



Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

---

# Χημεία

## Ενότητα 13: Χημική κινητική

Αν. Καθηγητής Γεώργιος Μαρνέλλος  
e-mail: [gmarnellos@uowm.gr](mailto:gmarnellos@uowm.gr)

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

---



# Άδειες Χρήσης

---

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



# Χρηματοδότηση

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



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
*επένδυση στην κοινωνία της γνώσης*  
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

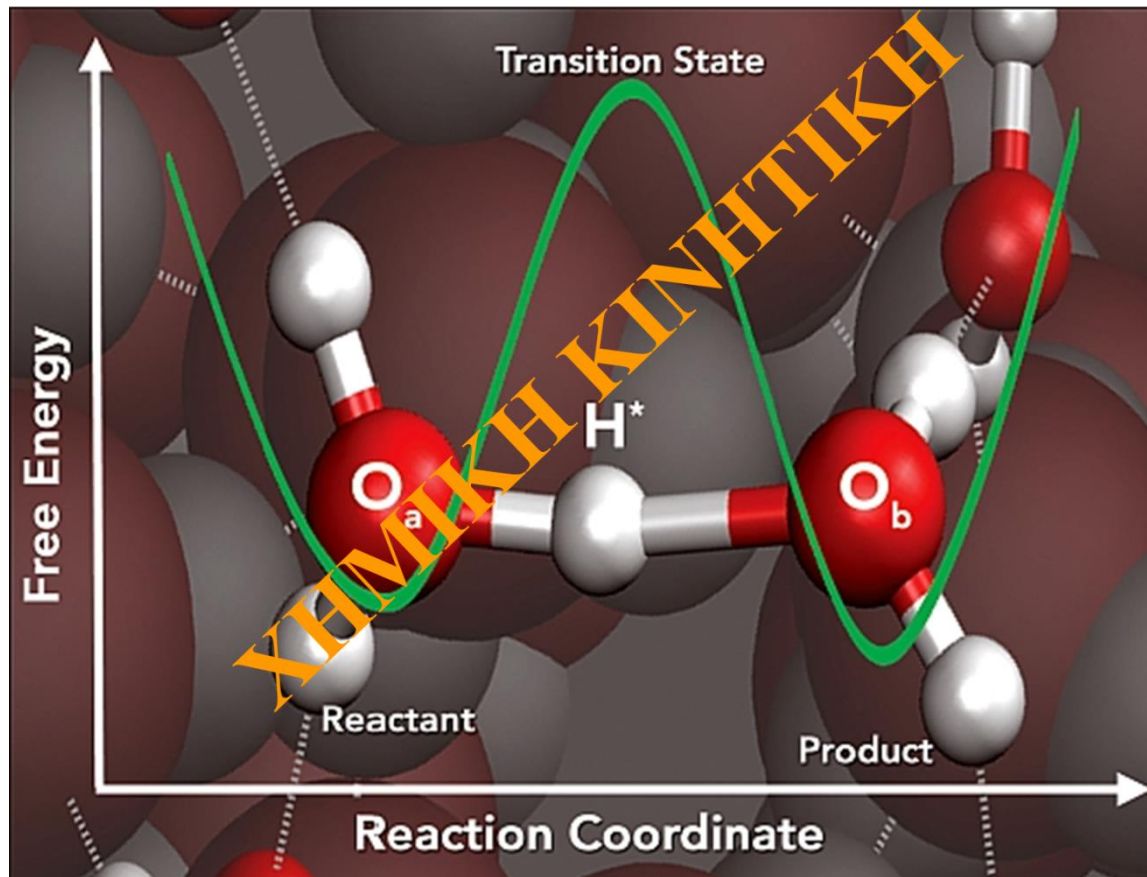
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
Πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

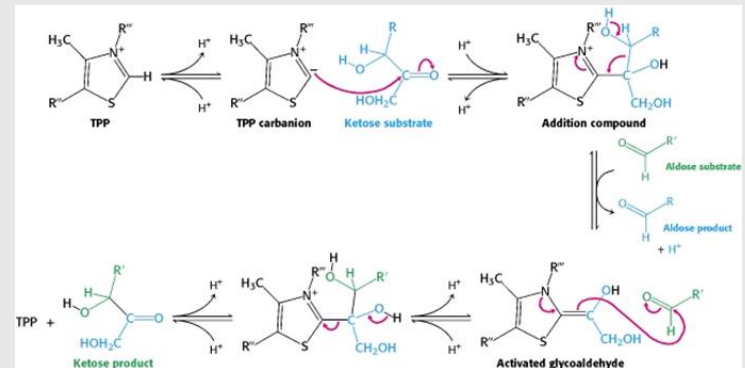


# Κεφάλαιο 13<sup>ο</sup>



# Χημική κινητική (1/6)

- **Ο κλάδος της χημείας που ασχολείται με την ρυθμό των χημικών αντιδράσεων καθώς και με τους παράγοντες που τον επηρεάζουν.**



Η Χημική Κινητική ασχολείται με:

- ✓ Με την ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων.
- ✓ Με τους παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα.
- ✓ Με τον μηχανισμό της αντίδρασης.

Η γνώση της ταχύτητας των αντιδράσεων αλλά και των συνθηκών κάτω από τις οποίες ευνοείται η παραγωγή των επιθυμητών προϊόντων, συμβάλλει στον κατάλληλο σχεδιασμό των χημικών αντιδραστήρων έτσι ώστε να παράγεται η μέγιστη δυνατή ποσότητα του επιθυμητού προϊόντος με το κατά το δυνατόν ελάχιστο κόστος.



# Χημική κινητική (2/6)

## ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΧΗΜΙΚΗΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ...

... Η μεταβολή της συγκέντρωσης ενός συστατικού (αντιδρώντος ή προϊόντος) στην μονάδα του χρόνου.

- Έστω η αντίδραση:  $2A(g) + B(g) \rightarrow \Gamma(g)$ .
- Στοιχειομετρία: 2 moles αντιδρώντος A αντιδρούν με 1 mol B και παράγεται 1 mole από το προϊόν Γ. Η μέση ταχύτητα είναι ίση με:

$$u = - \frac{\text{μεταβολή της συγκέντρωσης των αντιδρώντων}}{\text{μονάδα του χρόνου}} = - \frac{\Delta[A]}{\Delta t} = - \frac{\Delta[B]}{\Delta t}$$

$$u = \frac{\text{μεταβολή της συγκέντρωσης των προϊόντων}}{\text{μονάδα του χρόνου}} = \frac{\Delta[\Gamma]}{\Delta t}$$

[i]: Γραμμομοριακή Συγκέντρωση σε mol/l.

