

# Μάθημα Βιοχημικές Διεργασίες (ENE.2070)

Ισοζύγια ενέργειας & Φαινόμενα Μεταφοράς  
Θερμότητας στους Βιοαντιδραστήρες

---

Δρ. ΑΝΕΣΤΗΣ ΒΛΥΣΙΔΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος

Πανεπιστήμιο Πατρών

## Τι μάθαμε στην προηγούμενη διάλεξη (Διάλεξη 7)

---

- Αποστείρωση του Θρεπτικού Μέσου
  - Γιατί χρειάζεται
  - Τα στάδια
  - Κινητικές αποστείρωσης
  - Υπολογισμό του χρόνου αποστείρωσης
- Κατανάλωση ισχύς σε διεργασίες ζύμωσης
- Σχηματισμοί Βιοαντιδραστήρων

# Περιγραφή Σημερινής Διάλεξης (Διάλεξη 8)

---

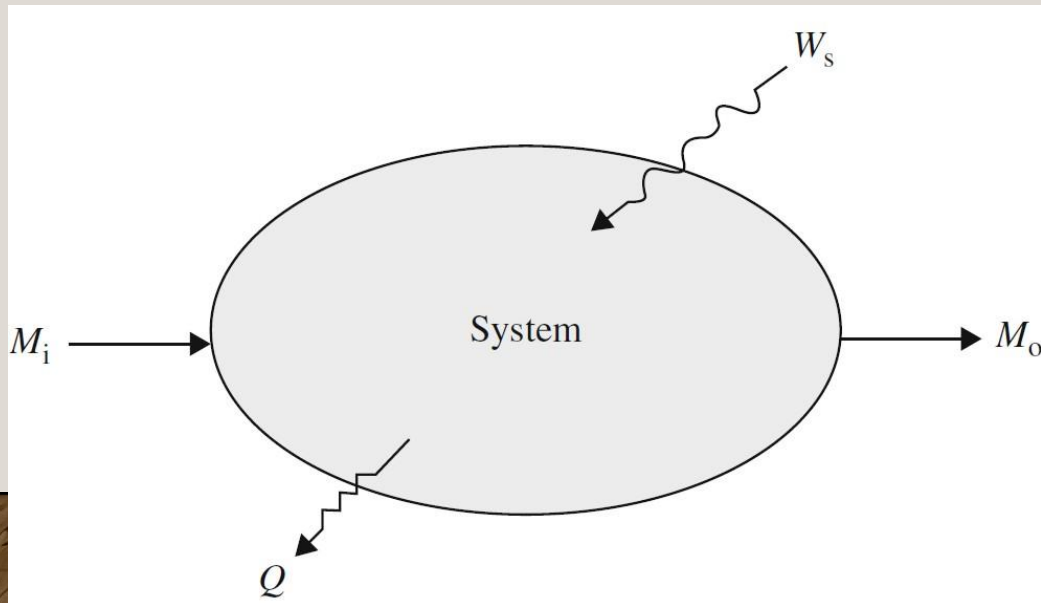
- Ισοζύγια Ενέργειας σε Βιοδιεργασίες
  - Υπολογισμός Της Αλλαγής της Ενθαλπίας
  - Θερμότητα Αντίδρασης για Βιοδιεργασίες με Παραγωγή Βιομάζας
  - Η εξίσωση ισοζυγίου ενέργειας για την καλλιέργεια κυττάρων
  - Παραδείγματα

---

# Ισοζύγια Ενέργειας σε Βιοδιεργασίες

# Γενική Εξίσωση Ισοζυγίου Ενέργειας

- Η αρχή που βασίζεται σε όλους τους υπολογισμούς του ενεργειακού ισοζυγίου είναι ο νόμος διατήρησης της ενέργειας, ο οποίος δηλώνει ότι η ενέργεια δεν μπορεί ούτε να δημιουργηθεί ούτε να καταστραφεί.
- {Ενέργεια που μπαίνει μέσα στο σύστημα} - {Ενέργεια που βγαίνει από το σύστημα} = {Ενέργεια που συσσωρεύεται μέσα στο σύστημα}



$M_i$  είναι η μάζα που εισάγεται στο σύστημα  $M_o$  είναι η μάζα που φεύγει από το σύστημα  $W_s$  το έργο που εισάγεται στο σύστημα (π.χ. από τον κινητήρα μέσω του άξονα και του τaráκτρου)  $Q$  είναι η ενέργεια που αφήνει το σύστημα σε μορφή θερμότητας.

