



Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

---

# Χημεία

## Ενότητα 17: Οξειδοαναγωγή & ηλεκτροχημεία

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

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών



Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

# 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

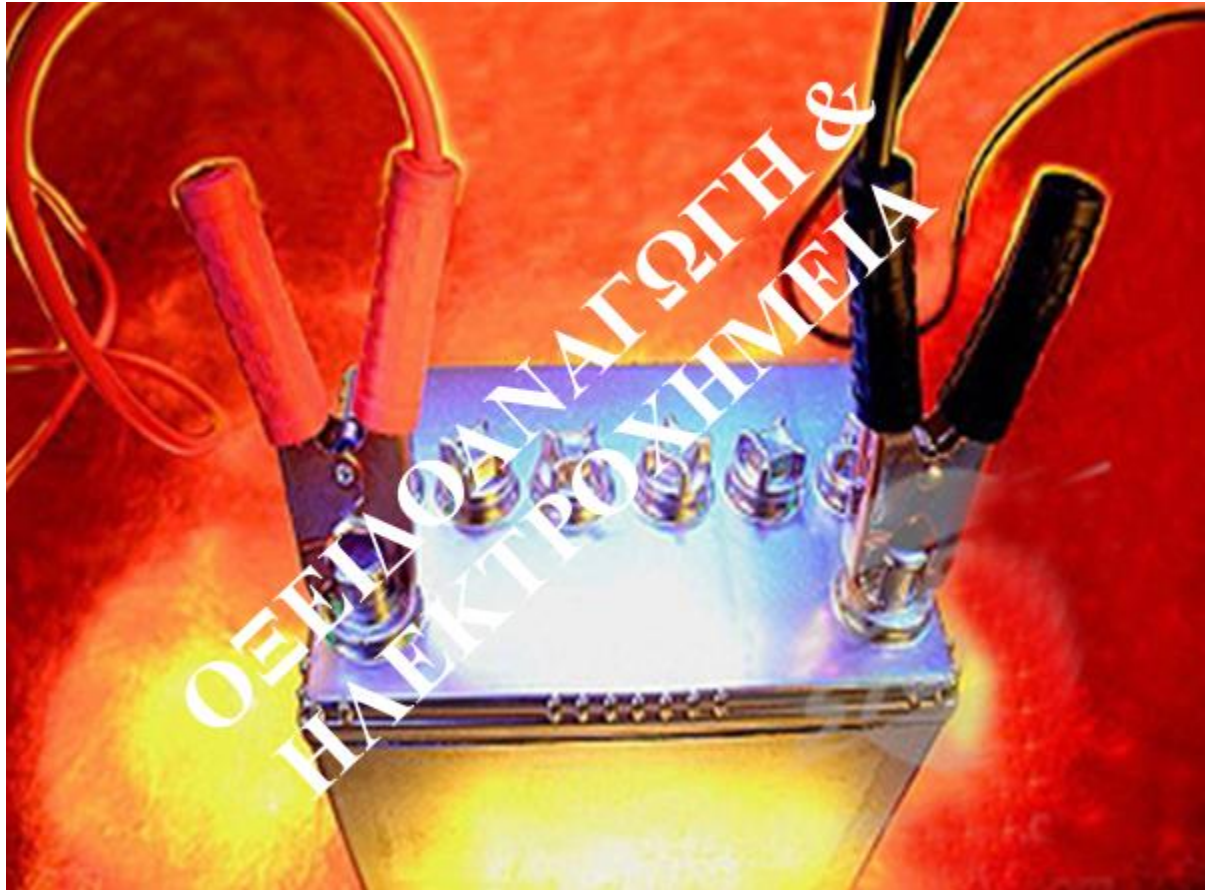


ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



# Κεφάλαιο 17<sup>ο</sup>

---



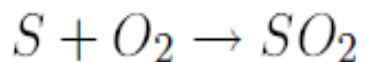
# Εισαγωγή

- Τα περισσότερα χημικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στον ανθρώπινο οργανισμό και στο περιβάλλον βασίζονται σε χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιείται μεταφορά ηλεκτρονίων →

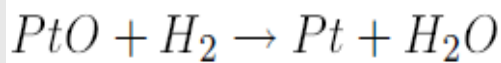
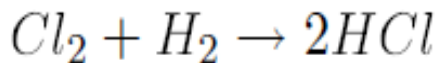
## Αντιδράσεις Οξειδοαναγωγής.

**Πρδ: Καύση/αναπνοή σε ζώντες οργανισμούς, διάβρωση μετάλλων  
Οξείδωση και Αναγωγή ... (Αρχικοί Ορισμοί).**

**Οξείδωση** ορίζεται η προσθήκη οξυγόνου σε μία ουσία ή η αφαίρεση υδρογόνου απ' αυτή.

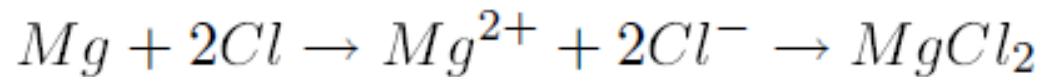


**Αναγωγή** ορίζεται η απομάκρυνση οξυγόνου από μία ουσία ή η προσθήκη υδρογόνου σε αυτή.



# Οξείδωση και Αναγωγή ... (Μεταγενέστεροι Ορισμοί)

**Οξείδωση** ορίζεται η αποβολή ηλεκτρονίων, ενώ ως Αναγωγή η πρόσληψη ηλεκτρονίων.



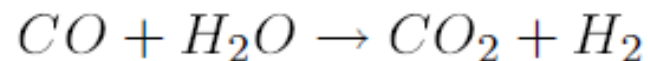
Δεν είναι απαραίτητη η μεταφορά οξυγόνου ή υδρογόνου αλλά η ύπαρξη ηλεκτροθετικών και ηλεκτροαρνητικών ατόμων τα οποία θα έχουν τάση να αποβάλλουν ή να προσλαμβάνουν ηλεκτρόνια.

**Το Mg οξειδώνεται σε  $Mg^{+2}$  αποβάλλοντας 2 ηλεκτρόνια ενώ το Cl ανάγεται σε  $Cl^{-}$  προσλαμβάνοντας 1 ηλεκτρόνιο.**

Οι διεργασίες οξείδωσης και αναγωγής λαμβάνουν χώρα παράλληλα και η συνολική διεργασία χαρακτηρίζεται ως

**αντίδραση οξειδοαναγωγής.**

Τι γίνεται με αυτή την αντίδραση ;



# Οξείδωση και Αναγωγή ... (Ορισμός)

Ως **Οξείδωση** ορίζεται η αντίδραση στην οποία παρατηρείται **αύξηση του αριθμού οξείδωσης** ενός στοιχείου, ενώ ως **Αναγωγή** η αντίδραση κατά την οποία **ο αριθμός οξείδωσης ενός στοιχείου μειώνεται**.



*Σε μία ομοιοπολική ένωση ο αριθμός οξείδωσης ορίζεται ως το φαινομενικό φορτίο που θα αποκτησεί το άτομο εάν τα κοινά ζεύγη ηλεκτρονίων μετατοπιστούν προς το πλέον ηλεκτραρνητικό άτομο. (π.χ. HCl όπου Cl -1 και H +1).*

*Σε μία ιοντική ένωση ο αριθμός οξείδωσης συμπίπτει με το φορτίο των ιόντων (π.χ. NaCl όπου Na +1 και Cl -1).*



# Κανόνες για τον Προσδιορισμό του ΑΟ (1/2)

---

1. Το άθροισμα των Αριθμών Οξειδωσης (Α.Ο.) όλων των ατόμων μιας ουδέτερης ένωσης ισούται με μηδέν. Εάν πρόκειται για ιόν τότε το άθροισμα των Α.Ο. ισούται με το φορτίο του ιόντος. Στο υδροχλώριο (HCl) το άθροισμα των Α.Ο. του H και του Cl ισούται με μηδέν, ενώ στο θειικό ιόν ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) το άθροισμα των Α.Ο. όλων των ατόμων ισούται με - 2.
2. Τα άτομα όλων των στοιχείων που βρίσκονται σε ελεύθερη κατάσταση (π.χ.  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ , Na, κλπ.) έχουν Α.Ο. ίσο με μηδέν.
3. Τα μονοατομικά ιόντα (π.χ.  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ , κλπ.) έχουν Α.Ο. ίσο με το φορτίο του ιόντος.
4. Ο αριθμός οξειδωσης του H είναι +1 στην περίπτωση που αυτό ενώνεται με αμέταλλα (π.χ. HCl, HI, κλπ.) και -1 όταν ενώνεται με μέταλλα (π.χ. NaH, LiH,  $\text{CaH}_2$ , κλπ.).





# Κανόνες για τον Προσδιορισμό του ΑΟ (2/2)

---

5. Ο αριθμός οξείδωσης του Ο είναι - 2. Εξαίρεση αποτελεί η ένωση  $F_2O$  στην οποία έχει αριθμό οξείδωσης +2 καθώς και τα υπεροξείδια (π.χ.  $H_2O_2$ ) στα οποία έχει Α.Ο. - 1.
6. Ο αριθμός οξείδωσης του F είναι - 1.
7. Τα αλκάλια στις ενώσεις τους έχουν Α.Ο. +1 και οι αλκαλικές γαίες + 2.
8. Τα στοιχεία βόριο (B) και αργίλιο (Al) έχουν συνήθως Α.Ο. + 3.