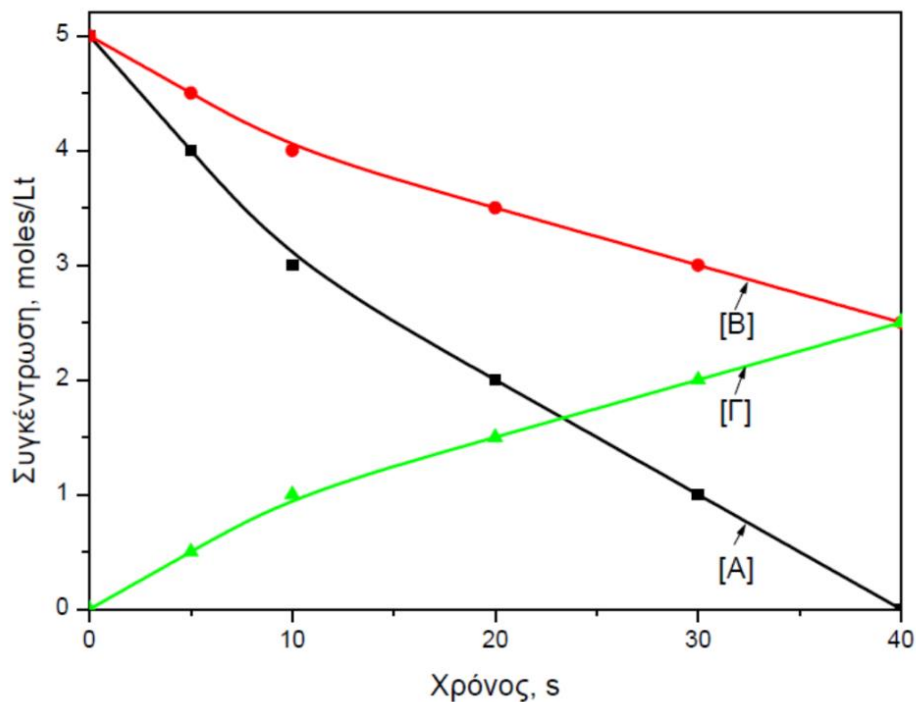
u: Ταχύτητα αντίδρασης σε mol/l.s .

*Αρχικά η  $[\Gamma]_0$  θα είναι μηδενική ενώ θα αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Το αντίθετο θα συμβαίνει με τις συγκεντρώσεις των αντιδρώντων.*



# Χημική κινητική (3/6)

## ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΧΗΜΙΚΗΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ...



Μεταβολή της συγκέντρωσης των συστατικών A, B και Γ.



# Χημική κινητική (4/6)

## ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΧΗΜΙΚΗΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ...

Η ταχύτητα, διαφέρει ανάλογα με το αντιδρών ή προϊόν ως προς το οποίο θα εκφραστεί. Γενικά όμως για την αντίδραση  $\alpha A + \beta B \rightarrow \gamma \Gamma + \delta \Delta$  ισχύει:

$$u = -\frac{1}{\alpha} \frac{\Delta[A]}{\Delta t} = -\frac{1}{\beta} \frac{\Delta[B]}{\Delta t} = \frac{1}{\gamma} \frac{\Delta[\Gamma]}{\Delta t} = \frac{1}{\delta} \frac{\Delta[\Delta]}{\Delta t}$$

- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ : Στοιχειομετρικοί συντελεστές.

Η ταχύτητα μιας αντίδρασης δεν παραμένει σταθερή με τον χρόνο αφού μεταβάλλεται συνεχώς η συγκέντρωση τόσο των αντιδρώντων όσο και των προϊόντων. Η στιγμιαία ταχύτητα:

$$u_{\text{στιγμιαία}} = -\frac{1}{\alpha} \frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{\beta} \frac{d[B]}{dt} = \frac{1}{\gamma} \frac{d[\Gamma]}{dt} = \frac{1}{\delta} \frac{d[\Delta]}{dt}$$