Η μάζα έχει ενέργεια που σχετίζεται με τη μορφή κινητικής, δυναμικής και εσωτερικής ενέργειας.

Επίσης, έχουμε και το έργο που χρειάζεται για την κίνηση της μάζας.

# Γενική Εξίσωση Ισοζυγίου Ενέργειας

- $M_i (U + E_k + E_p + pV)_i - M_o (U + E_k + E_p + pV)_o - Q + W_s = \Delta E$

- $W_f = p V$  (είναι το έργο που εισάγεται και εξάγεται από το σύστημα μέσω της ροής)  $p$ : πίεση,  $V$ : όγκος
- $\Delta E$  : είναι η συσσώρευση της ενέργειας

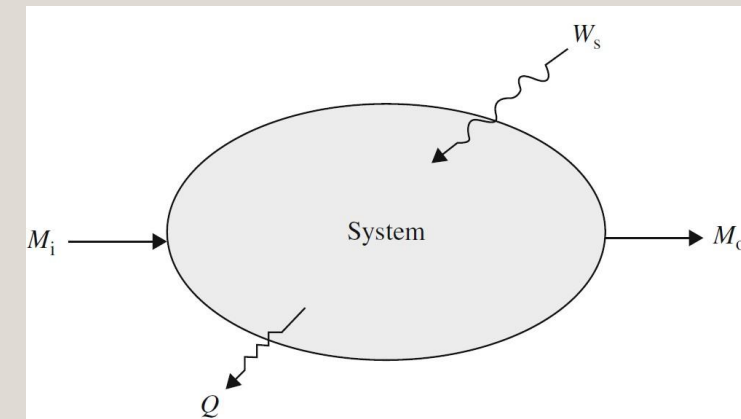
- Για πολλά συστατικά ( $i=n$ ) έχουμε

- $\sigma_{\text{ροεξ εισόδου}} M(U+E_k+E_p+pV) - \sigma_{\text{ροεξ εξόδου}} M(U+E_k+E_p+pV) - Q + W_s = \Delta E$

- Η εξίσωση αυτή εκφράζει τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής.

- Άμα αντικαταστήσουμε στην παραπάνω εξίσωση τον όρο της ενθαλπίας  $h = u + pV$  τότε:

- $\sigma_{\text{ροεξ εισόδου}} M(h+E_k+E_p) - \sigma_{\text{ροεξ εξόδου}} M(h+E_k+E_p) - Q + W_s = \Delta E$



Η Ενθαλπία είναι μια ιδιότητα που χρησιμοποιείται συχνά σε υπολογισμούς ενεργειακού ισοζυγίου.

# Απλοποίηση της εξίσωσης Διατήρησης της Ενέργειας

- Κινητική ( $E_k$ ) και δυναμική ( $E_p$ ) ενέργεια μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες στις βιοδιεργασίες

- Οπότε η προηγούμενη εξίσωση μπορεί να γραφτεί:

$$\sigma_{\text{Ροεξ}}^{\text{εισόδου}} (\text{Mh}) - \sigma_{\text{Ροεξ}}^{\text{εξόδου}} (\text{Mh}) - Q + W_S = \Delta E$$

- Σε μόνιμες συνθήκες  $\Delta E = 0$

$$\sigma_{\text{Ροεξ}}^{\text{εισόδου}} (\text{Mh}) - \sigma_{\text{Ροεξ}}^{\text{εξόδου}} (\text{Mh}) - Q + W_S = 0$$

- Αυτή η εξίσωση χρησιμοποιείται πολύ συχνά στα Ι.Ε. των βιοδιεργασιών

- Αδιαβατική διεργασία: Όταν το  $Q=0$  (δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας από και προς το σύστημα)

$$\sigma_{\text{Ροεξ}}^{\text{εισόδου}} (\text{Mh}) - \sigma_{\text{Ροεξ}}^{\text{εξόδου}} (\text{Mh}) + W_S = \Delta E$$

Αυτές είναι οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στα ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ των βιοδιεργασιών και μας επιτρέπουν να υπολογίζουμε:

Π.χ. Πόση θερμότητα πρέπει να απομακρύνουμε από έναν ζυμωτήρα για να διατηρήσουμε τις βέλτιστες συνθήκες ή

Πόσο επηρεάζει η εξάτμιση της απαιτήσεως σε ψύξη. Πρέπει να βρούμε την ειδική ενθαλπία των ροών που μπαίνουν και βγαίνουν από το σύστημα.

