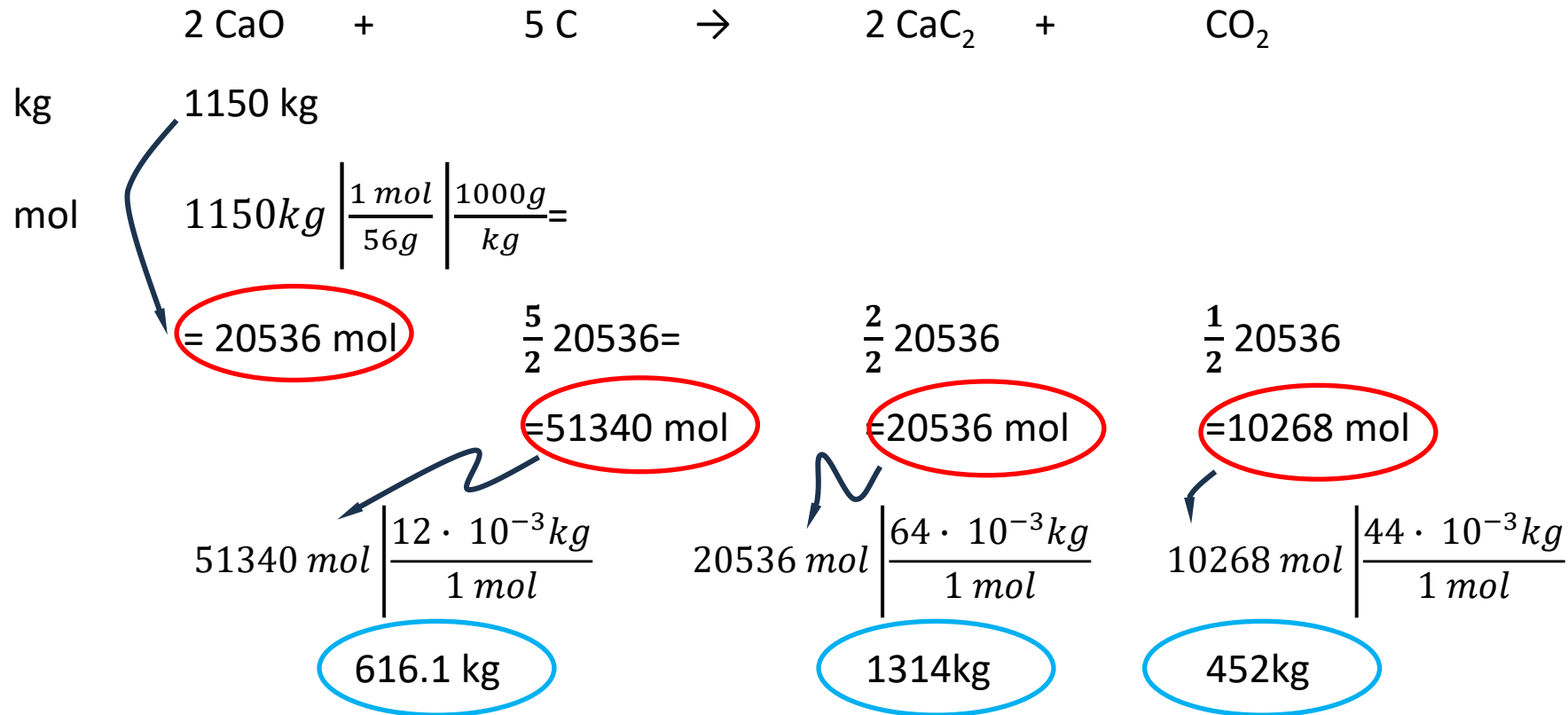
	2 CaO	+	5 C	→	2 CaC <sub>2</sub>	+	CO <sub>2</sub>
mol	2		5		2		1
g	2 · 56 = 112		5 · 12 = 60		2 · 64 = 128		1 · 44 = 44

Διατίθενται 1150kg  $\text{CaO}$ , άρα

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

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1**

“Ορθότερος” τρόπος με χρήση στοιχειομετρικών συντελεστών

**ΛΥΣΗ**

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.

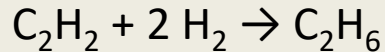
$$\text{Περίσσεια} = \frac{n_{\text{ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ}} - n_{\text{ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ}}}{n_{\text{ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ}}}$$

## 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'αναλογία 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

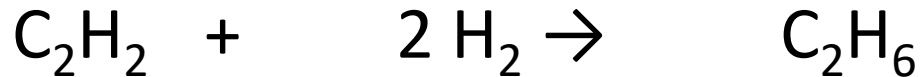


**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2**

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

**20 kmol**                      **50 kmol**

Στοιχειομετρικά απαιτούμενα ( $n_{stoichiometric}$ )

Διατίθενται (τροφοδοσία) ( $n_{feed}$ )



$C_2H_2$

Περιοριστικό  
αντιδρών  
(*limiting  
reactant*)



$H_2$

Αντιδρών σε  
περίσσεια  
(*excess  
reactant*)

**Περίσσεια ( $H_2$ )**

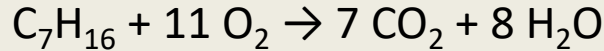
$$\frac{n_{\text{ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ}} - n_{\text{ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ}}}{n_{\text{ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ}}} = \frac{50 - 40}{40}$$

$$= 0.25 = \mathbf{25\%}$$

### 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 στοιχειομετρίες και moles και βλέπουμε...*



### 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

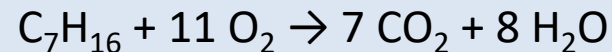
$$C_7H_{16} \quad 80g = 80g \frac{1 \text{ mol}}{100 \text{ g}} = 0.80 \text{ mol}$$

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

**Βήμα 2:** Check περιοριστικό αντιδρών / αντιδρών σε περίσσεια

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

Άρα  $O_2$  είναι αντιδρών σε περίσσεια  
 $C_7H_{16}$  περιοριστικό αντιδρών



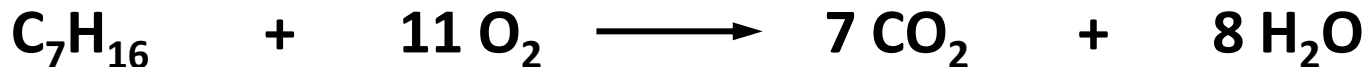
**Περίσσεια ( $O_2$ )**

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

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3**

Για πλήρη αντίδραση, πόσα g CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O θα παραχθούν και τι υπάρχει (mol %) στο προϊόν;

**Βήμα 3:** Μετατροπή moles σε g



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

### Βαθμός μετατροπής:

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

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

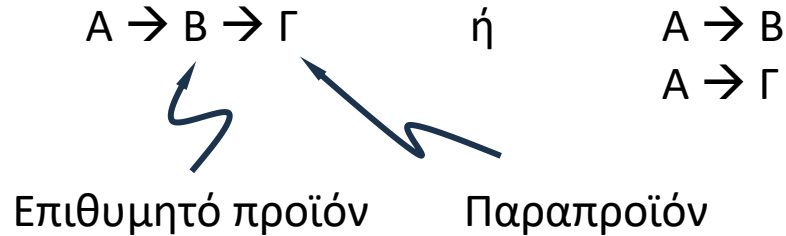
Όταν ο βαθμός μετατροπής αναφέρεται σε περιοριστικό αντιδρών, τότε ορίζεται ως **βαθμός μετατροπής της αντίδρασης**

**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)

## Εκλεκτικότητα:

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



$$\text{Εκλεκτικότητα} = \frac{\text{mol}_B}{\text{mol}_\Gamma}$$

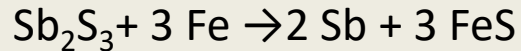
## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4



**HIM.5.2.12**



Το αντιμόνιο (Sb) παράγεται με θέρμανση αντιμονίτη ( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ) με σκραπ σιδήρου και απομάκρυνση του λιωμένου Sb από τον πυθμένα του αντιδραστήρα:



Θερμαίνονται μαζί 600 kg  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  και 250 kg Fe και παράγονται 200 kg Sb.

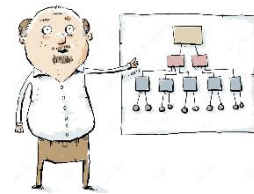
- (α) Ποιο είναι το περιοριστικό αντιδρών;
- (β) % περίσσεια του αντιδρώντος σε περίσσεια;
- (γ) Βαθμός μετατροπής (κλάσμα) αντίδρασης;
- (δ) Βαθμός μετατροπής (%) με βάση το  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ;
- (ε) Απόδοση σε kg Sb/kg  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  (τροφοδοσίας);

Hint:

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

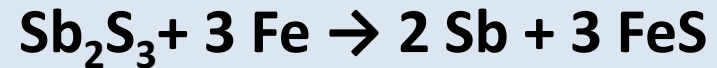


## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4



### Βήμα 1:

Μετατροπή kg σε mol και διάγραμμα ροής



Χημική ένωση	m (kg)	$M_i$ (g/mol)	mol
$\text{Sb}_2\text{S}_3$	600	339.7	1766
Fe	250	55.85	4476
Sb	200	121.8	1642
FeS	-	87.91	



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4

### Βήμα 2:

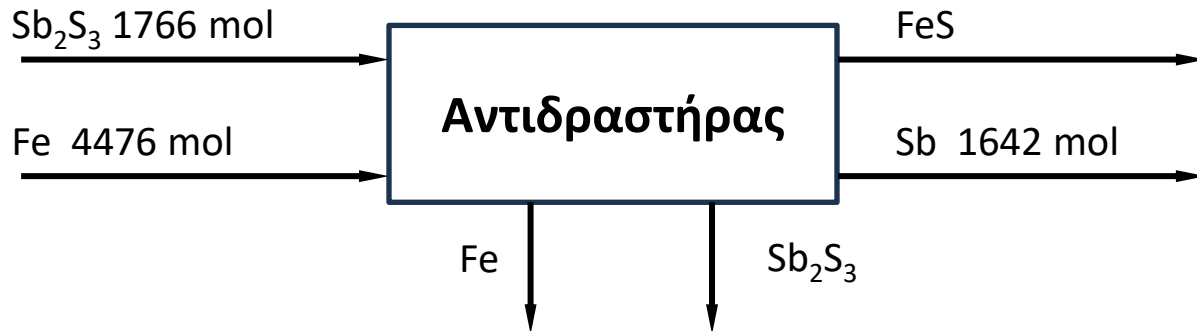
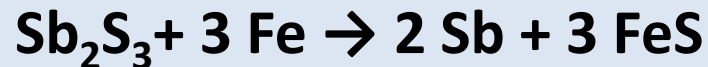
Περιοριστικό αντιδρών;

Στοιχειομετρική αναλογία:  $\left(\frac{Fe}{Sb_2S_3}\right)_{στοιχ.} = \frac{3}{1} = 3$

Παρεχόμενη (feed) αναλογία:  $\left(\frac{Fe}{Sb_2S_3}\right)_{feed.} = \frac{4476}{1766} = 2.53$

}  $\Rightarrow Fe =$  Περιοριστικό αντιδρών  
}  $\Rightarrow Sb_2S_3$  σε περίσσεια

- Καθώς έχουμε περίσσεια  $Sb_2S_3$  κάποια moles σίγουρα θα περισσέψουν
- Επίσης, επειδή δεν είμαστε σίγουροι ότι αντιδρούν όλα τα αντιδρώντα, πιθανά να περισσέψει ΚΑΙ Fe



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4

### Βήμα 3:

% περίσσεια του αντιδρώντος σε περίσσεια;

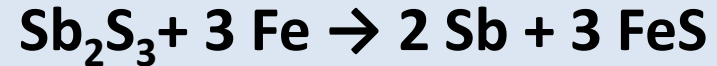
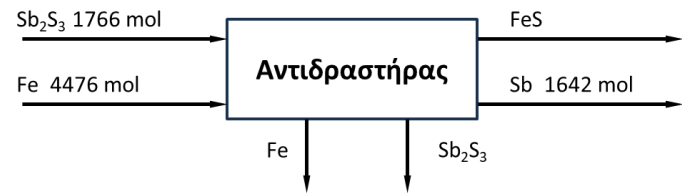
$$\% \text{ Περίσσεια του } \text{Sb}_2\text{S}_3 = \frac{n_{\text{τροφ.}} - n_{\text{στοιχ, αντιμονιτη}}}{n_{\text{στοιχ, αντιμονιτη}}} \quad (1)$$

Ερώτηση: Ναι, αλλά πόσο θα είναι το  $n_{\text{στοιχ}}$ ;

Απάντηση: Θα είναι τα mol εκείνα που χρειάζονται για να αντιδράσουν πλήρως με όλη την ποσότητα (4476 mol) του Fe (το οποίο είναι το περιοριστικό αντιδρών)

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

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



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4

### Βήμα 4:

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

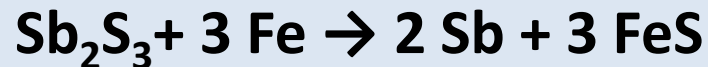
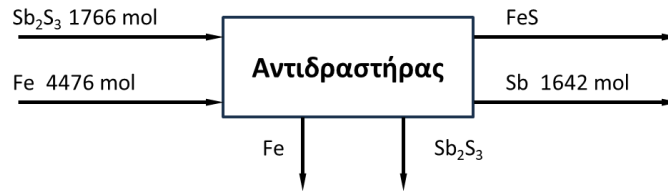
$$f_{Fe} = \frac{mol_{reacted}}{mol_{fed}} = \frac{mol\ Fe\ που\ αντιδρουν}{mol\ Fe\ τροφοδοσιας} \quad (2)$$

Ερώτηση: Ναι, αλλά πόσο θα είναι το  $n_{Fe, reacted}$  ;

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

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

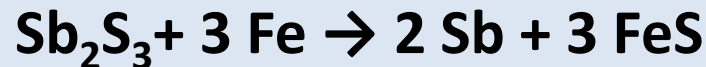
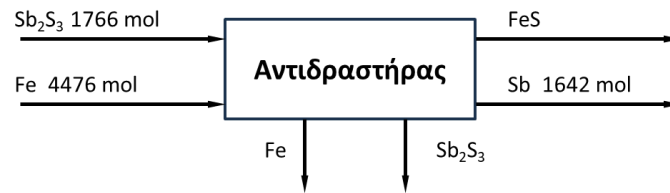
$$(2) \Rightarrow f_{Fe} = \frac{mol\ Fe\ που\ αντιδρουν}{mol\ Fe\ τροφοδοσιας} = \frac{2463}{4476} = 0.55 = 55\%$$



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4

### Βήμα 5:

Βαθμός μετατροπής (%) με βάση το  $Sb_2S_3$



$$f_{\text{αντιμονιτη}} = \frac{mol_{\text{reacted}}}{mol_{\text{fed}}} = \frac{mol \text{ αντιμονιτη που αντιδρουν}}{mol \text{ αντιμονιτη τροφοδοσιας}} \quad (3)$$

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

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

$$\text{Σύμφωνα με την στοιχειομετρία: } \frac{mol_{Sb}}{mol_{Sb_2S_3}} = \frac{2}{1} = \frac{n_{Sb, \text{παραγ.}}}{n_{Sb_2S_3, \text{reacted}}} = \frac{1642}{n_{Sb_2S_3, \text{reacted}}} \Rightarrow n_{Sb_2S_3, \text{reacted}} = 821 \text{ mol}$$

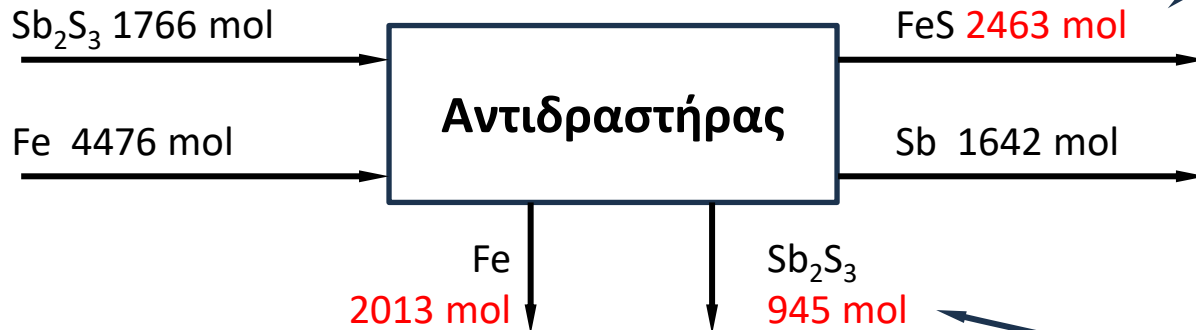
$$(3) \Rightarrow f_{\text{αντιμονιτη}} = \frac{mol \text{ αντιμονιτη που αντιδρουν}}{mol \text{ αντιμονιτη τροφοδοσιας}} = \frac{821}{1766} = 0.465 = 46.5\%$$

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4



### Βήμα 6:

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



$$\frac{n_{\text{FeS}}}{n_{\text{Sb}_2\text{S}_3, \text{reacted}}} = \frac{3}{1} = \frac{n_{\text{FeS}}}{821}$$

$$\begin{aligned} n_{\text{Fe}, \text{υπολοιπο}} &= \\ n_{\text{Fe}, \text{τροφοδ.}} - n_{\text{Fe}, \text{reacted}} &= \\ = 4476 - 2463 &= 2013 \text{ mol} \end{aligned}$$

Βήμα 4

$$\begin{aligned} n_{\text{Sb}_2\text{S}_3, \text{υπολοιπο}} &= \\ n_{\text{Sb}_2\text{S}_3, \text{τροφοδ.}} - n_{\text{Sb}_2\text{S}_3, \text{reacted}} &= \\ = 1766 - 821 &= 945 \text{ mol} \end{aligned}$$

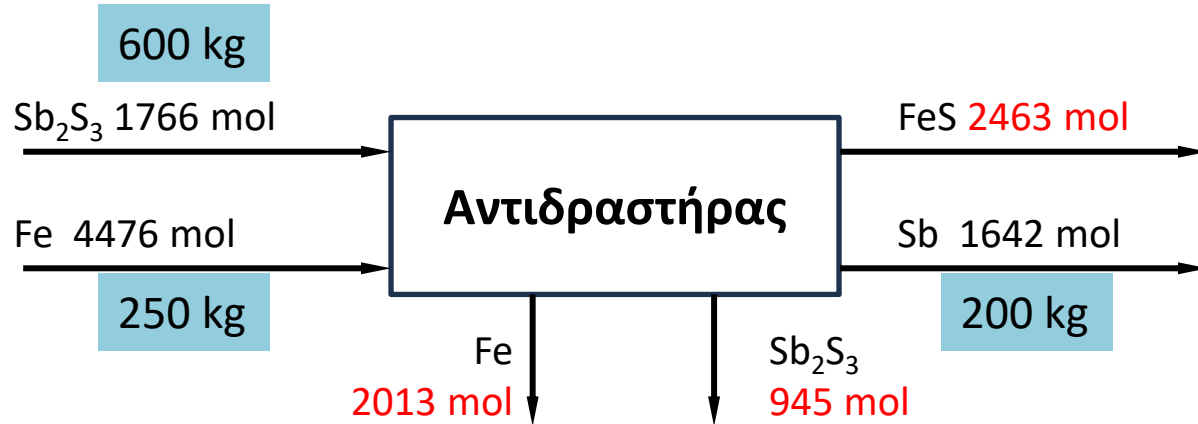
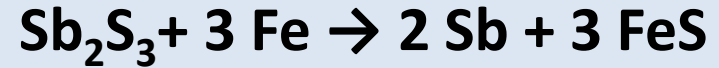
Βήμα 5

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4



### Βήμα 7:

Απόδοση σε kg Sb/kg  $Sb_2S_3$  (τροφοδοσίας)



$$\text{Απόδοση} = \frac{200 \text{ kg Sb}}{600 \text{ kg } Sb_2S_3} = \frac{1}{3} = 0.33 \text{ kg Sb / kg } Sb_2S_3$$

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4



**Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 1766 mol**

Σε περίσσεια

Στοιχειομετρικά απαιτούνταν: 1492 mol

Τελικά αντέδρασαν: 821 mol



**Fe 4476 mol**

Περιοριστικό αντιδρών

Τελικά αντέδρασαν: 2463 mol



**FeS 2463 mol**



**Sb 1642 mol**

Στοιχειομετρικά θα μπορούσαν να παραχθούν: 2984 mol



**Fe**

2013 mol



**Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>**

945 mol



Μαύρα στοιχεία: Ότι πραγματικά τροφοδοτήθηκε – εξήλθε από τον αντιδραστήρα

Κόκκινα στοιχεία: Πληροφοριακά στοιχεία



### 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  $\xi$
- 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  $\xi$ :
  - ❖ οι ποσότητες των υπολοίπων αντιδρώντων που αντέδρασαν και
  - ❖ οι ποσότητες των προϊόντων που έχουν παραχθεί

## 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)  
 $\nu_i$  στοιχειομετρικός συντελεστής της χημ. ένωσης (i) στην αντίδραση  
 $\xi$  έκταση της αντίδρασης (mol)

## ΕΚΤΑΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ – ΑΤΕΛΕΙΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ

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



ΕΙΣΡΟΗ

+

ΠΑΡΑΓΩΓΗ

=

ΕΚΡΟΗ

+

ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ

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:

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

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

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

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

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

Όπου όμως,  $\xi_A = \xi_B = \xi_\Gamma = \xi_\Delta = \xi_E = \xi$  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!**

## ΕΚΤΑΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ – ΑΤΕΛΕΙΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ

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

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

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

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

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

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

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



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;*

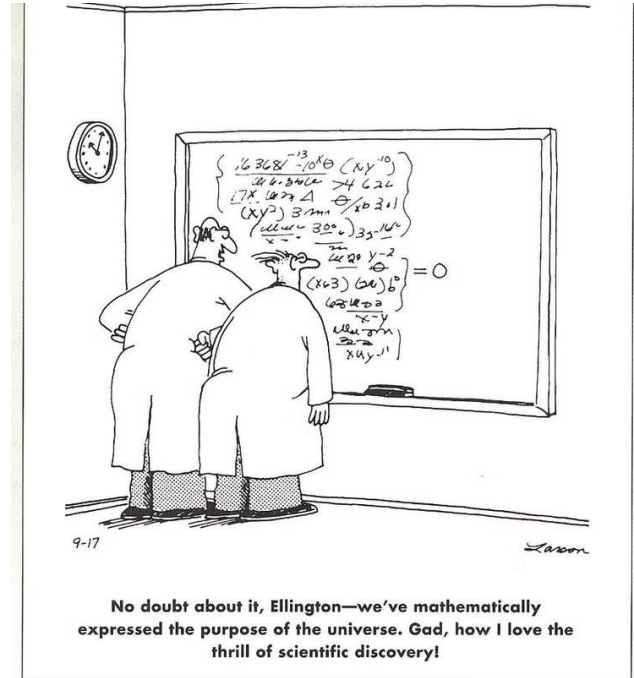
## ΕΚΤΑΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ – $\xi_{max}$

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

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

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

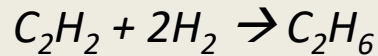
Επομένως, συγκριτικά, το συστατικό Β είναι σε «έλλειψη» και άρα (μεταξύ τους) το Β είναι το περιοριστικό αντιδρών.



### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5

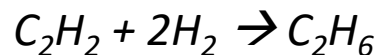


Έχουμε 20.0 kmol/h ακετυλενίου ( $C_2H_2$ ), 50.0 kmol/h  $H_2$  και 50.0 kmol αιθανίου  $C_2H_6$  και ύστερα από κάποιο χρόνο αντιδρούν 30.0 kmol  $H_2$ . Χρησιμοποιώντας την έννοια της έκτασης της αντίδρασης, υπολογίστε την ποσότητα των αντιδρώντων και προϊόντων σε αυτόν τον χρόνο.



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

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5**

Υπολογισμός της έκτασης της αντίδρασης ( $\xi$ ) με βάση το  $H_2$

$$n_{H_2} = n_{H_2,0} \pm \nu_{H_2} \cdot \xi \Leftrightarrow \xi = \frac{n_{H_2} - n_{H_2,0}}{\nu_{H_2}} \quad (1)$$

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

$$n_{H_2} = n_{\text{αρχικό}} - n_{\text{αντέδρασε}} = 50 - 30 = 20 \text{ kmol},$$

$$\text{οπότε } \xi = \frac{n_{H_2} - n_{H_2,0}}{\nu_{H_2}} = \frac{20 - 50}{-2} = \frac{-30}{-2} = 15 \text{ kmol}$$

Επομένως:

$$n_{H_2} = n_{H_2,0} - 2 \cdot \xi = 50 - 2 \cdot 15 = 20 \text{ kmol} \quad (\text{σημ. αν και το είχαμε ήδη υπολογίσει})$$

$$n_{C_2H_2} = n_{C_2H_2,0} - 1 \cdot \xi = 20 - 1 \cdot 15 = 5 \text{ kmol}$$

$$n_{C_2H_6} = n_{C_2H_6,0} + 1 \cdot \xi = 50 + 1 \cdot 15 = 65 \text{ kmol}$$

**Ερώτ.:** Γιατί με βάση το  $H_2$  και όχι με βάση το  $C_2H_2$ ;

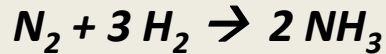
**Απάντ.:** Γιατί για το  $H_2$  μας δίνονται δεδομένα για χρόνο  $t$



### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6



Έστω ότι έχουμε την παραγωγή αμμωνίας



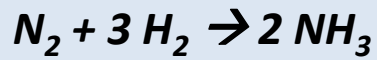
με αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας με τροφοδοσία  $100 \text{ mol/s N}_2$ ,  $300 \text{ mol/s H}_2$  και  $1 \text{ mol/s Ar}$  (αδρανές αέριο). Να υπολογίσετε τις ροές των προϊόντων αν ο βαθμός μετατροπής του  $\text{H}_2$  είναι  $0.60$  (δηλ.  $60\%$ ):

- α) με χρήση της έκτασης της αντίδρασης  $\xi$
- β) μέσω ατομικών ισοζυγίων
- γ) μέσω της στοιχειομετρίας της αντίδρασης (δηλ. όπως Παράδειγμα 1)

Hint:

- *Don't panic.* Δεν βοηθάει ποτέ
- Αντίθετα, ο βαθμός μετατροπής του  $\text{H}_2$  υποδεικνύει ατελή αντίδραση
- Προφανώς, στα «προϊόντα» θα έχουμε υπολειπόμενο  $\text{H}_2$
- Πιθανά να βοηθήσει να σχεδιάσουμε το διάγραμμα ροής ....

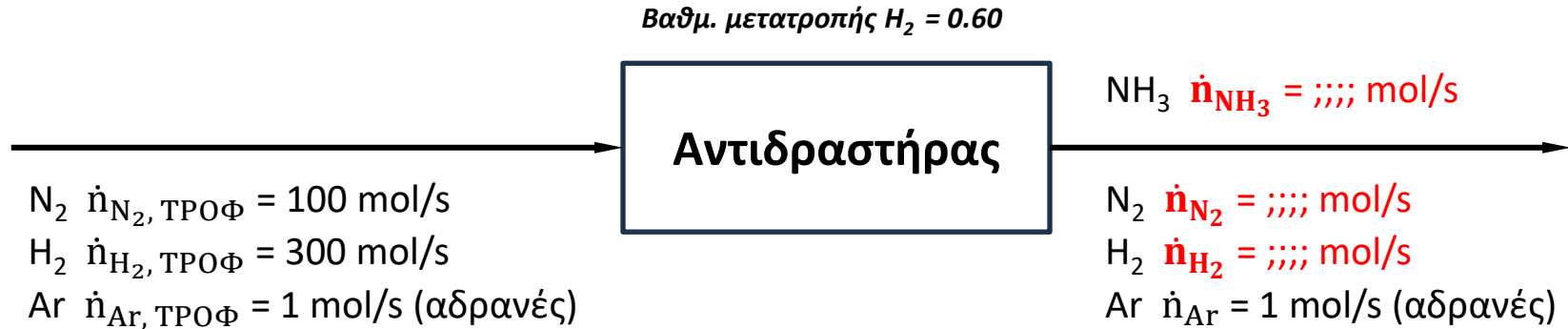


**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6**

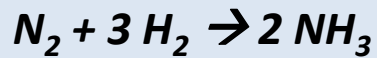
Έστω ότι έχουμε την παραγωγή αμμωνίας με αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας με τροφοδοσία 100 mol/s  $\text{N}_2$ , 300 mol/s  $\text{H}_2$  και 1 mol/s Ar (αδρανές αέριο). Να υπολογίσετε τις ροές των προϊόντων αν ο βαθμός μετατροπής του  $\text{H}_2$  είναι 0.60 (δηλ. 60%):

**Βήμα 1:**

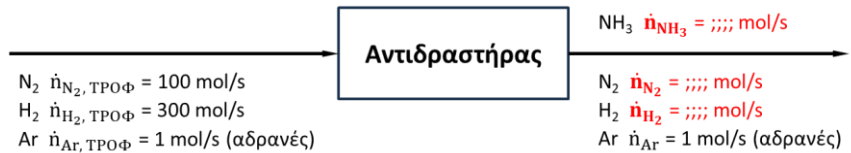
## Διάγραμμα ροής



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6



Βαθμ. μετατροπής  $\text{H}_2 = 0.60$



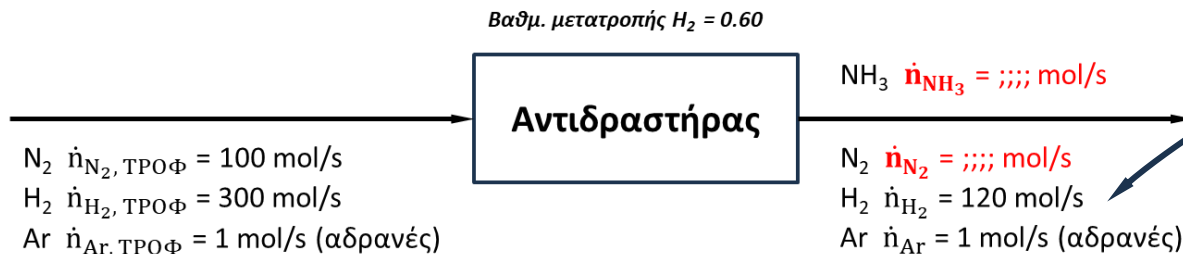
### Βήμα 2:

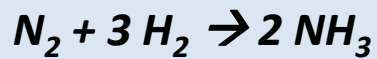
Τι μπορούμε, άραγε, να υπολογίσουμε από τον βαθμό μετατροπής τους  $\text{H}_2$  ;

$$f_{\text{H}_2} = 0.60 = \frac{\text{mol}_{\text{H}_2} \text{αντεδρασαν}}{\text{mol}_{\text{H}_2} \text{τροφοδοσιας}} = \frac{\text{mol}_{\text{H}_2} \text{τροφοδοσιας} - \text{mol}_{\text{H}_2} \text{που ΔΕΝ αντεδρασαν}}{\text{mol}_{\text{H}_2} \text{τροφοδοσιας}} = \frac{\dot{n}_{\text{H}_2, \text{τροφ}} - \dot{n}_{\text{H}_2}}{\dot{n}_{\text{H}_2, \text{τροφ}}} =$$

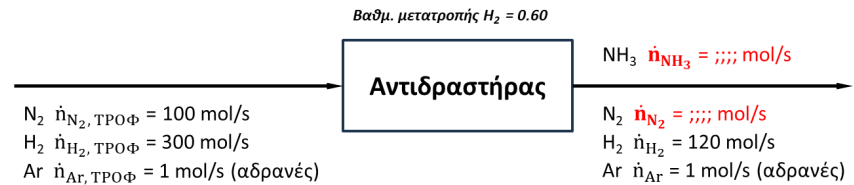
$$= \frac{300 - \dot{n}_{\text{H}_2}}{300} \quad \Rightarrow \quad \dot{n}_{\text{H}_2} = 120 \text{ mol/s}$$