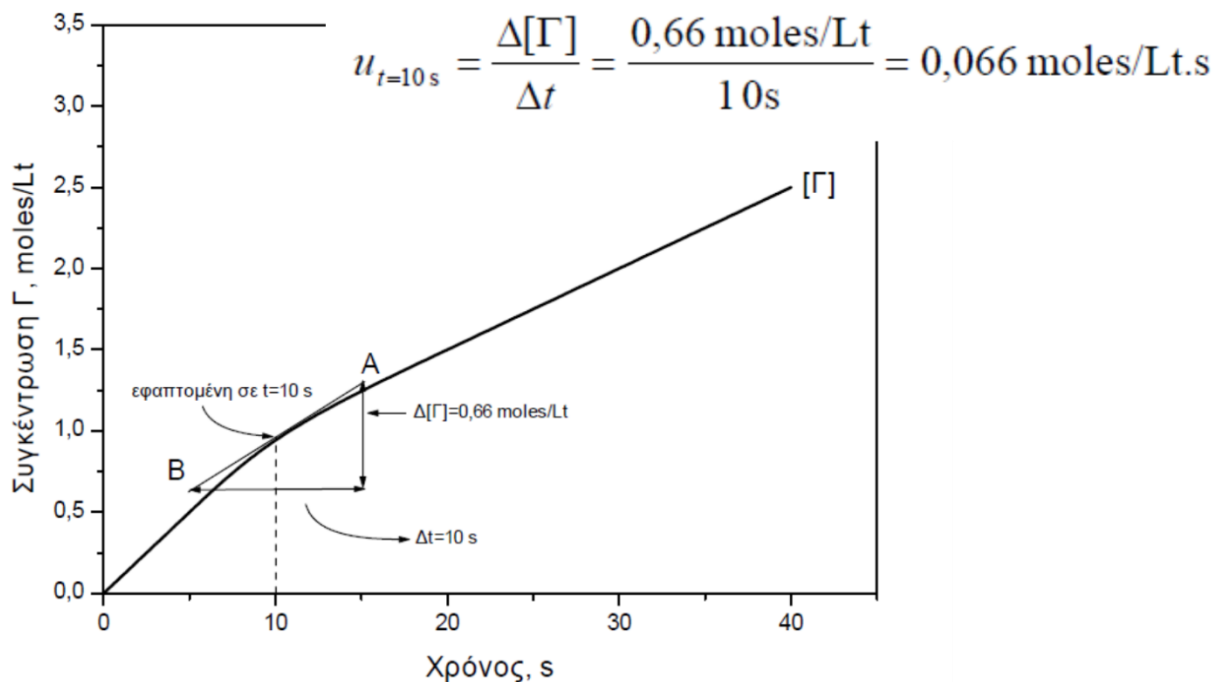




# Χημική κινητική (5/6)

## ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΧΗΜΙΚΗΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ...

- Έστω ότι θέλουμε να υπολογίσουμε την στιγμιαία ταχύτητα για  $t = 10 \text{ sec}$  της αντίδρασης  $2A + B \rightarrow \Gamma$ .



# Χημική κινητική (6/6)

---

*... Παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα (ρυθμό):*

- Η συγκέντρωση των αντιδρώντων.
- Η θερμοκρασία.
- Η παρουσία καταλύτη.
- Η πίεση.
- Η ακτινοβολία.



# Επίδραση της Συγκέντρωσης (1/6)

Για την γενική αντίδραση  $\alpha A + \beta B \rightarrow \gamma \Gamma + \delta \Delta$ , η έκφραση που χρησιμοποιείται για να αποτυπώσει την εξάρτηση του ρυθμού από τις συγκεντρώσεις είναι ο **νόμος της ταχύτητας**:

$$u = k[A]^m[B]^n$$

- $k$ : σταθερά ταχύτητας.
- $m, n$ : μερικές τάξεις της αντίδρασης.
- $m + n$ : ολική τάξη αντίδρασης.

• Έστω η αντίδραση:  $2\text{NO} (\text{g}) + 2 \text{H}_2 (\text{g}) \rightarrow \text{N}_2 (\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O} (\text{g})$

• Ρυθμός αντίδρασης:  $u = k[\text{NO}]^2[\text{H}_2]$  *Γιατί υπάρχει διαφορά ;;;*

Οι τάξεις των αντιδράσεων μπορεί να είναι ακέραιοι, κλασματικοί αριθμοί, ενώ μπορεί να παίρνουν και μηδενικές ή αρνητικές τιμές.



# Παράδειγμα 13.1

- Με βάση τα πειραματικά δεδομένα του παρακάτω πίνακα, που αναφέρονται στην αντίδραση  $3A + B \rightarrow 2\Gamma$  να προσδιοριστεί η έκφραση του νόμου της ταχύτητας για την εν λόγω αντίδραση. Ο νόμος της ταχύτητας θα είναι της μορφής:  $u = k [A]^m [B]^n$ .

Πείραμα	Αρχική συγκέντρωση A, moles/Lt	Αρχική συγκέντρωση B, moles/Lt	Αρχική ταχύτητα αντίδρασης, moles/Lt·s
1 <sup>ο</sup>	2,0	2,0	$u_1 = 2 \times 10^{-3}$
2 <sup>ο</sup>	4,0	2,0	$u_2 = 8 \times 10^{-3}$
3 <sup>ο</sup>	4,0	4,0	$u_3 = 16 \times 10^{-3}$



# Επίδραση της Συγκέντρωσης (2/6)

Ανάλογα με την ολική τάξη της αντίδρασης ο νόμος της ταχύτητας μπορεί να πάρει τις κάτωθι μορφές:

- 1<sup>ης</sup> τάξης:  $u = k[A]$
- 2<sup>ης</sup> τάξης:  $u = k[A][B]$  ή  $u = k[A]^2$
- 3<sup>ης</sup> τάξης:  $u = k[A][B][\Gamma]$  ή  $u = k[A]^2[B]$  ή  $u = k[A]^3$
- 0<sup>ης</sup> τάξης:  $u = k$



# Επίδραση της Συγκέντρωσης (3/6)

---

- Οι ταχύτητες των περισσοτέρων αντιδράσεων αυξάνονται με αύξηση της θερμοκρασίας. Προσεγγιστικά, αύξηση της θερμοκρασίας κατά  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , προκαλεί διπλασιασμό στην ταχύτητα.
- **Θεωρία Συγκρούσεων:** Για να πραγματοποιηθεί μια αντίδραση είναι απαραίτητο τα αντιδρώντα μόρια να συγκρουστούν μεταξύ τους. Η σύγκρουση αυτή θα οδηγήσει σε προϊόντα (αποτελεσματικές) μόνο εάν η ενέργεια των μορίων είναι αρκετά μεγάλη και μόνο εάν τα μόρια αυτά έχουν τον κατάλληλο προσανατολισμό.
- Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται προκειμένου η σύγκρουση δυο μορίων να είναι αποτελεσματική, να οδηγήσει δηλαδή σε αντίδραση, ονομάζεται **Ενέργεια Ενεργοποίησης**.



# Επίδραση της Συγκέντρωσης (4/6)

---

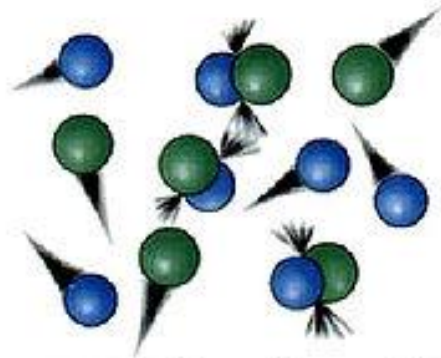
- Εάν αυξηθεί η **συγκέντρωση** ενός συστατικού, αυξάνεται ο αριθμός των μορίων που συγκρούονται με αποτέλεσμα να παρατηρείται αύξηση στην ταχύτητα αντίδρασης.
- Εάν αυξηθεί η **θερμοκρασία** των μορίων, αυξάνεται σημαντικά η κινητική ενέργεια των μορίων με αποτέλεσμα να αυξάνεται και ο αριθμός των συγκρούσεων.