# Παράδειγμα 17.1

---

Να βρεθεί ο Α.Ο. του άνθρακα (C) στις παρακάτω ενώσεις: (a)  $\text{CH}_4$ , (b)  $\text{CH}_3\text{OH}$ , (c)  $\text{CO}_2$ , και (d)  $\text{C}_2\text{H}_2$ .

## ΛΥΣΗ

Έστω  $x$  ο αριθμός οξείδωσης του C στις παραπάνω ενώσεις. Σύμφωνα με τους κανόνες που αναπτύχθηκαν παραπάνω θα ισχύει για κάθε περίπτωση ξεχωριστά:

(a) Ο Α.Ο. του H είναι +1 (κανόνας 4), οπότε με βάση τον κανόνα (1) προκύπτει ότι  $x + 4 \times (+1) = 0 : x = -4$ .

(b) Σύμφωνα με τους κανόνες 4 και 5 οι Α.Ο. του H και του O θα είναι +1 και -2, αντίστοιχα. Από τον κανόνα (1) προκύπτει ότι  $x + 3 \times (+1) + (-2) + 1 = 0 : x = -2$ .

(c) Ο Α.Ο. του O είναι -2 (κανόνας 5), άρα με βάση τον κανόνα (1) προκύπτει ότι  $x + 2 \times (-2) = 0 : x = +4$ .

(d) Ο Α.Ο. του H είναι +1 (κανόνας 4), οπότε με βάση τον κανόνα (1) προκύπτει ότι  $2 \cdot x + 4 \times (+1) = 0 : x = -2$ .



# Παράδειγμα 17.2

---

Να βρεθεί ο Α.Ο. όλων των ατόμων στις παρακάτω ενώσεις: (a)  $\text{HNO}_3$ , (b)  $\text{SO}_4^{2-}$ , (c)  $\text{CaH}_2$ , (d)  $\text{NH}_4^+$ , και (e)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Σύμφωνα με τους κανόνες που αναπτύχθηκαν παραπάνω θα ισχύει για κάθε περίπτωση ξεχωριστά:

(a) Ο αριθμός οξείδωσης του H είναι + 1 (κανόνας 4), ενώ ο αριθμός οξείδωσης του O είναι - 2 (κανόνας 5). Εάν  $x$  ο αριθμός οξείδωσης του N, τότε σύμφωνα με το κανόνα 1 θα ισχύει ότι  $1 + x + 3 \times (-2) = 0$ :  $x = +5$ .

(b) Ο αριθμός οξείδωσης του O είναι - 2 (κανόνας 5). Εάν  $x$  ο αριθμός οξείδωσης του S, τότε σύμφωνα με το κανόνα 1 θα ισχύει ότι  $x + 4 \times (-2) = -2$ :  $x = +6$ .

(c) Πρόκειται για ένωση του H με μέταλλο, οπότε σύμφωνα με τον κανόνα 4 ο αριθμός οξείδωσης του H θα είναι - 1.

(d) Ο αριθμός οξείδωσης του H είναι + 1 (κανόνας 4). Εάν  $x$  ο αριθμός οξείδωσης του N, τότε σύμφωνα με το κανόνα 1 θα ισχύει ότι  $x + 4 \times (+1) = +1$ :  $x = -3$ .

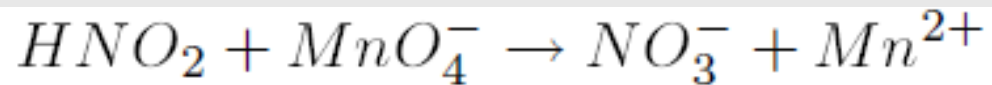
(e) Ο αριθμός οξείδωσης του O είναι - 2 (κανόνας 5). Εάν  $x$  ο αριθμός οξείδωσης του Al, τότε σύμφωνα με το κανόνα 1 θα ισχύει ότι  $2 \cdot x + 3 \times (-2) = 0$ :  $x = +3$ .



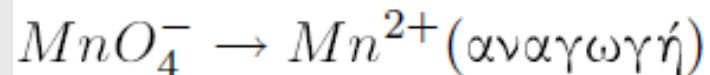
# Ισοστάθμιση Οξειδοαναγωγικών Αντιδράσεων (1/3)

- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν 2 μέθοδοι:

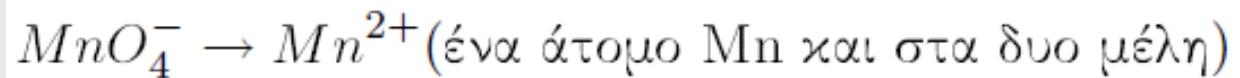
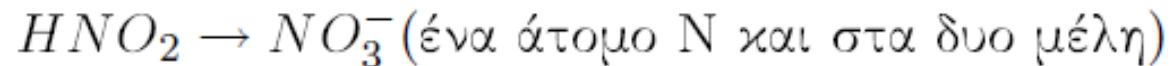
(α) Η μέθοδος των ημιαντιδράσεων, η οποία βασίζεται στο διαχωρισμό της συνολικής αντίδρασης σε δυο ημιαντιδράσεις, μια οξείδωσης και μια αναγωγής.  
(β) Η μέθοδος της μεταβολής του Α.Ο., η οποία βασίζεται στη μεταβολή των Α.Ο. του οξειδωτικού και του αναγωγικού μέσου.



- Η συνολική αντίδραση διαχωρίζεται σε 2 ημιαντιδράσεις:

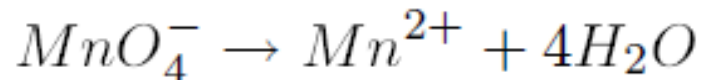
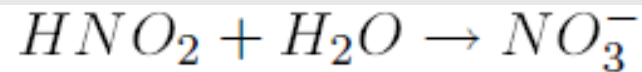


- Σε κάθε ημιαντίδραση γίνεται ισοστάθμιση των ατόμων που μεταβάλλεται ο αριθμός οξείδωσης:

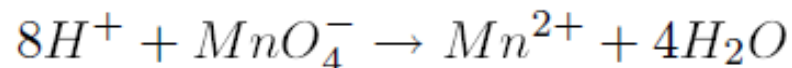
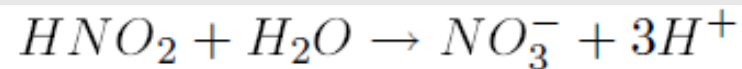


# Ισοστάθμιση Οξειδοαναγωγικών Αντιδράσεων (2/3)

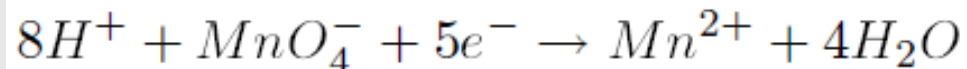
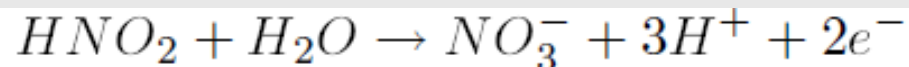
- Σε κάθε ημιαντίδραση ισοσταθμίζουμε τα άτομα οξυγόνου (O), προσθέτοντας μόρια H<sub>2</sub>O στα μέλη των ημιαντιδράσεων που είναι ελλιπή σε άτομα οξυγόνου:



- Ισοσταθμίζουμε τα άτομα υδρογόνου (H), προσθέτοντας ιόντα H<sup>+</sup> στα μέλη των ημιαντιδράσεων που είναι ελλιπή σε άτομα H:

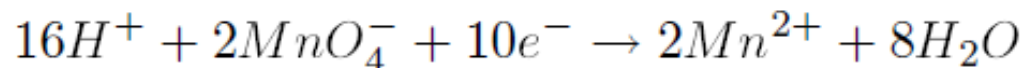
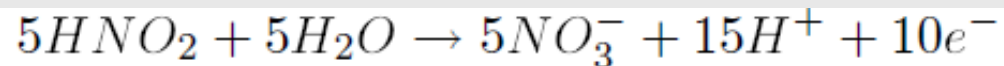


- Σε κάθε ημιαντίδραση γίνεται ισοστάθμιση φορτίων προσθέτοντας ανάλογο αριθμό ηλεκτρονίων όπου απαιτείται:

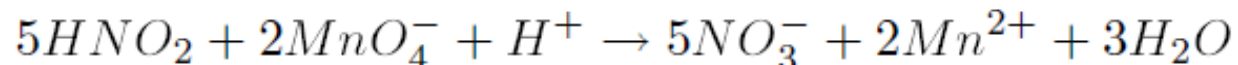
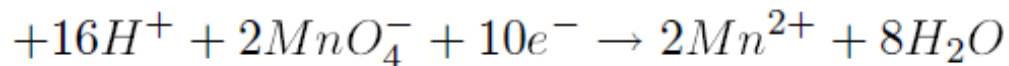
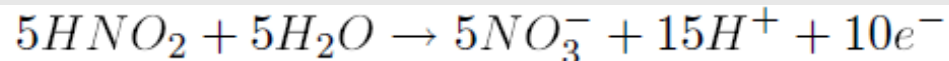