Άρα το διάγραμμα ροής επικαιροποιείται ως εξής:



**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6****Βήμα 3:**

(α) Υπολογισμοί μέσω έκτασης αντίδρασης



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

$$\dot{n}_{\text{N}_2} = \dot{n}_{\text{N}_2, \text{τροφ}} - 1 \cdot \dot{\xi} \quad \Leftrightarrow \dot{n}_{\text{N}_2} = 100 - \dot{\xi} \quad [\text{mol/s}] \quad (1)$$

$$\dot{n}_{\text{H}_2} = \dot{n}_{\text{H}_2, \text{τροφ}} - 3 \cdot \dot{\xi} = \quad \Leftrightarrow 120 = 300 - 3 \cdot \dot{\xi} \quad [\text{mol/s}] \quad \Leftrightarrow \dot{\xi} = 60 \text{ mol/s} \quad (2)$$

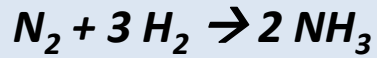
$$\dot{n}_{\text{NH}_3} = \dot{n}_{\text{NH}_3, \text{τροφ}} + 2 \cdot \dot{\xi} \quad \Leftrightarrow \dot{n}_{\text{NH}_3} = 0 + 2 \cdot \dot{\xi} \quad [\text{mol/s}] \quad (3)$$

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

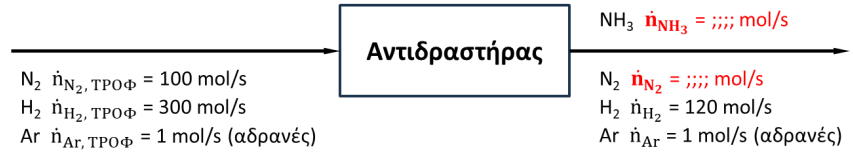
$$(1) \Leftrightarrow \dot{n}_{\text{N}_2} = 100 - 60 = 40 \text{ mol/s}$$

$$(3) \Leftrightarrow \dot{n}_{\text{NH}_3} = 2 \cdot 60 = 120 \text{ mol/s}$$

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6



Βαθμ. μετατροπής  $H_2 = 0.60$



### Βήμα 4:

(β) Υπολογισμοί μέσω ατομικών ισοζυγίων

#### Ισοζύγιο N

$$N_{IN} = N_{OUT} \text{ δηλαδή } N_{\text{στο } N_2 \text{ TPO}\Phi} = N_{\text{στο } N_2 \text{ E}\Xi\text{O}\Delta} + N_{\text{στην } NH_3 \text{ E}\Xi\text{O}\Delta}$$

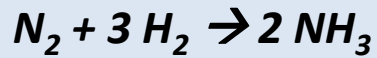
$$\begin{aligned} \text{Άρα υπό μορφή ρών:} \quad 2 \cdot \dot{n}_{N_2, \text{τροφ}} &= 2 \cdot \dot{n}_{N_2} + 1 \cdot \dot{n}_{NH_3} \Leftrightarrow \\ 2 \cdot 100 &= 2 \cdot \dot{n}_{N_2} + 1 \cdot \dot{n}_{NH_3} \end{aligned} \quad (4)$$

#### Ισοζύγιο H

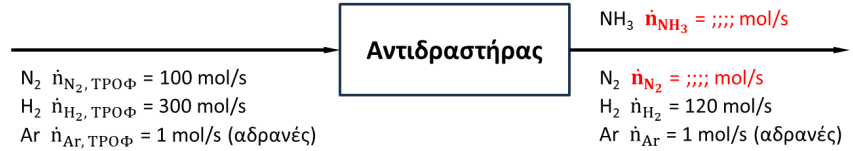
$$H_{IN} = H_{OUT} \text{ δηλαδή } H_{\text{στο } H_2 \text{ TPO}\Phi} = H_{\text{στο } H_2 \text{ E}\Xi\text{O}\Delta} + H_{\text{στην } NH_3 \text{ E}\Xi\text{O}\Delta}$$

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

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6



Βαθμ. μετατροπής  $\text{H}_2 = 0.60$



### Βήμα 4:

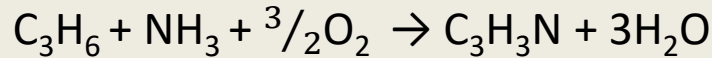
(γ) μέσω της στοιχειομετρίας της αντίδρασης

[mol/s]	$\text{N}_2$	+	$3 \text{H}_2$	$\rightarrow$	$2 \text{NH}_3$
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 $\text{H}_2$	$\frac{\text{N}_2}{\text{H}_2} = \frac{1}{3} = \frac{100 - \dot{n}_{\text{N}_2}}{180}$ $\Rightarrow \dot{n}_{\text{N}_2} = 40 \text{ mol/s}$				$\frac{\text{NH}_3}{\text{H}_2} = \frac{2}{3} = \frac{\dot{n}_{\text{NH}_3}}{180}$ $\Rightarrow \dot{n}_{\text{NH}_3} = 120 \text{ mol/s}$

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7



Το ακρυλονιτρίλιο ( $C_3H_3N$ ) παράγεται σύμφωνα με την ακόλουθη αντίδραση και επιτυγχάνεται μια μετατροπή 30.0% του περιοριστικού αντιδρώντος.



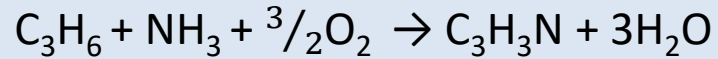
Η τροφοδοσία έχει σύσταση: 10.0% mol προπυλένιο, 12.0% mol αμμωνία και 78% mol αέρα. Θεωρείστε σύσταση αέρα 21%  $O_2$  και 79%  $N_2$ . Με βάση 100 mol τροφοδοσίας, βρείτε τα ακόλουθα:

- 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*



**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7****Βήμα 1:**

Διάγραμμα ροής

Βάση υπολογισμού  
Τροφοδοσία: 100.0 mol

$n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{IN}} = 0.100 \text{ mol C}_3\text{H}_6 / \text{mol}$   
 $n_{\text{NH}_3, \text{IN}} = 0.120 \text{ mol NH}_3 / \text{mol}$   
 $n_{\text{air,IN}} = 0.780 \text{ mol air / mol}$

0.210 mol O<sub>2</sub> / mol air  
0.790 mol N<sub>2</sub> / mol air

Βαθμ. μετατροπής Π.Α. = 0.30

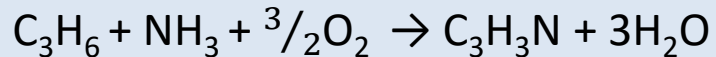
**Αντιδραστήρας**

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

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



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7



### Βήμα 2:

### Σύσταση εισόδου

Βάση υπολογισμού  
Τροφοδοσία: 100.0 mol

$$\begin{aligned} n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{IN}} &= 0.100 \text{ mol C}_3\text{H}_6 / \text{mol} \\ n_{\text{NH}_3, \text{IN}} &= 0.120 \text{ mol NH}_3 / \text{mol} \\ n_{\text{air,IN}} &= 0.780 \text{ mol air / mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0.210 \text{ mol O}_2 / \text{mol air} \\ 0.790 \text{ mol N}_2 / \text{mol air} \end{aligned}$$

Βαθμ. μετατροπής Π.Α. = 0.30

Αντιδραστήρας

$$n_{\text{C}_3\text{H}_3\text{N}} = \text{;;; mol C}_3\text{H}_3\text{N}$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = \text{;;; mol H}_2\text{O}$$

$$n_{\text{C}_3\text{H}_6} = \text{;;; mol C}_3\text{H}_6$$

$$n_{\text{NH}_3} = \text{;;; mol NH}_3$$

$$n_{\text{O}_2} = \text{;;; mol O}_2$$

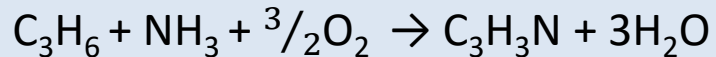
$$n_{\text{N}_2} = \text{;;; mol N}_2$$

$$n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{IN}} = 0.100 \frac{\text{mol C}_3\text{H}_6}{\text{mol τροφοδοσία}} \cdot 100 \text{ mol τροφοδ} = 10.0 \text{ mol}$$

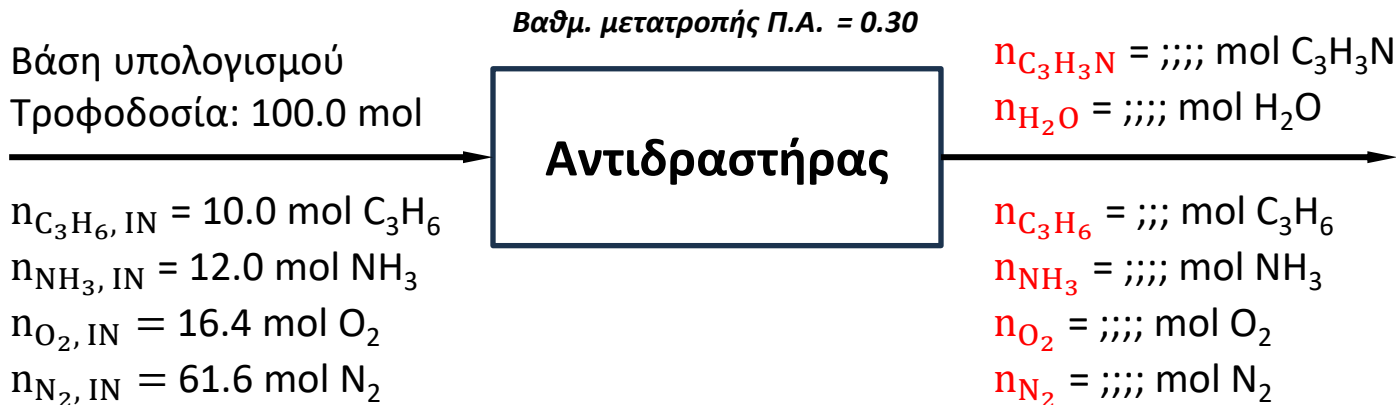
$$n_{\text{NH}_3, \text{IN}} = 0.120 \frac{\text{mol NH}_3}{\text{mol τροφοδοσία}} \cdot 100 \text{ mol τροφοδ} = 12.0 \text{ mol}$$

$$n_{\text{O}_2, \text{IN}} = 78 \text{ mol air} \cdot \left| \frac{0.21 \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol air}} \right| = 16.4 \text{ mol O}_2$$

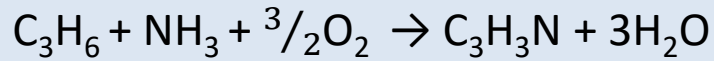
$$n_{\text{N}_2, \text{IN}} = 78 \text{ mol air} \cdot \left| \frac{0.79 \text{ mol N}_2}{1 \text{ mol air}} \right| = 61.6 \text{ mol N}_2$$

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7****Βήμα 2:**

Διάγραμμα ροής  
(επικαιροποιημένο)



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7



### Βήμα 3:

(α) Περιοριστικό αντιδρών (1ος τρόπος)

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

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

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

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

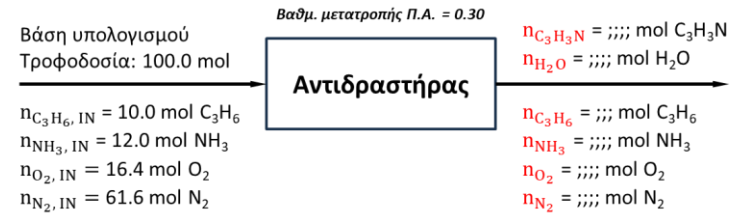
1.2 (IN) > 1.0 (ΣΤΟΙΧ)  $\Rightarrow$   $\text{NH}_3$  σε περίσσεια

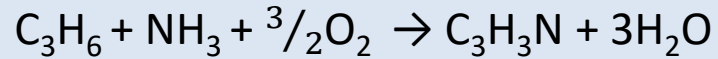


Περιοριστικό αντιδρών είναι το προπυλένιο  $\text{C}_3\text{H}_6$



1.64 (IN) > 1.5 (ΣΤΟΙΧ)  $\Rightarrow$   $\text{O}_2$  σε περίσσεια



**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7****Βήμα 3:**

(α) Περιοριστικό αντιδρών (2ος τρόπος)

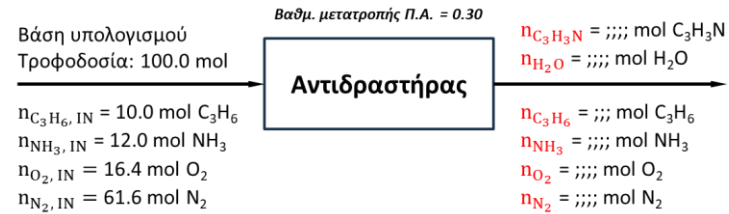
$$\text{ΕΙΣΡΟΗ} + \text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ} = \text{ΕΚΡΟΗ} + \text{ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ}$$

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

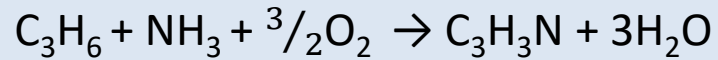
$$\xi_{max, \text{NH}_3} = \frac{0 - 12.0}{-1} = 12.0$$

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

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



Περιοριστικό αντιδρών αυτό με το μικρότερο  $\xi_{max}$  δηλαδή το προπυλένιο  $\text{C}_3\text{H}_6$

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7****Βήμα 4:**

(β) Περίσσεια των υπολοίπων αντιδρώντων

Αφού το Π.Α. είναι το προπυλένιο  $\text{C}_3\text{H}_6$ , τότε, όπως είδαμε (1<sup>ος</sup> τρόπος) το  $\text{O}_2$  και  $\text{NH}_3$  είναι σε περίσσεια:

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

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

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

(1)  $\Leftrightarrow$

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

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

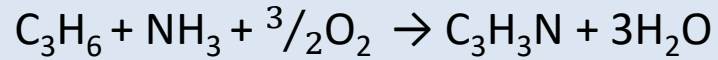
Βάση υπολογισμού  
Τροφοδοσία: 100.0 mol

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

Βαθμ. μετατροπής Π.Α. = 0.30

Αντιδραστήρας

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

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7**

Βάση υπολογισμού

Τροφοδοσία: 100.0 mol

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

Βαθμ. μετατροπής Π.Α. = 0.30

Αντιδραστήρας

 $n_{\text{C}_3\text{H}_3\text{N}} = \text{;;; mol C}_3\text{H}_3\text{N}$  $n_{\text{H}_2\text{O}} = \text{;;; mol H}_2\text{O}$  $n_{\text{C}_3\text{H}_6} = \text{;;; mol C}_3\text{H}_6$  $n_{\text{NH}_3} = \text{;;; mol NH}_3$  $n_{\text{O}_2} = \text{;;; mol O}_2$  $n_{\text{N}_2} = \text{;;; mol N}_2$ **Βήμα 5:**(γ) Σύσταση του προϊόντος (1<sup>ος</sup> τρόπος με χρήση ξ)Έχει δοθεί ότι βαθμός μετατροπής Π.Α. (ήτοι του  $\text{C}_3\text{H}_6$ ) είναι 30%, επομένως:

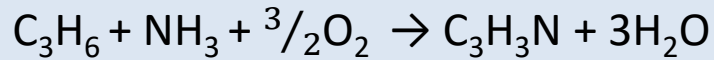
$$f = 0.3 = \frac{n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{αντιδρ.}}}{n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{τροφοδ.}}} = \frac{n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{τροφοδ.}} - n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{out}}}{n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{τροφοδ.}}} = \frac{10.0 - n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{out}}}{10.0} \Rightarrow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

Υπολογισμός ξ

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

$$n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{out}} = n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{τροφοδ.}} - 1 \cdot \xi \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 7.0 = 10.0 - \xi \quad \Rightarrow \xi = 3.0 \text{ mol}$$

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7**

Βάση υπολογισμού

Τροφοδοσία: 100.0 mol

Βαθμ. μετατροπής Π.Α. = 0.30

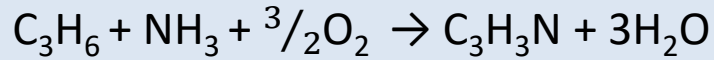
 $n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{IN}} = 10.0 \text{ mol C}_3\text{H}_6$  $n_{\text{NH}_3, \text{IN}} = 12.0 \text{ mol NH}_3$  $n_{\text{O}_2, \text{IN}} = 16.4 \text{ mol O}_2$  $n_{\text{N}_2, \text{IN}} = 61.6 \text{ mol N}_2$  $n_{\text{C}_3\text{H}_3\text{N}} = \text{;;; mol C}_3\text{H}_3\text{N}$  $n_{\text{H}_2\text{O}} = \text{;;; mol H}_2\text{O}$ **Αντιδραστήρας** $n_{\text{C}_3\text{H}_6} = \text{;;; mol C}_3\text{H}_6$  $n_{\text{NH}_3} = \text{;;; mol NH}_3$  $n_{\text{O}_2} = \text{;;; mol O}_2$  $n_{\text{N}_2} = \text{;;; mol N}_2$ **Βήμα 5:**(γ) Σύσταση του προϊόντος (1<sup>ος</sup> τρόπος με χρήση ξ)Χρήση ξ (=3.0 mol) για τις υπόλοιπες ενώσεις και στοιχεία του προϊόντος

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

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

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

$$100.0 \%$$

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7**

Βάση υπολογισμού  
Τροφοδοσία: 100.0 mol

Βαθμ. μετατροπής Π.Α. = 0.30

Αντιδραστήρας

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

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

**Βήμα 5:**

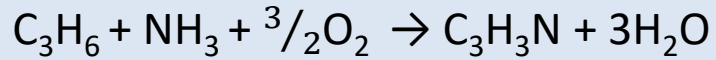
(γ) Σύσταση του προϊόντος (2<sup>ος</sup> τρόπος με ισοζύγια μάζας)

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

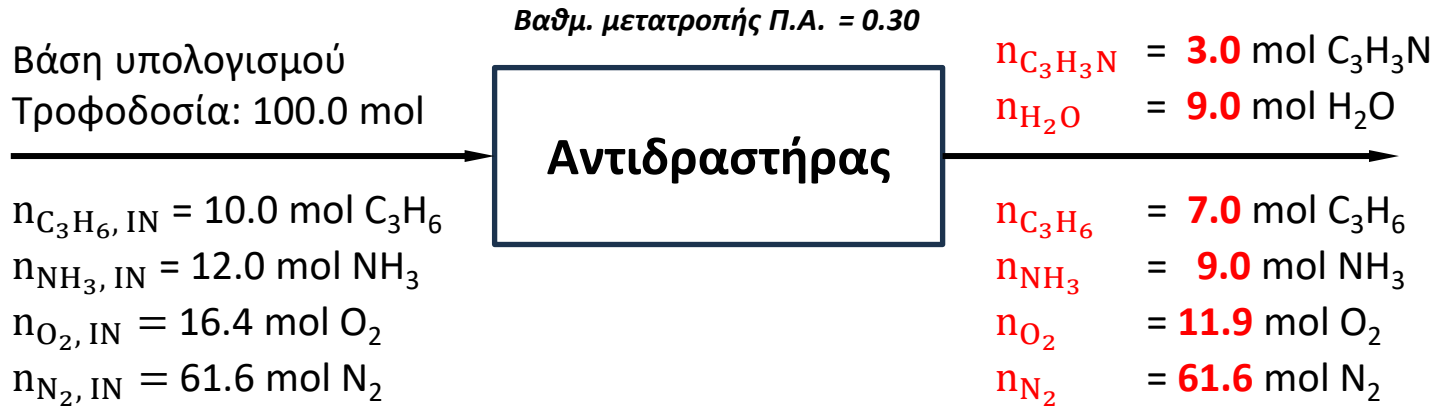
$$\begin{array}{l} \text{C}_3\text{H}_6 \quad 10.0 + 0 = n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{out}} + f \cdot 10 \quad \xRightarrow{f=0.3} \quad n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{out}} = 7 \text{ mol} \\ \text{NH}_3 \quad 12.0 + 0 = n_{\text{NH}_3, \text{out}} + 0.3 \cdot 10 \cdot \left| \frac{1 \text{ mol NH}_3}{1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

Ομοίως, όπως προηγουμένως, υπολογίζονται τα  $y_i$



**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7****Βήμα 6:**

Διάγραμμα ροής (με υπολογισμένες τιμές)

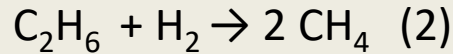
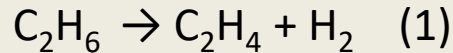


Περιοριστικό αντιδρών:	$\text{C}_3\text{H}_6$
Περίσσεια $\text{NH}_3$ :	20 %
Περίσσεια $\text{O}_2$ (αέρα):	9.3%
Σύσταση προϊόντος (mol %):	$\text{C}_3\text{H}_6$ : 6.9, $\text{NH}_3$ : 8.9, $\text{O}_2$ : 11.7, $\text{N}_2$ : 60.7, $\text{C}_3\text{H}_3\text{N}$ : 2.9, $\text{H}_2\text{O}$ : 8.9

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8



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



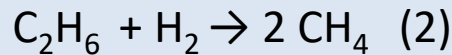
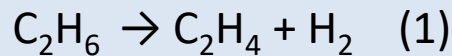
Η τροφοδοσία περιλαμβάνει 85.0 mol % αιθάνιο ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) και 15 mol % αδρανή (I). Ο βαθμός μετατροπής του αιθανίου είναι 0.501 και η απόδοση σε αιθυλένιο ( $\text{mol C}_2\text{H}_4 / \text{mol C}_2\text{H}_6$ ) 0.471.

Υπολογίστε τη μολαρική σύσταση του προϊόντος και την εκλεκτικότητα του αιθυλενίου ως προς το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ).

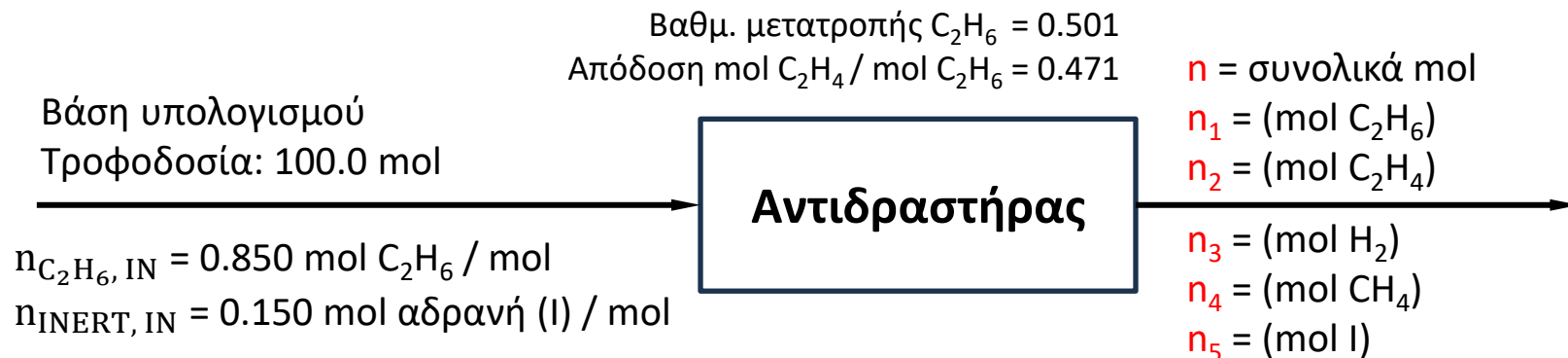
Hint:

- Πλέον έχει καταστεί σαφές ότι δεν χρειάζεται πανικός, *life is short*
- Προσοχή, το  $\text{H}_2$  δεν είναι διαθέσιμο από την αρχή, αλλά παράγεται μέσω της αντίδρασης (1)
- Στο «προϊόν» θα έχουμε σχεδόν τα πάντα, *think about it, ... πάλι*

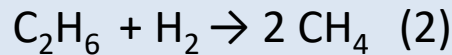
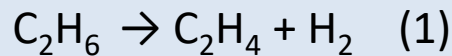


**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8****Βήμα 1:**

## Διάγραμμα ροής



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8

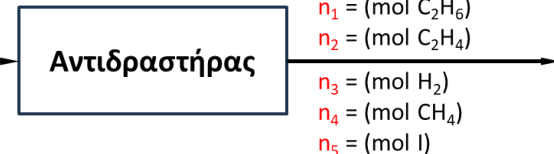


### Βήμα 2:

Βάση υπολογισμού  
Τροφοδοσία: 100.0 mol

$n_{\text{C}_2\text{H}_6, \text{IN}} = 0.850 \text{ mol C}_2\text{H}_6 / \text{mol}$   
 $n_{\text{INERT, IN}} = 0.150 \text{ mol αδρανή (I) / mol}$

Βαθμ. μετατροπής  $\text{C}_2\text{H}_6 = 0.501$   
Απόδοση  $\text{mol C}_2\text{H}_4 / \text{mol C}_2\text{H}_6 = 0.471$



### Σύσταση προϊόντος με χρήση $\xi$

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

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

Αν  $\xi_1$  είναι η έκταση της πρώτης αντίδρασης και  $\xi_2$  της δεύτερης, τότε:

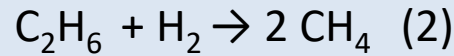
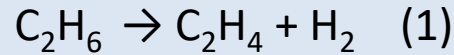
$$n_1 \text{ (mol C}_2\text{H}_6) = 85 - 1 \cdot \xi_1 - 1 \cdot \xi_2 \quad (3)$$

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

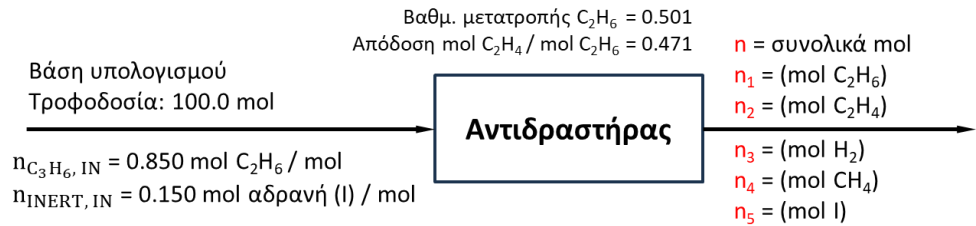
$$n_3 \text{ (mol H}_2) = 0 + 1 \cdot \xi_1 - 1 \cdot \xi_2 \quad (5)$$

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

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

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8****Βήμα 3:**

Αξιοποίηση βαθμού μετατροπής



Βαθμός μετατροπής  $\text{C}_2\text{H}_6 : f = 0.501 \Rightarrow$  το υπόλοιπο κλάσμα  $(1 - 0.501)$  δεν αντέδρασε και βρίσκεται στην έξοδο!