***Αύξηση του αριθμού των συγκρούσεων, οδηγεί σε αυξημένη πιθανότητα αντίδρασης και σε υψηλότερες ταχύτητες αντίδρασης.***

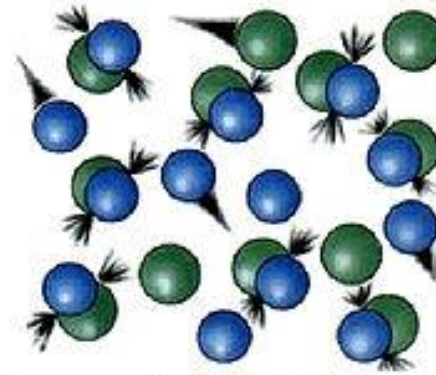
- ***Θεωρία Μεταβατικής Κατάστασης ή Ενεργοποιημένου συμπλόκου.***
- ***Ενεργοποιημένο σύμπλοκο*** εννοούμε μια μεταβατική ασταθή διάταξη ατόμων που σχηματίζεται στιγμιαία κατά την σύγκρουση των μορίων και η οποία κατά την διάσπασή της οδηγεί στον σχηματισμό προϊόντων.



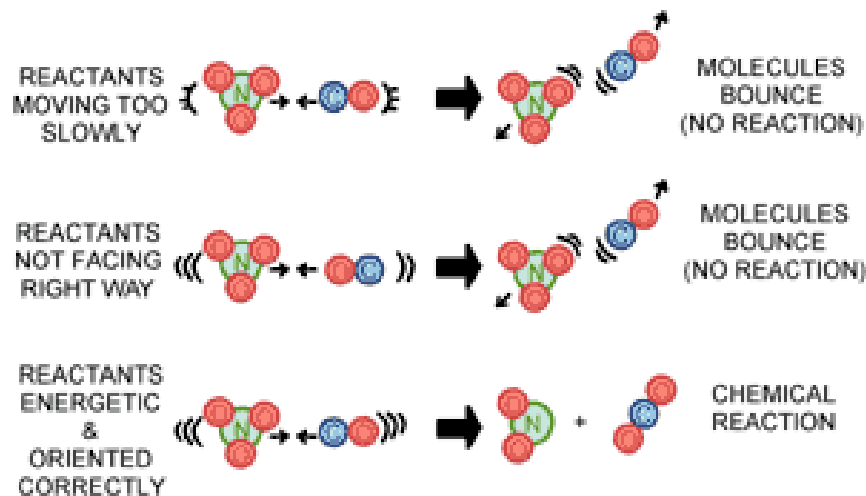
# Επίδραση της Συγκέντρωσης (5/6)



Low concentration = Few collisions

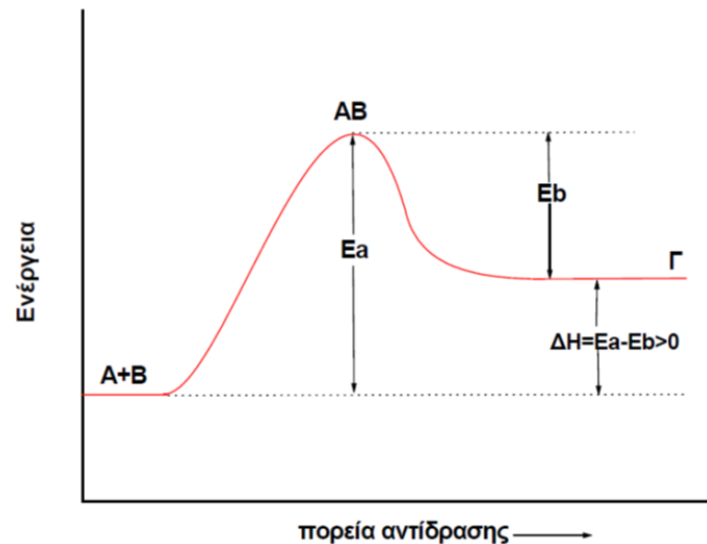
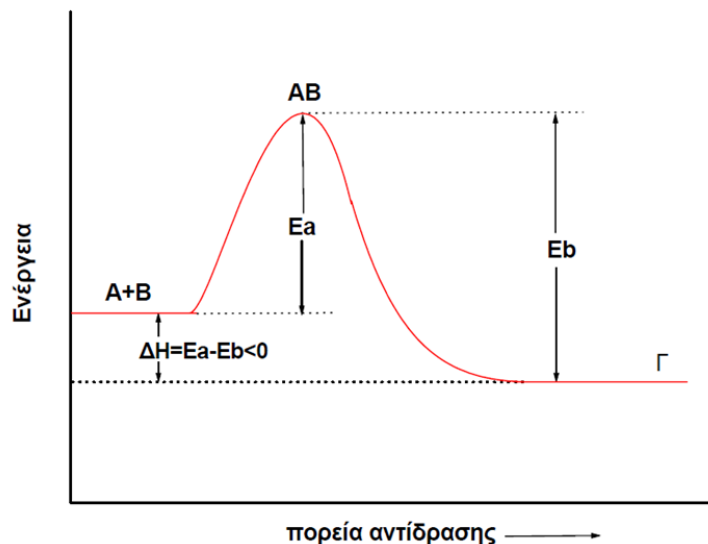


High concentration = More collisions





# Επίδραση της Συγκέντρωσης (6/6)



**Εξώθερμη**

**Ενδόθερμη**

**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ  
ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ  $A+B \rightarrow AB \rightarrow \Gamma$ .**



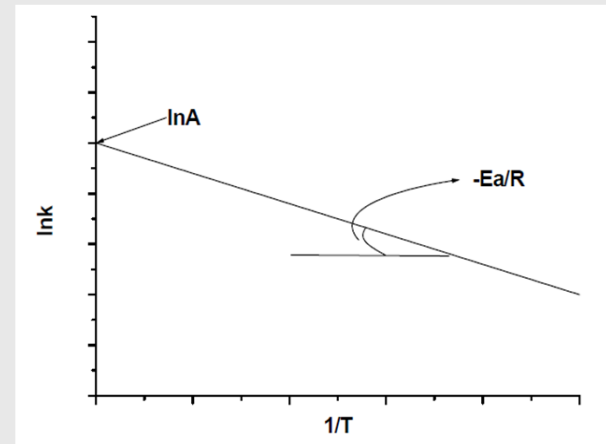
# Εξίσωση Arrhenius ...