# Ισοστάθμιση Οξειδοαναγωγικών Αντιδράσεων (3/3)

- Πολλαπλασιάζουμε κάθε ημιαντίδραση με τον κατάλληλο συντελεστή, ώστε να προκύψει ο ίδιος αριθμός ηλεκτρονίων και στις 2 ημιαντιδράσεις:



- 7. Προσθέτουμε τις 2 ημιαντιδράσεις απαλείφοντας τους όμοιους όρους:



# Ηλεκτροχημεία

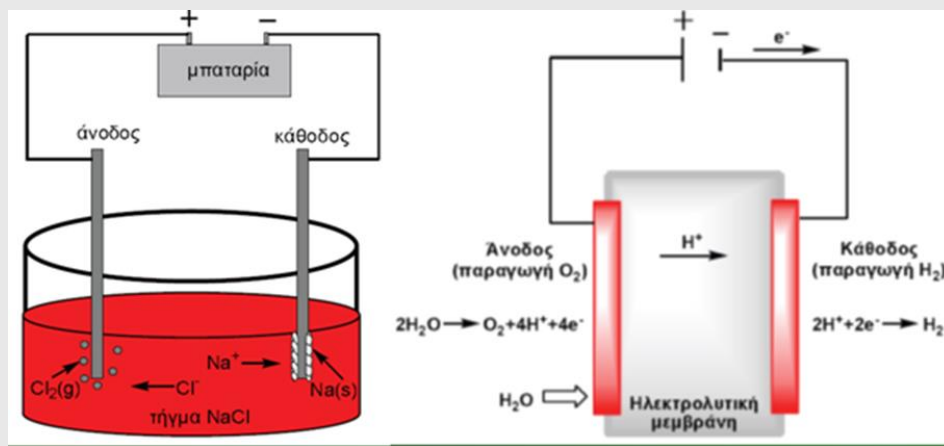
---

- Αν η μεταφορά ηλεκτρονίων πραγματοποιείται όχι άμεσα αλλά μέσω ενός τρίτου σώματος (π.χ. Μεταλλικός αγωγός) τότε η αντίδραση είναι **ηλεκτροχημική**.
- Κατά την ηλεκτρόλυση προκαλείται μια οξειδοαναγωγική αντίδραση με τη βοήθεια εξωτερικού ηλεκτρικού ρεύματος.
- Στην περίπτωση δηλαδή της ηλεκτρόλυσης πραγματοποιείται μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική μέσω κατάλληλων ηλεκτροχημικών στοιχείων, τα οποία ονομάζονται ηλεκτρολυτικά.



# Ηλεκτρόλυση και Ηλεκτρολυτικά Στοιχεία

Μέσω των στοιχείων αυτών μπορεί να πραγματοποιηθεί η εξαγωγή καθαρών μετάλλων από τα μεταλλεύματά τους (π.χ. Al, Ca, Na), ενώ ευρέως διαδεδομένη είναι και η χρήση τους στη βιομηχανία επιμετάλλωσης και για την παραγωγή υδρογόνου.



- Στην κάθοδο:  $2\text{Na}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Na}$
- Στην άνοδο:  $2\text{Cl}^- - 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cl} \rightarrow \text{Cl}_2$

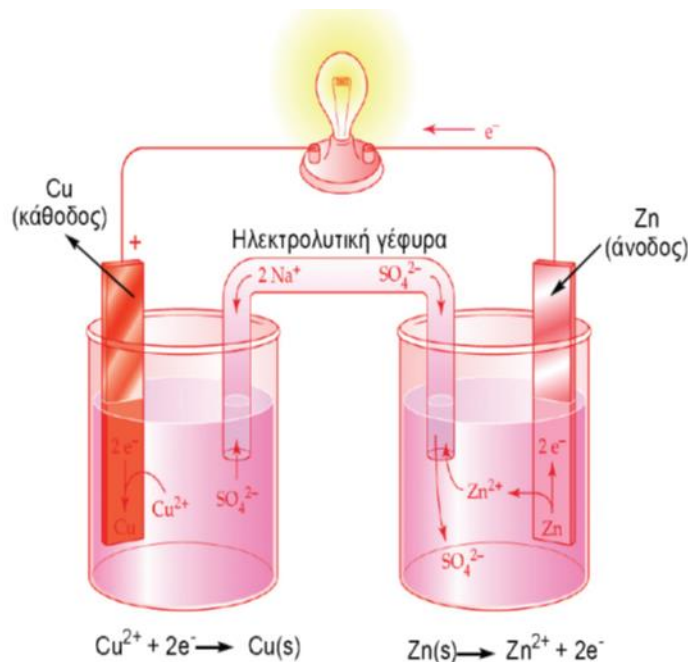




# Γαλβανικά Στοιχεία ... (Στοιχείο Daniel)

Πρόκειται ουσιαστικά για ηλεκτρολυτικά στοιχεία μετατροπής της χημικής ενέργειας (που απελευθερώνεται κατά την πραγματοποίηση των οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων) σε ηλεκτρική.

- Όταν κλείσει το κύκλωμα παρατηρείται ροή  $e^-$  από το ηλεκτρόδιο του Zn προς το ηλεκτρόδιο του Cu.
- Στο ηλεκτρόδιο του Zn ο Zn(s) οξειδώνεται προς ιόντα  $Zn^{2+}$ , με παράλληλη απελευθέρωση  $e^-$ .
- Τα ηλεκτρόνια αυτά, μέσω του εξωτερικού κυκλώματος, καταλήγουν στο ηλεκτρόδιο του Cu, όπου και ανάγουν τα  $Cu^{2+}$  σε Cu(s).



**Γαλβανικό στοιχείο Zn-Cu  
Στοιχείο Daniel**



# Γαλβανικά Στοιχεία (1/4)

Το στοιχείο Daniel παριστάνεται ως εξής:



Η | εκφράζει την διεπιφάνεια στερεής φάσης και διαλύματος, ενώ η || την γέφυρα άλατος που διατηρεί την ηλεκτρική ουδετερότητα.

Η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται στα 2 ηλεκτρόδια ομάζεται ΗΕΔ ή δυναμικό του στοιχείου (E<sub>cell</sub>).

Πρότυπο δυναμικό σε T= 25°C και P= 1 Atm.

Η γνώση της τιμής ενός κανονικού δυναμικού εκφράζει την τάση που έχουν τα αντιδρώντα να μετατραπούν σε προϊόντα.

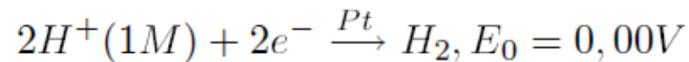


# Γαλβανικά Στοιχεία (2/4)

Επειδή το πρότυπο δυναμικό εκφράζει την τάση τόσο της ημιαντίδρασης αναγωγής όσο και αυτής της οξειδωσης, τότε ισχύει:

$$E_{cell}^0 = |E_{cathode}^0| + |E_{anode}^0|$$

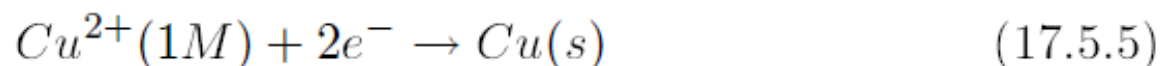
Εάν μας ενδιαφέρει η οξειδωτική ή αναγωγική ισχύ του κάθε σώματος ξεχωριστά, τότε είναι προφανές ότι πρέπει να γνωρίζουμε το πρότυπο δυναμικό του κάθε ημιστοιχείου ξεχωριστά ( $E_{cathode}^0$  και  $E_{anode}^0$ ), και όχι το πρότυπο δυναμικό του στοιχείου ( $E_{cell}^0$ ). Με βάση την παραπάνω σχέση, αυτό μπορεί να επιτευχθεί εάν είναι γνωστό το δυναμικό του ενός εκ των δύο ημιστοιχείων ( $E_{cathode}^0$  ή  $E_{anode}^0$ ) καθώς και το δυναμικό του στοιχείου ( $E_{cell}^0$ ), οπότε μπορεί να βρεθεί το δυναμικό και του άλλου ημιστοιχείου. Όμως, επειδή δεν είναι εφικτό να γνωρίζουμε ταυτόχρονα το δυναμικό του ενός ημιστοιχείου και το συνολικό δυναμικό του στοιχείου, η μόνη λύση είναι να τεθεί αυθαίρετα το δυναμικό ενός ημιστοιχείου ίσο με μηδέν και στη συνέχεια να υπολογίσουμε τα δυναμικά των άλλων ημιστοιχείων συγκρίνοντας τα με αυτό. Ως τέτοιο ημιστοιχείο - ηλεκτρόδιο αναφοράς επιλέχθηκε το πρότυπο ηλεκτρόδιο υδρογόνου:



# Γαλβανικά Στοιχεία (3/4)

---

Έτσι εάν θέλουμε να υπολογίσουμε το πρότυπο δυναμικό για το ημιστοιχείο (ηλεκτρόδιο) του Cu, ή διαφορετικά για την ημιαντίδραση:



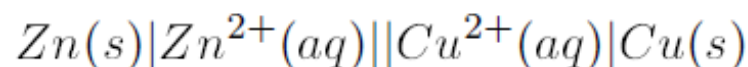
δεν έχουμε παρά να συνδυάσουμε το πρότυπο ηλεκτρόδιο υδρογόνου με αυτό του Cu και να μετρήσουμε το  $E_{cell}^0$ . Η τιμή που προκύπτει είναι 0,34 V, οπότε αφού το  $E^0$  για το ηλεκτρόδιο υδρογόνου είναι μηδέν, το  $E^0$  για το ηλεκτρόδιο του χαλκού θα είναι 0,34 V. Ανάλογα βρίσκουμε ότι το πρότυπο δυναμικό για το ηλεκτρόδιο του Zn (για την ημιαντίδραση δηλαδή  $Zn(s) \rightarrow Zn^{2+} + 2 e^{-}$ ) είναι 0,763 V.