# Εξίσωση ισοζυγίου ενέργειας

- Συνήθως, η θερμότητα της αντίδρασης, η λανθάνουσα θερμότητα της αλλαγής φάσης και το μηχανικό έργο,  $W_s$ , είναι τα μόνα ενεργειακά φαινόμενα που αξίζει να ληφθούν υπόψη στα ισοζύγια ενέργειας των ζυμώσεων.
- Οι θερμοότητες ανάμιξης είναι αμελητέες. Η συνολική αλλαγή στην ενθαλπία λόγω της αλλαγής θερμοκρασίας είναι επίσης μικρή.
- Η εξάτμιση είναι η πιο πιθανή αλλαγή φάσης στη λειτουργία του ζυμωτή.  $M_v$ : μάζα που εξατμίζεται  
Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης ( $\Delta h_v$ ): η θερμότητα που απαιτείται για την εξάτμιση ενός υγρού.
- Εάν η εξάτμιση ελέγχεται, τότε τα λανθάνοντα φαινόμενα θερμότητας μπορούν επίσης να αγνοηθούν.
- Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω η εξίσωση ισοζυγίου ενέργειας είναι:
- **$-\Delta H_{rxn} - M_v \Delta h_v - Q + W_s = \Delta E$**
- Όπου το  $Q$  είναι η θερμότητα που πρέπει να βγάλουμε από το σύστημα ούτως ώστε να διατηρήσουμε την θερμοκρασία του ζυμωτήρα σταθερή δηλ για  $\Delta E = 0$ .
- $Q = ?$  (Για την εκτίμηση του νερού ψύξης)



# Υπολογισμός της θερμότητας της αντίδρασης $\Delta H_{rxn}$

---

- Το  $\Delta H_{rxn}$  υπολογίζεται από τη θερμότητα καύσης των μεμονωμένων ενώσεων.
- Η θερμότητα καύσης ( $\Delta h_c$ ) ορίζεται ως η θερμότητα που εκλύεται κατά την αντίδραση μιας ουσίας με το οξυγόνο για να δώσει ορισμένα προϊόντα οξείδωσης όπως αέριο  $CO_2$ ,  $H_2O$  και αέριο  $N_2$ .
- Η πρότυπη θερμότητα καύσης ( $\Delta h_c^\circ$ ) αναφέρεται σε πρότυπες συνθήκες ( $25^\circ C$  και  $1 \text{ atm}$ ).
- Κατά συνθήκη, η  $\Delta h_c^\circ$  είναι μηδέν για τα προϊόντα οξείδωσης, δηλ  $CO_2$ ,  $H_2O$  και  $N_2$ .
- Οι πρότυπες θερμότητες καύσης για άλλες ενώσεις είναι πάντα αρνητικές.

# Υπολογισμός της θερμότητας της αντίδρασης $\Delta H_{rxn}$

- Πρότυπες θερμότητες καύσης χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της (πρότυπης) θερμότητας της αντίδρασης  $\Delta H_{rxn}$

$$\Delta H_{rxn}^{\circ} = \sum_{\text{reactants}} n \Delta h_c^{\circ} - \sum_{\text{products}} n \Delta h_c^{\circ}$$

$$\Delta H_{rxn}^{\circ} = \sum_{\text{reactants}} M \Delta h_c^{\circ} - \sum_{\text{products}} M \Delta h_c^{\circ}$$

- $\Delta h_c^{\circ}$  είναι η πρότυπη θερμότητα καύσης ανά γραμμομόριο (κάποιες φορές ανά g ή kg)
- n είναι τα γραμμομόρια αντιδρώντος ή προϊόντος που εμπλέκονται στην αντίδραση, και
- M είναι η μάζα αντιδρώντος ή προϊόντος που εμπλέκονται στην αντίδραση, και
- Η πρότυπη θερμότητα της αντίδρασης είναι η διαφορά μεταξύ της θερμότητας της καύσης των αντιδρώντων και των προϊόντων.