Η σταθερά της ταχύτητας ( $k$ ) μιας αντίδρασης συνδέεται με την θερμοκρασία μέσω της σχέσεως (Arrhenius):

$$k = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)$$

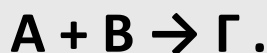
$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{R} \frac{1}{T}$$

- A: Προεκθετικός Παράγοντας.
- $E_a$ : Ενέργεια Ενεργοποίησης.
- R: Παγκόσμια σταθερά των ιδανικών αερίων (8,314 J/mol.K).
- T: Η απόλυτη θερμοκρασία σε Kelvin.

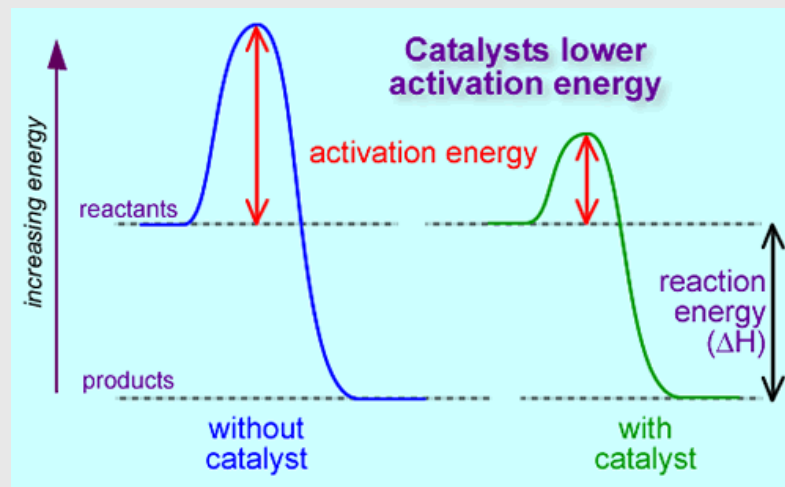
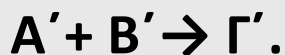


# Επίδραση των καταλυτών

- Οι καταλύτες είναι ουσίες που μεταβάλλουν τον ρυθμό των χημικών αντιδράσεων και παραμένουν ουσιαστικά αναλλοίωτες μετά το πέρας της αντίδρασης, διατηρώντας την μάζα και την χημική τους σύσταση.
- Οι καταλύτες είναι ουσίες που βοηθούν μια αντίδραση να φτάσει γρηγορότερα σε κατάσταση ισορροπίας, παρέχοντας ένα καινούργιο “μονοπάτι” από το οποίο τα αντιδρώντα θα οδηγηθούν γρηγορότερα στα επιθυμητά προϊόντα.



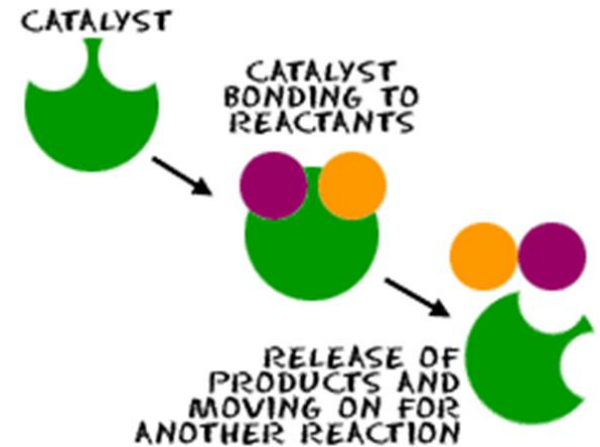
ή



# Ο Καταλύτης

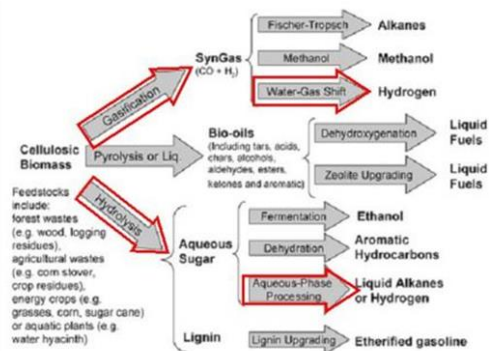
Μειώνει την ενέργεια ενεργοποίησης.

- Αυξάνει την ταχύτητα της αντίδρασης.
- Δεν προκαλεί την αντίδραση, η οποία γίνεται και χωρίς αυτόν αλλά με πολύ μικρή ταχύτητα.
- Δεν επηρεάζει την θέση ισορροπίας.
- Ενεργεί μέσω της επιφάνειάς του χημοροφώντας αντιδρώντα και πιθανόν ενδιάμεσα της αντίδρασης.

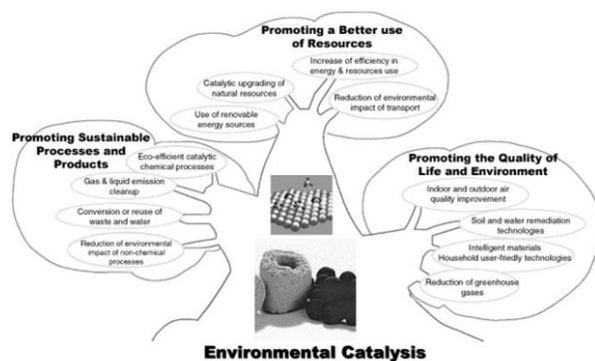


# Εφαρμογές Κατάλυσης

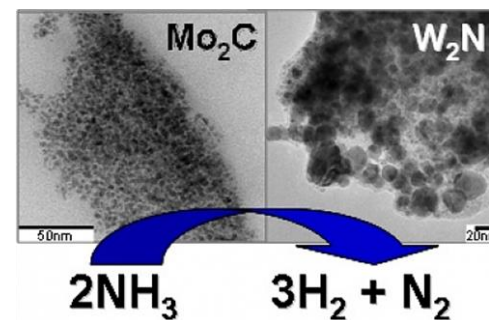
## ΕΝΕΡΓΕΙΑ



## ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ



## ΧΗΜΙΚΑ ΠΡΟΙΟΝΤΑ



# Είδη Χημικών Αντιδράσεων

---

- **ΟΜΟΓΕΝΕΙΣ:** Λαμβάνουν χώρα στην ίδια φάση.
- **ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ:** Λαμβάνουν χώρα σε δύο ή περισσότερες φάσεις (Αέρια Αντιδρώντα-Προϊόντα, Στερεός Καταλύτης).