# Γαλβανικά Στοιχεία (4/4)

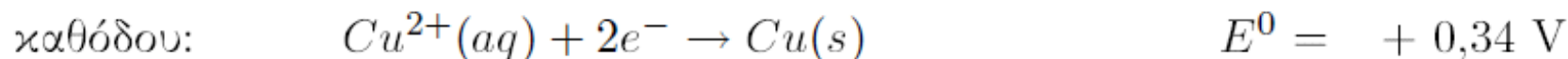
---

Άρα για τις ημιαντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στο στοιχείο

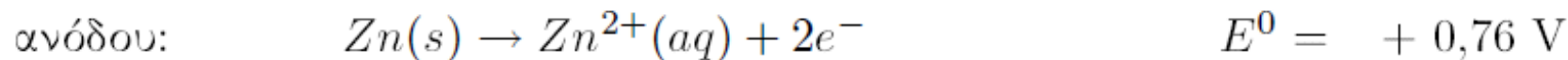


καθώς και για τα αντίστοιχα πρότυπα δυναμικά τους έχουμε:

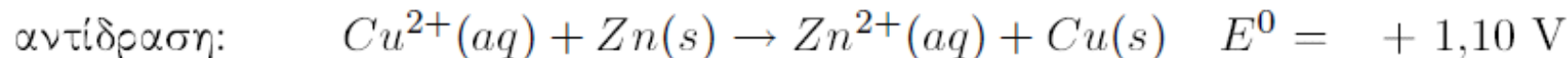
Ημιαντίδραση



Ημιαντίδραση



Συνολική



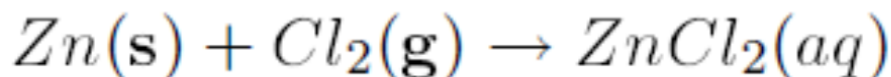
# Πρότυπα δυναμικά αναγωγής στους 25°C

Ημιαντίδραση αναγωγής	$E^0$ [V]
$Li^+ + 1e^- \rightarrow Li$	- 3,05 (ασθενές οξειδωτικό)
$K^+ + 1e^- \rightarrow K$	- 2,93
$Ba^{2+} + 2e^- \rightarrow Ba$	- 2,90
$Ca^{2+} + 2e^- \rightarrow Ca$	- 2,87
$Na^+ + 1e^- \rightarrow Na$	- 2,71
$Mg^{2+} + 2e^- \rightarrow Mg$	- 2,36
$Al^{3+} + 3e^- \rightarrow Al$	- 1,66
$Mn^{2+} + 2e^- \rightarrow Mn$	- 1,18
$Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn$	- 0,76
$Cr^{3+} + 1e^- \rightarrow Cr^{2+}$	- 0,74
$Fe^{2+} + 2e^- \rightarrow Fe$	- 0,44
$Cr^{3+} + 1e^- \rightarrow Cr^{2+}$	- 0,41
$Co^{2+} + 2e^- \rightarrow Co$	- 0,28
$Ni^{2+} + 2e^- \rightarrow Ni$	- 0,25
$Sn^{2+} + 2e^- \rightarrow Sn$	- 0,14
$Pd^{2+} + 2e^- \rightarrow Pd$	- 0,13
$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	0,00 (εξ ορισμού)
$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$	+ 0,34
$I_2 + 2e^- \rightarrow 2I^-$	+ 0,54
$Fe^{3+} + 1e^- \rightarrow Fe^{2+}$	+ 0,77
$Ag^+ + 1e^- \rightarrow Ag$	+ 0,80
$Br_2 + 2e^- \rightarrow 2Br^-$	+ 1,09
$Cl_2 + 2e^- \rightarrow 2Cl^-$	+ 1,36
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- \rightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$	+ 1,51
$Ce^{4+} + 1e^- \rightarrow Ce^{3+}$	+ 1,61
$F_2 + 2e^- \rightarrow 2F^-$	+ 2,87 (ισχυρό οξειδωτικό)

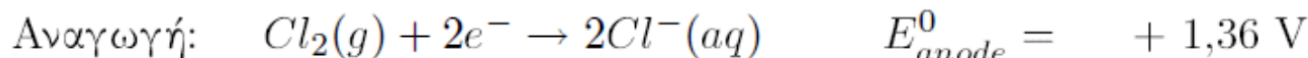
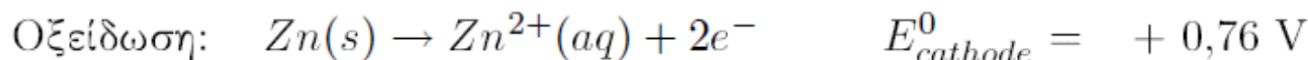


# Παράδειγμα 17.3

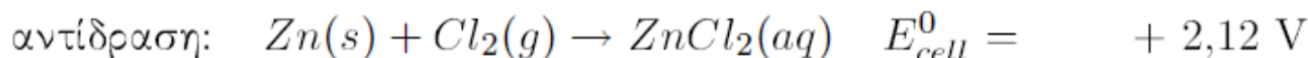
Να υπολογιστεί το  $E_{cell}^0$  σε ένα ηλεκτροχημικό στοιχείο που λαμβάνει χώρα η παρακάτω αντίδραση:



Σύμφωνα με την παραπάνω αντίδραση ο Zn (s) οξειδώνεται, ενώ το Cl<sub>2</sub>(g) ανάγεται. Άρα οι αντίστοιχες ημιαντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στο ηλεκτροχημικό στοιχείο καθώς και τα αντίστοιχα δυναμικά τους  $E^0$  (όπως αυτά προκύπτουν από τον Πίνακα 17.1) είναι:



Συνολική



Να σημειωθεί ότι επειδή το  $E_{cell}^0 > 0$ , η παραπάνω αντίδραση επιτελείται αυθόρμητα κατά τη φορά του βέλους. Αντίθετα, εάν για μια αντίδραση είναι  $E_{cell}^0 < 0$ , αυτό σημαίνει ότι η αντίδραση δεν είναι αυθόρμητη.



# Fuel Cell .... A brief history

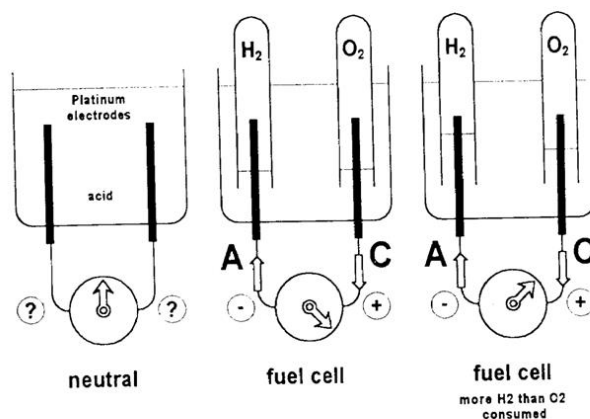
The 1<sup>st</sup> fuel cell was constructed by Sir William Grove in 1839. Before 60's there was no any practical application. However, fuel cell technology was selected instead of nuclear or solar energy to implemented in the Apollo Space Mission.



*W. Grove*

Sir William Robert Grove  
(July 11, 1811 - August 1, 1896)

Photo: The Bridgeman Art Library, London (The Royal Institution, London)



Grove's experiment of 1839  
Schematic based on information contained in [2]