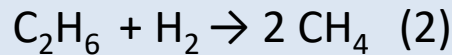
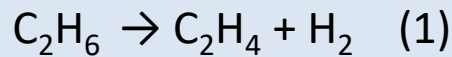
$$n_1 = \frac{(1-0.501)\text{mol C}_2\text{H}_6 \text{ που δεν αντεδρασαν}}{\text{mol C}_2\text{H}_6 \text{ τροφοδοσιας}} \cdot 85.0 \text{ mol C}_2\text{H}_6 \text{ τροφοδοσίας} \Rightarrow$$

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

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

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

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8



### Βήμα 4:

Αξιοποίηση βαθμού απόδοσης

Βάση υπολογισμού  
Τροφοδοσία: 100.0 mol

$n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{IN}} = 0.850 \text{ mol C}_2\text{H}_6 / \text{mol}$   
 $n_{\text{INERT, IN}} = 0.150 \text{ mol αδρανή (I) / mol}$

Βαθμ. μετατροπής  $\text{C}_2\text{H}_6 = 0.501$   
Απόδοση  $\text{mol C}_2\text{H}_4 / \text{mol C}_2\text{H}_6 = 0.471$

Αντιδραστήρας

$n$  = συνολικά mol  
 $n_1$  = (mol  $\text{C}_2\text{H}_6$ )  
 $n_2$  = (mol  $\text{C}_2\text{H}_4$ )  
 $n_3$  = (mol  $\text{H}_2$ )  
 $n_4$  = (mol  $\text{CH}_4$ )  
 $n_5$  = (mol I)

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

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

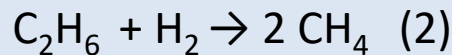
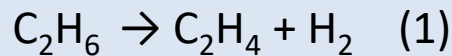
$$(9) \Rightarrow n_2 = 0.471 \cdot 85.0 = 40.0 \text{ mol C}_2\text{H}_4$$

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

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



Μπορώ πλέον να  
λύσω τις (3) έως (6)

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

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

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

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

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

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

---


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

Βάση υπολογισμού  
Τροφοδοσία: 100.0 mol

$n_{\text{C}_3\text{H}_6, \text{IN}} = 0.850 \text{ mol C}_2\text{H}_6 / \text{mol}$   
 $n_{\text{INERT, IN}} = 0.150 \text{ mol αδρανή (I) / mol}$

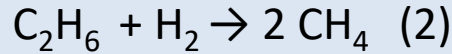
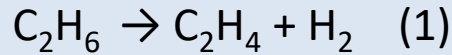
Βαθμ. μετατροπής  $\text{C}_2\text{H}_6 = 0.501$   
Απόδοση  $\text{mol C}_2\text{H}_4 / \text{mol C}_2\text{H}_6 = 0.471$

**Αντιδραστήρας**

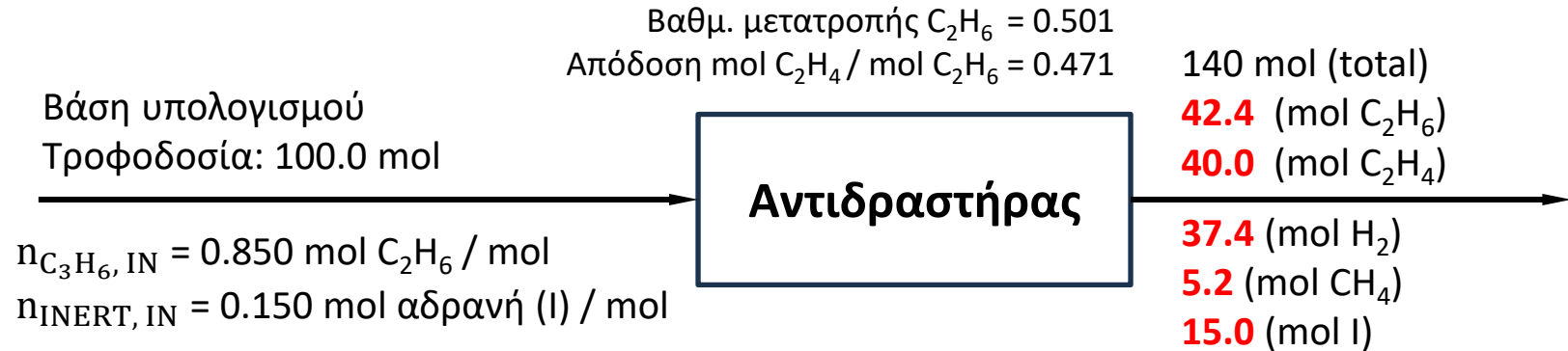
$n$  = συνολικά mol  
 $n_1$  = (mol  $\text{C}_2\text{H}_6$ )  
 $n_2$  = (mol  $\text{C}_2\text{H}_4$ )  
 $n_3$  = (mol  $\text{H}_2$ )  
 $n_4$  = (mol  $\text{CH}_4$ )  
 $n_5$  = (mol I)

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

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8

Βήμα 6:

## Ανακεφαλαίωση



**Σύσταση προϊόντος (mol %):  $\text{C}_2\text{H}_6$ : 30.3,  $\text{C}_2\text{H}_4$ : 28.6,  $\text{H}_2$ : 26.7,  $\text{CH}_4$ : 3.7, Inert: 10.7**

**Εκλεκτικότητα  $\text{C}_2\text{H}_4$  ως προς  $\text{CH}_4 = 7.7 \frac{\text{mol C}_2\text{H}_4}{\text{mol CH}_4}$**





# ΠΕΡΙ ΙΣΟΖΥΓΙΩΝ

Ισοζύγιο μάζας χημικής ένωσης σε **ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ** (μη μόνιμη) κατάσταση

$$\begin{array}{ccccccccc} \text{ΕΙΣΡΟΗ} & + & \text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ} & - & \text{ΕΚΡΟΗ} & - & \text{ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ} & = & \text{ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ} \\ \text{Ρυθμός} & & \text{Ρυθμός} & & \text{Ρυθμός} & & \text{Ρυθμός} & & \text{Ρυθμός} \\ \text{εισόδου} & & \text{παραγωγής} & & \text{εξόδου} & & \text{κατανάλωσης} & & \text{συσσώρευσης} \\ \text{συστατικού} & & \text{συστατικού} & & \text{συστατικού} & & \text{συστατικού} & & \text{συστατικού} \\ \text{στο} & & \text{εντός του} & & \text{από το} & & \text{εντός του} & & \text{εντός του} \\ \text{σύστημα} & & \text{συστήματος} & & \text{σύστημα} & & \text{συστήματος} & & \text{συστήματος} \end{array}$$

Ισοζύγιο μάζας χημικής ένωσης σε **ΜΟΝΙΜΗ** κατάσταση

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

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

# ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΗΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ & ΧΗΜΙΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ

	<b>ΙΣΧΥΕΙ ΕΙΣΡΟΗ = ΕΚΡΟΗ ;;;;</b>	
	Χωρίς χημική αντίδραση	Με χημική αντίδραση
	<b>ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ</b>	
<b>Μάζα</b>	<b>ΝΑΙ</b>	<b>ΝΑΙ</b>
<b>Μοί</b>	<b>ΝΑΙ</b>	<b>ΌΧΙ !!!!</b>
	<b>ΜΕΡΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ</b>	
<b>Μάζα χημικού στοιχείου</b>	<b>ΝΑΙ</b>	<b>ΝΑΙ</b>
<b>μοί χημικού στοιχείου</b>	<b>ΝΑΙ</b>	<b>ΝΑΙ</b>
<b>Μάζα χημικής ένωσης</b>	<b>ΝΑΙ</b>	<b>ΌΧΙ !!!!</b>
<b>μοί χημικής ένωσης</b>	<b>ΝΑΙ</b>	<b>ΌΧΙ !!!!</b>



# ΠΕΡΙ ΒΑΘΜΩΝ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ

## ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ ΑΝΑ ΕΙΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

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

### ΜΟΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Αρ. αγνώστων  
μεταβλητών

Αρ. ανεξάρτητων χημικών  
αντιδράσεων

Αρ. ισοζυγίων μάζας  
μοριακών ειδών

Αρ. περιορισμών

### ΑΤΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Αρ. αγνώστων  
μεταβλητών

Αρ. ισοζυγίων μάζας  
ατομικών ειδών

Αρ. ισοζυγίων μάζας  
μη αντιδρώντων

Αρ. περιορισμών

### ΕΚΤΑΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ

Αρ. αγνώστων  
μεταβλητών

Αρ. ανεξάρτητων χημικών  
αντιδράσεων (αρ. ξ)

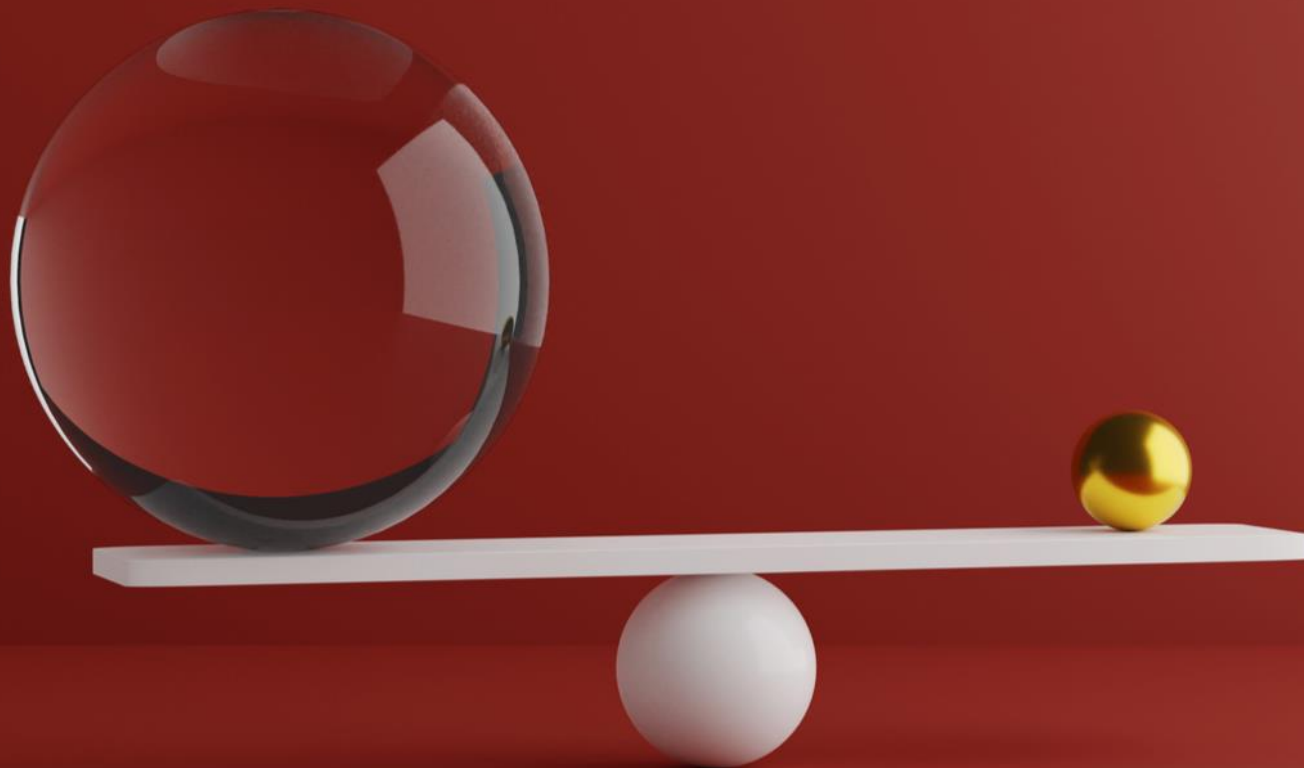
Αρ. εξισώσεων με  
αντιδρώντα

Αρ. ισοζυγίων μάζας  
μη αντιδρώντων

Αρ. περιορισμών

+

-



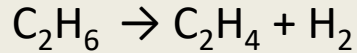
# ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ

# ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΙΣΟΖΥΓΙΩΝ – 1 ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9



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

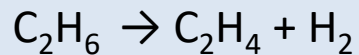


Η **ροή**  $\text{H}_2$  στην έξοδο είναι 40 kmol/min.

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



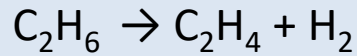


**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9**
 $100 \text{ kmol/min C}_2\text{H}_6$ 
**ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ**  
**(Αντιδραστήρας)**
 $40 \text{ kmol/min H}_2$ 
 $\dot{n}_1 \text{ kmol/min C}_2\text{H}_6$ 
 $\dot{n}_2 \text{ kmol/min C}_2\text{H}_4$ 
**Βήμα 1 ΜΟΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ:**

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
<b>Βαθμοί ελευθερίας</b>			<b>+2 +1 -3-0 = 0</b>

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9**
 $100 \text{ kmol/min C}_2\text{H}_6$ 
**ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ  
(Αντιδραστήρας)**
 $40 \text{ kmol/min H}_2$ 
 $\dot{n}_1 \text{ kmol/min C}_2\text{H}_6$ 
 $\dot{n}_2 \text{ kmol/min C}_2\text{H}_4$ 
**Βήμα 1 ΜΟΡΙΑΚΗ ΒΑΣΗ:**

Επίλυση μέσω μοριακών ισοζυγίων

ΕΙΣΡΟΗ

+

ΠΑΡΑΓΩΓΗ

-

ΕΚΡΟΗ

-

ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ

= 0

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

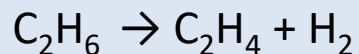
$$\text{C}_2\text{H}_6 \quad \cancel{\text{Εισ}} + \cancel{\text{Παρ}} - \text{Κατ} - \text{Εξ} = 0 \quad \Leftrightarrow \text{Εισ} = \text{Κατ} + \text{Εξ} \quad \Leftrightarrow$$

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

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

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

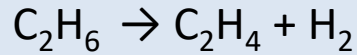
$$\Leftrightarrow \dot{n}_2 = 40 \frac{\text{kmol}}{\text{min}} \text{C}_2\text{H}_4$$

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9**
 $100 \text{ kmol/min C}_2\text{H}_6$ 
**ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ**  
**(Αντιδραστήρας)**
 $40 \text{ kmol/min H}_2$ 
 $\dot{n}_1 \text{ kmol/min C}_2\text{H}_6$ 
 $\dot{n}_2 \text{ kmol/min C}_2\text{H}_4$ 
**Βήμα 2 ΑΤΟΜΙΚΗ (ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΗ) ΑΝΑΛΥΣΗ:**

Υπολογισμός βαθμών ελευθερίας

**ΑΤΟΜΙΚΗ (ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΗ) ΒΑΣΗ**

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

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9**
 $100 \text{ kmol/min C}_2\text{H}_6$ 
**ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ**  
**(Αντιδραστήρας)**
 $40 \text{ kmol/min H}_2$ 
 $\dot{n}_1 \text{ kmol/min C}_2\text{H}_6$ 
 $\dot{n}_2 \text{ kmol/min C}_2\text{H}_4$ 
**Βήμα 2 ΑΤΟΜΙΚΗ (ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΗ) ΑΝΑΛΥΣΗ:**

Επίλυση μέσω ατομικών (στοιχειακών) ισοζυγίων

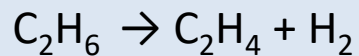
**ΕΙΣΡΟΗ****=****ΕΚΡΟΗ**

$$\text{C} \quad \overbrace{100 \frac{\text{kmol C}_2\text{H}_6}{\text{min}} \cdot \frac{2 \text{ kmol C.}}{1 \text{ kmol C}_2\text{H}_6}}^{\text{Εισροή C}_2\text{H}_6} = \overbrace{\dot{n}_1 \cdot \frac{2}{1}}^{\text{Εκροή C}_2\text{H}_6} + \underbrace{\dot{n}_2 \cdot \frac{2}{1}}_{\text{Εκροή C}_2\text{H}_4} \Rightarrow 100 = \dot{n}_1 + \dot{n}_2 \quad (1)$$

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

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

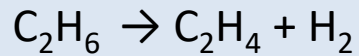
$$\dot{n}_2 = 40 \frac{\text{kmol}}{\text{min}} \text{C}_2\text{H}_4$$

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9**
 $100 \text{ kmol/min C}_2\text{H}_6$ 
**ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ**  
**(Αντιδραστήρας)**
 $40 \text{ kmol/min H}_2$ 
 $\dot{n}_1 \text{ kmol/min C}_2\text{H}_6$ 
 $\dot{n}_2 \text{ kmol/min C}_2\text{H}_4$ 
**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 (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> )
-	Αριθμός μη αντιδρώντων (αδρανών) συστατικών	-	0
-	Άλλες εξισώσεις και περιορισμοί	-	0
<b>Βαθμοί ελευθερίας</b>			<b>+2 +1 -3 -0 -0 = 0</b>

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9**
 $100 \text{ kmol/min C}_2\text{H}_6$ 
**ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ  
(Αντιδραστήρας)**
 $40 \text{ kmol/min H}_2$ 
 $\dot{n}_1 \text{ kmol/min C}_2\text{H}_6$ 
 $\dot{n}_2 \text{ kmol/min C}_2\text{H}_4$ 
**Βήμα 3 ΑΝΑΛΥΣΗ με βάση την ΕΚΤΑΣΗ της ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ:**

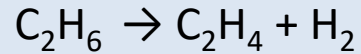
Υπολογισμός βαθμών ελευθερίας

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

$\text{H}_2$ :  $40 = 0 + 1 \cdot \xi \quad \Rightarrow \xi = 40 \text{ kmol/min}$

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

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

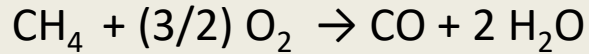
**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9****Βήμα 4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΙΣΟΖΥΓΙΩΝ:**

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΙΣΟΖΥΓΙΩΝ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ / ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ
Ατομική βάση	Συνήθως η 1 <sup>η</sup> μας επιλογή
Έκταση αντίδρασης ( $\xi$ )	Πολύ καλό εργαλείο επίλυσης
Μοριακή βάση	Πιο σύνθετοι υπολογισμοί. Μόνο για απλά συστήματα μιας αντίδρασης

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10



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



- Σύσταση τροφοδοσίας: 7.80% mol  $\text{CH}_4$ , 19.4%  $\text{O}_2$  και 72.8%  $\text{N}_2$ .
- Βαθμός μετατροπής μεθανίου: 90.0%.
- Στο προϊόν ισχύει:  $(\text{mol CO}_2)/(\text{mol CO}) = 8.0$

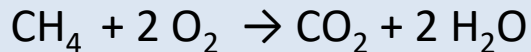
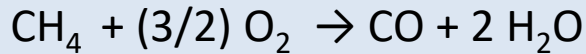
Έχοντας ως **βάση υπολογισμού 100 mol τροφοδοσία:**

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

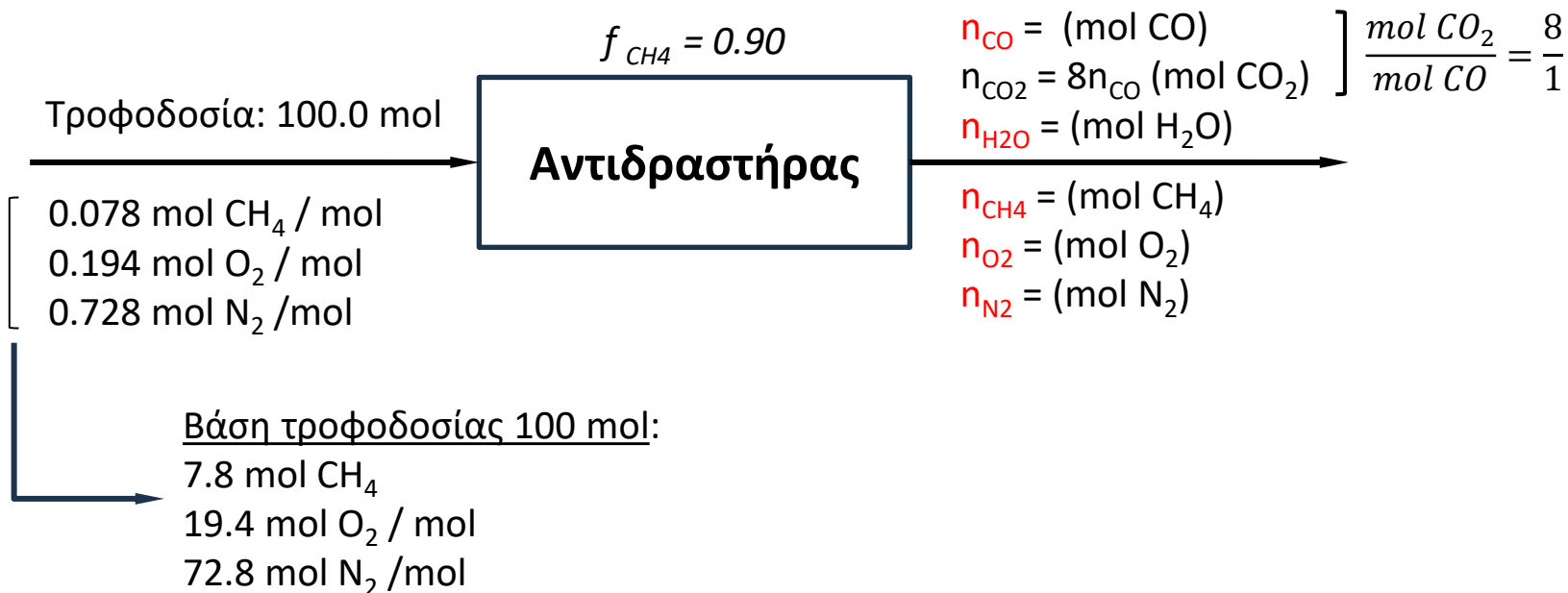
Ποια είναι η **μολαρική σύσταση του προϊόντος/εξόδου/καυσαερίων.**



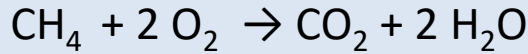
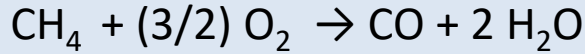


**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10****Βήμα 1:**

Διάγραμμα ροής

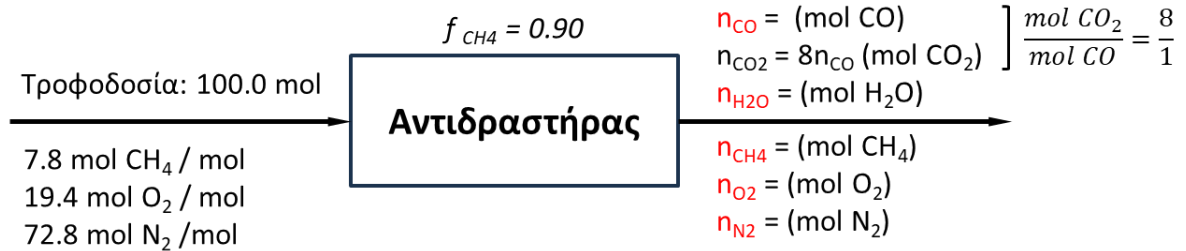


**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10**



**Βήμα 2:**

Βαθμοί ελευθερίας



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

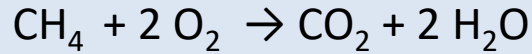
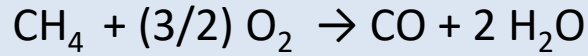
**6** άγνωστοι + **2** αντιδράσεις – **6** ισοζύγια μάζας – **2** περιορισμοί = 0

Ατομική ανάλυση:  $(\text{C}, \text{H}, \text{O})$   $(\text{N})$

**6** άγνωστοι – **3** ισοζύγια μάζας – **1** μη αντιδρών – **2** περιορισμοί =

Έκταση:  $(\xi_1, \xi_2)$   $(\text{CH}_4, \text{O}_2, \text{CO}, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O})$   $(\text{N})$

**6** άγνωστοι + **2** αντιδράσεις – **5** ισοζύγια μάζας – **1** μη αντιδρών  
– **2** περιορισμοί = 0

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10****Βήμα 3:**

Αξιοποίηση περιορισμών και άλλων πληροφοριών

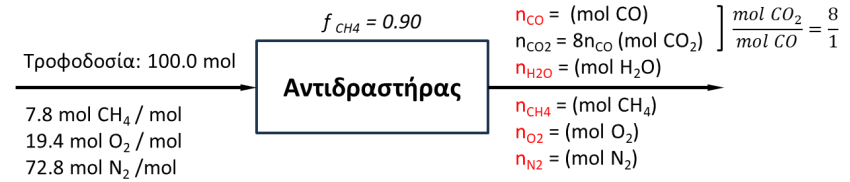
1. Βαθμός μετατροπής μεθανίου  $f_{\text{CH}_4} = 0.90 \Leftrightarrow$

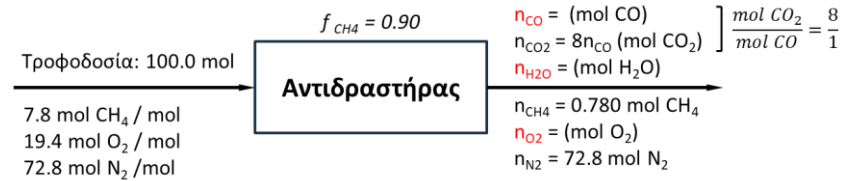
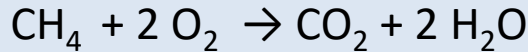
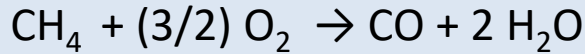
$$\frac{n_{\text{CH}_4, \text{τροφοδ.}} - n_{\text{CH}_4}}{n_{\text{CH}_4, \text{τροφοδ.}}} = \frac{7.80 - n_{\text{CH}_4}}{7.80} = 0.90 \Leftrightarrow n_{\text{CH}_4} = \mathbf{0.78 \text{ mol}}$$

2. Αναλογία  $\text{CO}_2 / \text{CO}$

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

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



**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 CH<sub>4</sub> που καταναλώθηκαν μέσω κάθε αντίδρασης

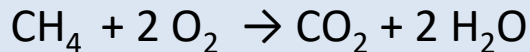
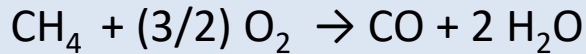
$$\text{O}_2: 19.4 + 0 = n_{\text{O}_2} + n_{\text{O}_2, \text{R1}} + n_{\text{O}_2, \text{R2}} \quad (2)$$

όπου  $n_{\text{O}_2, \text{R1}}$  και  $n_{\text{O}_2, \text{R2}}$  είναι τα mol του O<sub>2</sub> που αντέδρασαν μέσω κάθε αντίδρασης

Για να μη «γεμίζουμε» όμως αγνώστους, **μπορούμε να εκφράσουμε τα mol του O<sub>2</sub> που αντέδρασαν βάσει των αντίστοιχων mol CH<sub>4</sub>, ήτοι:**

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

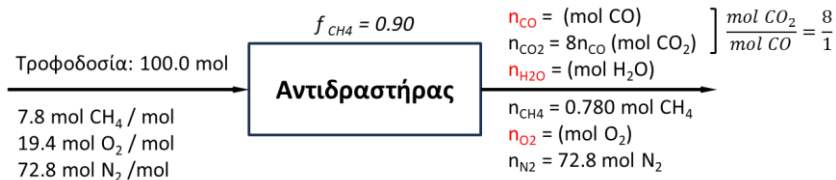
$$19.4 = n_{\text{O}_2} + 1.5 \cdot n_{\text{CH}_4, \text{R1}} + 2 \cdot n_{\text{CH}_4, \text{R2}} \quad (2^*)$$

**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



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

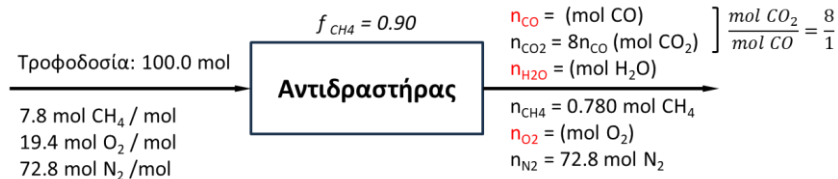
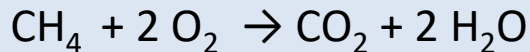
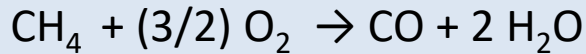
όπου  $n_{\text{CO}, P1}$  είναι τα mol CO που παρήχθησαν μέσω κάθε αντίδρασης

Όπως και προηγουμένως, όμως, **μπορούμε να εκφράσουμε τα mol του CO που παρήχθησαν βάσει των αντίστοιχων mol  $\text{CH}_4$** , ήτοι:

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

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

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

**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

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

όπου  $n_{\text{H}_2\text{O}, P1}$  και  $n_{\text{H}_2\text{O}, P2}$  είναι τα mol H<sub>2</sub>O που παρήχθησαν μέσω κάθε αντίδρασης

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

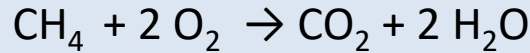
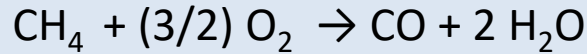
$$n_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \cdot n_{\text{CH}_4, R1} + 2 \cdot n_{\text{CH}_4, R2} \quad (5^*)$$

**ΣΧΟΛΙΟ:**

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

**Απάντηση:**

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

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10****Βήμα 4:**

Επίλυση μέσω μοριακών ισοζυγίων

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

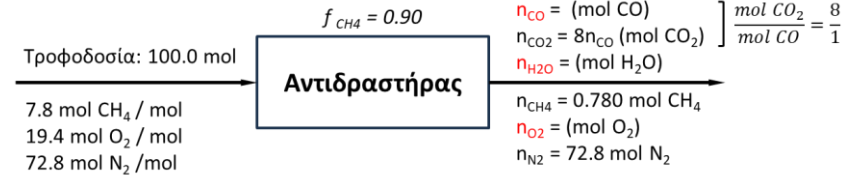
$$19.4 = n_{\text{O}_2} + 1.5 \cdot n_{\text{CH}_4, \text{R1}} + 2 \cdot n_{\text{CH}_4, \text{R2}} \quad (2^*)$$

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

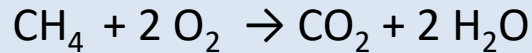
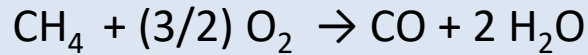
$$8 n_{\text{CO}} = n_{\text{CH}_4, \text{R2}} \quad (4^*)$$

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

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

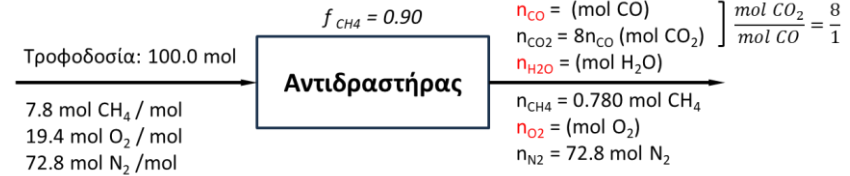


## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10



### Βήμα 5:

Επίλυση μέσω ατομικών ισοζυγίων



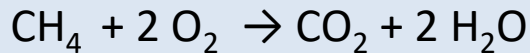
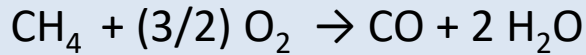
ΕΙΣΡΟΗ = ΕΚΡΟΗ

$$\begin{aligned} \text{C: } & \overbrace{7.80 \text{ mol CH}_4 \cdot \frac{1 \text{ mol C}}{1 \text{ mol CH}_4}}^{\text{C στο CH}_4 \text{ ΕΙΣ}} = \overbrace{0.78 \text{ mol CH}_4 \cdot \frac{1 \text{ mol C}}{1 \text{ mol CH}_4}}^{\text{C στο CH}_4 \text{ ΕΞΟΔ}} + \overbrace{n_{\text{CO}} \cdot \frac{1 \text{ mol C}}{1 \text{ mol CO}}}^{\text{C στο CO ΕΞΟΔ}} + \overbrace{n_{\text{CO}_2} \cdot \frac{1 \text{ mol C}}{1 \text{ mol CO}}}^{\text{C στο CO}_2 \text{ ΕΞΟΔ}} \Rightarrow \\ & 7.02 = n_{\text{CO}} + n_{\text{CO}_2} \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{O: } & \overbrace{19.4 \text{ mol} \cdot \frac{2 \text{ mol O}}{1 \text{ mol O}_2}}^{\text{O}_2 \text{ ΕΙΣ}} = \overbrace{n_{\text{O}_2} \cdot \frac{2 \text{ mol O}}{1 \text{ mol O}_2}}^{\text{O}_2 \text{ ΕΞ}} + \overbrace{n_{\text{CO}} \cdot \frac{1 \text{ mol O}}{1 \text{ mol CO}}}^{\text{O στο CO ΕΞΟΔ}} + \overbrace{n_{\text{CO}_2} \cdot \frac{2 \text{ mol O}}{1 \text{ mol CO}_2}}^{\text{O στο CO}_2 \text{ ΕΞΟΔ}} \\ & + \overbrace{n_{\text{CO}} \cdot \frac{2 \text{ mol H}_2\text{O}}{1 \text{ mol CO}} \cdot \frac{1 \text{ mol O}}{1 \text{ mol H}_2\text{O}}}^{\substack{n_{\text{H}_2\text{O}, P1} \\ \text{O στο H}_2\text{O}, P1}} + \overbrace{n_{\text{CO}_2} \cdot \frac{2 \text{ mol H}_2\text{O}}{1 \text{ mol CO}_2} \cdot \frac{1 \text{ mol O}}{1 \text{ mol H}_2\text{O}}}^{\substack{n_{\text{H}_2\text{O}, P2} \\ \text{O στο H}_2\text{O}, P2}} \Rightarrow \end{aligned}$$

$$38.8 = 2 \cdot n_{\text{O}_2} + 3 \cdot n_{\text{CO}} + 4 \cdot n_{\text{CO}_2} \quad (7)$$



**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10****Βήμα 5:**

Επίλυση μέσω ατομικών ισοζυγίων

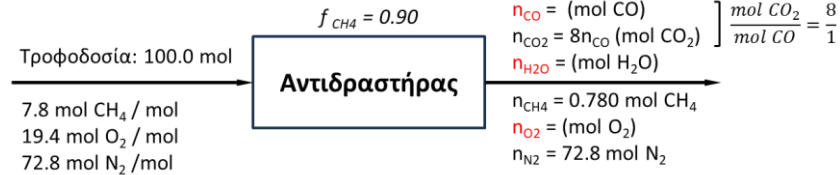
$$\text{ΕΙΣΡΟΗ} = \text{ΕΚΡΟΗ}$$

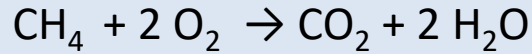
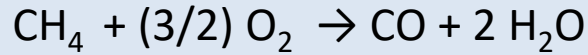
$$\text{H: } \overbrace{7.80 \text{ mol CH}_4 \cdot \frac{4 \text{ mol H}}{1 \text{ mol CH}_4}}^{\text{H στο CH}_4 \text{ ΕΙΣ}} = \overbrace{0.78 \text{ mol CH}_4 \cdot \frac{4 \text{ mol H}}{1 \text{ mol CH}_4}}^{\text{H στο CH}_4 \text{ ΕΞΟΔ}} + \overbrace{n_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \frac{2 \text{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

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

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)  $\Rightarrow n_{\text{O}_2} = 5.75 \text{ mol}$



**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10****Βήμα 6:**

με βάση την ΕΚΤΑΣΗ της ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ:

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

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

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

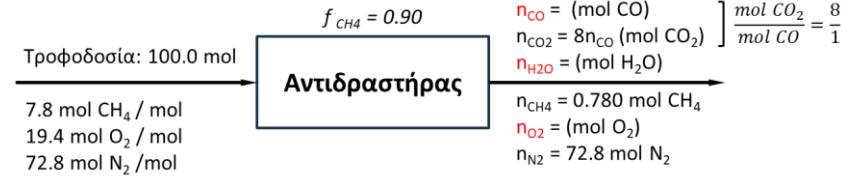
$$\text{CO}: \quad n_{\text{CO}} = 0 + 1 \cdot \xi_1 \quad \Leftrightarrow n_{\text{CO}} = \xi_1 \quad (10)$$