# Φαινόμενο

## Ετερογενούς Κατάλυσης

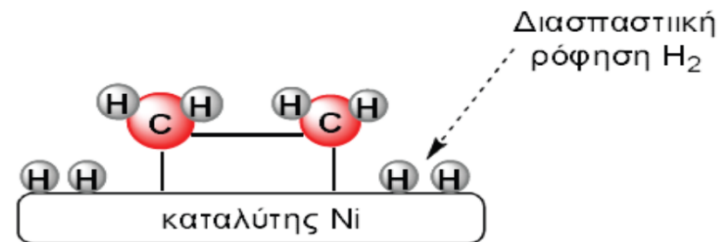
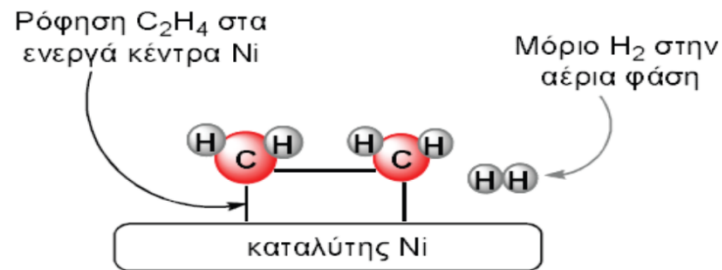
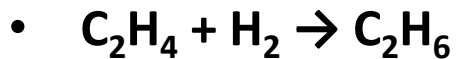
---

- Αναγκαία προϋπόθεση για να εμφανίζει ένα υλικό καταλυτικές ιδιότητες είναι να μπορεί να συγκρατήσει πάνω στην επιφάνεια του τουλάχιστον ένα από τα αντιδρώντα συστατικά του μίγματος.
- Η συγκράτηση αυτή καλείται **ρόφηση** και πραγματοποιείται πάνω σε ορισμένα σημεία της επιφάνειας των καταλυτών τα **ενεργά κέντρα**.
- Στα κέντρα αυτά αναπτύσσονται ισχυροί χημικοί δεσμοί ανάμεσα στα άτομα του καταλύτη και τα μόρια των αντιδρώντων. Αυτή η ισχυρή ρόφηση πάνω στην επιφάνεια μπορεί να οδηγήσει στην διάσπαση των μορίων και την δημιουργία νέων δεσμών στην επιφάνεια του καταλύτη.
- Το επόμενο βήμα, είναι η επιτέλεση μιας σειράς ενδιαμέσων αντιδράσεων πάνω στην επιφάνεια του καταλύτη οι οποίες θα οδηγήσουν τελικά στον σχηματισμό των επιθυμητών προϊόντων.



# Παράδειγμα

## Υδρογόνωση Αιθυλενίου (1/3)



- Βήμα 1<sup>ο</sup>:** Ρόφηση αιθυλενίου στην επιφάνεια του Ni. Ο διπλός δεσμός ανάμεσα στα άτομα άνθρακα σπάει και σχηματίζονται νέοι δεσμοί των ατόμων του άνθρακα με την επιφάνεια του Ni.
- Βήμα 2<sup>ο</sup>:** Τα μόρια  $H_2$  ροφόνται διασπαστικά πάνω στην επιφάνεια του Ni.

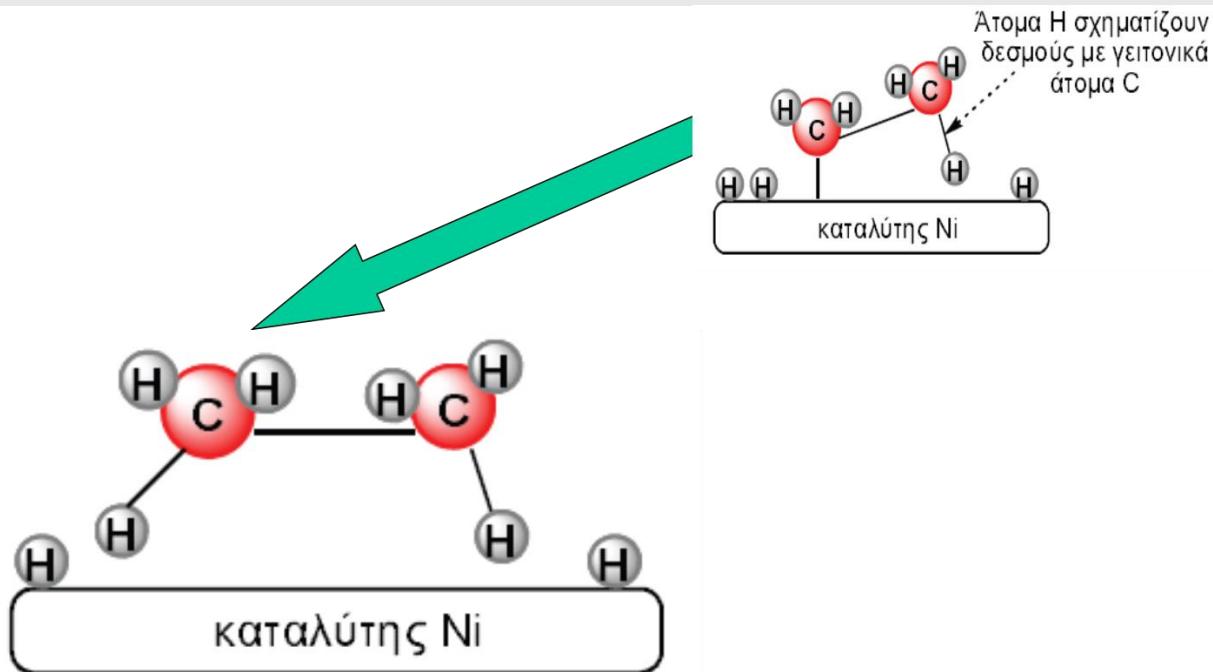




# Παράδειγμα

## Υδρογόνωση Αιθυλενίου (2/3)

- $C_2H_4 + H_2 \rightarrow C_2H_6$
- **Βήμα 3<sup>ο</sup>**: Εάν ένα άτομο H βρεθεί κοντά σε δεσμό C-Ni, τότε τα άτομα αυτά σχηματίζουν δεσμούς με τα άτομα του άνθρακα. Το ίδιο συμβαίνει και με το άλλο άτομο άνθρακα το οποίο σχηματίζει δεσμό με γειτονικό άτομο H.