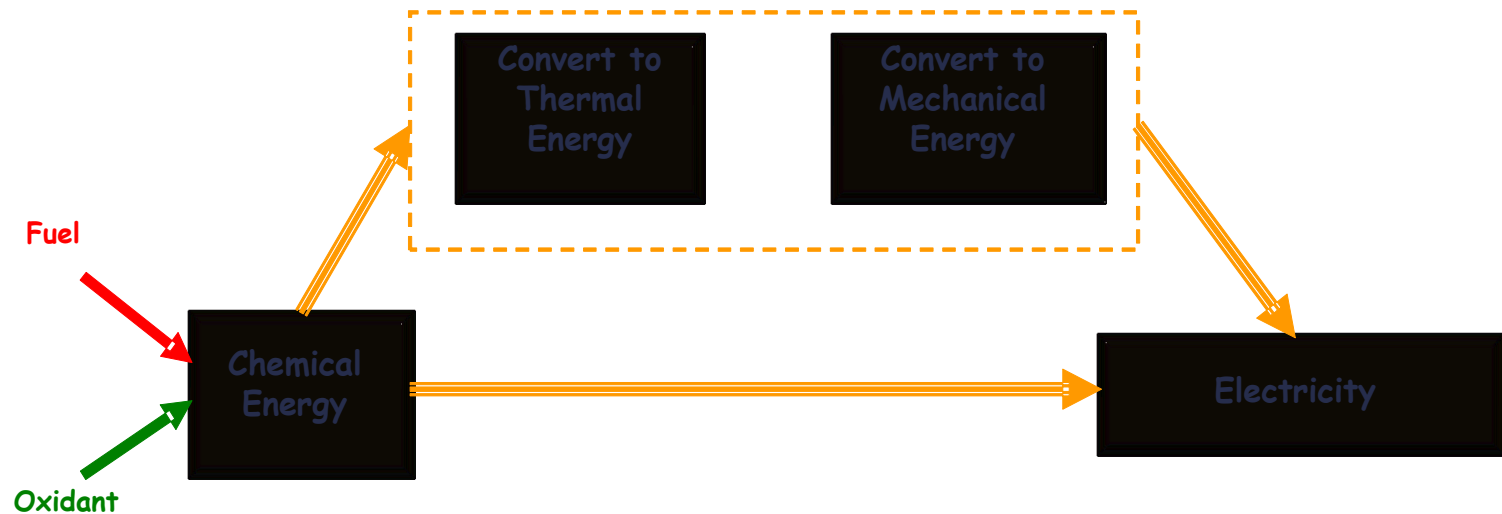




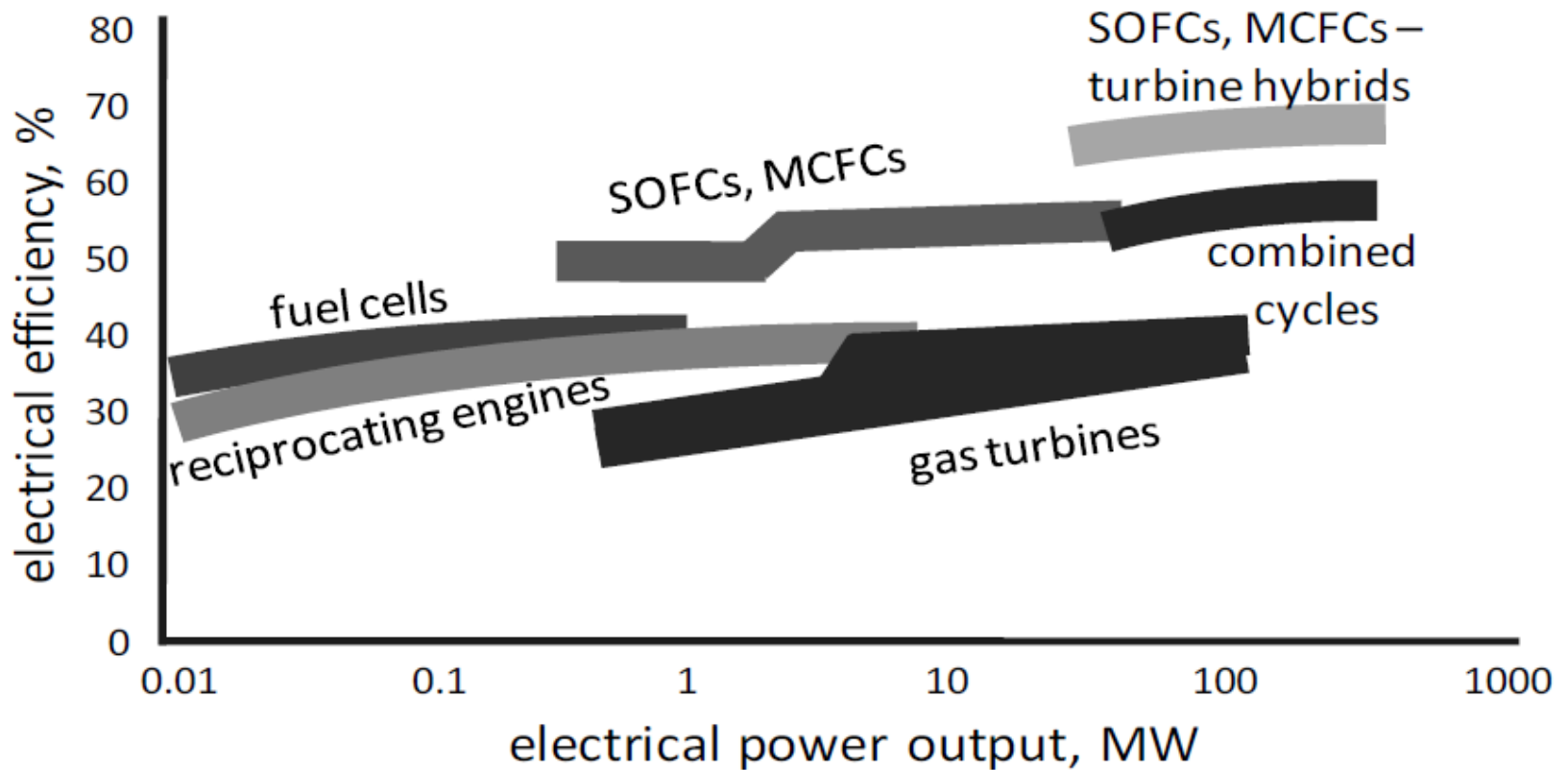
# Fuel Cells vs Thermal Engines

---

Fuel cells are electrochemical devices that directly convert the chemical energy of a fuel to electricity at higher efficiencies compared to conventional thermal engines.



# Comparative Efficiency ...

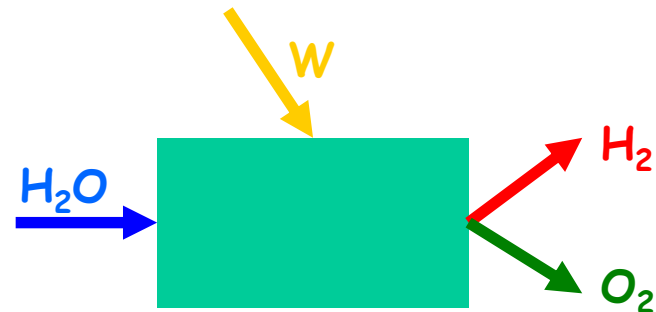
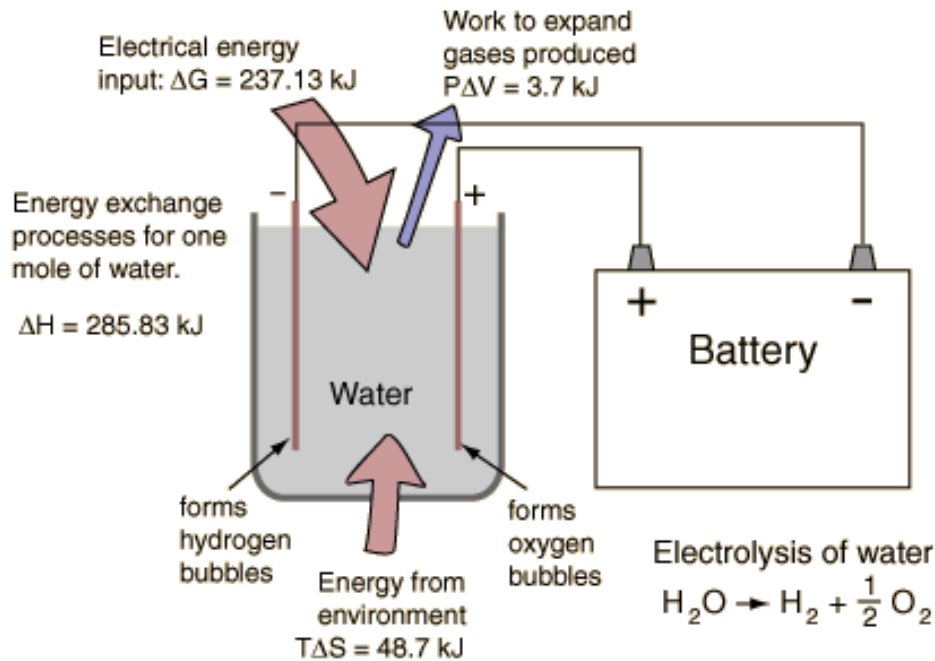