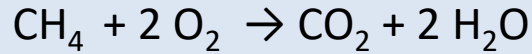
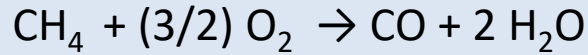
$$\text{CO}_2: \quad n_{\text{CO}_2} = 0 + 1 \cdot \xi_2 \quad \Leftrightarrow n_{\text{CO}_2} = \xi_2 \quad (11)$$

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

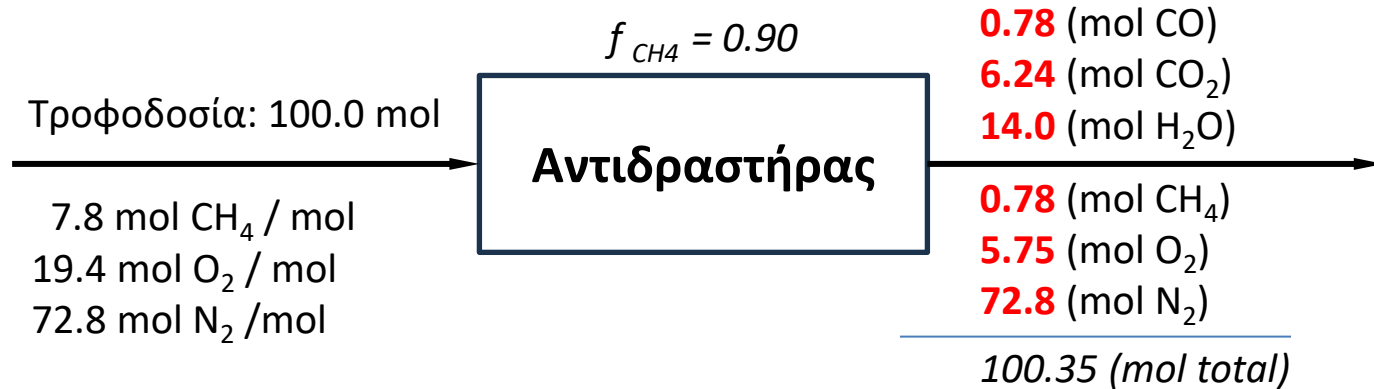
$$\text{Περιορισμός: } n_{\text{CO}_2} = 8 n_{\text{CO}} \quad (13)$$

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



**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 10****Βήμα 7:**

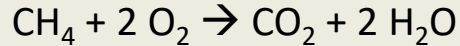
Σύνοψη και σύσταση προϊόντος

**Σύσταση προϊόντος (mol %):****CH<sub>4</sub>: 0.78****CO: 0.78****CO<sub>2</sub>: 6.2****H<sub>2</sub>O: 14****O<sub>2</sub>: 5.7****N<sub>2</sub>: 72.5**

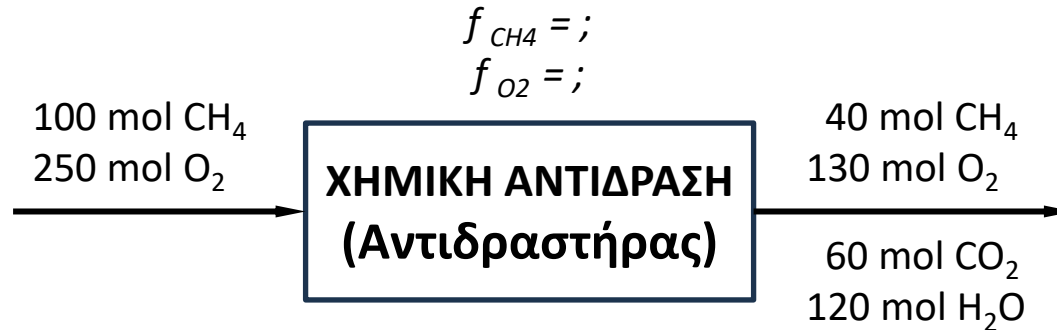
## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 11

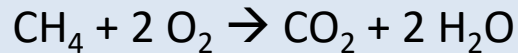


Δίνεται η ακόλουθη αντίδραση και διάγραμμα ροής:



1. Βαθμός μετατροπής μεθανίου = ;
2. Βαθμός μετατροπής οξυγόνου = ;
3. Καταστρώστε τις σχετικές εξισώσεις με βάση την έκταση της αντίδρασης  $\xi$  για τα  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  και  $\text{H}_2\text{O}$ . Υπολογίστε το  $\xi$ .
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,  $\text{O}_2$  είναι σωστά.
7. Περιεκτικότητα καυσαερίων σε  $\text{CH}_4$  σε υγρή και σε ξηρή βάση:



**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 11**

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

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

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

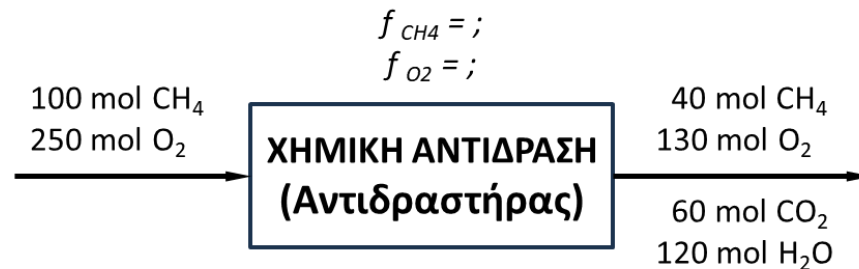
$$\text{CH}_4: \quad 40 = 100 - 1 \cdot \xi \quad \Leftrightarrow \xi = 60 \text{ mol}$$

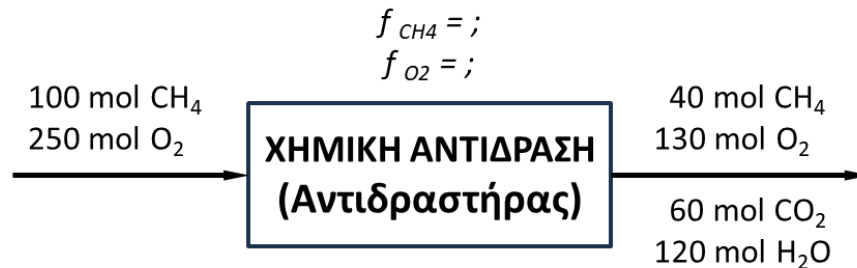
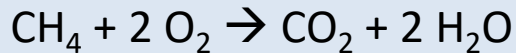
$$\text{O}_2: \quad 130 = 250 - 2 \cdot \xi$$

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

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

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



**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 11**

6. Έλεγχος ισοζυγίων (C, H, O, O<sub>2</sub>):

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

C:  $100 + 0 = 40 + 60$   OK

H:  $4 \cdot 100 + 0 = 4 \cdot 40 + 2 \cdot 120$   OK

O:  $2 \cdot 250 + 0 = 2 \cdot 130 + 2 \cdot 60 + 1 \cdot 120$   OK

O<sub>2</sub>:  $250 - 2 \cdot \xi = 130$   OK

7. Περιεκτικότητα καυσαερίων σε CH<sub>4</sub> σε υγρή και ξηρή βάση:

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

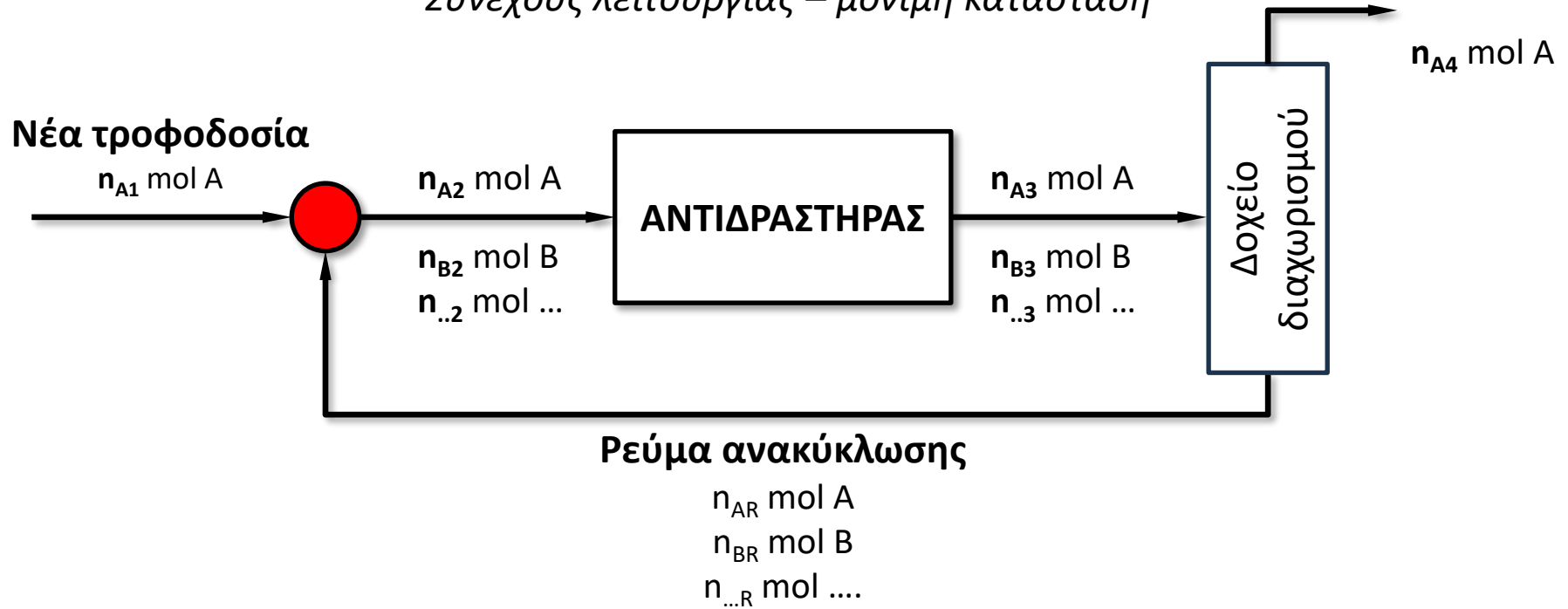
$$\text{Ξηρή βάση} = \frac{\text{mol CH}_4}{\text{mol total ΧΩΡΙΣ H}_2\text{O}} = \frac{40}{40+130+60} = 17.4\%$$



**ΠΕΡΙ ΙΣΟΖΥΓΙΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ  
ΜΕ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ**

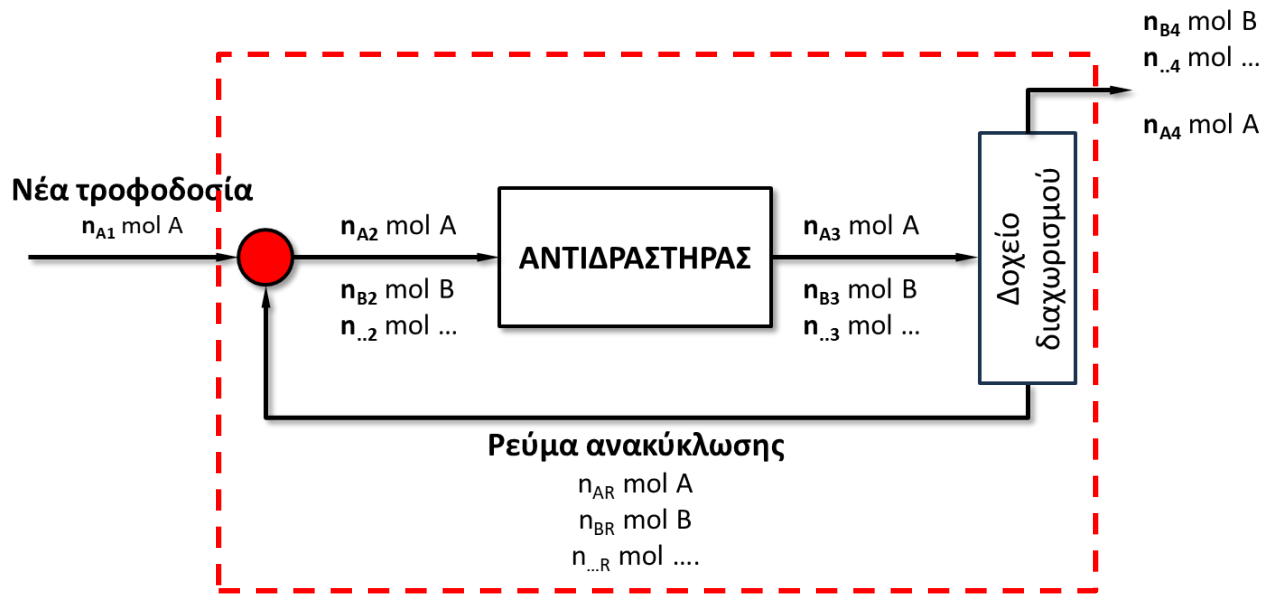
# ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

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



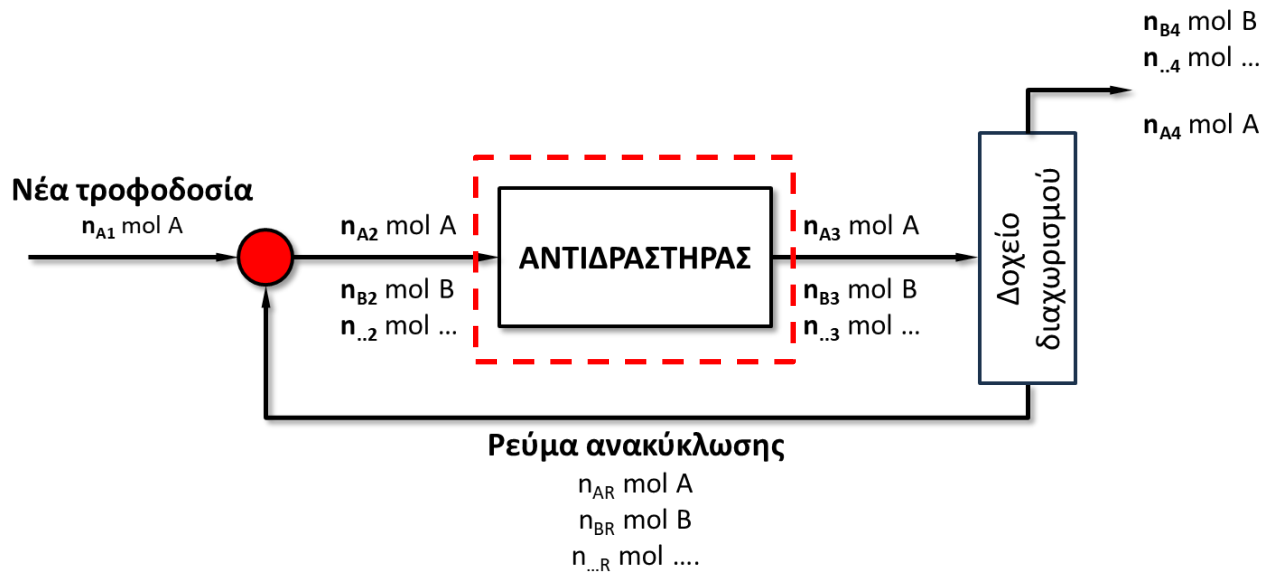
$$\text{Λόγος Ανακύκλωσης } \Sigma R = \frac{\text{Ρεύμα Ανακύκλωσης}}{\text{Νέα Τροφοδοσία}} = \frac{n_{AR}}{n_{A1}}$$





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

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



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

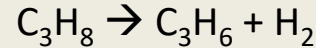
$$f_{SP} = \frac{\text{mol περιοριστικού αντιδρώντος που αντιδρούν σε κάθε περασμα}}{\text{mol περιοριστικού αντιδρώντος στη τροφοδοσια του αντιδραστηρα}}$$

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

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12



Δίνεται η ακόλουθη αντίδραση αφυδρογόνωσης του προπανίου:

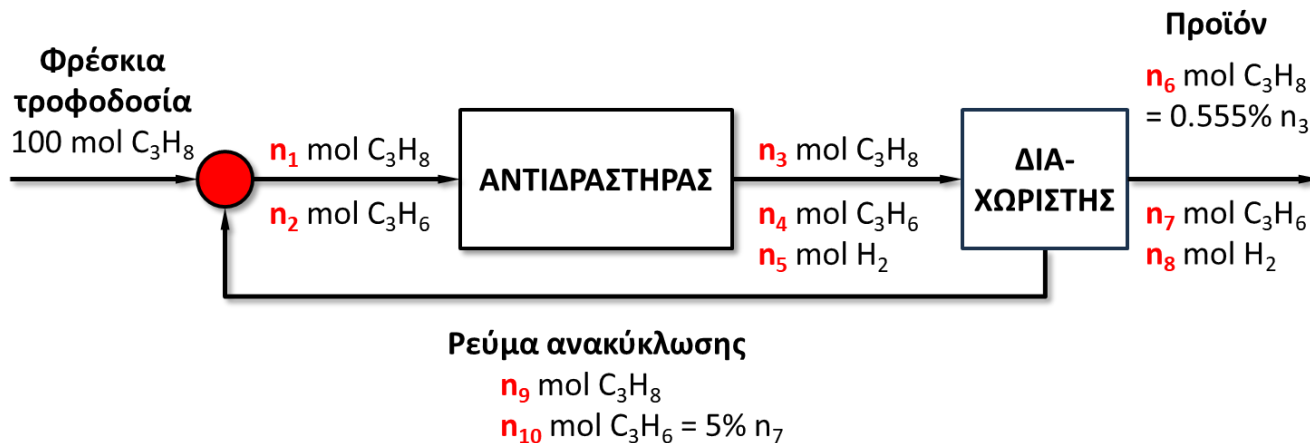
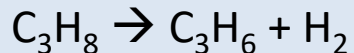


Το **συνολικό κλάσμα μετατροπής** του προπανίου είναι 95%. Τα προϊόντα της αντίδρασης διαχωρίζονται σε δύο ρεύματα. Το **1<sup>ο</sup> ρεύμα** περιέχει **H<sub>2</sub>, προπυλένιο** και το 0.555% του **προπανίου** που εξέρχεται από τον αντιδραστήρα και λαμβάνεται ως προϊόν. Το **2<sup>ο</sup> ρεύμα** που περιέχει το υπόλοιπο **προπάνιο** που δεν αντέδρασε και 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 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> φρέσκιας τροφοδοσίας

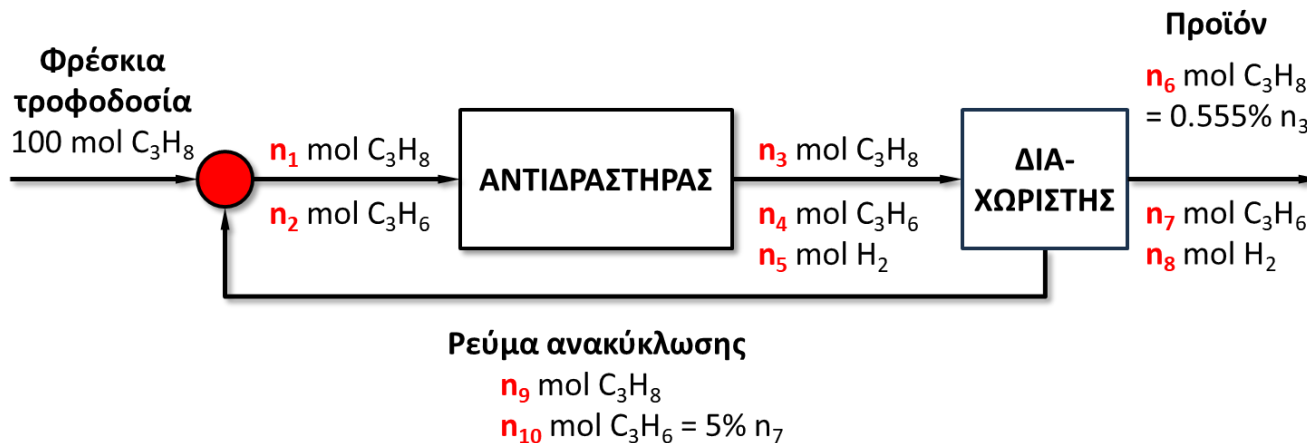
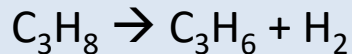
## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12



### 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 $f_{\text{OA}} = 0.95$
<b>Βαθμοί ελευθερίας</b>			<b>3 - 2 - 1 = 0</b>

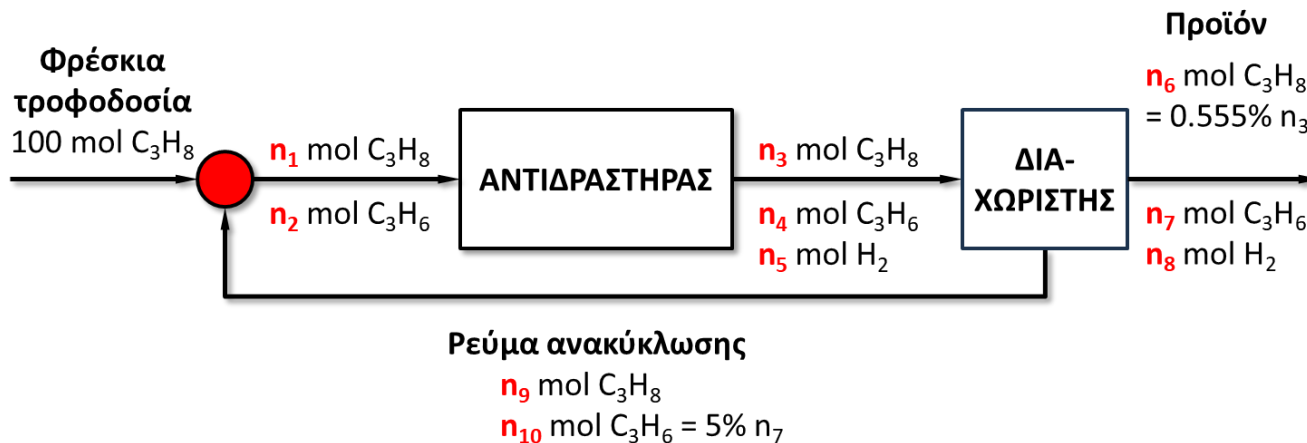
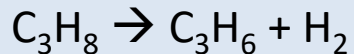
## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12



### 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
<b>Βαθμοί ελευθερίας</b>			<b>4 - 2 = 2</b>

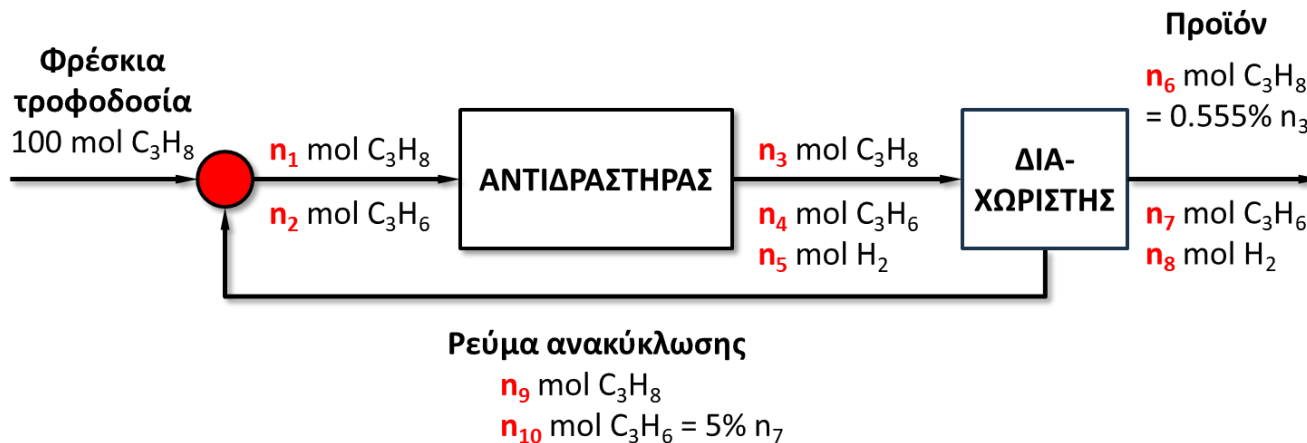
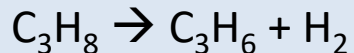
## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12



### 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
<b>Βαθμοί ελευθερίας</b>			$5 - 2 = 3$

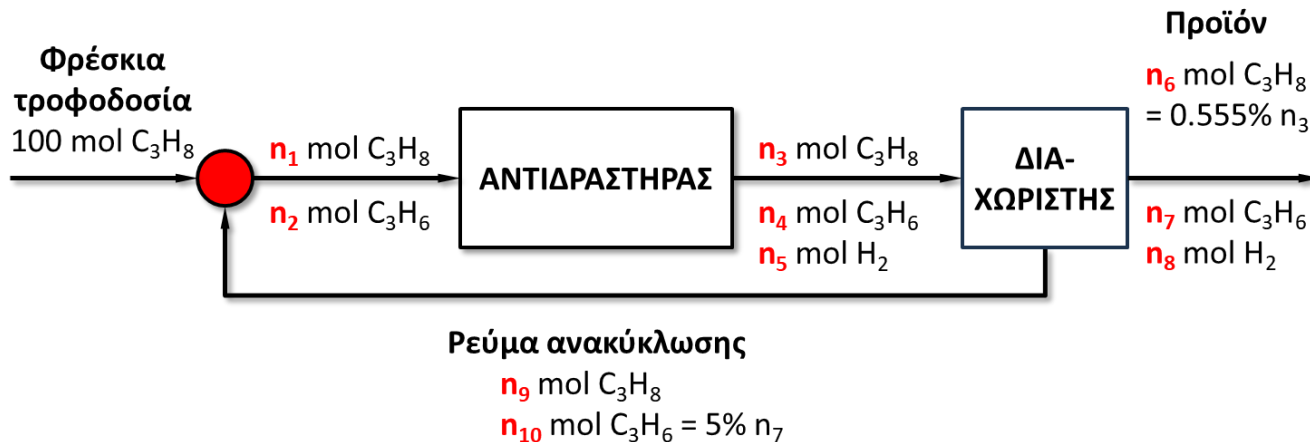
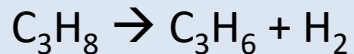
## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12



### 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	-	3 ( $f_{\text{OA}}, n_6/n_3, n_{10}/n_7$ )
<b>Βαθμοί ελευθερίας</b>			$8 - 3 - 3 = 2$

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12



### Συνολικό σύστημα:

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

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

$$\text{Περιορισμός: } f_{\text{OA}} = (100 - n_6) / 100 = 0.95 \quad (3)$$

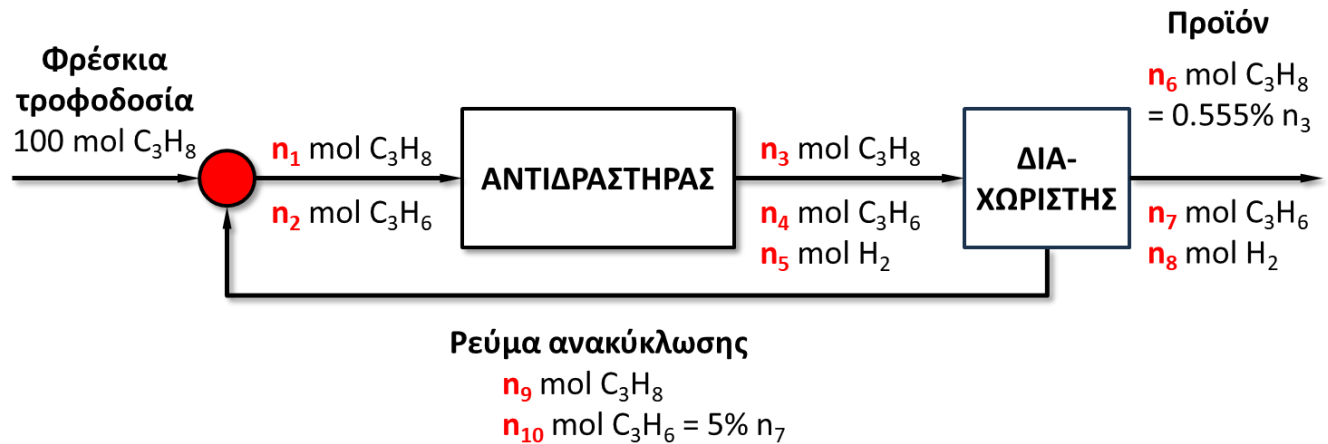
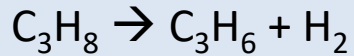
$$(3) \Leftrightarrow n_6 = 5 \text{ mol } \text{C}_3\text{H}_8$$

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

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



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12



Στη συνέχεια, πως θα αποφασίσουμε την σειρά επίλυσης  
(Ανάμειξη, Αντιδραστήρας, Διαχωριστής);

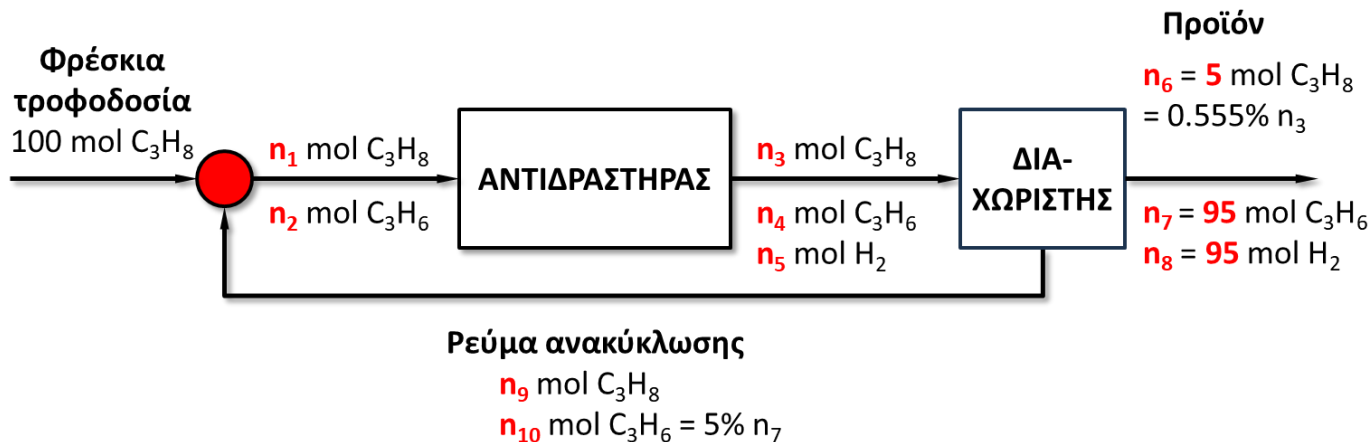
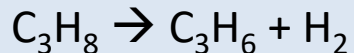
Hint 1: Ο αντιδραστήρας έχει έτσι και αλλιώς 3 Β.Ε., άρα τελευταίος

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

5 άγνωστες μεταβλητές (n<sub>3</sub>, n<sub>4</sub>, n<sub>5</sub> | n<sub>9</sub>, n<sub>10</sub>), 3 ισοζύγια μάζας (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, H<sub>2</sub>), και 2 αχρησιμοποίητους περιορισμούς (n<sub>6</sub>/n<sub>3</sub> και n<sub>10</sub> / n<sub>7</sub>) ήτοι Β.Ε. 5-3-2=0

Σε αντίθεση, οι Β.Ε. του αναμεικτήρα παραμένουν Β.Ε.=2

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12



### Διαχωριστής

Ισοζύγιο C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>:  $n_3 = n_6 + n_9 \Rightarrow$

Ισοζύγιο C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>:  $n_4 = n_7 + n_{10} \Rightarrow$