- Σε μια εξώθερμη αντίδραση πλεόνασμα ενέργειας απελευθερώνεται ως θερμότητα και η τιμή  $\Delta H_{\text{rxn}}$  είναι αρνητική.
- Από την άλλη πλευρά, ενέργεια απορροφάται κατά τη διάρκεια της ενδόθερμης αντίδρασης, η ενθαλπία των προϊόντων είναι μεγαλύτερη από αυτή των αντιδρώντων και το  $\Delta H_{\text{rxn}}$  είναι θετικό.

$$\Delta H_{\text{rxn}} < 0 \quad , \quad \text{εξώθερμη}$$

$$\Delta H_{\text{rxn}} > 0 \quad , \quad \text{ενδόθερμη}$$

# Θερμότητα της αντίδρασης με οξυγόνο ως δέκτης ηλεκτρονίων

---

- Το μοριακό οξυγόνο  $O_2$  δέχεται τέσσερα ηλεκτρόνια δηλ για ένα mol  $O_2$  που καταναλώνεται κατά την αναπνοή, τέσσερα ηλεκτρόνια πρέπει να μεταφερθούν.
- Εάν δεχτούμε την τιμή των 115 kJ ενέργειας που απελευθερώνεται ανά ηλεκτρονίο που μεταφέρεται, η ποσότητα ενέργειας που απελευθερώνεται από την κατανάλωση ενός mol  $O_2$  είναι επομένως (4 x 115) kJ, ή 460 kJ.
- Έτσι, η θερμότητα της αντίδρασης για αερόβιο μεταβολισμό είναι περίπου ~ 460 kJ ανά mol  $O_2$  που καταναλώνεται.

# Θερμότητα της αντίδρασης με το οξυγόνο να μην είναι ο κύριος δέκτης ηλεκτρονίων



- Εάν μια ζύμωση χρησιμοποιεί δέκτες ηλεκτρονίων εκτός του οξυγόνου, για παράδειγμα στην αναερόβια καλλιέργεια
- Τότε πρέπει να χρησιμοποιούνται οι θερμότητες καύσης για την εκτίμηση της θερμότητας της αντίδρασης για αναερόβιες μετατροπές.
- Όταν η αμμωνία (NH<sub>3</sub>) είναι η πηγή αζώτου

$$\Delta H_{\text{rxn}}^\circ = (n\Delta h_c^\circ)_{\text{substrate}} + (n\Delta h_c^\circ)_{\text{NH}_3} - (n\Delta h_c^\circ)_{\text{biomass}} - (n\Delta h_c^\circ)_{\text{product}}$$

- όπου  $n$  είναι ο αριθμός γραμμομορίων και  $\Delta h_c^\circ$  είναι η πρότυπη θερμότητα καύσης. Οι πρότυπες θερμότητες καύσης για το υπόστρωμα, την NH<sub>3</sub> και τα προϊόντα μπορούν να βρεθούν σε πίνακες

# Παράδειγμα υπολογισμού της θερμότητας της αντίδρασης από την θερμότητα της καύσης

- Fumaric acid is produced from malic acid using the enzyme, fumarase. Calculate the *standard heat of reaction* (δλδ την πρότυπη θερμότητα αντίδρασης σε kJ):

πρότυπες συνθήκες (25°C, 1 atm)

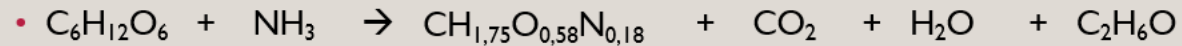


- $(\Delta h_c^\circ)_{\text{malic acid}} = -1328.8 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $(\Delta h_c^\circ)_{\text{fumaric acid}} = -1334.0 \text{ kJ mol}^{-1}$
- $(\Delta h_c^\circ)_{\text{liquid water}} = 0 \text{ kJ mol}^{-1}$

- $$\Delta H_{\text{rxn}}^\circ = \sum_{\text{reactants}} n\Delta h_c^\circ - \sum_{\text{products}} n\Delta h_c^\circ$$

- $\Delta H_{\text{rxn}} = 1 \text{ mol} (-1328.8 \text{ kJ mol}^{-1}) - 1 \text{ mol} (-1334.0 \text{ kJ mol}^{-1}) = 5.2 \text{ kJ}$
- Αφού το  $\Delta H_{\text{rxn}}$  είναι θετικό, η αντίδραση είναι ενδόθερμη και άρα έχουμε απορρόφηση θερμότητας.