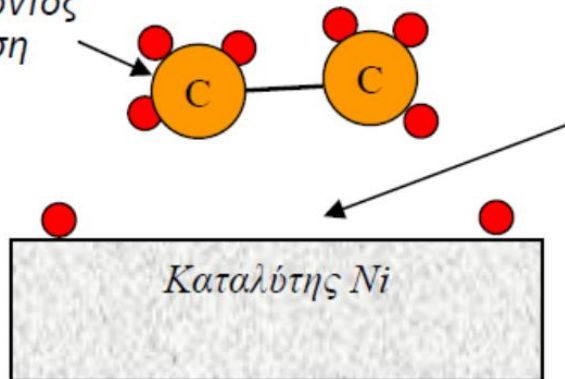


# Παράδειγμα

## Υδρογόνωση Αιθυλενίου (3/3)

- $C_2H_4 + H_2 \rightarrow C_2H_6$
- **Βήμα 4<sup>ο</sup>:** Το τελικό αποτέλεσμα είναι ο σχηματισμός της ένωσης  $C_2H_6$  και η απελευθέρωση των ενεργών κέντρων τα οποία είναι ξανά έτοιμα να ροφήσουν νέα μόρια αντιδρώντος και να συνεχιστεί έτσι η αντίδραση.

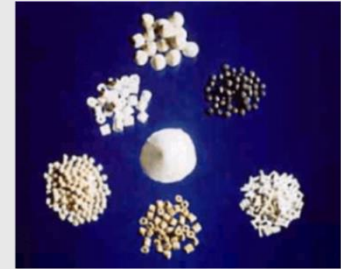
Σχηματισμός προϊόντος  
( $C_2H_6$ ) στην αέρια φάση



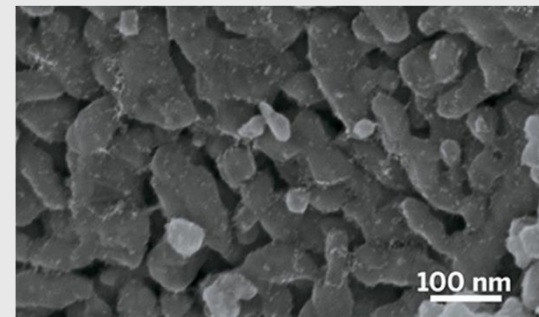
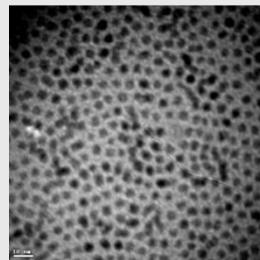
Ελευθέρως ενεργά κέντρα  
διαθέσιμα για ρόφηση  
νέων μορίων

# Καταλύτες

- Οι καταλύτες αποτελούνται από τον **φορέα** και την **ενεργό φάση**.

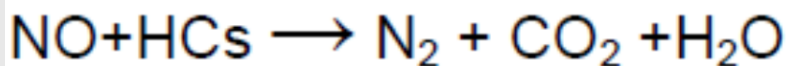


- Ο Φορέας είναι ένα πορώδες υλικό με μεγάλη ειδική επιφάνεια ( $m^2/gr$ ), πάνω στον οποίον βρίσκεται διεσπαρμένο το ενεργό μέταλλο (π.χ.  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $ZrO_2$ ).
- Την ενεργό φάση η οποία είναι συνήθως κάποιο ευγενές μέταλλο ή μετάπτωσης (Pt, Pd, Rh, Ni, κ.α.) πάνω στην οποία επιτελείται η ρόφηση των αντιδρώντων ειδών.

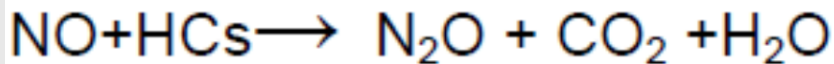


# Χαρακτηριστικά Καταλυτών

- Η **καταλυτική ενεργότητα**, αναφέρεται στο κατά πόσο μπορεί ένας καταλύτης να επηρεάσει τον ρυθμό της αντίδρασης (moles /s ανά μονάδα μάζας του καταλύτη ή ανά ενεργό κέντρο του καταλύτη).
- Η **εκλεκτικότητα** ενός καταλύτη αναφέρεται στην ικανότητα του να ευνοεί την παραγωγή ενός συγκεκριμένου προϊόντος όταν λαμβάνουν χώρα πολλές παράλληλες αντιδράσεις που οδηγούν στον σχηματισμό διαφορετικών προϊόντων.