Ισοζύγιο H<sub>2</sub>:  $n_5 = n_8 = 95 \text{ mol H}_2$

Περιορισμός 1:  $n_6 = 5.55 \times 10^{-3} n_3$

Περιορισμός 2:  $n_{10} = 0.05 n_7$

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

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

$n_5 = 95 \quad (6)$

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

$n_{10} = 0.05 n_7 \quad (8)$

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

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

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

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

### Σημείο ανάμιξης

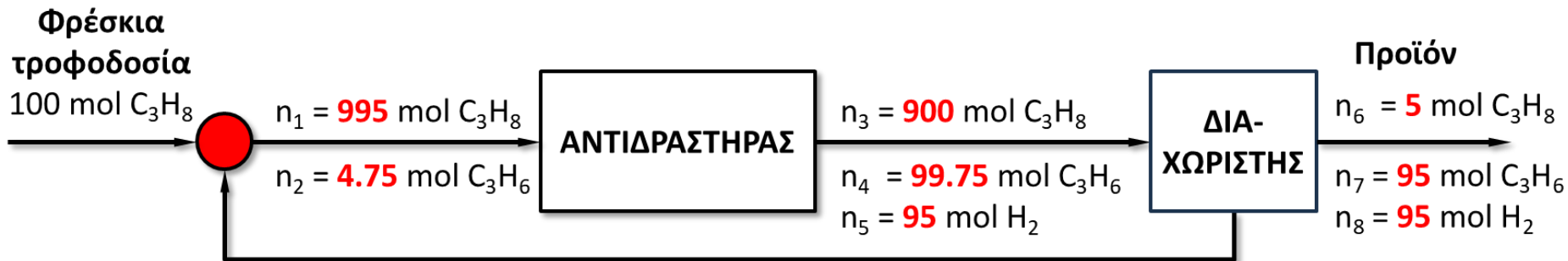
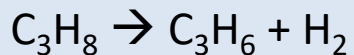
Ισοζύγιο C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>:  $100 + n_9 = n_1 \Rightarrow$

Ισοζύγιο C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>:  $0 + n_{10} = n_2 \Rightarrow$

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

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

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12**



**Ρεύμα ανακύκλωσης**

$$n_9 = 895 \text{ mol C}_3\text{H}_8$$

$$n_{10} = 4.75 \text{ mol C}_3\text{H}_6 = 5\% n_7$$

**Μολαρική  
 σύσταση  
 προϊόντος**

$$5 \text{ mol C}_3\text{H}_8$$

$$95 \text{ mol C}_3\text{H}_6$$

$$95 \text{ mol H}_2$$

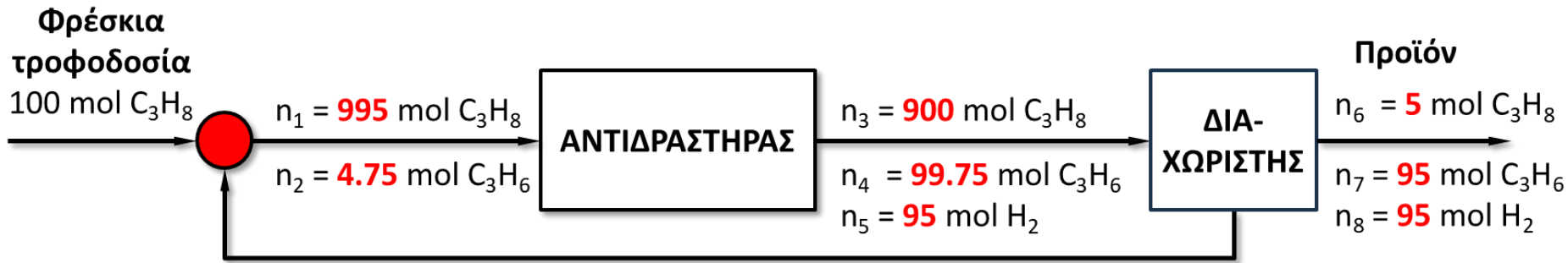
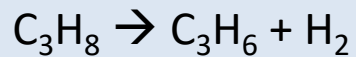
---


$$195 \text{ mol μίγμα}$$

$$5/195 = 2.6 \%$$

$$95/195 = 48.7 \%$$

$$95/195 = 48.7 \%$$

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12**

**Ρεύμα ανακύκλωσης**

$$n_9 = 895 \text{ mol C}_3\text{H}_8$$

$$n_{10} = 4.75 \text{ mol C}_3\text{H}_6 = 5\% n_7$$

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

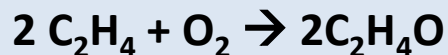
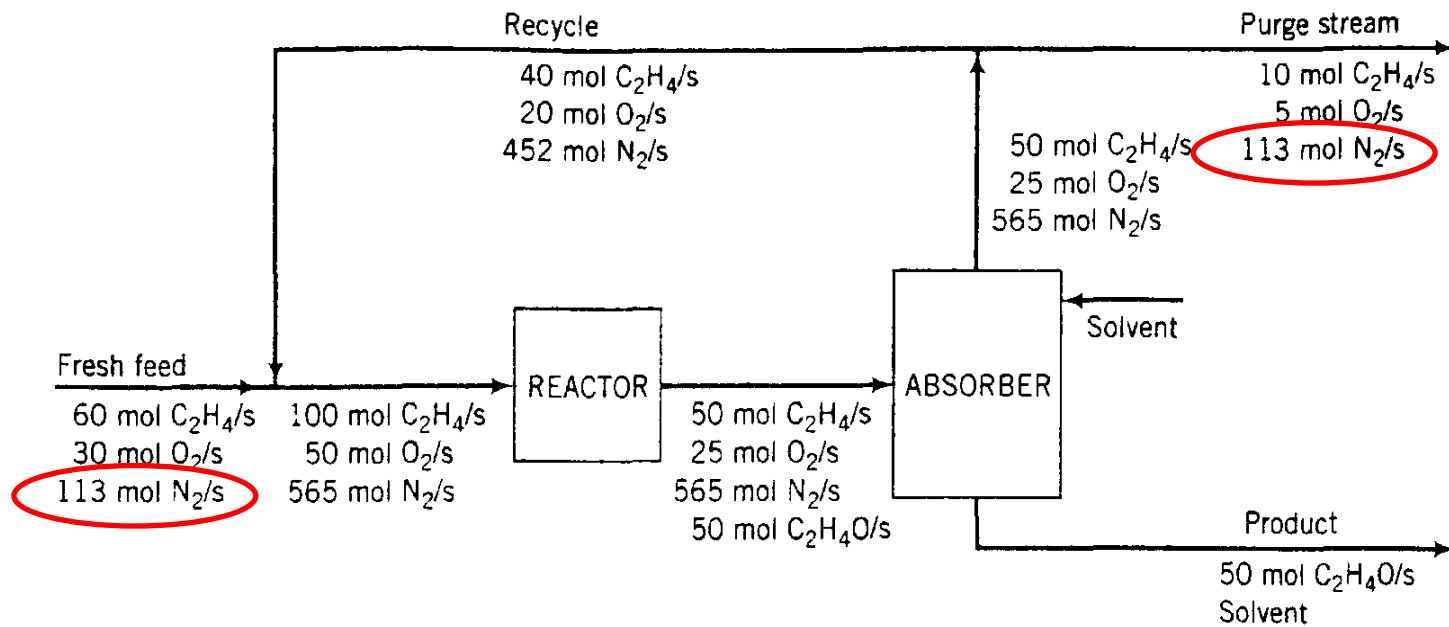
$$f_{\text{SP}} = \frac{n_1 - n_3}{n_1} = \frac{995 - 900}{995} \approx 0.095 \text{ ή } 9.5\%$$



# ΠΕΡΙ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΙΨΕΩΝ (ΚΑΘΑΡΙΣΜΩΝ)

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



**Παράδειγμα:**

Παραγωγή αιθυλενοξειδίου με ανακύκλωση και καθαρισμό (απόρριψη)

## ΑΠΟΡΡΙΨΗ (ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ: PURGING)

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



Η μεθανόλη παράγεται σύμφωνα με την αντίδραση



Η φρέσκια (νέα) τροφοδοσία περιέχει  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  και 0.400 mol% αδρανή I. Τα προϊόντα του αντιδραστήρα περνούν από συμπυκνωτή που απομακρύνει  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , αλλά όχι αντιδρώντα και αδρανή (I), τα οποία ανακυκλώνονται στον αντιδραστήρα. Για να αποφευχθεί η συσσώρευση του (I), ένα ρεύμα καθαρισμού απομακρύνεται. Δίνεται ότι η σύσταση της τροφοδοσίας του αντιδραστήρα είναι 28.0% mol  $\text{CO}_2$ , 70.0 %  $\text{H}_2$  και 2.0 % mol (I). Η μετατροπή απλής διαδρομής  $\text{H}_2$  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  $\text{CH}_3\text{OH}$** .



Hint:

- Ένα διάγραμμα ροής διώχνει το άγχος



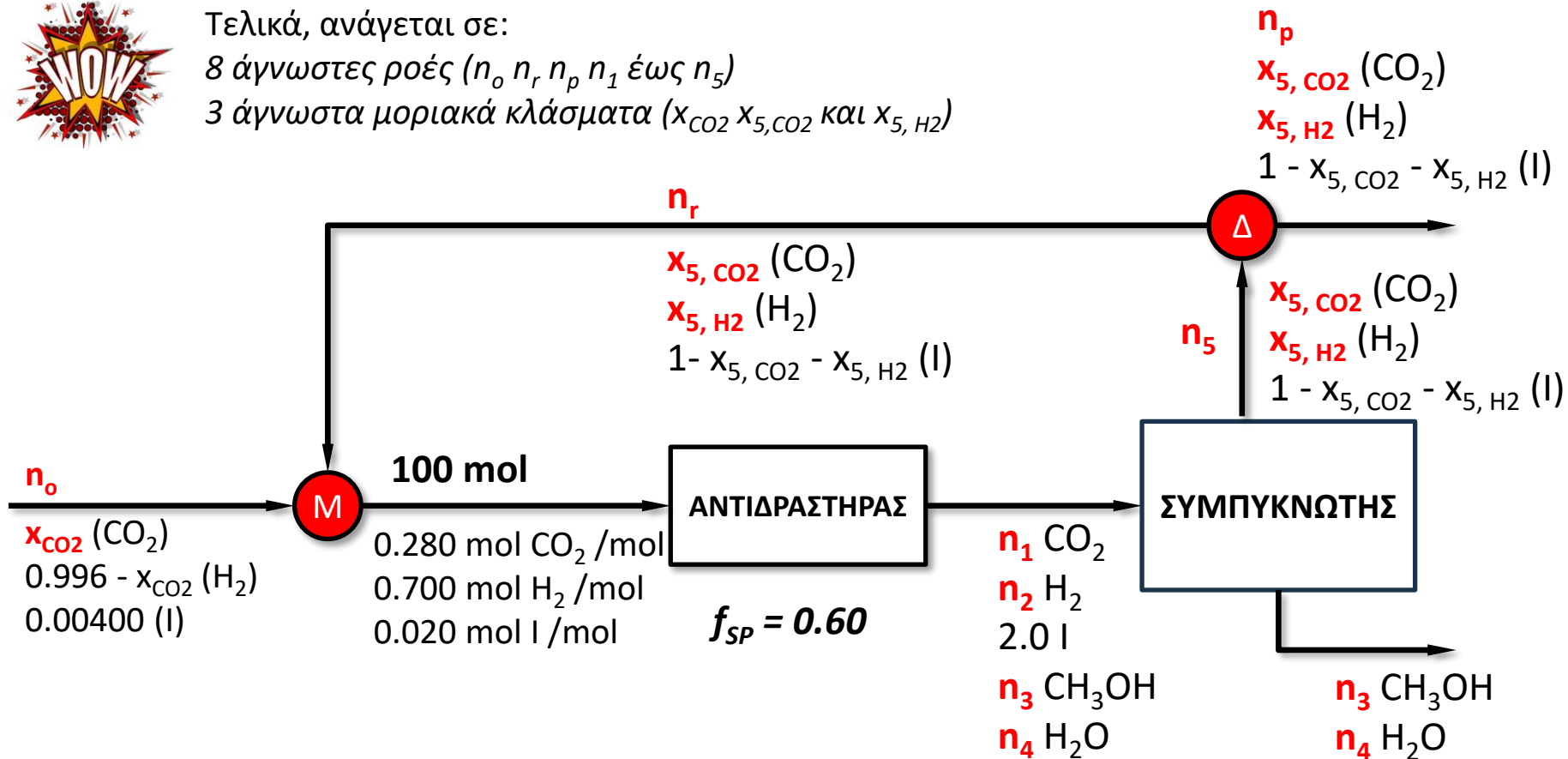
# ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



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  $x_{5,\text{H}_2}$ )

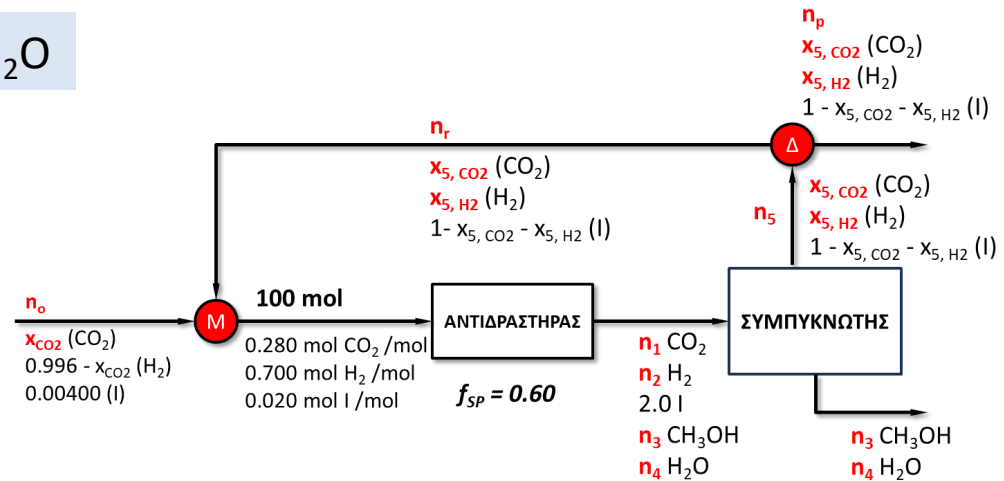


### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



#### 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). **Απλά (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;*

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13**

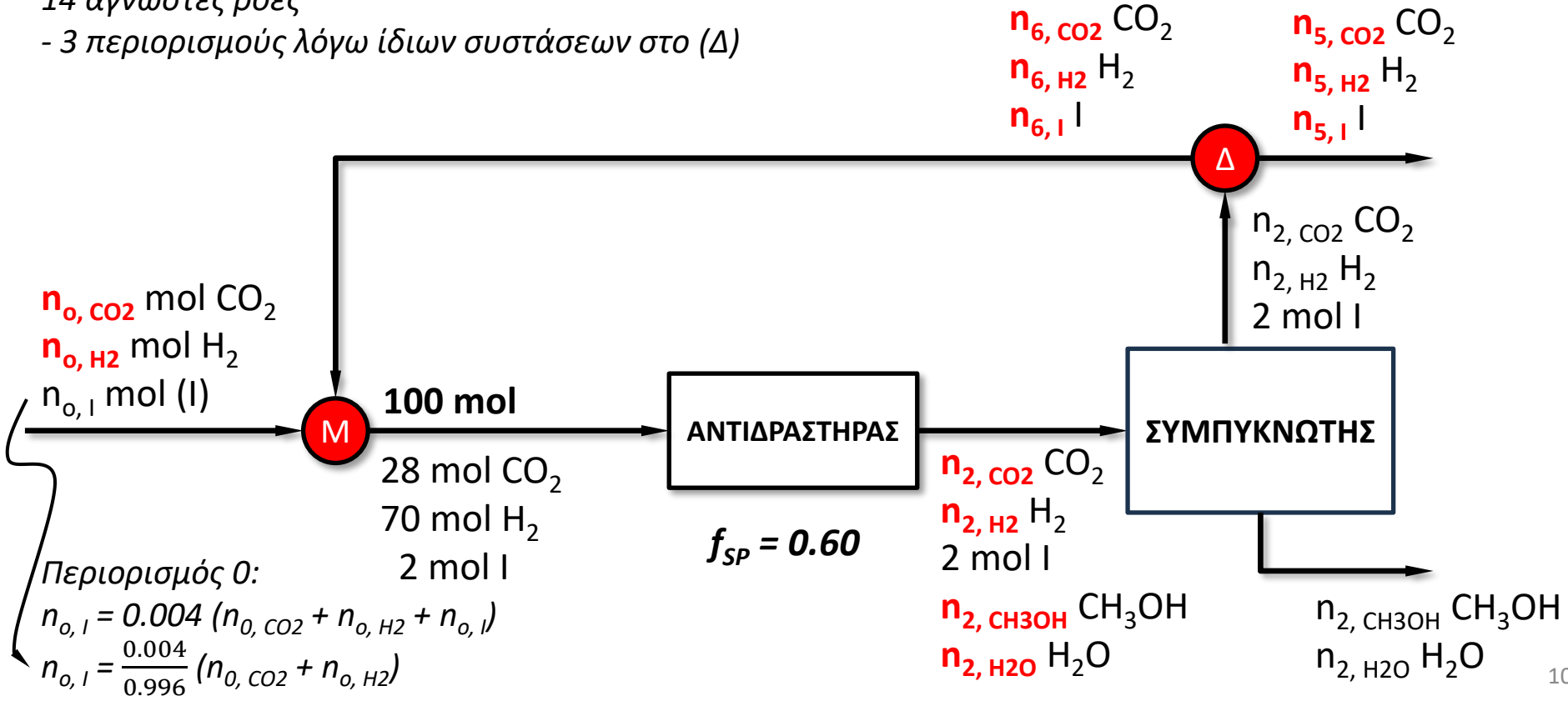


Διάγραμμα ροής μόνο με άγνωστες ποσότητες moles

Τελικά, ανάγεται σε:

14 άγνωστες ροές

- 3 περιορισμούς λόγω ίδιων συστάσεων στο (Δ)



**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13**

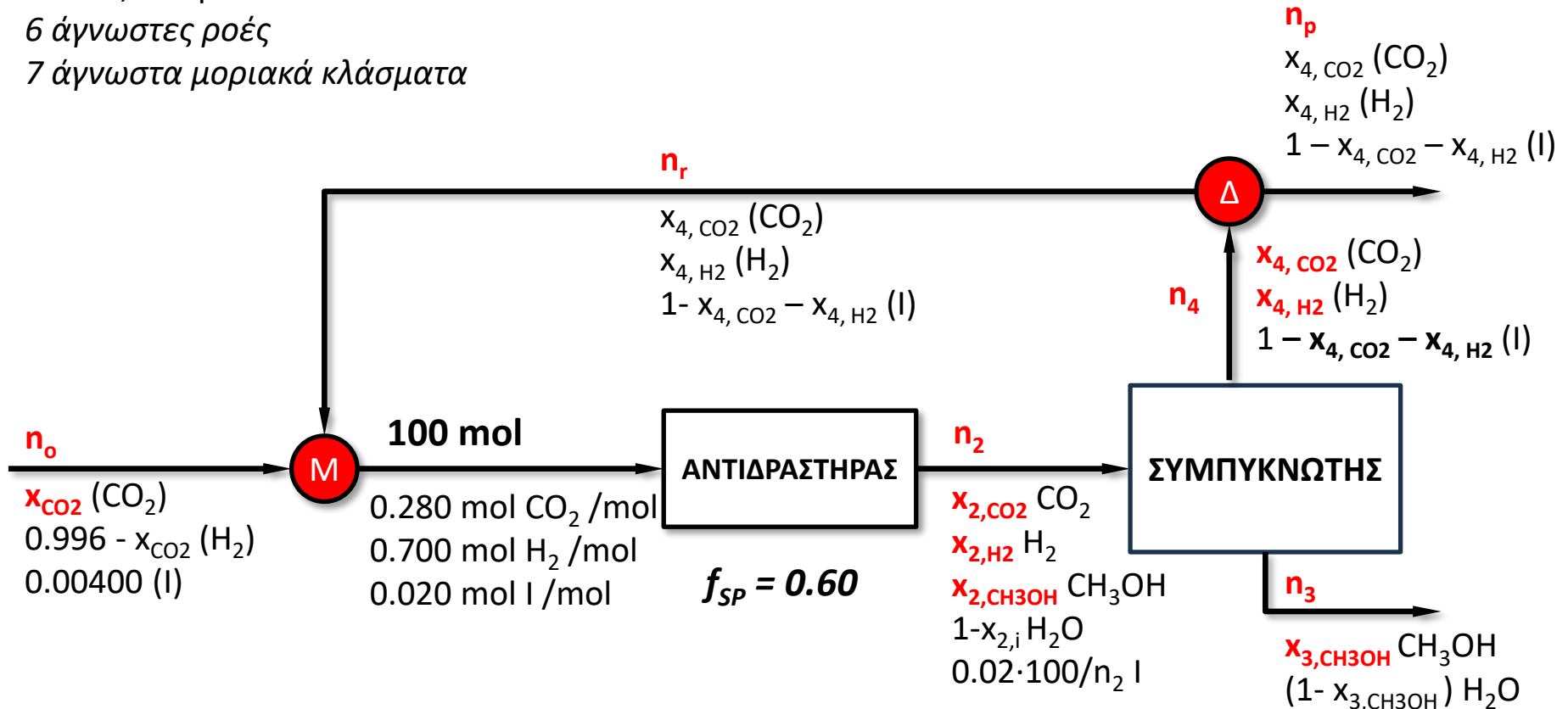


**Διάγραμμα ροής μόνο με άγνωστες ροές και συστάσεις**

Τελικά, ανάγεται σε:

6 άγνωστες ροές

7 άγνωστα μοριακά κλάσματα



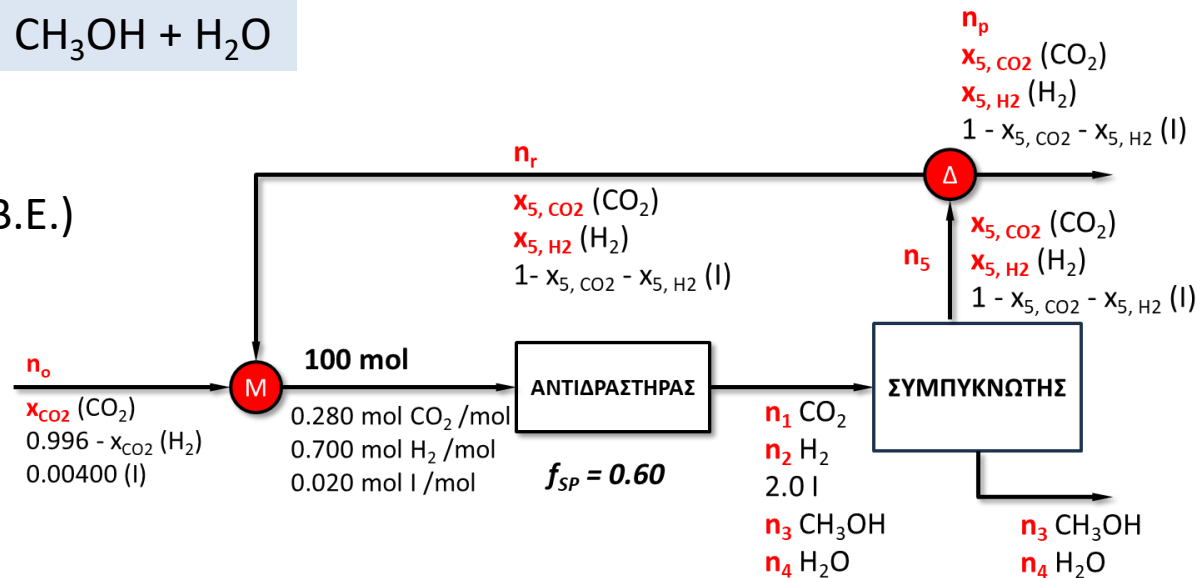
## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



### Βήμα 2:

Ανάλυση βαθμών ελευθερίας (B.E.)

ΜΟΡΙΑΚΗ ΒΑΣΗ



### 1. Συνολικό σύστημα:

B.E. = 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 ( $\text{CO}_2, \text{H}_2, \text{CH}_3\text{OH}, \text{H}_2\text{O}, \text{I}$ )  $\Rightarrow$  **B.E. = 3**

### 2. Σημείο ανάμιξης:

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

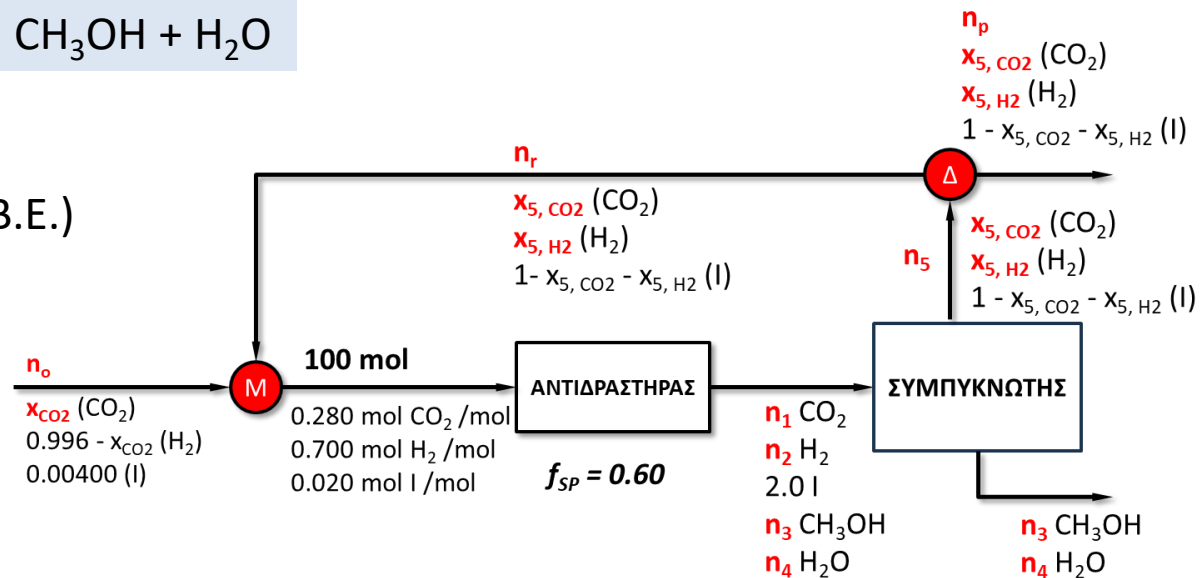
### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



#### 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 ( CO<sub>2</sub> , H<sub>2</sub> , CH<sub>3</sub>OH , H<sub>2</sub>O ) – 1 περιορισμός (  $f_{SP}$  )

⇒ 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 ( CO<sub>2</sub> , H<sub>2</sub> , I , CH<sub>3</sub>OH , H<sub>2</sub>O ) ⇒ B.E. = 2

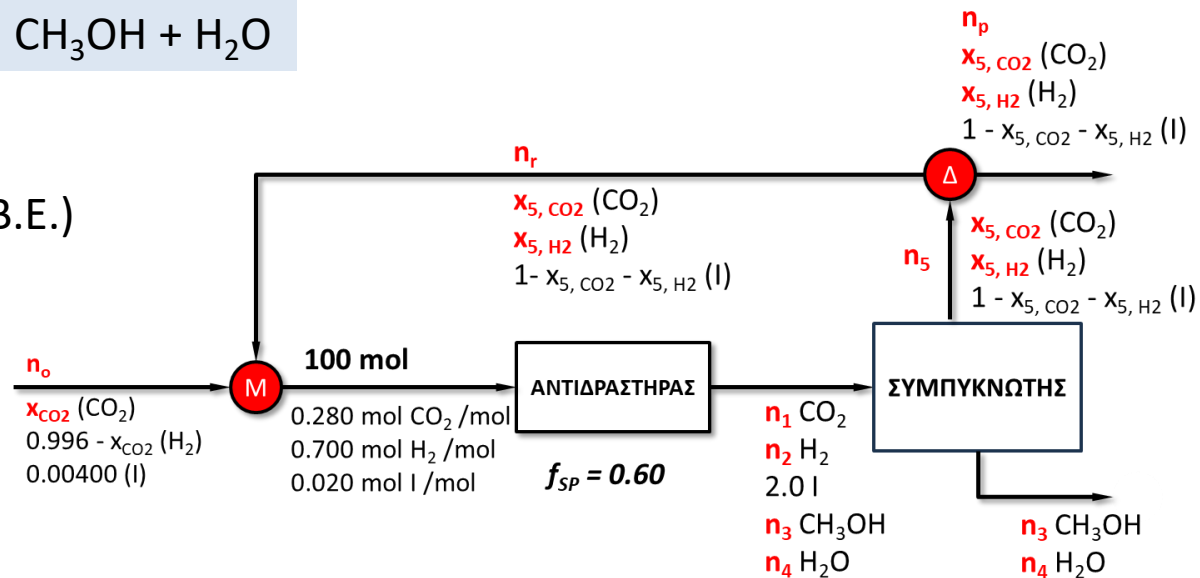
## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



### 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<sub>2</sub> ή H<sub>2</sub> ανάγονται στο ίδιο)

⇒ B.E. = 4

**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		
<b>ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ</b>	<b>3</b>	<b>2</b> (0) <input checked="" type="checkbox"/>	<b>0</b> <input checked="" type="checkbox"/>	<b>2</b> (0) <input checked="" type="checkbox"/>	<b>4</b> (0)
ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ		<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>



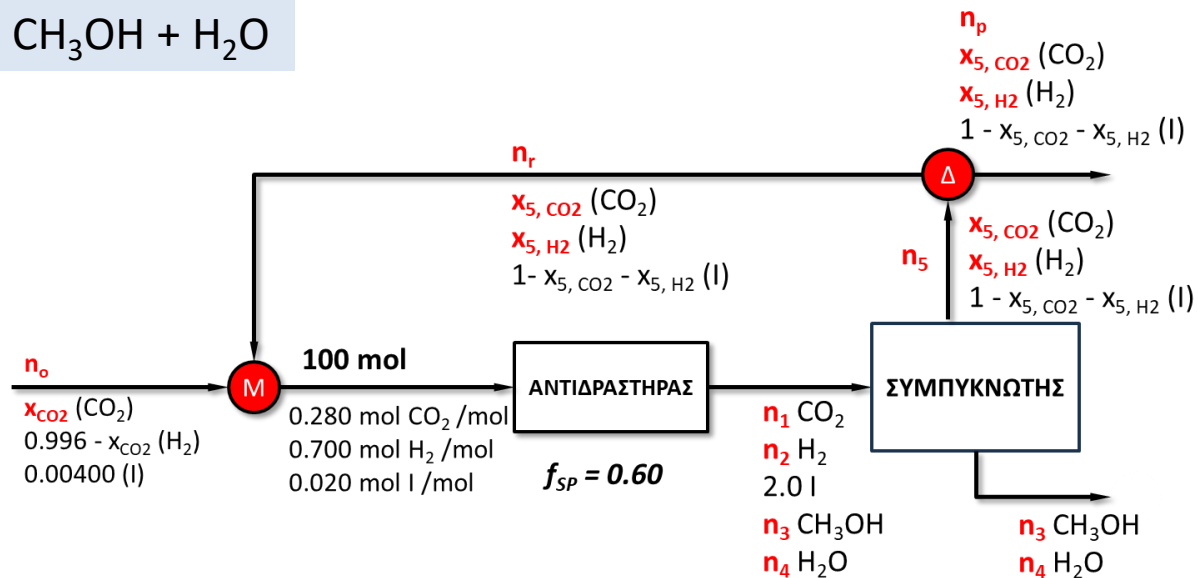
## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