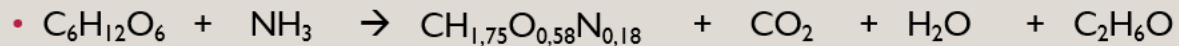
- **Άσκηση** Σε αυτοσχέδιο ζυμωτήρα παράγεται αιθανόλη υπό **αναερόβιες** συνθήκες και **αμμωνία** ως πηγή αζώτου. Υποθέτουμε ότι δεν έχουμε εξάτμιση και δεν έχουμε και ανάμιξη



- *Moles* αιθανόλης που παραγονται = **8,68 mol**
- *Moles* γλυκόζης που καταναλώνονται = **4,93 mol**
- Moles  $\text{NH}_3$  = **0,64 mol** & moles βιομάζας = **3,55 mol** - MW = **25.6 g/mol**
  - Δίνονται τα  $\Delta h_c^o$  για την γλυκόζη, την αμμωνία, την βιομάζα και την αιθανόλη.
    - $\Delta h_c^o$  γλυκόζης = **- 2805,0 KJ/mol**
    - $\Delta h_c^o$   $\text{NH}_3$  = **- 382,6 KJ/mol**
    - $\Delta h_c^o$  βιομάζα = **- 21,2 KJ/g** (θεωρούμε την θερμότητα καύσης για τις ζύμες ίση με **-21,2 KJ/g**)
    - $\Delta h_c^o$  αιθανόλης = **- 1366,8 KJ/mol**
    - $\Delta h_c^o$   $\text{CO}_2$  = **0 KJ/mol**
    - $\Delta h_c^o$   $\text{H}_2\text{O}$  = **0 KJ/mol**

Να υπολογιστούν Α)  $\Delta H_{rxn}$  της αντίδρασης και Β) η θερμότητα που πρέπει να βγάλουμε από το σύστημα ούτως ώστε να διατηρήσουμε την θερμοκρασία του ζυμωτήρα σταθερή δηλ για  $\Delta E = 0$ .

# Άσκηση



- moles αιθανόλης που παραγονται = 8,68 mol
- moles γλυκόζης που καταναλώνονται = 4,93 mol
- moles NH<sub>3</sub> = 0,64 mol & moles βιομάζας = 3,55 mol  
MW = 25.6 g/mol

- Χρησιμοποιούμε τις θερμότητες καύσεις των αντιδρώντων και των προϊόντων για να βρούμε το  $\Delta H_{\text{rxn}}$

$$\Delta H_{\text{rxn}}^{\circ} = (n\Delta h_c^{\circ})_{\text{substrate}} + (n\Delta h_c^{\circ})_{\text{NH}_3} - (n\Delta h_c^{\circ})_{\text{biomass}} - (n\Delta h_c^{\circ})_{\text{product}}$$

$$\Delta h_c^{\circ} \text{ γλυκόζης} = - 2805,0 \text{ KJ/mol}$$

$$\Delta h_c^{\circ} \text{ NH}_3 = - 382,6 \text{ KJ/mol}$$

$$\Delta h_c^{\circ} \text{ βιομάζα} = - 21,2 \text{ KJ/g}$$

$$\Delta h_c^{\circ} \text{ αιθανόλης} = - 1366,8 \text{ KJ/mol}$$

- $\Delta H_{\text{rxn}} = (n\Delta h_c^{\circ} \text{ γλυκ.}) + (n\Delta h_c^{\circ} \text{ NH}_3) - (n\Delta h_c^{\circ} \text{ βιομάζας}) - (n\Delta h_c^{\circ} \text{ αιθανόλης})$
- Αντικαθιστώ στην παραπάνω εξίσωση τις θερμότητες καύσης και τα moles:
  - $\Delta H_{\text{rxn}} = 4,93 \text{ mol} (- 2805,0 \text{ kJ / mol}) + 0,64 \text{ mol} (- 382,6 \text{ kJ / mol}) - 3,55 \text{ mol} (- 21,2 \text{ kJ / g}) (25,6 \text{ g/mol}) - 8,68 \text{ mol} (- 1366,8 \text{ kJ / mol})$