**Figure 3.8.** Comparative efficiency (% LHV) of power generation systems (US DOE, 2002; IEA, 2005)



# Electrolysis

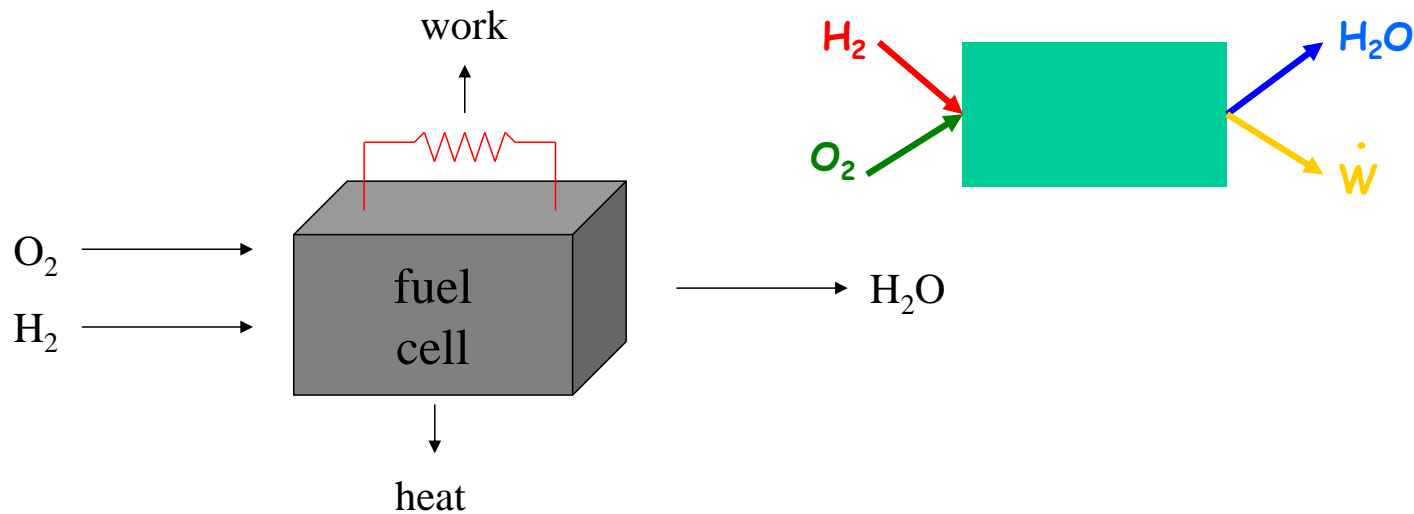
“How is related with Fuel Cells ?”



# Fuel Cell – Operating principle

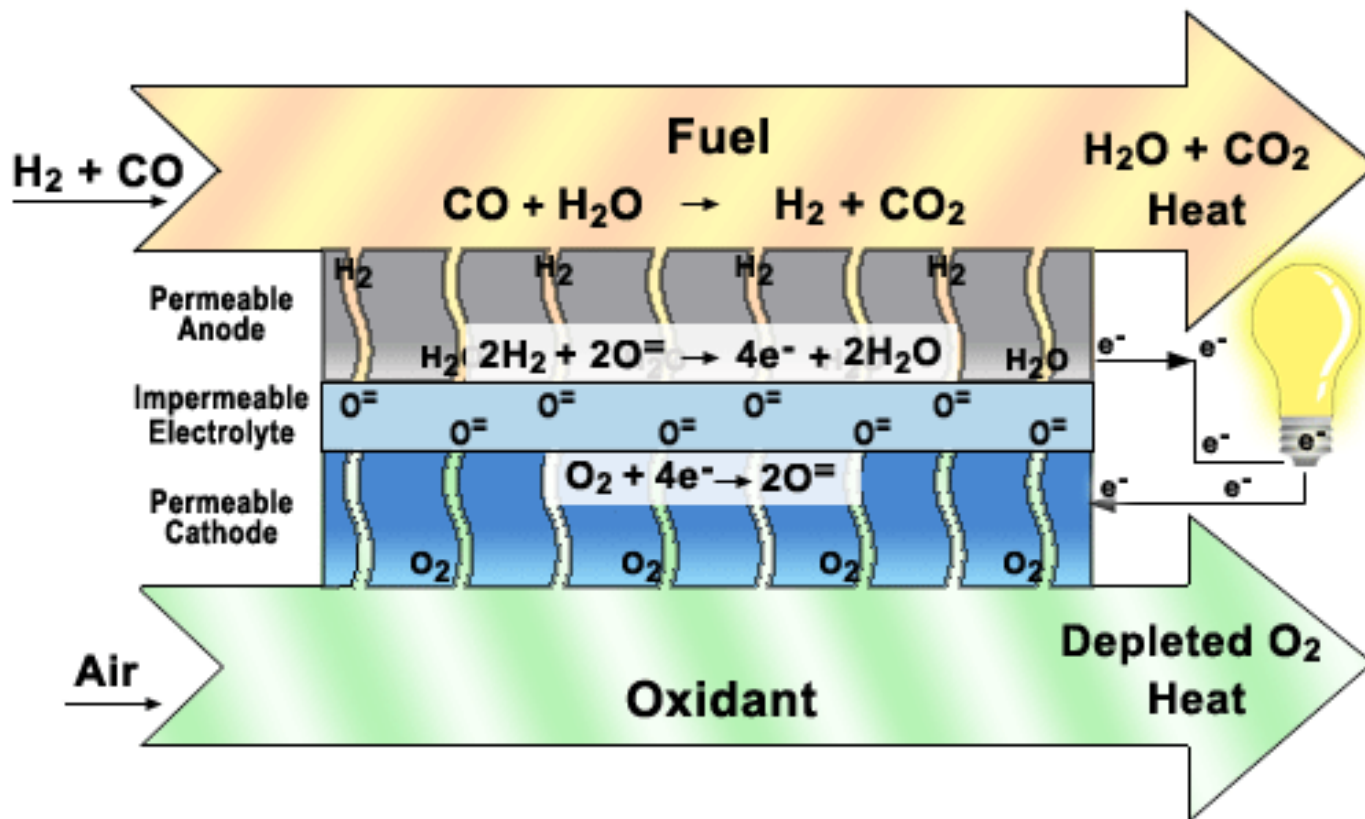
## “Reverse Electrolysis”

The well known electrolysis needs work to proceed. If we reverse electrolysis, work can be produced spontaneously.