### Βήμα 3:

ΕΠΙΛΥΣΗ (με ισοζύγια)

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



### ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ:

$$f_{SP, H_2} = 0.60$$

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

$$\Rightarrow n_2 = 70 - 42 = 28.0 \text{ mol } H_2$$

Μ.Ισ.Μ.  $CO_2$

$$0.280 \cdot 100 + 0 = n_1 + 42.0 \text{ mol } H_2 \cdot \left| \frac{1 \text{ mol } CO_2}{3 \text{ mol } H_2} \right.$$

$$\Rightarrow n_1 = 14.0 \text{ mol } CO_2$$

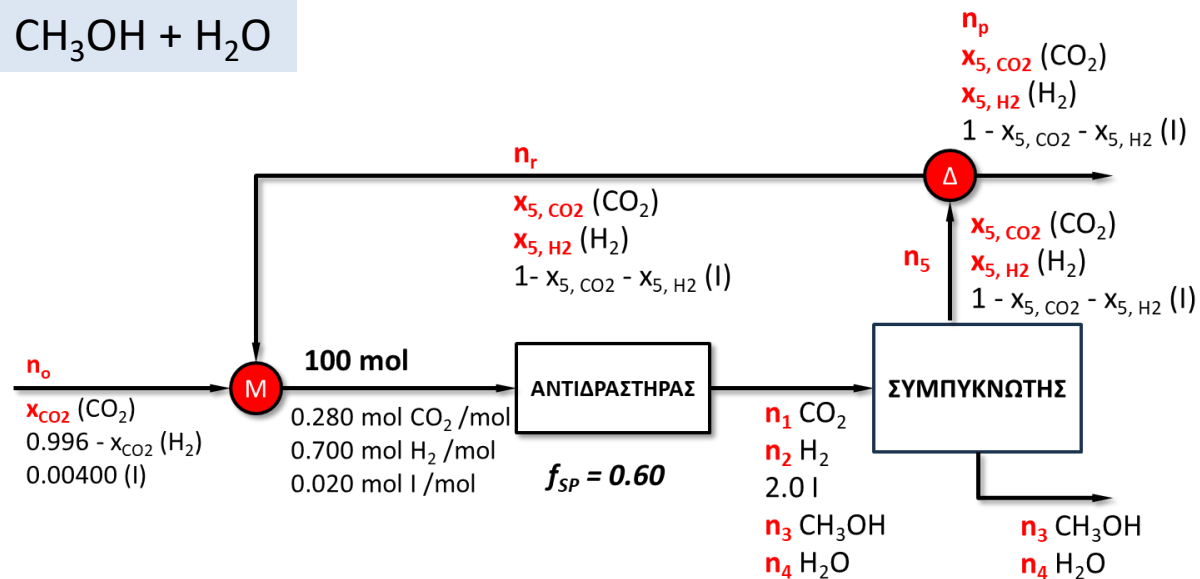
## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



### Βήμα 3:

ΕΠΙΛΥΣΗ (με ισοζύγια)

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



### ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ (συνέχεια):

$$\text{Μ.Ισ.Μ. CH}_3\text{OH} \quad 0 + 42.0 \text{ mol H}_2 \cdot \frac{1 \text{ mol CH}_3\text{OH}}{3 \text{ mol H}_2} = n_3 + 0$$

$$\Rightarrow n_3 = 14.0 \text{ mol CH}_3\text{OH}$$

$$\text{Μ.Ισ.Μ. H}_2\text{O} \quad 0 + 42.0 \text{ mol H}_2 \cdot \frac{1 \text{ mol H}_2\text{O}}{3 \text{ mol H}_2} = n_4 + 0$$

$$\Rightarrow n_4 = 14.0 \text{ mol H}_2\text{O}$$

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



#### Βήμα 3:

Εναλλακτική ΕΠΙΛΥΣΗ (με έκταση  $\xi$ )

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

#### ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ:



$$\text{H}_2 \quad n_2 = 0.700 \cdot 100 - 3 \cdot \xi$$

$$\text{CO}_2 \quad n_1 = 0.280 \cdot 100 - 1 \cdot \xi$$

$$\text{CH}_3\text{OH} \quad n_3 = 0 + 1 \cdot \xi$$

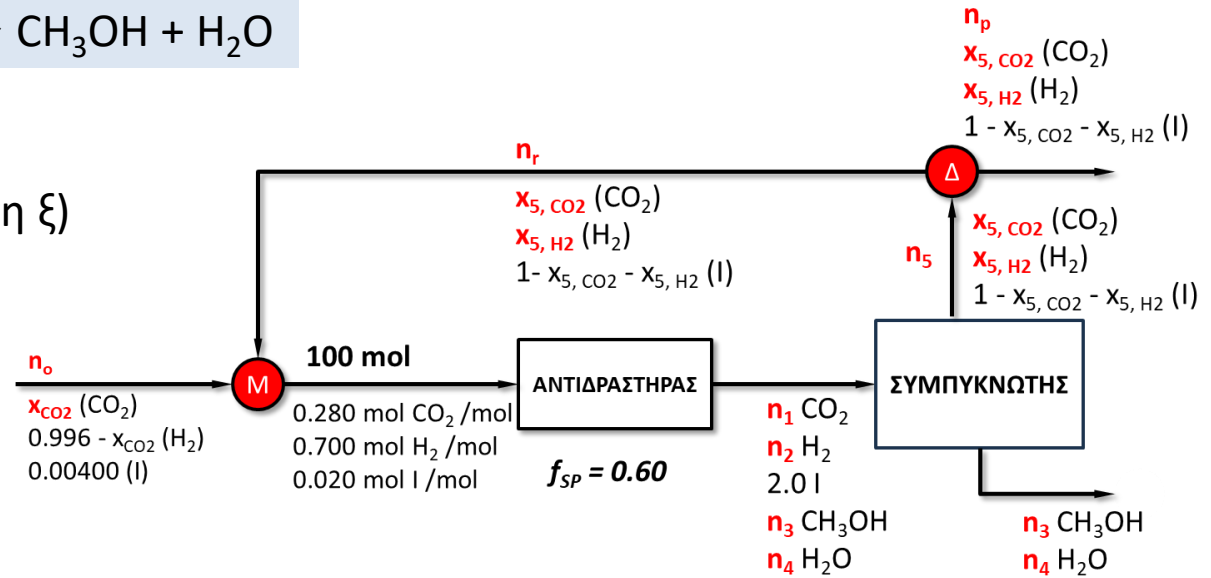
$$\text{H}_2\text{O} \quad n_4 = 0 + 1 \cdot \xi$$

$$f_{SP}=0.60 \rightarrow n_2=28.0 \text{ mol} \Rightarrow \xi = 14 \text{ mol}$$

$$\Rightarrow n_1 = 14 \text{ mol}$$

$$\Rightarrow n_3 = 14 \text{ mol}$$

$$\Rightarrow n_4 = 14 \text{ mol}$$



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

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



### Βήμα 3:

ΕΠΙΛΥΣΗ (με ισοζύγια)

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

### ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ:

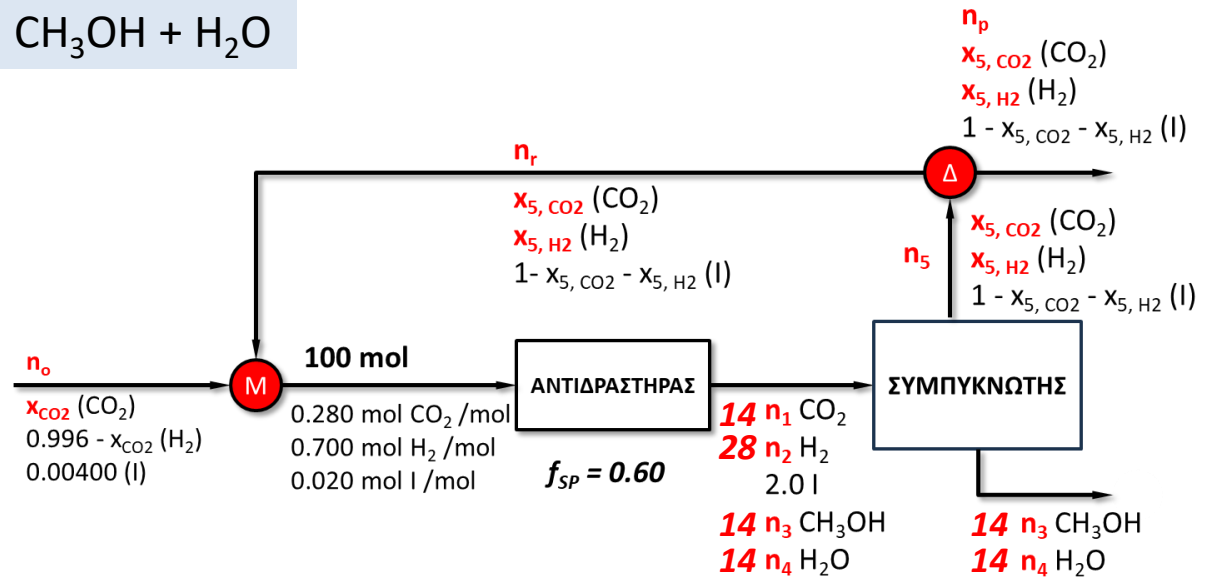
Συνολικό ισοζύγιο:

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

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

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

$$\text{I (αδρανής)} \quad x_1 + x_{5, \text{CO}_2} + x_{5, \text{H}_2} = 1 \Rightarrow x_1 = 0.0454 \text{ mol I} / \text{mol}$$



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



### Βήμα 3:

ΕΠΙΛΥΣΗ (με ισοζύγια)

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

### ΣΗΜΕΙΟ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ:

Συνολικό ισοζύγιο:

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

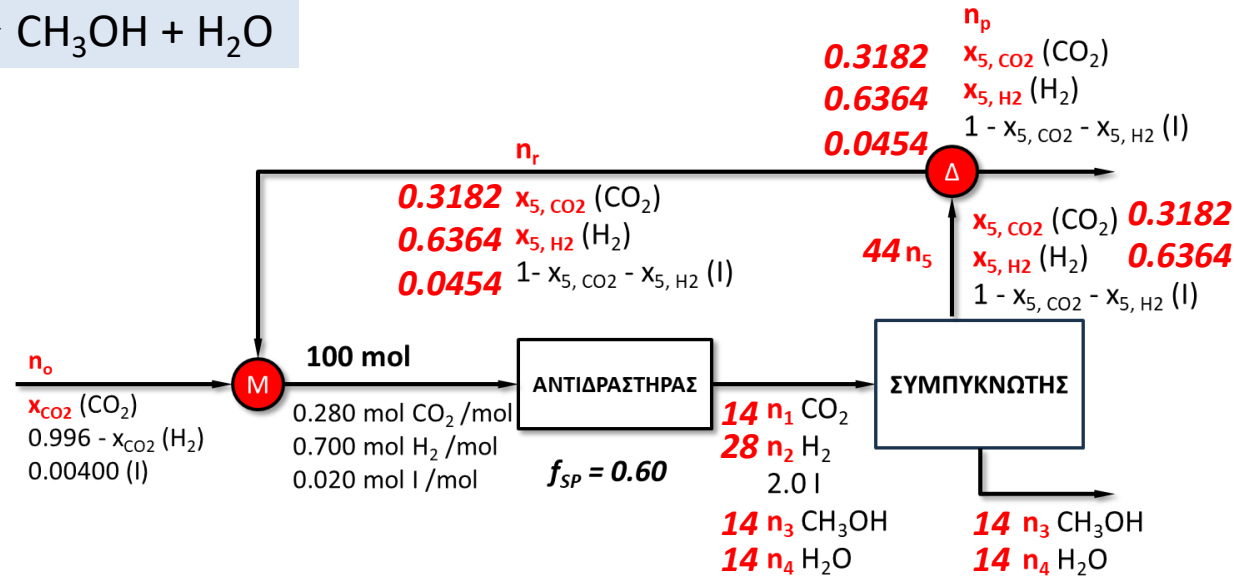
Ισοζύγιο I (αδρανής):

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

### Μ.Ισ.Μ. CO<sub>2</sub>

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

$$\Leftrightarrow x_{\text{CO}_2} = 0.256 \text{ mol CO}_2 / \text{mol}$$



$$n_o = 61.4 \text{ mol (νέα τροφοδοσία)}$$

$$n_r = 38.6 \text{ mol (ανακύκλωση)}$$

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13****ΕΥΛΟΓΗ ΑΠΟΡΙΑ**

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

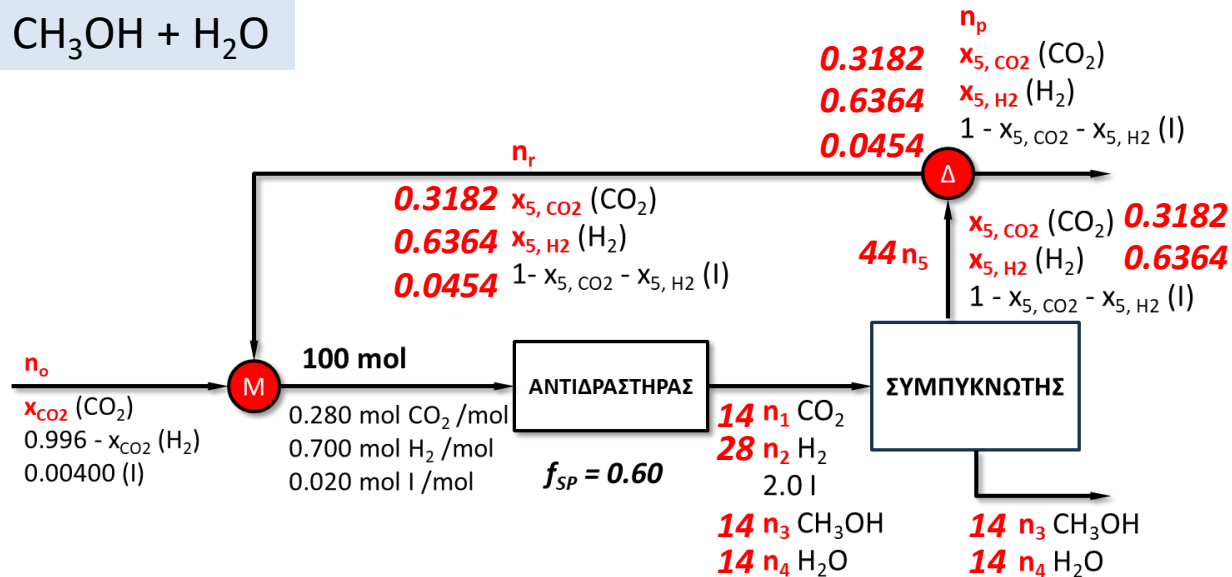
**ΣΗΜΕΙΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ:**

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



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



### Βήμα 3:

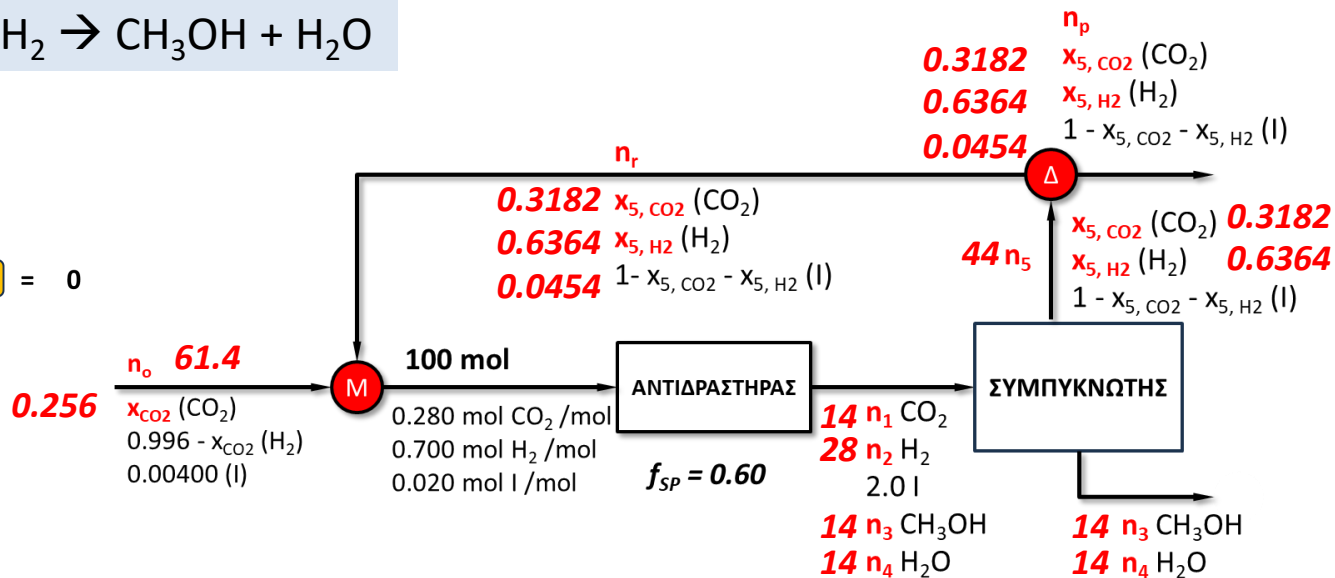
ΕΠΙΛΥΣΗ (με ισοζύγια)

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

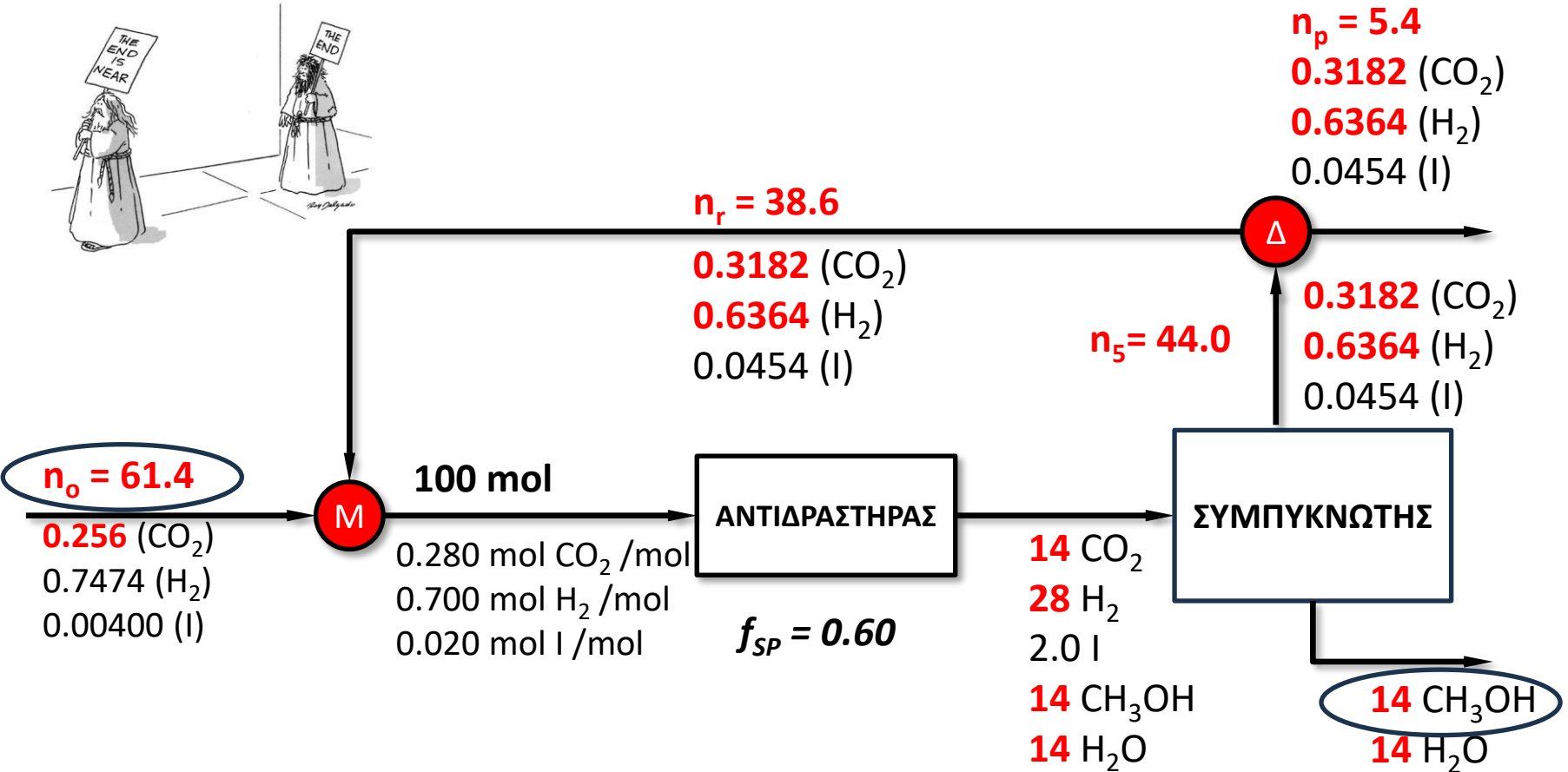
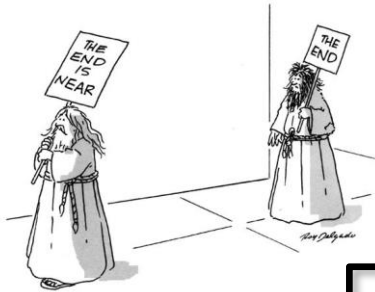
### ΣΗΜΕΙΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ:

Συνολικό ισοζύγιο:

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



**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13**



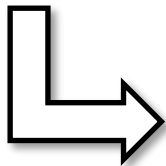
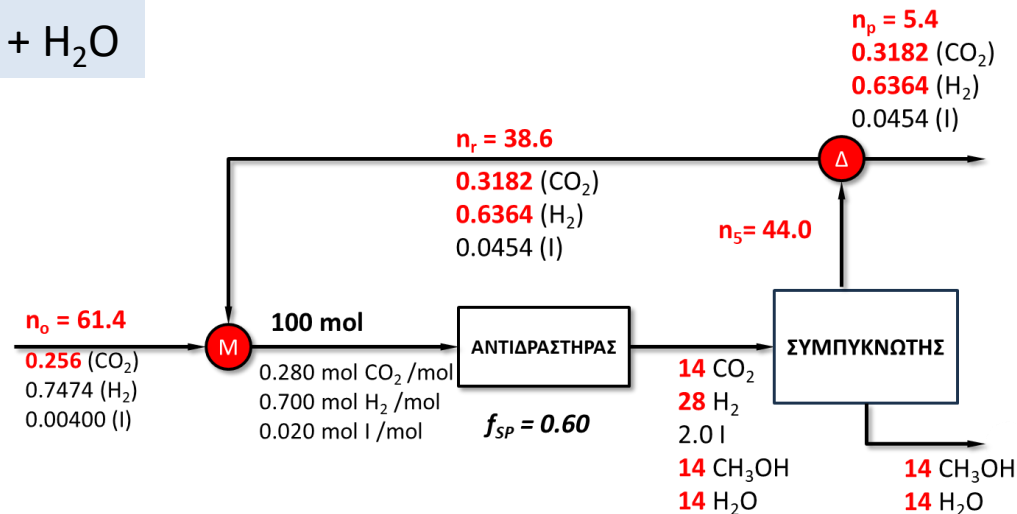


### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



Καλά όλα αυτά, αλλά όλοι οι προηγούμενοι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με βάση υπολογισμού 100 mol νέας τροφοδοσίας αντιδραστήρα

Τελικό αποτέλεσμα;  
Για 100 mol νέας τροφοδοσίας παράγονται 14 mol  $\text{CH}_3\text{OH}$



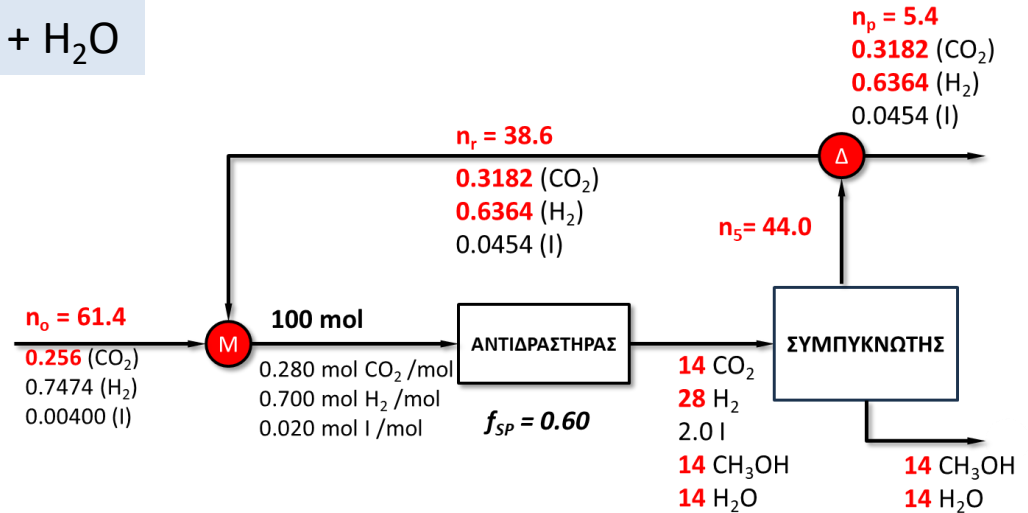
Επομένως για να παραχθούν 155 mol  $\text{CH}_3\text{OH}$ , απαιτείται να πολλαπλασιάσουμε τις ροές (αλλά όχι τις συστάσεις!!) με ένα συντελεστή **upscaling = 155/14**

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 13



### ΝΕΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ

Βάση 100	Upscale (155/14)
$n_o = 61.4 \text{ mol}$	$n_o = 680 \text{ mol}$
25.6 % $\text{CO}_2$	25.6 % $\text{CO}_2$
74.0 % $\text{H}_2$	74.0 % $\text{H}_2$
0.4 % I	0.4 % I



### ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΑΝΤΙΔΡ.

Βάση 100	Upscale (155/14)
100 mol	1107 mol
28.0 % $\text{CO}_2$	28.0 % $\text{CO}_2$
70.0 % $\text{H}_2$	70.0 % $\text{H}_2$
2 % I	2 % I

### ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

Βάση 100	Upscale (155/14)
$n_r = 38.6 \text{ mol}$	427 mol
31.8 % $\text{CO}_2$	31.8 % $\text{CO}_2$
63.6 % $\text{H}_2$	63.6 % $\text{H}_2$
4.6 % I	4.6 % I

### ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ

Βάση 100	Upscale (155/14)
$n_p = 5.4 \text{ mol}$	59.8 mol
31.8 % $\text{CO}_2$	31.8 % $\text{CO}_2$
63.6 % $\text{H}_2$	63.6 % $\text{H}_2$
4.6 % I	4.6 % I

## ΑΠΟΡΡΙΨΗ (ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ: PURGING)

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 14



Άλλες  
προτεινόμενες  
ασκήσεις (Him):  
6.3.8, 6.3.10,  
6.3.20

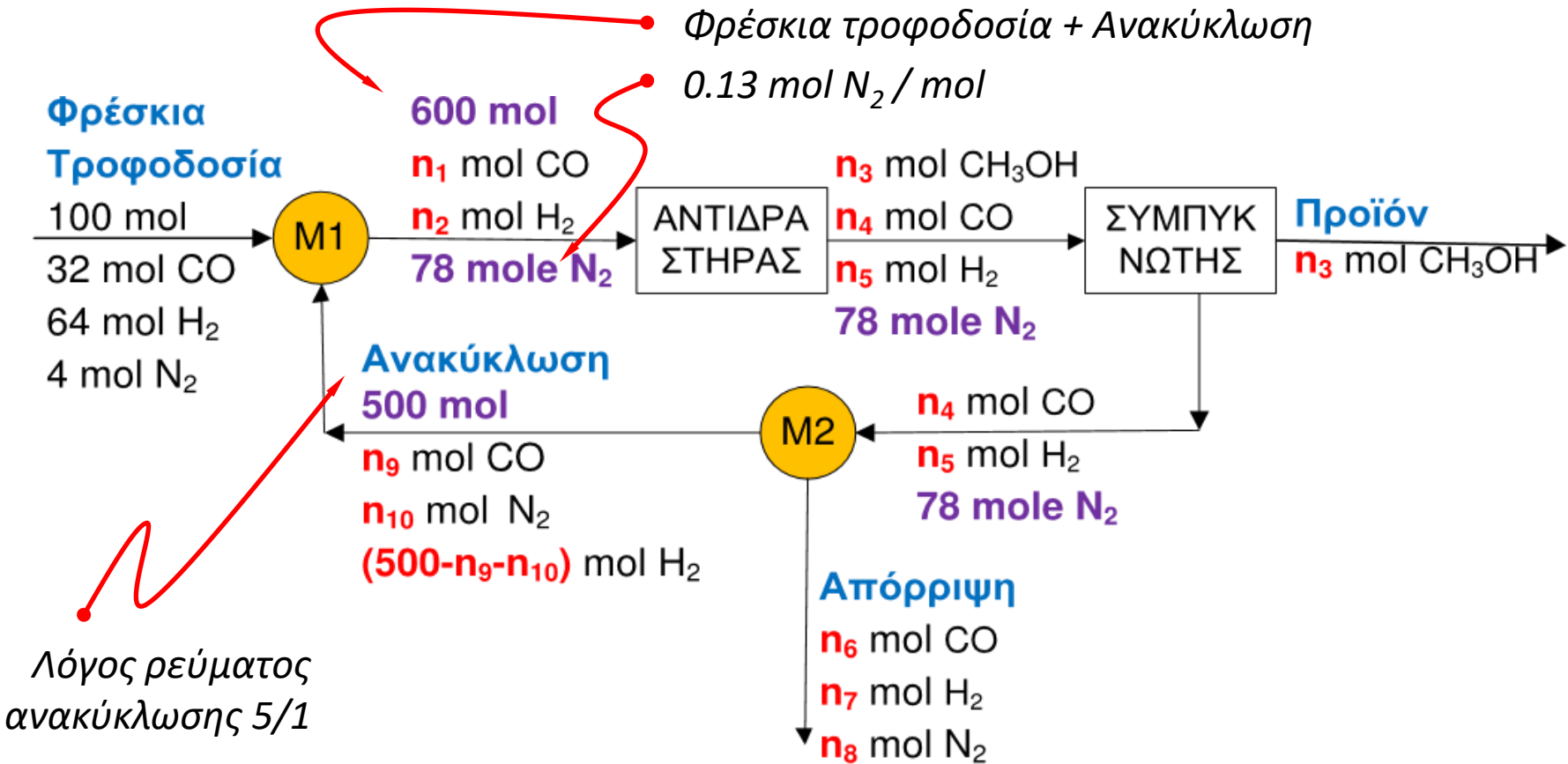
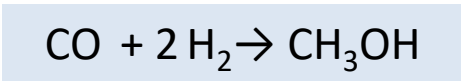
Μεθανόλη παράγεται από CO και H<sub>2</sub> σε καταλυτικό αντιδραστήρα σύμφωνα με την αντίδραση:  $\text{CO} + 2 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$

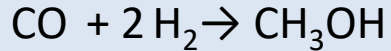
- Η φρέσκια τροφοδοσία περιλαμβάνει 32% CO, 64% H<sub>2</sub> και 4.0% N<sub>2</sub>.
- Το ρεύμα αναμιγνύεται με ένα ρεύμα ανακύκλωσης 5/1 (5 μέρη ανακύκλωσης προς 1 μέρος φρέσκιας τροφοδοσίας) και μπαίνει στον αντιδραστήρα με 13.0% σε N<sub>2</sub>. Το ποσοστό μετατροπής απλού περάσματος είναι μικρό.
- 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<sub>2</sub> και N<sub>2</sub>.
- Το αέριο προϊόν του συμπυκνωτή χωρίζεται σε 2 ρεύματα, το ένα απομακρύνεται (απορρίπτεται) και το άλλο ανακυκλώνεται.