$$\Delta H_{\text{rxn}} = -283,03 \text{ kJ}$$



# Άσκηση

---

- Η εξίσωση ισοζυγίου ενέργειας είναι:
- $-\Delta H_{\text{rxn}} - M_v \Delta h_v - Q + W_s = \Delta E$
- Όπου το  $Q$  είναι το ζητούμενο δηλ η θερμότητα που πρέπει να βγάλουμε από το σύστημα ούτως ώστε να διατηρήσουμε την θερμοκρασία του ζυμωτήρα σταθερή δηλ για  $\Delta E = 0$ .
- Επίσης δεν έχουμε εξάτμιση ( $M_v = 0$ ) και δεν έχουμε και ανάμιξη άρα και το μηχανικό έργο είναι 0 ( $W_s = 0$ ).
- $Q = -\Delta H_{\text{rxn}} = 283,03 \text{ kJ}$

# ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ: ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΑΕΡΟΒΙΕΣ ΖΥΜΩΣΕΙΣ

Κιτρικό οξύ παράγεται χρησιμοποιώντας βυθισμένη καλλιέργεια του *Aspergillus niger* σε έναν βιοαντιδραστήρα διαλείποντος έργου που λειτουργεί στους 30°C.

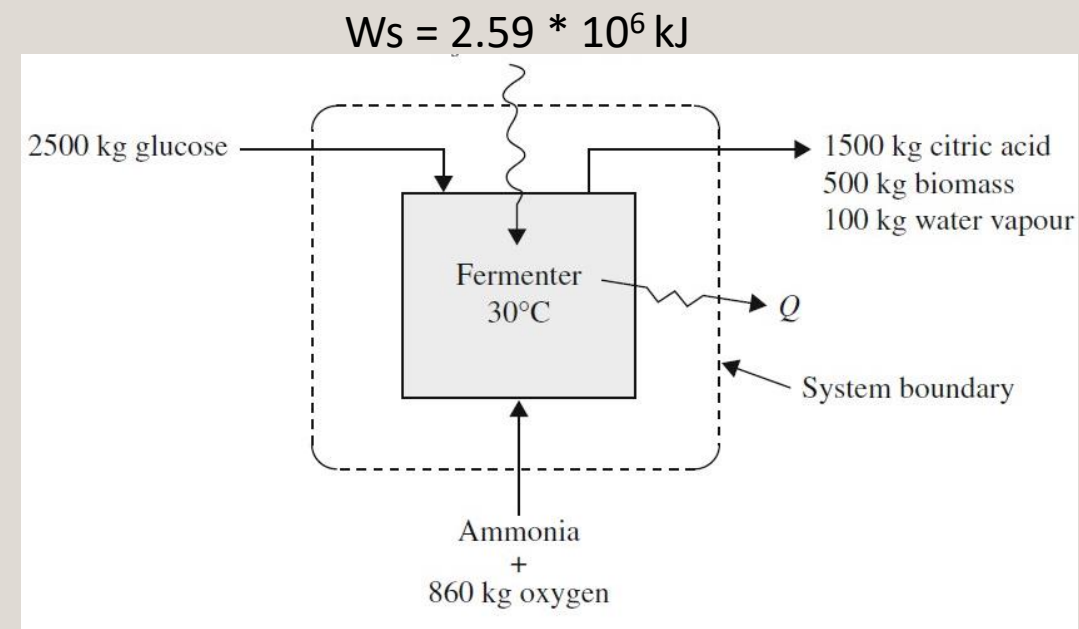
Σε διάστημα δύο ημερών, καταναλώνονται 2500 kg γλυκόζης και 860 kg οξυγόνου για την παραγωγή 1500 kg κιτρικού οξέος, 500 kg βιομάζας και άλλων προϊόντων.

Η αμμωνία χρησιμοποιείται ως πηγή αζώτου.