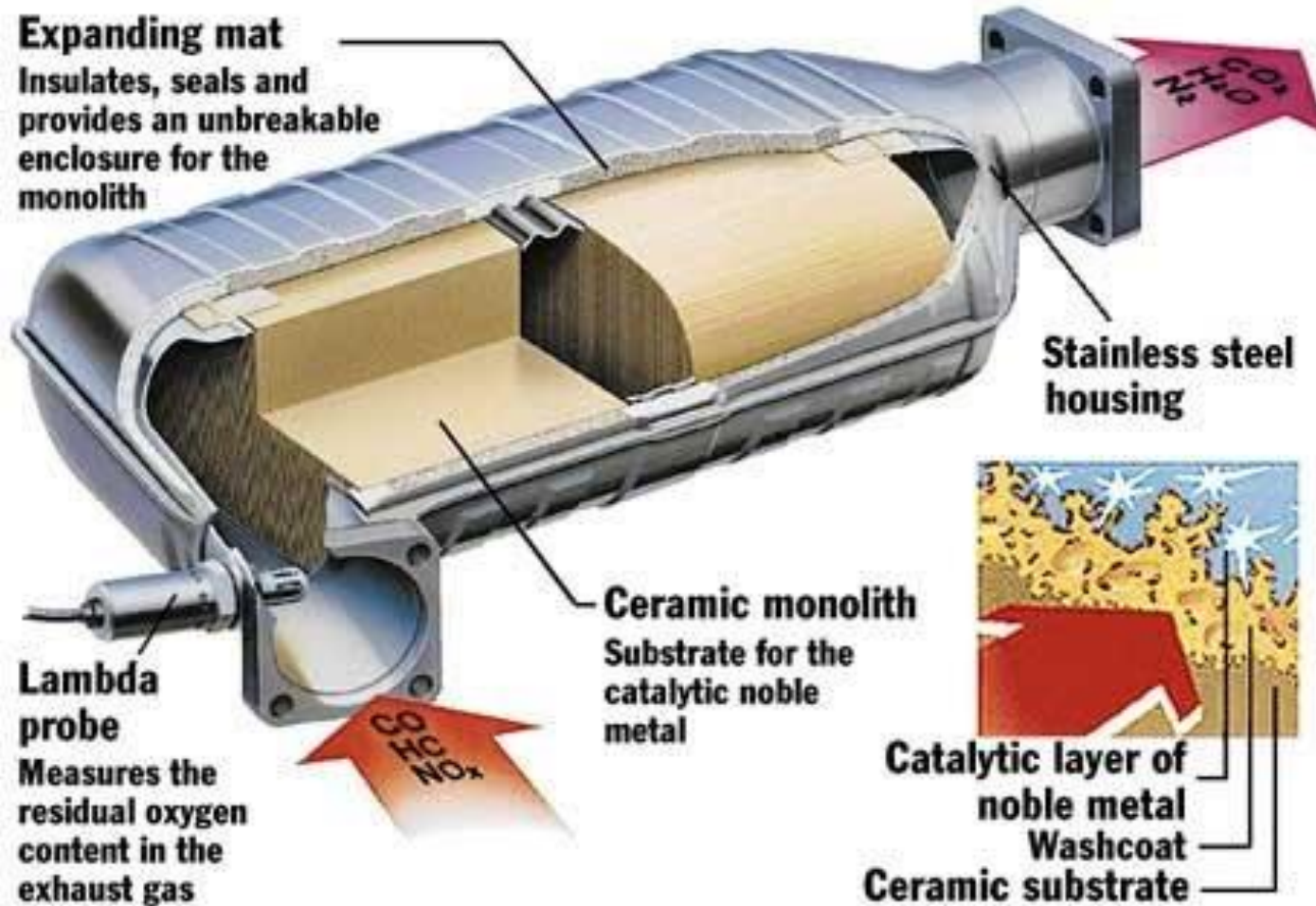
$$S_{\text{N}_2}(\%) = \frac{r_{\text{N}_2}}{r_{\text{N}_2} + r_{\text{N}_2\text{O}}} \times 100$$



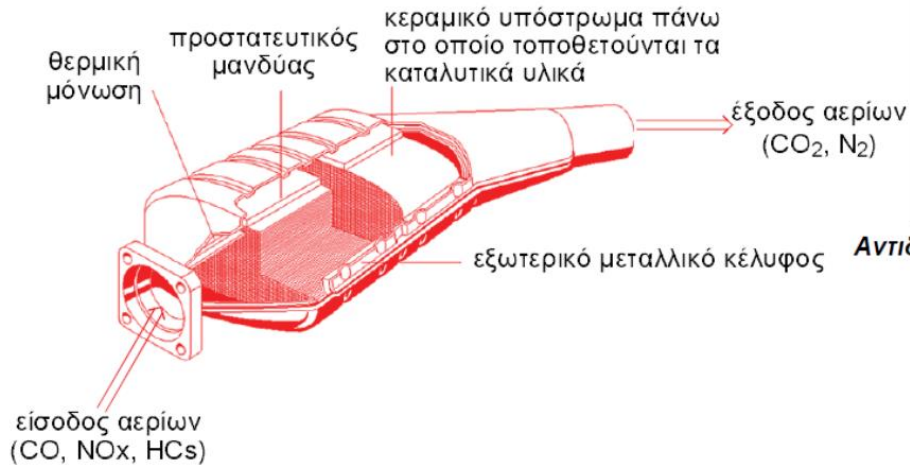
- Προωθητές (Δομής, ηλεκτρονική κατάσταση).
- Δηλητηρίαση (προσμίξεις).



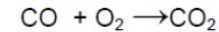
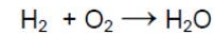
# Καταλυτικός Μετατροπέας (1/2)



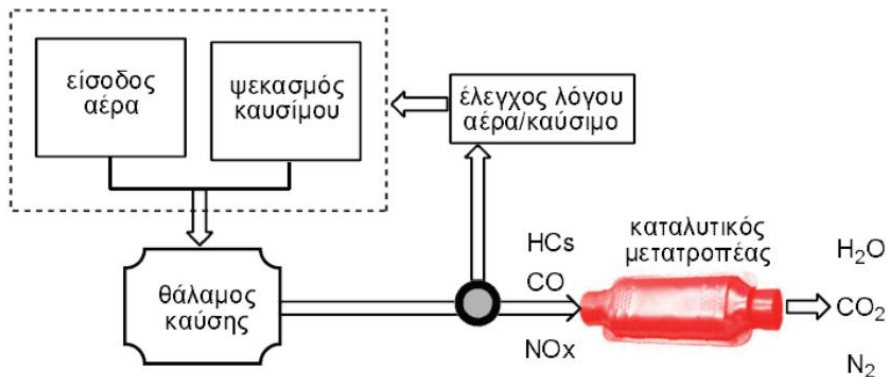
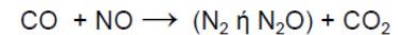
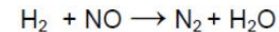
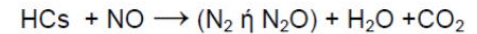
# Καταλυτικός Μετατροπέας (2/2)



## Αντιδράσεις Οξείδωσης



## Αντιδράσεις Αναγωγής



---

# Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



# Σημείωμα Αναφοράς

---

- Copyright Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Μαρνέλλος Γεώργιος. «Χημεία». Έκδοση: 1.0. Κοζάνη 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: [https:// eclass.uowm.gr/courses/MECH100/](https://eclass.uowm.gr/courses/MECH100/)





# Σημείωμα Αδειοδότησης

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



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

Ως Μη Εμπορική ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

---

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

## **Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες**

- Γενική Χημεία. Θεωρία & Εφαρμογές, Μ.Ι. Κονσολάκης, Εκδόσεις ΑΕΝΑΟΣ, 2008



# Διατήρηση Σημειωμάτων

---

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