Με βάση 100 mol φρέσκιας τροφοδοσίας:

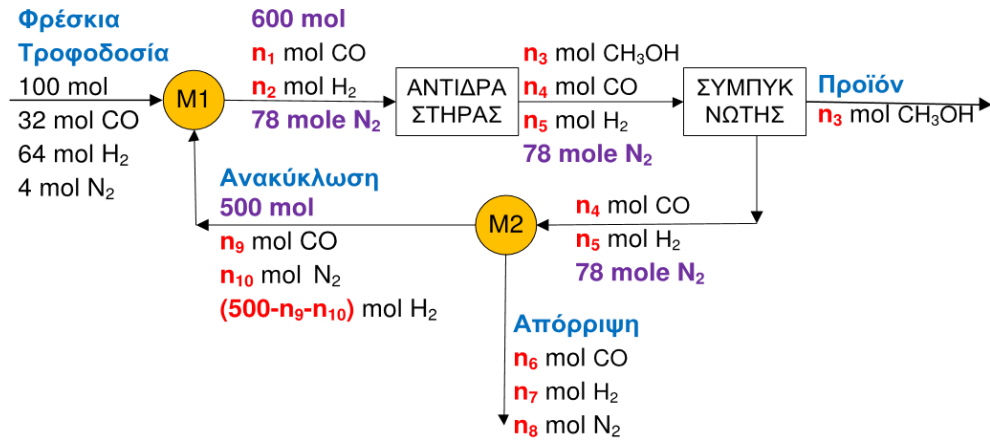
- α) Σχεδιάστε και επιλύστε το διάγραμμα ροής
- β) Συνολικός βαθμός μετατροπής CO και βαθμός μετατροπής CO στον αντιδραστήρα
- γ) Οφέλη ανακύκλωσης και καθαρισμού

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 14**



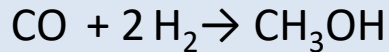
**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 14**

**Το κλειδί, εδώ, είναι το  $\text{N}_2$**   
 Αν προσέξουμε, στη μόνη ροή που βγαίνει, συνολικά, από το συνολικό σύστημα, είναι στο ρεύμα απόρριψης. Εξ ου και γνωρίζουμε την ποσότητα (78 mol)  $\text{N}_2$  στα ρεύματα τροφοδοσίας αντιδραστήρα, συμπυκνωτή και M2



1. Επομένως, για να μην υπάρχει συσσώρευση  $\text{N}_2 \Leftrightarrow n_8 = 4 \text{ mol N}_2$
2. Αφού «φεύγουν» 4 mol  $\text{N}_2$  στο ρεύμα απόρριψης,  $\Leftrightarrow n_{10} = 74 \text{ mol N}_2$

# ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 14



Στο σημείο απόρριψης, όμως, δεν γίνεται αλλαγή σύστασης, απλά

διάσπαση ρευμάτων:

$$(n_4 + n_5 + 78) = (n_6 + n_7 + 4) + 500$$

$$n_{IN M2} = n_P + 500$$

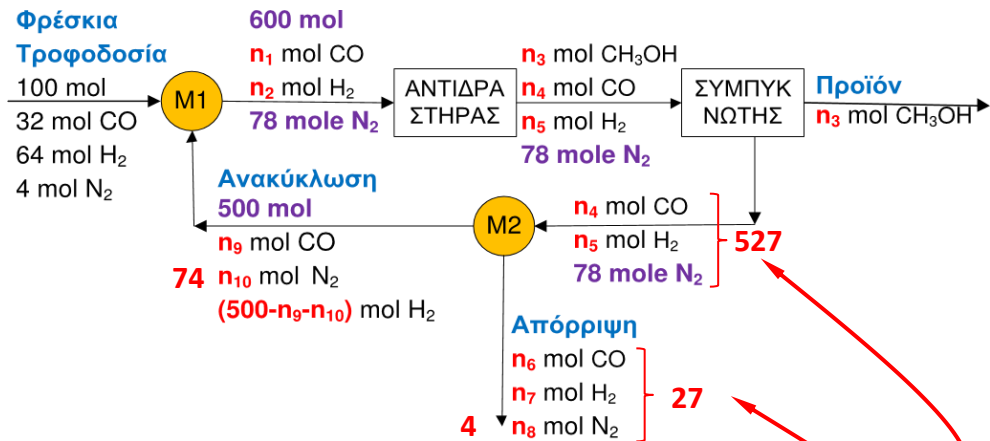
3. Αφού δεν αλλάζει η σύσταση, τότε:

$$\text{CO: } \frac{n_9}{500} = \frac{n_4}{n_4 + n_5 + 78} = \frac{n_6}{n_6 + n_7 + 4}$$

$$\text{H}_2: \frac{500 - n_9 - 74}{500} = \frac{n_5}{n_4 + n_5 + 78} = \frac{n_7}{n_6 + n_7 + 4}$$

$$\text{N}_2: \frac{74}{500} = \frac{78}{n_4 + n_5 + 78} = \frac{4}{n_6 + n_7 + 4}$$

**Άρα πρώτα πρέπει να βρούμε το  $n_9$**



$$(1) \quad (3) \quad \Leftrightarrow n_4 + n_5 = 449 \quad (3a)$$

$$(1) \quad (3) \quad \Leftrightarrow n_6 + n_7 = 23 \quad (3b)$$

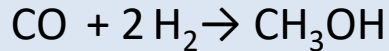
$$(2) \quad (1), (3a) \quad \Leftrightarrow \frac{n_4}{n_9} = \frac{527}{500} \quad (1a)$$

$$(2) \quad (1), (3a) \quad \Leftrightarrow \frac{n_6}{n_9} = \frac{27}{500} \quad (1b)$$

$$(3) \quad (2) \quad \Leftrightarrow \frac{527}{500} = \frac{n_5}{426 - n_9} \quad (2a)$$

$$(3) \quad (2) \quad \Leftrightarrow \frac{27}{500} = \frac{n_7}{426 - n_9} \quad (2b)$$

# ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 14



## Ατομικά ισοζύγια (σύνολο)

$$\begin{aligned} \text{C: } & 1 \cdot 32 = 1 \cdot n_3 + 1 \cdot n_6 & (4) \\ \text{H: } & 2 \cdot 64 = 4 \cdot n_3 + 2 \cdot n_7 & (5) \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \text{C: } \\ \text{H: } \end{aligned}} \right\} n_7 = 2 \cdot n_6 \quad (6)$$

$$(3) \quad \Rightarrow n_4 + n_5 = 449 \quad (3a)$$

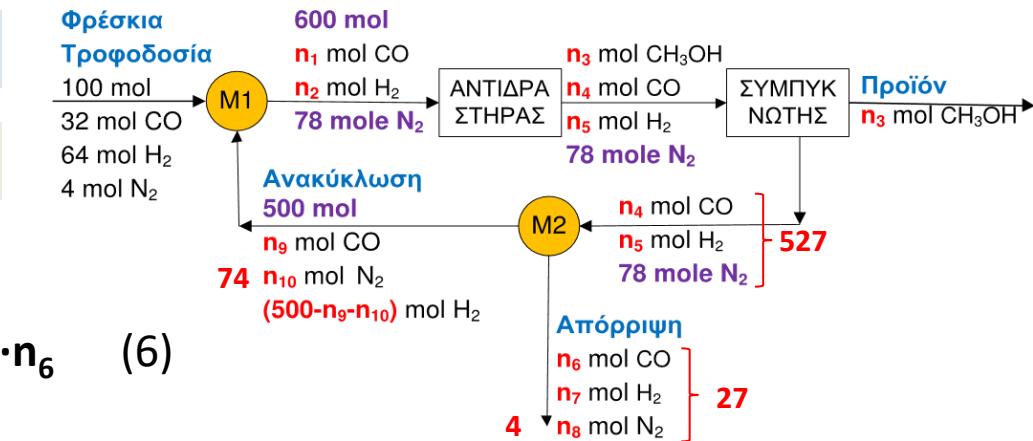
$$(3) \quad \Rightarrow n_6 + n_7 = 23 \quad (3b)$$

$$(1), (3a) \quad \Rightarrow \frac{n_4}{n_9} = \frac{527}{500} \quad (1a)$$

$$(1), (3a) \quad \Rightarrow \frac{n_6}{n_9} = \frac{27}{500} \quad (1b)$$

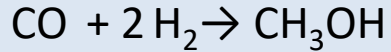
$$(2) \quad \Rightarrow \frac{527}{500} = \frac{n_5}{426 - n_9} \quad (2a)$$

$$(2) \quad \Rightarrow \frac{27}{500} = \frac{n_7}{426 - n_9} \quad (2b)$$



$$\begin{aligned} (6), (3b) & \Rightarrow n_6 = 7.7 \text{ mol CO} \\ \text{και} & \\ (1b) & \Rightarrow n_7 = 15.3 \text{ mol H}_2 \\ (1a) & \Rightarrow n_9 = 142 \text{ mol CO} \\ (3a) & \Rightarrow n_4 = 149.7 \text{ mol CO} \\ & \Rightarrow n_5 = 299.3 \text{ mol H}_2 \end{aligned}$$

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 14



### Αναμεικτήρας M1

$$n_1 = 32 + 142 = 174 \text{ mol CO}$$

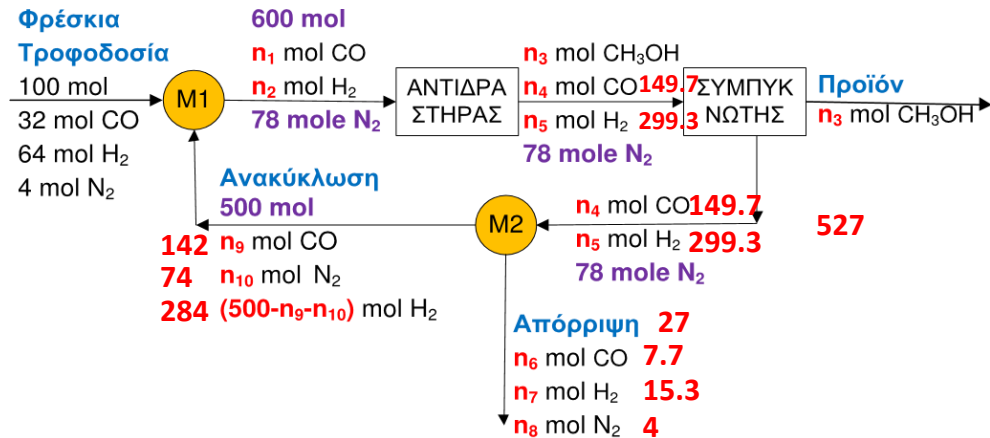
### Αντιδραστήρας

Αφού η τροφοδοσία του αντιδραστήρα σε CO είναι  $n_1 = 174 \text{ mol}$  και περίσσεψαν  $n_4 = 149.7 \text{ mol}$ , τότε **αντέδρασαν**  $n_1 - n_4 = 24.3 \text{ mol CO}$

Τα οποία απαιτούν  $2 \cdot 24.3 = 48.6 \text{ mol H}_2$  και παράγουν  $n_3 = 24.3 \text{ mol CH}_3\text{OH}$

**Μ. Ισ. H<sub>2</sub> :**

$$n_2 = n_5 + 48.6 = 299.3 + 48.6 = 347.9 \text{ mol H}_2$$



### Συνολικός βαθμός μετατροπής CO

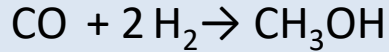
$$f_{\text{CO TOT}} = \frac{\text{Reacted}}{\text{Feed}} = \frac{32 - 7.7}{32} = 0.76 \text{ ήτοι } 76\%$$

### Βαθμός μετατροπής CO στον αντιδραστήρα

$$f_{\text{CO REACT}} = \frac{\text{Reacted}}{\text{Feed}} = \frac{24.3}{174} = 0.14 \text{ ήτοι } 14\%$$



# ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 14

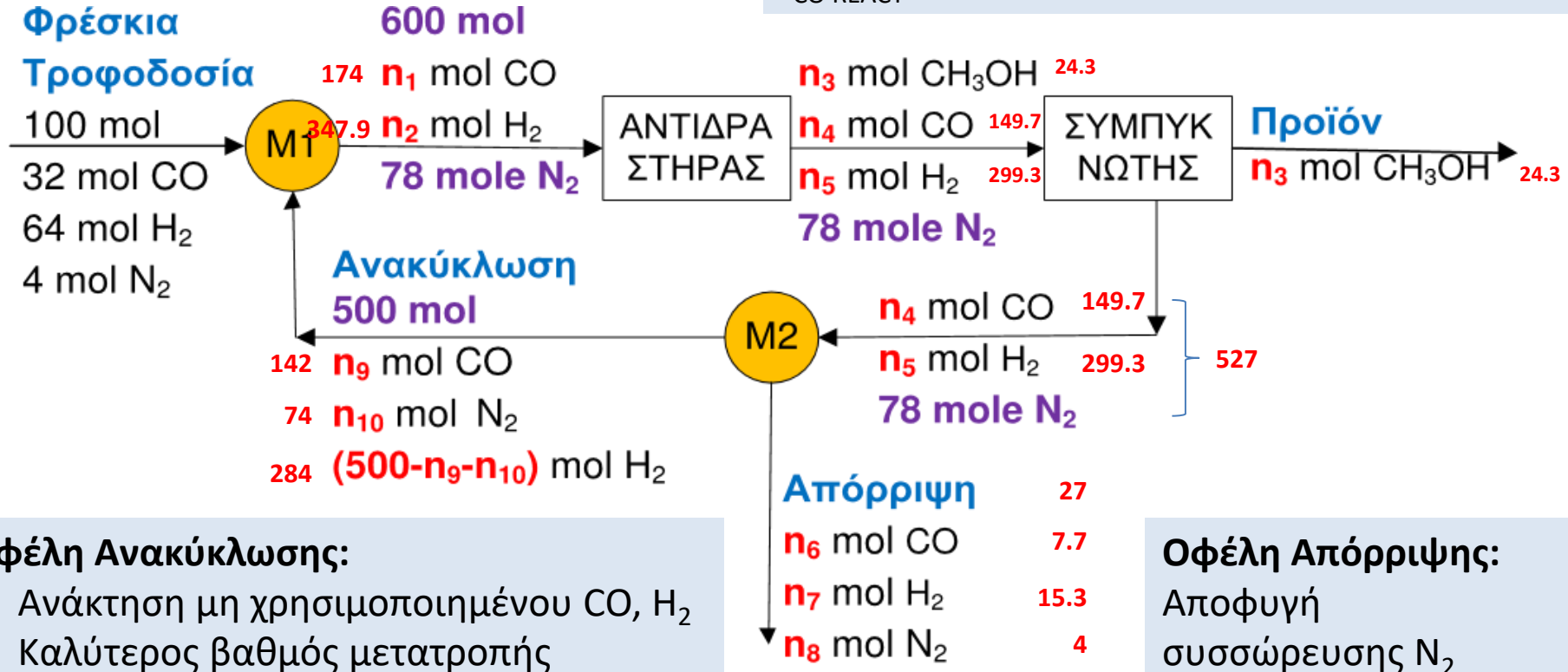


**Συνολικός βαθμός μετατροπής CO**

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

**Βαθμός μετατροπής CO στον αντιδραστήρα**

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



## Οφέλη Ανακύκλωσης:

- Ανάκτηση μη χρησιμοποιημένου CO, H<sub>2</sub>
- Καλύτερος βαθμός μετατροπής

## Οφέλη Απόρριψης:

- Αποφυγή συσσώρευσης N<sub>2</sub>

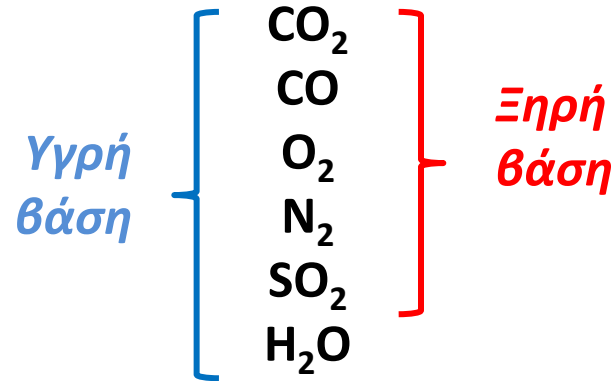


# ΠΕΡΙ ΚΑΥΣΗΣ

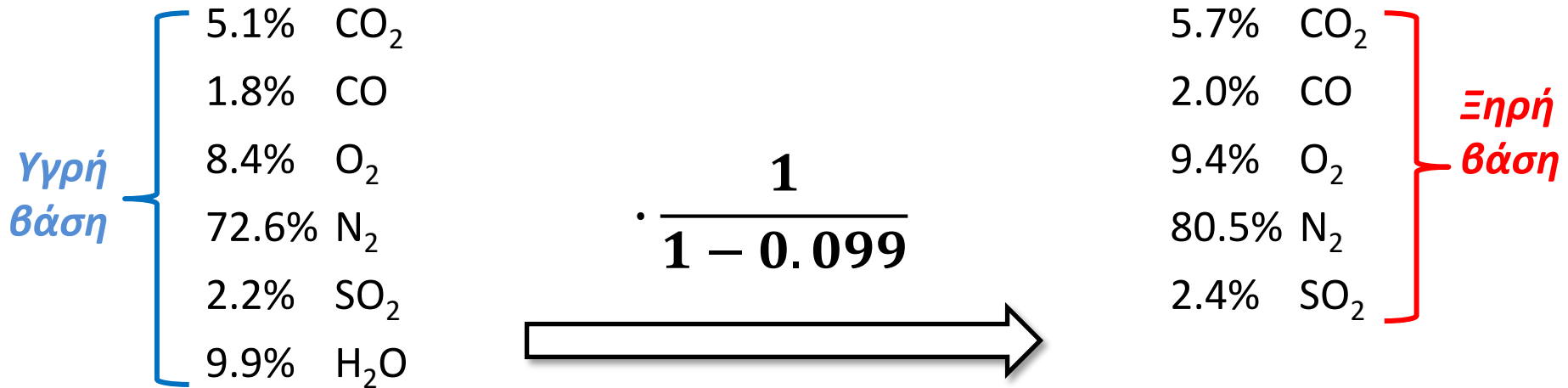
- Η ταχεία αντίδραση καυσίμου με οξυγόνο
- Η σημασία της δεν οφείλεται στην αξία των προϊόντων ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  και πιθανά  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ), αλλά στην απελευθέρωση σημαντικών ποσών ενέργειας.

- Ανάλυση καυσαερίων:

- ✓ Υγρή βάση
- ✓ Ξηρή βάση



## ΚΑΥΣΗ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ



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

## ΚΑΥΣΗ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ – ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ

Ένα αέριο μείγμα περιέχει 60.0 mole% N<sub>2</sub>, 15.0% CO<sub>2</sub> και από 10.0% O<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O. Υπολογίστε τη **μολαρική σύσταση σε ξηρή βάση**

Βάση υπολογισμών: 100 mol  
καυσαερίων σε υγρή βάση

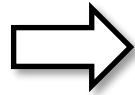
60.0 mol N<sub>2</sub>

15.0 mol CO<sub>2</sub>

10.0 mol O<sub>2</sub>

10.0 mol H<sub>2</sub>O

**Ξηρή βάση**  
**85 mol**



$$\frac{60.0}{85.0} = 0.706 \frac{\text{mol N}_2}{\text{mol EB}} \text{ ήτοι } \mathbf{70.6 \%}$$

$$\frac{15}{85.0} = 0.176 \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol EB}} \text{ ήτοι } \mathbf{17.6 \%}$$

$$\frac{10}{85.0} = 0.118 \frac{\text{mol O}_2}{\text{mol EB}} \text{ ήτοι } \mathbf{11.8 \%}$$

---

**95.0 mol υγρή βάση**

### 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.

$$\text{Περίσσεια αέρα} = \frac{\text{mol αερα τροφοδοσιας} - \text{mol αερα θεωρητικα απαιτούμενου}}{\text{mol αερα θεωρητικα απαιτουμενου}}$$

### 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  $CO_2$ ).

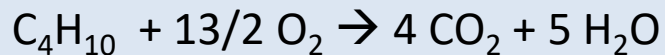
### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 15



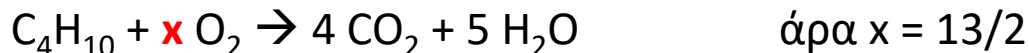
100 mol / h βουτάνιο εισέρχεται σε αντιδραστήρα και καίγεται με αέρα παροχής 5000 mol / h. Υπολογίστε % Περίσσεια αέρα

Hint:

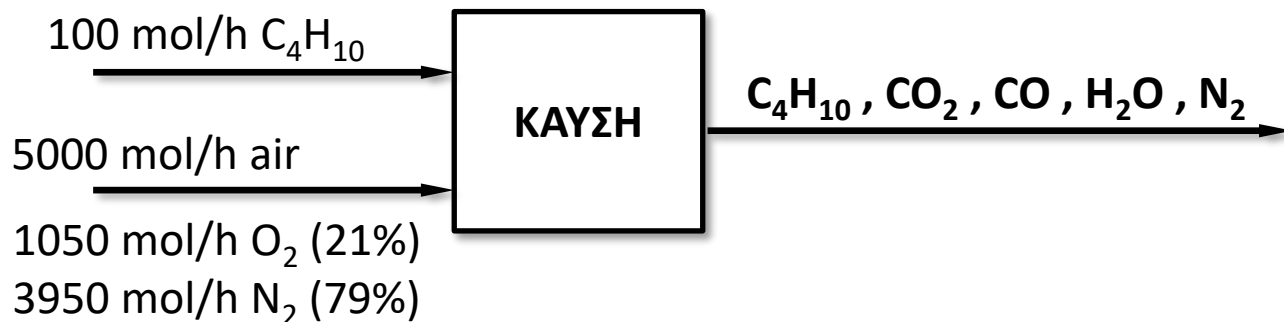
- *Χρειαζόμαστε να σκεφτούμε ποια η αντίδραση πλήρους καύσης, ώστε να συγκρίνουμε την θεωρητικά απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου (αέρα)*
- *Αν μας βοηθάει ένα διάγραμμα ροής (λέμε τώρα), ας το κάνουμε, αλλά μια απλή καύση είναι, ας μην αγχωνόμαστε, έχουμε τόσα άλλα να αγχωθούμε στη ζωή μας.*

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 15****Βήμα 1:****ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΠΛΗΡΟΥΣ ΚΑΥΣΗΣ**

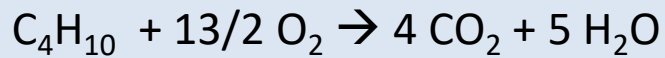
Όταν το βουτάνιο  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  καίγεται πλήρως, παράγει  $\text{CO}_2$  και υδρατμούς



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

**Βήμα 2:**



**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 15****Βήμα 3:**

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

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

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

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

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 16

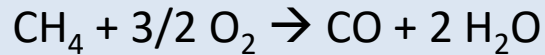
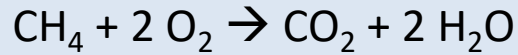


Εισάγονται **100 mol/h μεθανίου** που καίγονται με αέρα με σύσταση 21%  $O_2$  και 79%  $N_2$ .

1. Να υπολογίσετε τη ροή του **θεωρητικά απαιτούμενου  $O_2$** .
2. Να υπολογίσετε τη ροή θεωρητικά απαιτούμενου  $O_2$ , 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  $O_2$**  τότε να υπολογίστε την περίσσεια αέρα.

Hint:

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

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 16**

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

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

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

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

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

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

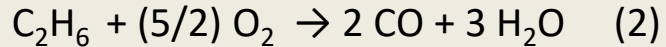
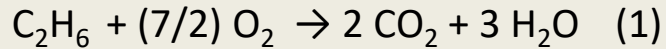
5. Αν  $\dot{n}_{\text{O}_2 feed} = 300 \text{ mol/h}$  τότε:

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

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 17



Αιθάνιο καίγεται σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



### ΔΕΔΟΜΕΝΑ

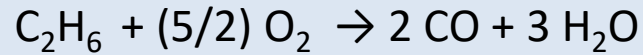
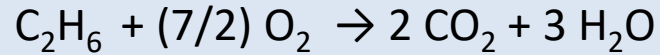
50% περίσσεια αέρα

Βαθμός μετατροπής αιθανίου: 90%

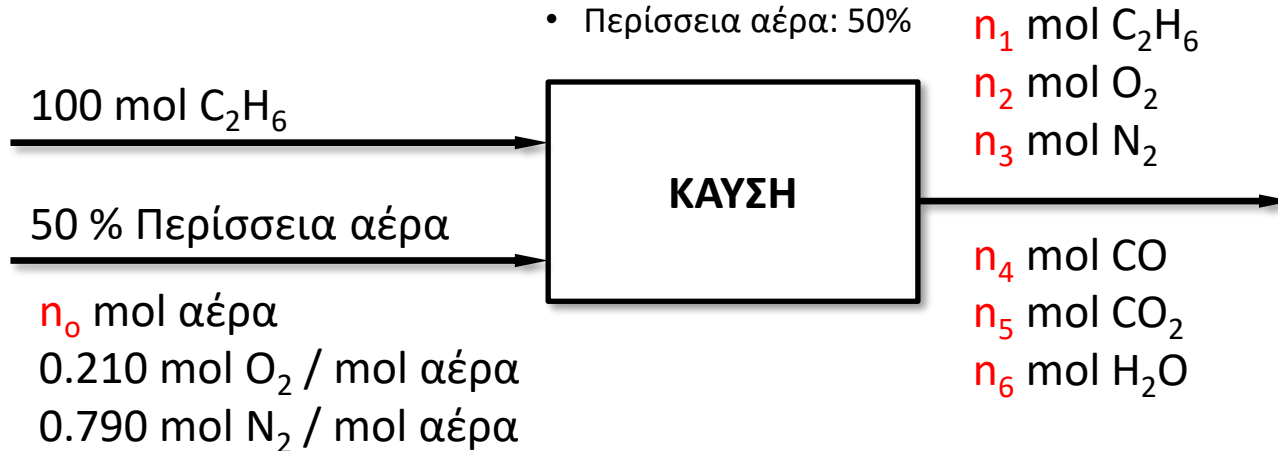
Το 25% του αιθανίου μετατρέπεται σε CO και το υπόλοιπο σε CO<sub>2</sub>.

### ΖΗΤΟΥΜΕΝΑ

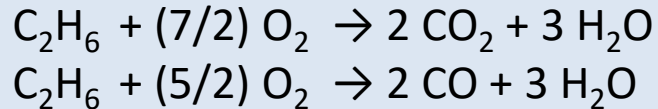
- Να σχεδιαστεί το διάγραμμα ροής
- Καθορίστε τους βαθμούς ελευθερίας και επιλύστε το σχετικό διάγραμμα ροής
- Μολαρική σύσταση εξόδου (καυσαερίων) σε υγρή βάση
- Μολαρική σύσταση εξόδου (καυσαερίων) σε ξηρή βάση
- Λόγος mol νερού προς mol ξηρών καυσαερίων

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 17****Βήμα 1:****Διάγραμμα ροής**

- $f_{\text{C}_2\text{H}_6} = 0.90$
- Το 25% του  $\text{C}_2\text{H}_6$  μετατρέπεται σε CO και 75% σε  $\text{CO}_2$
- Περίσσεια αέρα: 50%



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 17



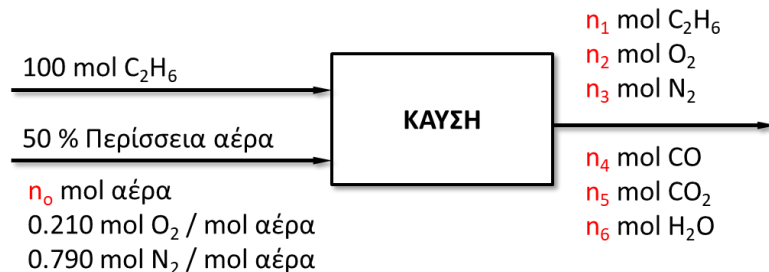
### Βήμα 2:

#### 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/CO<sub>2</sub>)

#### Βαθμοί ελευθερίας Β.Ε.

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



### Βήμα 3:

#### Αξιοποίηση περιορισμού 1:

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

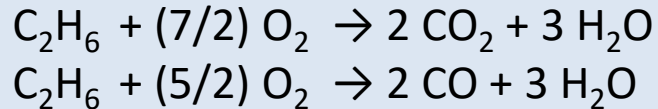
$$\text{όπου } n_o = n_{\text{O}_2 \text{ feed}} \frac{1 \text{ mol αερα}}{0.21 \text{ mol O}_2} \quad (4)$$

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

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

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

$$\left. \begin{array}{l} (3) \Leftrightarrow n_{\text{O}_2 \text{ feed}} = 525 \text{ mol} \\ (4) \Leftrightarrow n_o = 2500 \text{ mol} \end{array} \right\} n_{\text{N}_2 \text{ feed}} = n_3 = 2500 - 525 = 1975 \text{ mol}$$

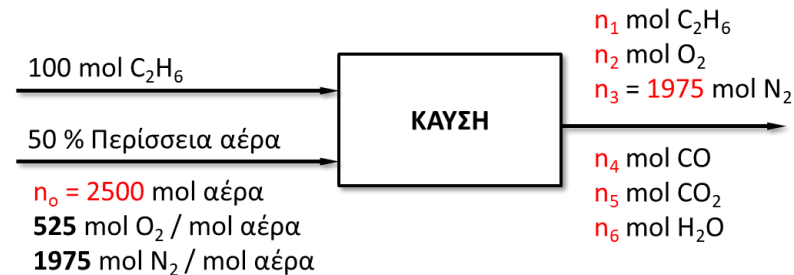
**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 17****Βήμα 4:**

Αξιοποίηση περιορισμών:

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

⇒

$$n_1 = 10 \text{ mol C}_2\text{H}_6$$



Περιορισμός 3: Το 25% του  $\text{C}_2\text{H}_6$  μετατρέπεται σε CO και 75% σε  $\text{CO}_2$

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

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

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

Αντίστοιχα:

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

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

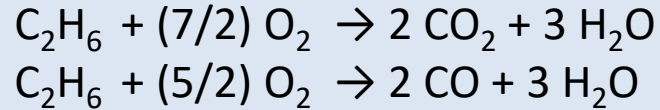
22.5 mol  $\text{C}_2\text{H}_6$  αντέδρασαν προς CO και απαιτούν  $5/2 \cdot 22.5 \text{ mol O}_2$

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

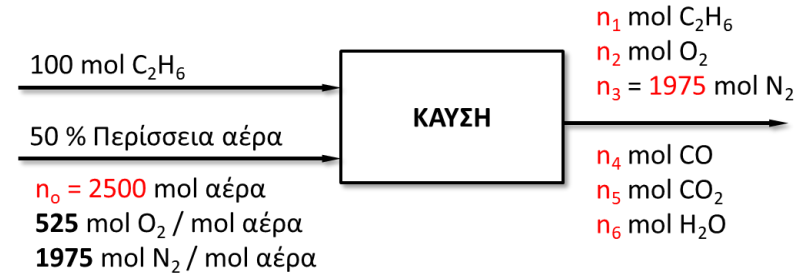
$$\frac{2 \text{ mol CO}}{1 \text{ mol C}_2\text{H}_6}$$

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

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

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 17****ΣΧΟΛΙΟ:**

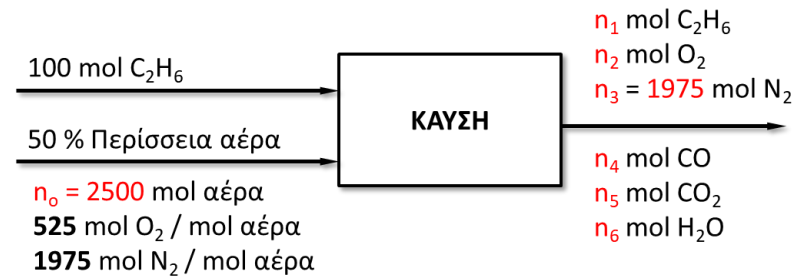
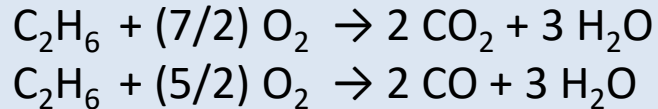
Μήπως η επίλυση στο προηγούμενο βήμα (περιορισμός 3) ήταν λίγο «μπακάλικη»;  
(σημ. αν και γρήγορη και ευκολονόητη)  
Ας το δούμε λίγο πιο «συστηματικά»:



Αυτό το 25% του  $\text{C}_2\text{H}_6$  που αντέδρασε οδηγεί σε CO μήπως μπορεί να μας δώσει κάποια σχέση μεταξύ των  $n_4$  και  $n_5$  ;

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



**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**

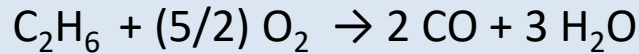
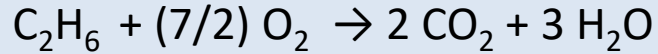
$$100 \text{ mol C}_2\text{H}_6 \cdot \frac{6 \text{ mol H}}{1 \text{ mol C}_2\text{H}_6} = n_1 \cdot \frac{6 \text{ mol H}}{1 \text{ mol C}_2\text{H}_6} + n_6 \cdot \frac{2 \text{ mol H}}{1 \text{ mol H}_2\text{O}} \quad \Leftrightarrow \quad n_6 = 270 \text{ mol H}_2\text{O}$$

**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)  $\Leftrightarrow$   $n_4 = 45 \text{ mol CO}$  και  $n_5 = 135 \text{ mol CO}_2$  και από (7)  $n_2 = 232.5 \text{ mol O}_2$

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 17**

100 mol C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>

50 % Περίσσεια αέρα

$n_o = 2500$  mol αέρα

525 mol O<sub>2</sub> / mol αέρα

1975 mol N<sub>2</sub> / mol αέρα

**ΚΑΥΣΗ**

$n_1 = 10$  mol C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>

$n_2 = 232.5$  mol O<sub>2</sub>

$n_3 = 1975$  mol N<sub>2</sub>

$n_4 = 45$  mol CO

$n_5 = 135$  mol CO<sub>2</sub>

$n_6 = 270$  mol H<sub>2</sub>O

**Σύσταση  
καυσαερίων**

$n_1 = 10$  mol C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>

$n_2 = 232.5$  mol O<sub>2</sub>

$n_3 = 1975$  mol N<sub>2</sub>

$n_4 = 45$  mol CO

$n_5 = 135$  mol CO<sub>2</sub>

$n_6 = 270$  mol H<sub>2</sub>O

**Υγρή βάση**

10 / 2667.5 = 0.37 %

8.72 %

74.04 %

1.69 %

5.06 %

10.12 %

100.00 %

**Ξηρή βάση**

10 / 2397.5 = 0.42 %

9.70 %

82.37 %

1.88 %

5.63 %

100.00 %

Υγρή βάση = 2667.5 mol

Ξηρή βάση = 2397.5 mol

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

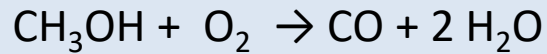
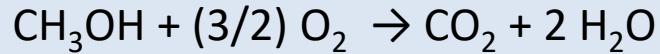
### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 18



**Υγρή μεθανόλη** ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) πυκνότητας  $0.792 \text{ kg/L}$  τροφοδοτείται με παροχή  $12.0 \text{ L/h}$  σε αντιδραστήρα και **καίγεται** με περίσσεια αέρα (σύσταση αέρα:  $0.210 \text{ mol O}_2/\text{mol air}$ ,  $0.790 \text{ mol N}_2/\text{mol air}$ ). Τα προϊόντα καύσης περιέχουν (μολαρική σύσταση) σε ξηρή βάση  $\text{CH}_3\text{OH}$   $0.45\%$ ,  $\text{CO}_2$   $9.03\%$  και  $\text{CO}$   $1.81 \%$ .