Ισχύς μπαίνει στο σύστημα υπό μηχανική ανάδευση του υγρού ζύμωσης.

Περίπου 100 kg νερού εξατμίζονται κατά την περίοδο καλλιέργειας.  $\Delta h_v = 2430.7 \text{ kJ kg}^{-1}$  στους 30°C

Υπολογίστε τις απαιτήσεις σε ψύξη. (Να υπολογιστεί η θερμότητα που πρέπει να απομακρυνθεί ώστε να διατηρήσουμε την θερμοκρασία του ζυμωτήρα δλδ για  $\Delta E = 0$ ).



# ΛΥΣΗ ΆΣΚΗΣΗΣ

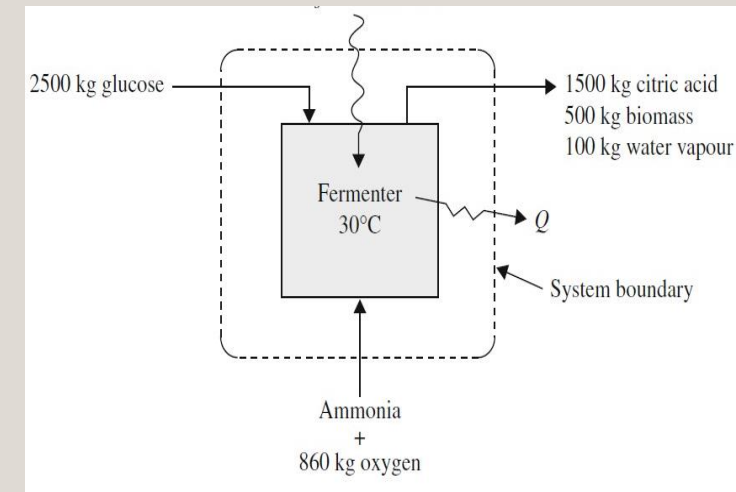
- Πρώτο βήμα: τι δεδομένα έχουμε και τι δεδομένα μπορούμε να υποθέσουμε/βρούμε
  - Αερόβια ζύμωση: Θερμότητα αντίδρασης  $-460 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ O}_2$
  - Εξτρά δεδομένα: η λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσής για το νερό στους  $30^\circ\text{C}$

$$\Delta h_v = 2430.7 \text{ kJ kg}^{-1}$$

- Δεύτερο βήμα: Γράφουμε την αντίδραση και το Ισοζύγιο Ενέργειας
- Γλυκόζη +  $\text{O}_2$  +  $\text{NH}_3 \rightarrow$  Βιομάζα + Κιτρικό οξύ +  $\text{CO}_2$  +  $\text{H}_2\text{O}$
- Ισοζύγιο Ενέργειας:
- $-\Delta H_{\text{rxn}} - M_v \Delta h_v - Q + W_s = \Delta E$  ; Όμως εμείς θέλουμε το  $Q$  για  $\Delta E = 0$

- $-\Delta H_{\text{rxn}} - M_v \Delta h_v - Q + W_s = 0$

$$W_s = 2.59 \cdot 10^6 \text{ kJ}$$



# ΛΥΣΗ ΑΣΚΗΣΗΣ (ΣΥΝΕΧΕΙΑ)

- Η θερμότητα της αντίδρασης  $\Delta H_{\text{rxn}}$  εξαρτάται από την ποσότητα του οξυγόνου που καταναλώθηκε:

$$\Delta H_{\text{rxn}} = (-460 \text{ kJ mol}^{-1}) (860 \text{ kg}) \cdot \left| \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right| \cdot \left| \frac{1 \text{ mol}}{32 \text{ g}} \right|$$

$$\Delta H_{\text{rxn}} = -1.24 \times 10^7 \text{ kJ}$$

- Η θερμότητα που χάνεται εξαιτίας της εξάτμισης είναι:

- $M_v \Delta h_v = (100 \text{ kg}) (2430.7 \text{ kJ kg}^{-1}) = 2.43 \times 10^5 \text{ kJ}$
- $W_s = 2.59 \times 10^6 \text{ kJ}$