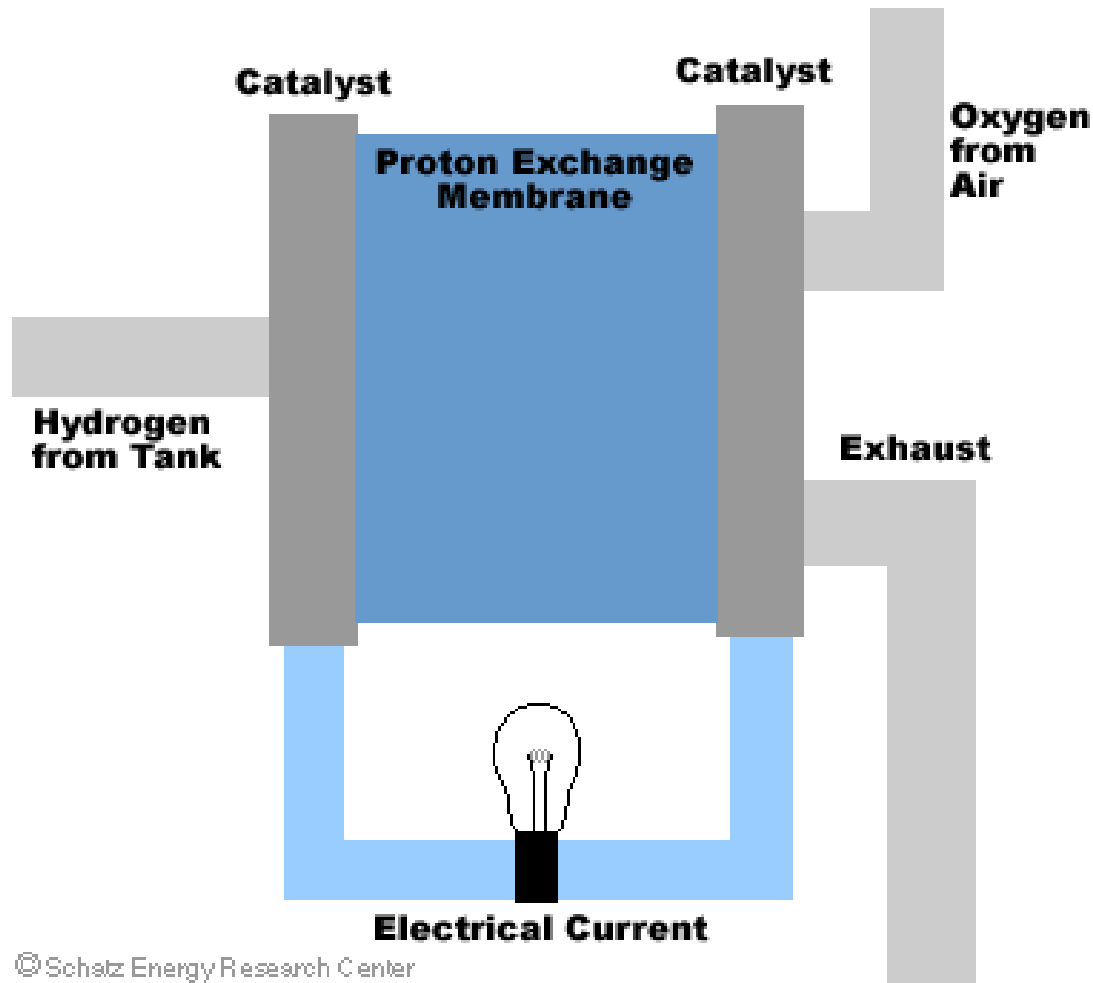


# Principle of Operation

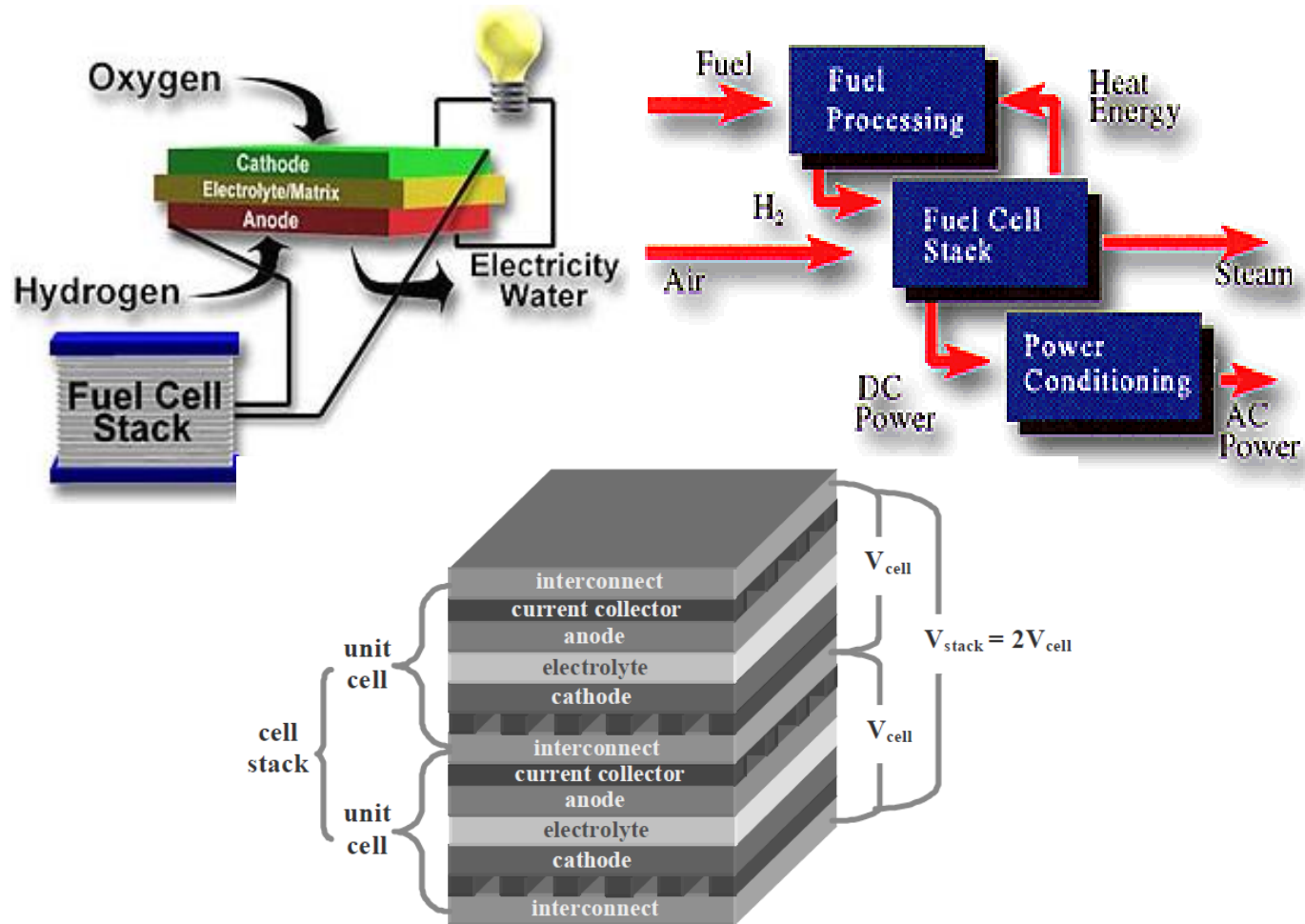
## Solid Oxide Fuel Cell



# Animation of PEMFC

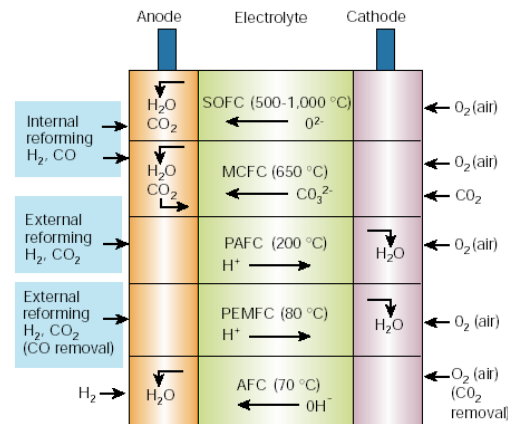


# What are the main components of a Fuel Cell ...



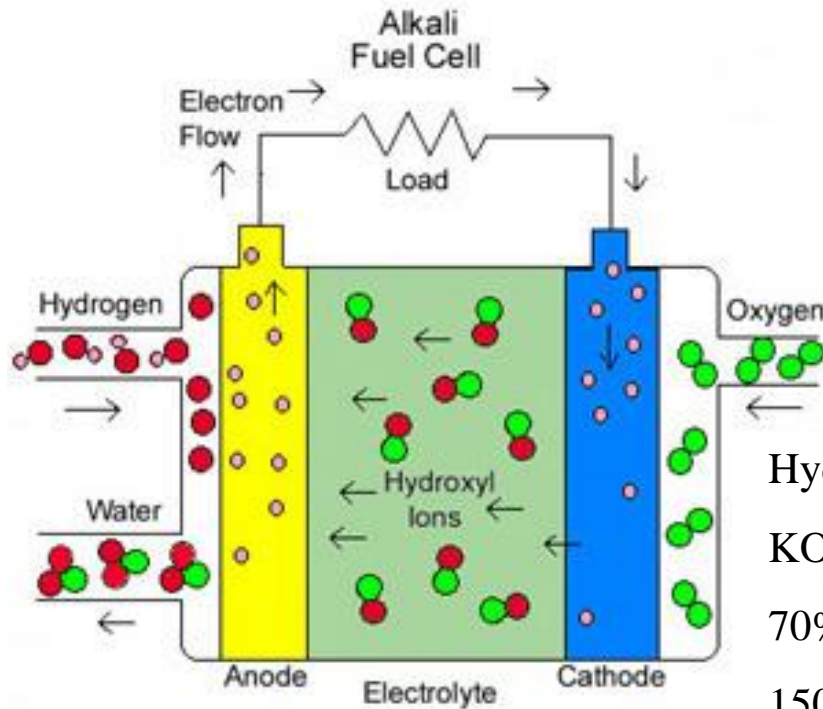
# What are the main components of a Fuel Cell ..

	anodic reaction	electrolyte	cathodic reaction
<b>PEFC</b>	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	polymer membranes charge carrier: $\text{H}^+$	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
<b>SOFC</b>	$2\text{H}_2 + 2\text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	mixed ceramic oxides charge carrier: $\text{O}^{2-}$	$\text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{O}^{2-}$
<b>MCFC</b>	$2\text{H}_2 + 2\text{CO}_3^{2-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 + 4\text{e}^-$	immobilised molten carbonate charge carrier: $\text{CO}_3^{2-}$	$\text{O}_2 + 2\text{CO}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{CO}_3^{2-}$
<b>PAFC</b>	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	immobilised liquid $\text{H}_3\text{PO}_4$ charge carrier: $\text{H}^+$	$\text{O}_2 + 2\text{CO}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{CO}_3^{2-}$
<b>AFC</b>	$2\text{H}_2 + 4\text{OH}^- \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	immobilised KOH charge carrier: $\text{OH}^-$	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$





# Alkaline Fuel Cells



Hydrogen as a fuel

KOH as an electrolyte

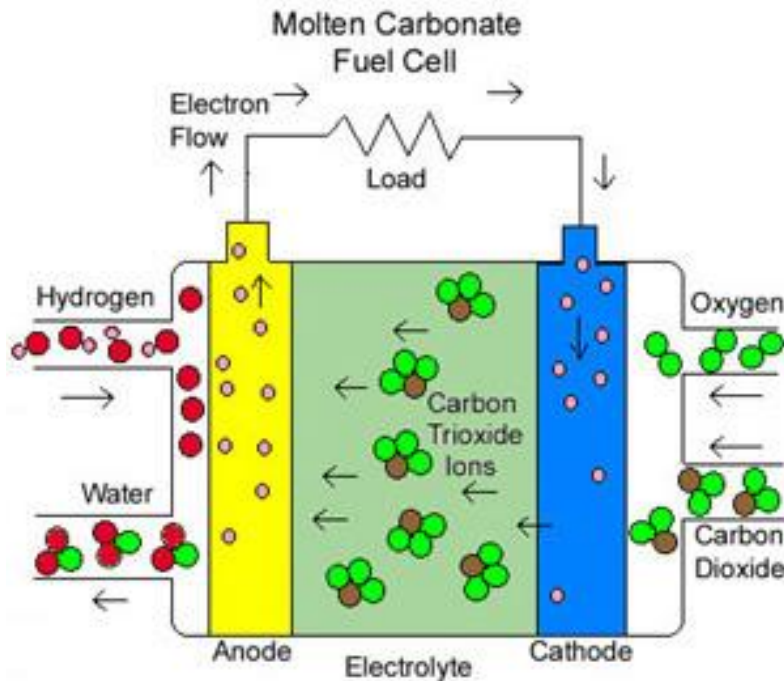
70% efficiency

150°C - 200°C (operation temperature)

Needs pure hydrogen and Pt electrodes → (\$\$)



# Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC)



Carbonate salt (electrolyte)