### ΖΗΤΟΥΜΕΝΑ

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

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 18****Βήμα 1:**

Διάγραμμα ροής

$$\dot{n}_0 = 12 \cdot 10^3 \cdot 0.792 / 32$$

$$\dot{n}_0 = 296.6 \text{ mol/h CH}_3\text{OH}$$

$$\dot{n}_1 \text{ mol/h O}_2$$

$$\frac{79}{21} \dot{n}_1 \text{ mol/h N}_2$$



$$\dot{n}_2 \text{ mol/h DG (dry gas)}$$

$$0.0045 \text{ mol CH}_3\text{OH} / \text{mol DG}$$

$$0.0903 \text{ mol CO}_2 / \text{mol DG}$$

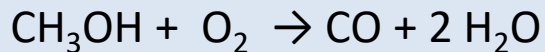
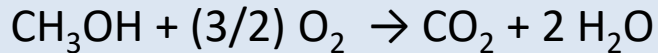
$$0.0181 \text{ mol CO} / \text{mol DG}$$

$$x \text{ mol O}_2 / \text{mol DG}$$

$$(1 - 0.0045 - 0.0903 - 0.0181 - x)$$

$$\text{mol N}_2 / \text{mol DG}$$

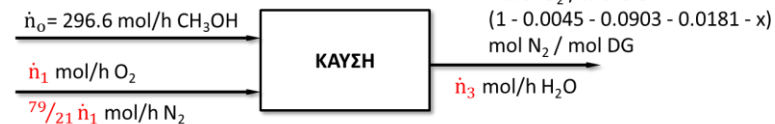
$$\dot{n}_3 \text{ mol/h H}_2\text{O}$$

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 18****Βήμα 2:**

Βαθμοί ελευθερίας (ατομική βάση)

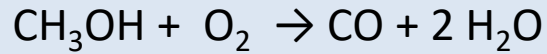
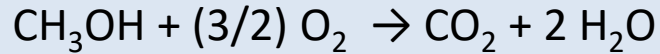
- +4 Άγνωστοι ( $\dot{n}_1$   $\dot{n}_2$   $\dot{n}_3$   $x$ )
- 3 Ατομικά ισοζύγια μάζας (C, H, O)
- 1 Ατομικό ισοζύγιο μάζας (N δεν αντιδρά)

**Βαθμοί ελευθερίας Β.Ε.**  
**= 4-3-1 = 0** άρα επιλύεται

**Βήμα 3:**

Μετατροπή παροχής σε mol/h

$$\dot{n}_0 = \frac{12 \text{ L CH}_3\text{OH}}{h} \left| \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ L}} \right| \left| \frac{0.792 \text{ g}}{1 \text{ cm}^3} \right| \left| \frac{1 \text{ mol}}{32.04 \text{ g}} \right| = \mathbf{296.6 \text{ mol/h CH}_3\text{OH}}$$

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 18****Βήμα 4:****Ατομικά ισοζύγια****Ατομικό ισοζύγιο C**

$$296.6 \text{ mol CH}_3\text{OH} \cdot \frac{1 \text{ mol C}}{1 \text{ mol CH}_3\text{OH}} =$$

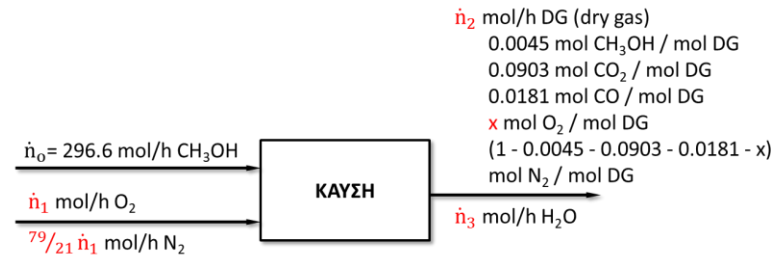
$$= \dot{n}_2 \cdot 0.0045 \cdot \frac{1 \text{ mol C}}{1 \text{ mol CH}_3\text{OH}} + \dot{n}_2 \cdot 0.0903 \cdot \frac{1 \text{ mol C}}{1 \text{ mol CO}_2} + \dot{n}_2 \cdot 0.0181 \cdot \frac{1 \text{ mol C}}{1 \text{ mol CO}} \quad (1)$$

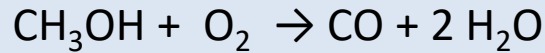
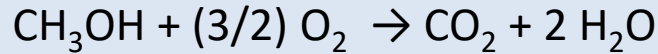
$$\Rightarrow \dot{n}_2 = 2627 \text{ mol/h DG}$$

**Ατομικό ισοζύγιο H**

$$296.6 \text{ mol CH}_3\text{OH} \cdot \frac{4 \text{ mol H}}{1 \text{ mol CH}_3\text{OH}} = \dot{n}_2 \cdot 0.0045 \cdot \frac{4 \text{ mol H}}{1 \text{ mol CH}_3\text{OH}} + \dot{n}_3 \cdot \frac{2 \text{ mol H}}{1 \text{ mol H}_2\text{O}} \quad (2)$$

$$\Rightarrow \dot{n}_3 = 569.6 \text{ mol/h H}_2\text{O}$$



**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 18****Βήμα 4:****Ατομικά ισοζύγια****Ατομικό ισοζύγιο O**

$$296.6 \text{ mol CH}_3\text{OH} \cdot \frac{1 \text{ mol O}}{1 \text{ mol CH}_3\text{OH}} + \dot{n}_1 \cdot \frac{2 \text{ mol O}}{1 \text{ mol O}_2} =$$

$$= \dot{n}_2 \cdot 0.0045 \cdot \frac{1 \text{ mol O}}{1 \text{ mol CH}_3\text{OH}} + \dot{n}_2 \cdot 0.0903 \cdot \frac{2 \text{ mol O}}{1 \text{ mol CO}_2} + \dot{n}_2 \cdot 0.0181 \cdot \frac{1 \text{ mol O}}{1 \text{ mol CO}} +$$

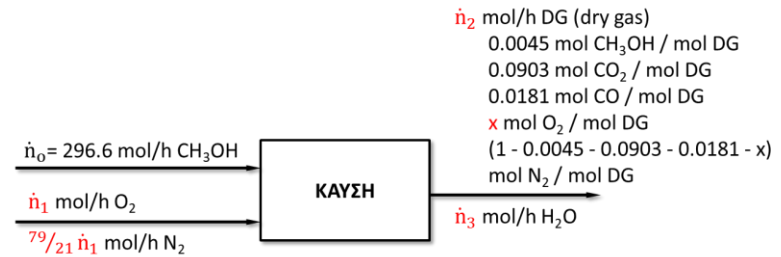
$$+ x \cdot \dot{n}_2 \cdot \frac{2 \text{ mol O}}{1 \text{ mol O}_2} + \dot{n}_3 \cdot \frac{1 \text{ mol O}}{1 \text{ mol H}_2\text{O}} \quad (3)$$

$$\Rightarrow 2 \dot{n}_1 = 806.8 + x \cdot 5254 \quad (3^*)$$

**Ατομικό ισοζύγιο N**

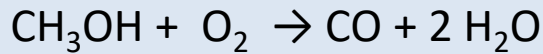
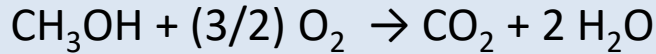
$${}^{79}_{21} \dot{n}_1 \cdot \frac{2 \text{ mol N}}{1 \text{ mol N}_2} = (1 - 0.0045 - 0.0903 - 0.0181 - x) \cdot \dot{n}_2 \cdot \frac{2 \text{ mol N}}{1 \text{ mol N}_2}$$

$$\Rightarrow 7.52 \dot{n}_1 = 4660.8 - x \cdot 5254 \quad (4^*)$$

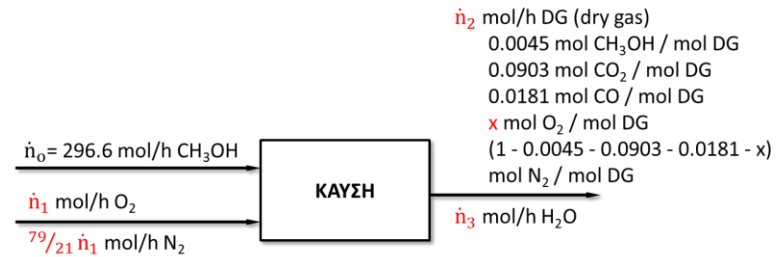
(3\*) & (4\*)  $\Rightarrow$ 

$$\dot{n}_1 = 574.3 \text{ mol O}_2$$

$$x = 0.0651 (\text{O}_2)$$

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 18****Βήμα 5:**

Κλάσμα μετατροπής μεθανόλης



$$f_{\text{CH}_3\text{OH}} = \frac{\text{mol αντεδρασαν}}{\text{mol τροφοδοσιας}} = \frac{\text{mol τροφοδοσιας} - \text{mol εξοδ.}}{\text{mol τροφοδοσιας}} \Rightarrow$$

$$f_{\text{CH}_3\text{OH}} = \frac{296.6 - 2627 \cdot 0.0045}{296.6} = 0.96$$

**Βήμα 6:**Περίσσεια αέρα = Περίσσεια O<sub>2</sub>

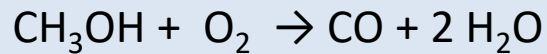
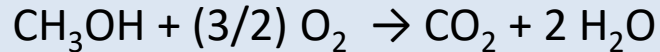
$$\text{Περίσσεια} = \frac{\dot{n}_{\text{feed}} - \dot{n}_{\Theta.\text{A.}}}{\dot{n}_{\Theta.\text{A.}}}$$

$$\dot{n}_{\text{feed}} = \dot{n}_1 = 574.3 \text{ mol O}_2$$

$$\dot{n}_{\text{O}_2 \Theta.\text{A.}} = 296.6 \text{ mol CH}_3\text{OH}_{\text{feed}} \frac{3/2 \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol CH}_3\text{OH}} = 444.9 \text{ mol O}_2$$

$$\text{Περίσσεια} = \frac{\dot{n}_{\text{O}_2 \text{ feed}} - \dot{n}_{\text{O}_2 \Theta.\text{A.}}}{\dot{n}_{\text{O}_2 \Theta.\text{A.}}} = \frac{574.3 - 444.9}{444.9} = 29.1 \%$$



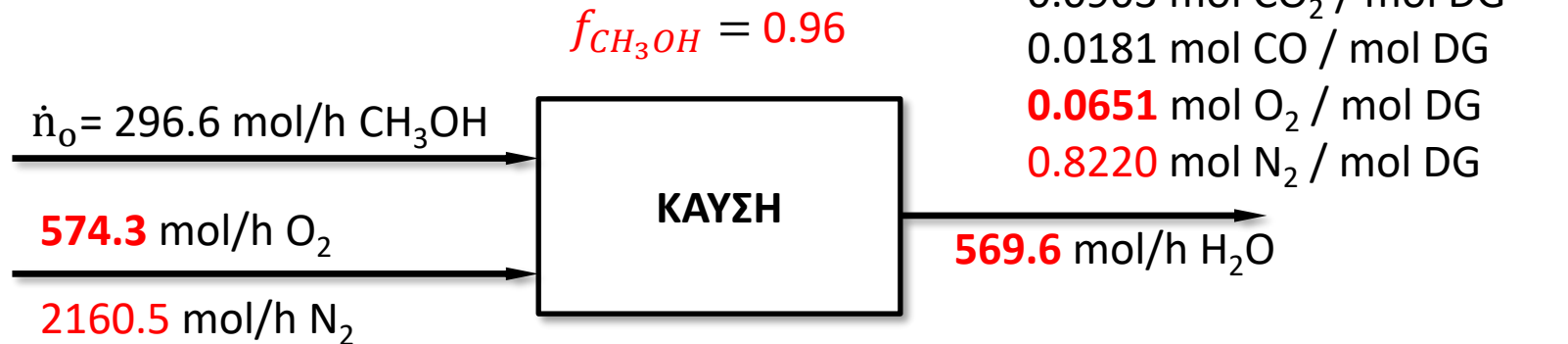
**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 18****Βήμα 7:**

Λόγος mol νερού προς mol καυσαερίων

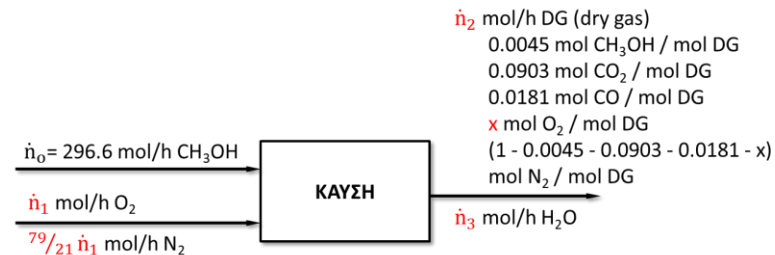
$$Y_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\dot{n}_3}{\dot{n}_2 + \dot{n}_3} = \frac{569.6}{2627 + 569.6} = 0.178 \text{ ήτοι } 17.8\%$$

**Βήμα 8:**

Σύνοψη



**Περίσσεια αέρα = 29.1 %**



## ΚΑΥΣΗ ΑΓΝΩΣΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΑ

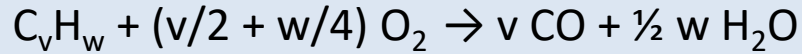
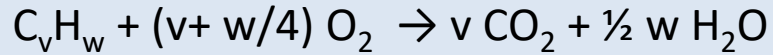
### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 19



Ένας υδρογονάνθρακας καίγεται με περίσσεια αέρα. Η έξοδος των καυσαερίων έχει σύσταση σε ξηρή βάση (% mol) 1.5% CO, 6.0% CO<sub>2</sub>, 8.2% O<sub>2</sub> και 84.3% N<sub>2</sub>. Διευκρινίζεται ότι στον υδρογονάνθρακα δεν υπάρχει στοιχειακό οξυγόνο.

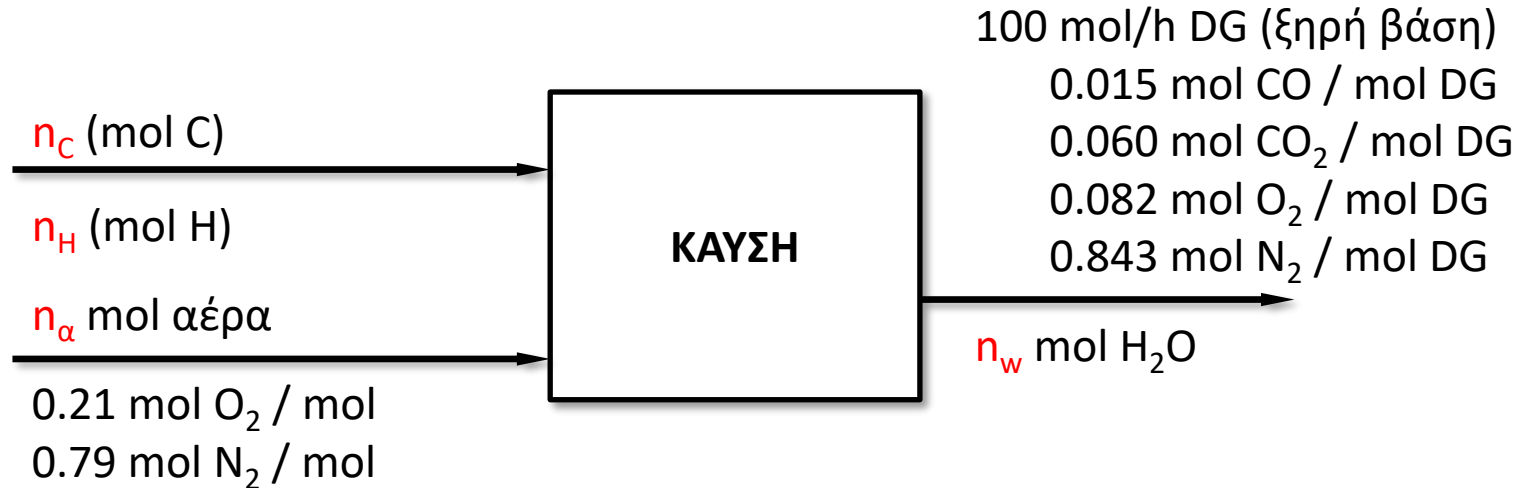


- Υπολογίστε τον λόγο H/C και υποθέστε τον μοριακό τύπο του υδρογονάνθρακα.
- Στη συνέχεια υπολογίστε την περίσσεια αέρα στην τροφοδοσία του καυστήρα.

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 19****Βήμα 1:**

Διάγραμμα ροής

Σημ. Προφανώς θεωρούμε ότι όλη η ποσότητα υδρογονάνθρακα καίγεται

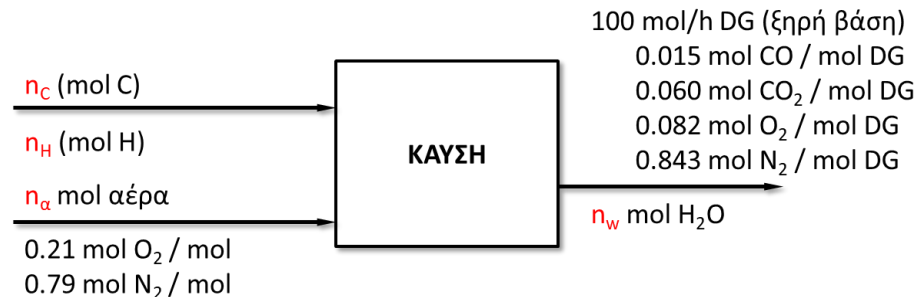


## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 19

### Βήμα 2:

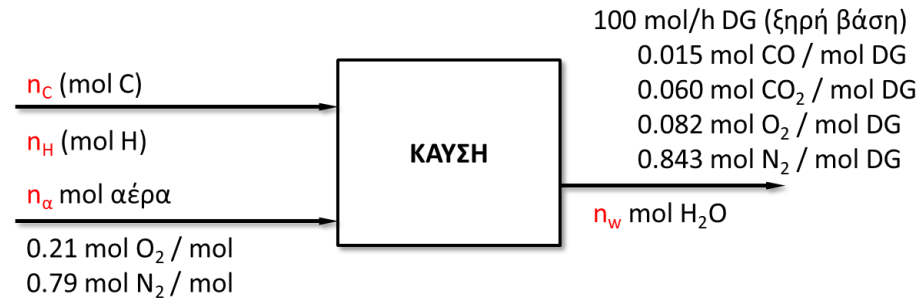
Βαθμοί ελευθερίας (ατομική βάση)

- +4 Άγνωστοι ( $n_C$   $n_H$   $n_\alpha$   $n_w$ )
- 3 Ατομικά ισοζύγια μάζας (C, H, O)
- 1 Ατομικό ισοζύγιο μάζας (N δεν αντιδρά)



} **Βαθμοί ελευθερίας B.E.**  
**= 4-3-1 = 0** άρα επιλύεται

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 19



### Βήμα 3:

Επίλυση ατομικών ισοζ. μάζας

#### Ατομικό ισοζύγιο C

$$n_C = 100 \cdot 0.015 \cdot \frac{1 \text{ mol C}}{1 \text{ mol CO}} + 100 \cdot 0.060 \cdot \frac{1 \text{ mol C}}{1 \text{ mol CO}_2} \quad (1) \quad \Rightarrow n_C = 7.5 \text{ mol C}$$

#### Ατομικό ισοζύγιο H

$$n_H = n_w \cdot \frac{2 \text{ mol H}}{1 \text{ mol H}_2\text{O}} \quad (2) \quad \Rightarrow n_H = 2 n_w \quad (2^*)$$

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 19

### Βήμα 3:

Επίλυση ατομικών ισοζ. μάζας

#### Ατομικό ισοζύγιο O

$$0.21 \cdot n_{\alpha} \cdot \frac{2 \text{ mol O}}{1 \text{ mol O}_2} = 100 \cdot 0.015 \cdot \frac{1 \text{ mol O}}{1 \text{ mol CO}} + 100 \cdot 0.060 \cdot \frac{2 \text{ mol O}}{1 \text{ mol CO}_2} + 100 \cdot 0.082 \cdot \frac{2 \text{ mol O}}{1 \text{ mol O}_2} + n_w \cdot \frac{1 \text{ mol O}}{1 \text{ mol H}_2\text{O}} \quad (3)$$
$$\Leftrightarrow 0.42 n_{\alpha} = 29.9 + n_w \quad (3^*)$$

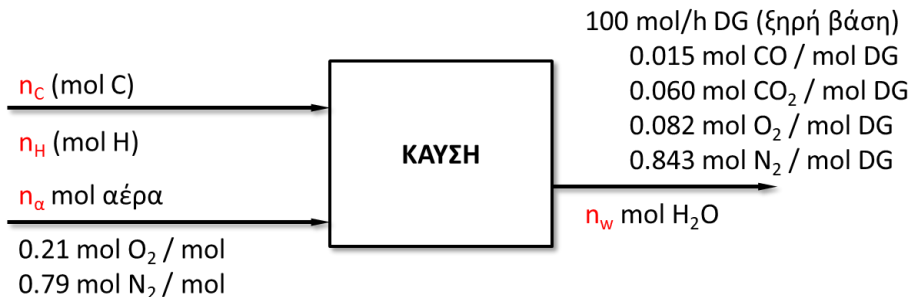
#### Ατομικό ισοζύγιο N

$$0.79 \cdot n_{\alpha} \cdot \frac{2 \text{ mol N}}{1 \text{ mol N}_2} = 100 \cdot 0.843 \cdot \frac{2 \text{ mol N}}{1 \text{ mol N}_2} \quad (3) \quad \Leftrightarrow \quad n_a = 106.7 \text{ mol αέρα}$$

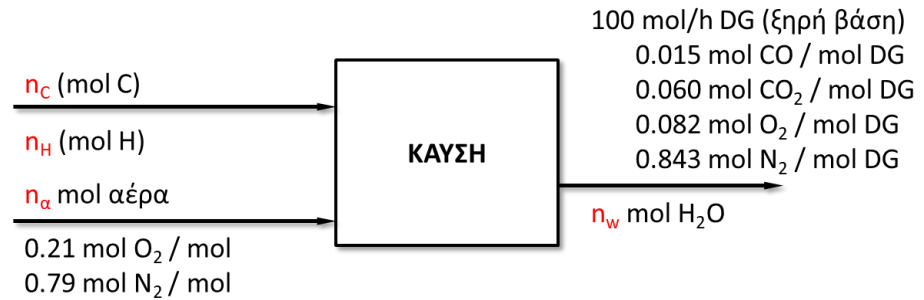
Επομένως, με αντικατάσταση

$$(3^*) \Leftrightarrow n_w = 14.9 \text{ mol H}_2\text{O}$$

$$(2^*) \Leftrightarrow n_H = 29.8 \text{ mol H}$$



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 19



### Βήμα 4:

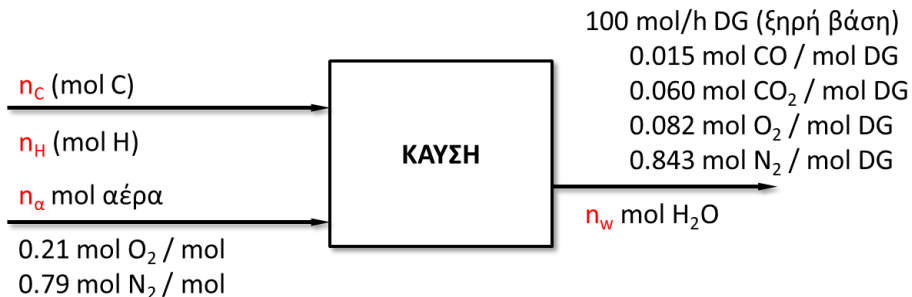
Αναλογία H/C

$$\text{Αναλογία H/C} = \frac{n_H}{n_C} = \frac{29.8}{7.5} = 3.97 \text{ mol H / mol C}$$

Άρα το καύσιμο έχει τον γενικό τύπο (CH<sub>3.97</sub>)<sub>N</sub>

Πιθανότατα είναι μεθάνιο CH<sub>4</sub> με προσμίξεις άλλων υδρογονανθράκων

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 19



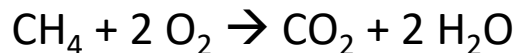
### Βήμα 6:

Περίσσεια αέρα = Περίσσεια O<sub>2</sub>

$$\dot{n}_{O_2 \text{ feed}} = n_\alpha \cdot 0.21 = 22.4 \text{ mol O}_2$$

Για τον υπολογισμό του  $\dot{n}_{O_2 \text{ } \Theta.A.}$  πρέπει να ξαναδούμε την στοιχειομετρία για πλήρη καύση προς CO<sub>2</sub> ήτοι:

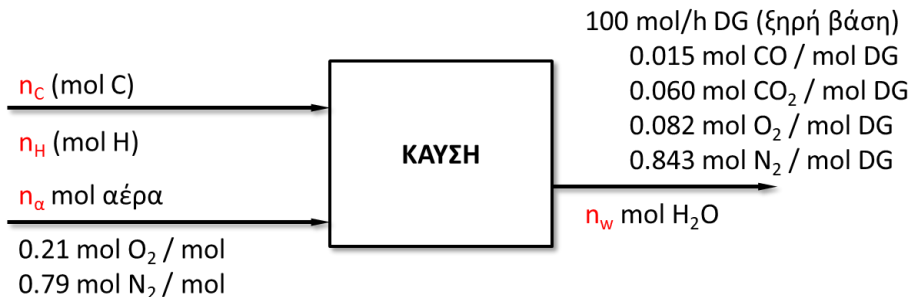
Είχαμε  $C_v H_w + (v + w/4) O_2 \rightarrow v CO_2 + \frac{1}{2} w H_2O$  όπου όμως πλέον  $v/w \approx \frac{1}{4} \Rightarrow$



Επειδή όμως  $v/w$  δεν είναι ακριβώς  $\frac{1}{4}$ , είναι δύσκολο να υπολογίσουμε το  $n_{\text{hydrocarbon}}$



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 19



### Βήμα 6:

Περίσσεια αέρα = Περίσσεια O<sub>2</sub>

$$\text{Περίσσεια} = \frac{n_{\text{feed}} - n_{\Theta.A.}}{n_{\Theta.A.}}$$

Αντ' αυτού, είναι πιο ακριβές να υπολογίσουμε πόσο οξυγόνο απαιτείται για πλήρη κατανάλωση του C και του H, που ήδη τα έχουμε υπολογίσει ως ποσότητες



$$\dot{n}_{\text{O}_2 \Theta.A.} = 7.5 \text{ mol C} \cdot \frac{1 \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol C}} + 29.8 \text{ mol H} \cdot \frac{1 \text{ mol O}_2}{4 \text{ mol H}} = 14.95 \text{ mol O}_2$$

$$\text{Περίσσεια αέρα} = \text{Περίσσεια O}_2 = \frac{n_{\text{feed}} - n_{\Theta.A.}}{n_{\Theta.A.}} = \frac{22.4 - 14.95}{14.95} = 0.498 \text{ ήτοι } 49.8\%$$