60 – 80% efficiency

~650°C (operation temperature)

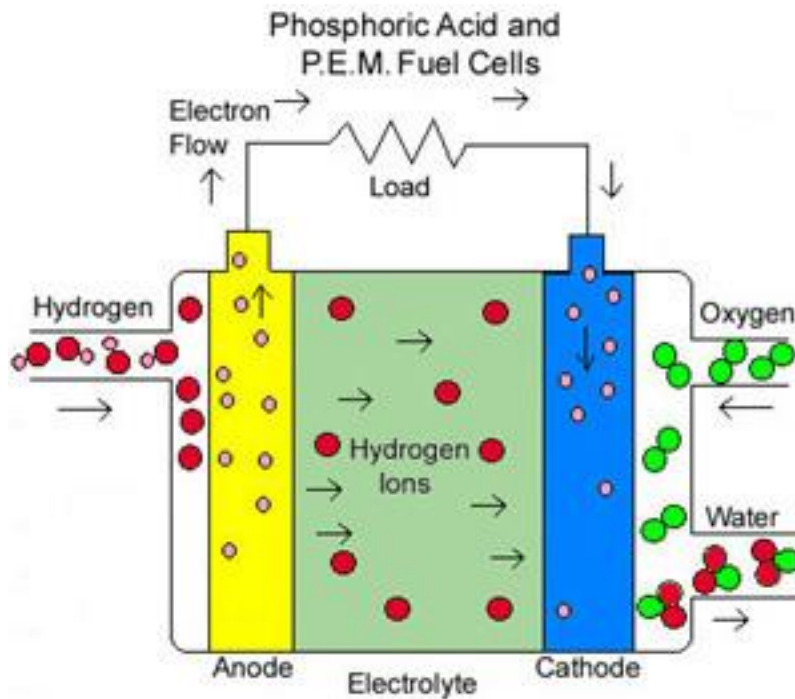
Nickel (electrode)

The operating temperature is high and can be used for CHP.

Carbonate ions are consumed → production of CO<sub>2</sub>



# Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)



Phosphoric acid (electrolyte)

40 – 80% efficiency

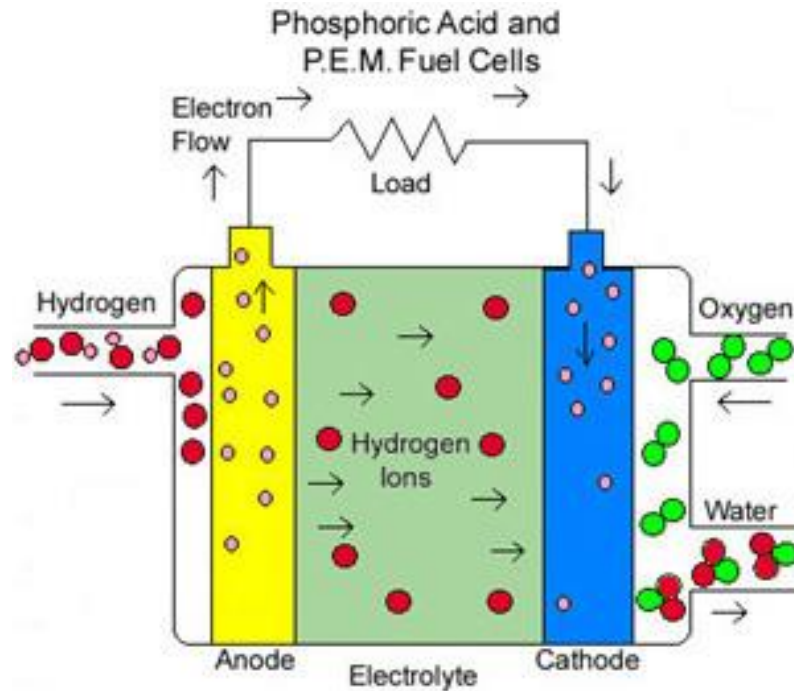
150°C - 200°C

Corrosive electrolyte

Pt is too expensive



# Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)



Polymer Membrane

40 – 50% efficiency

80°C

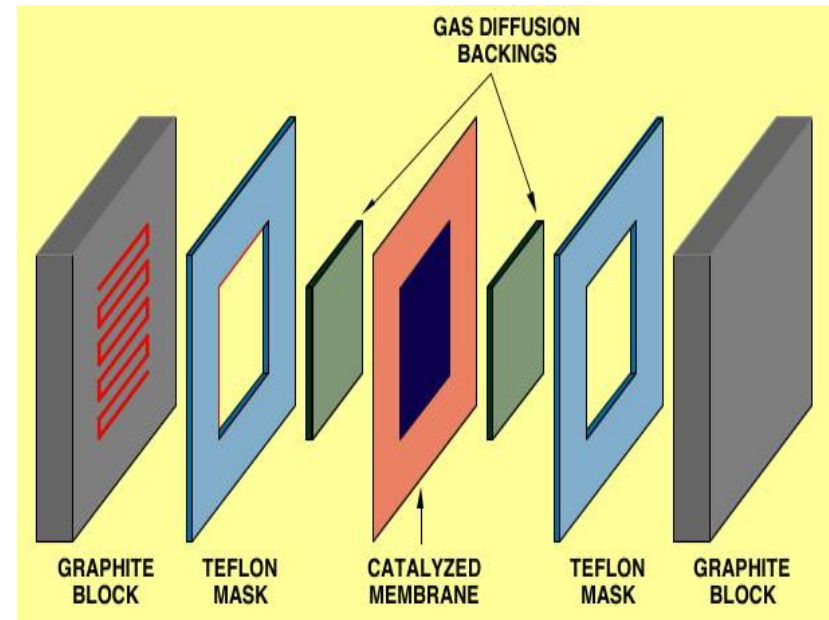
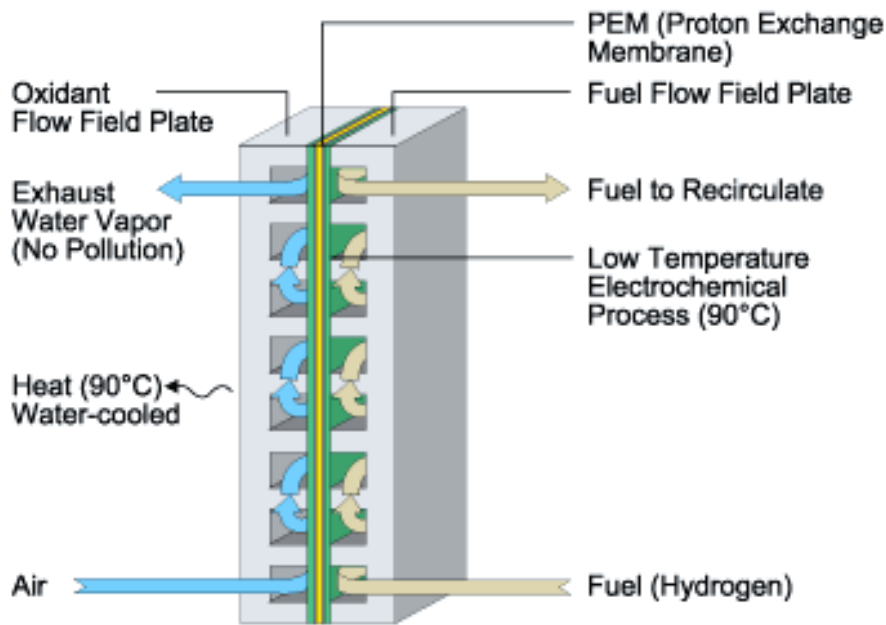
Cross over

Operation temperature appropriate for residential and automotive applications

Pt electrodes → \$\$

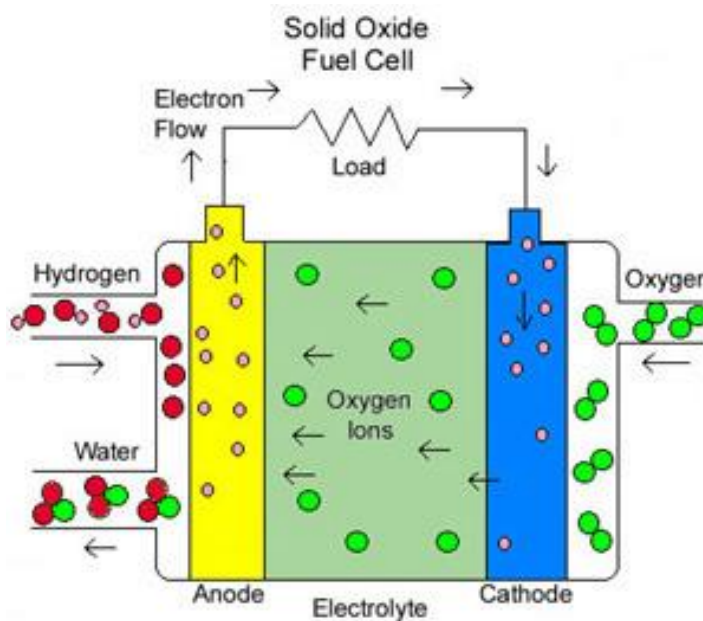


# Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC)





# Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)



Solid electrolyte (ceramic)

~60% efficiency

~1000°C



Fuel flexibility

CHP



# Applications

---



---

# 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.