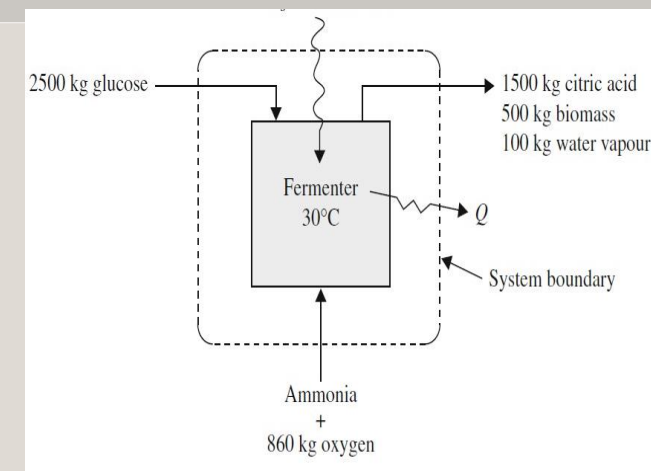
- Αντικαθιστώντας τα προηγούμενα αποτέλεσμα στην εξίσωση του Ισοζυγίου Ενέργειας:

$$-\Delta H_{\text{rxn}} - M_v \Delta h_v - Q + W_s = 0$$

$$-(-1.24 \times 10^7 \text{ kJ}) - (2.43 \times 10^5 \text{ kJ}) - Q + (2.59 \times 10^6 \text{ kJ}) = 0$$

$$Q = 1.47 \times 10^7 \text{ kJ}$$

$$W_s = 2.59 \times 10^6 \text{ kJ}$$

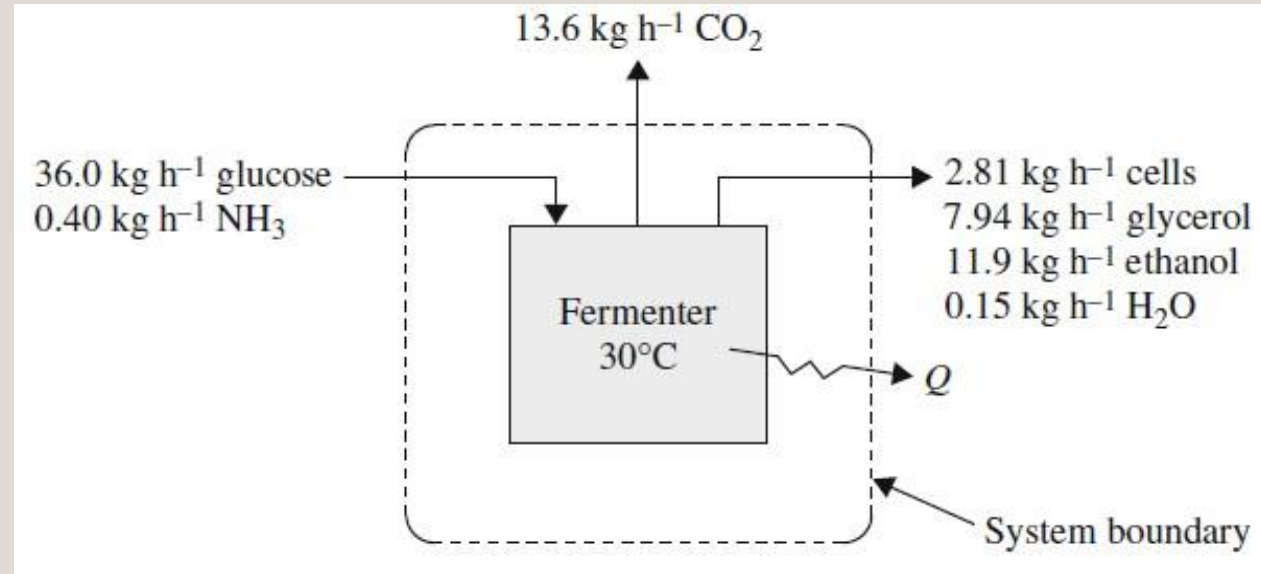


- Βλέπουμε ότι το  $Q$  είναι θετικό, δείχνοντας ότι θερμότητα πρέπει να απομακρυνθεί από το σύστημα.

# ΑΣΚΗΣΗ: ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΑΝΑΕΡΟΒΙΟ ΖΥΜΩΤΗΡΑ

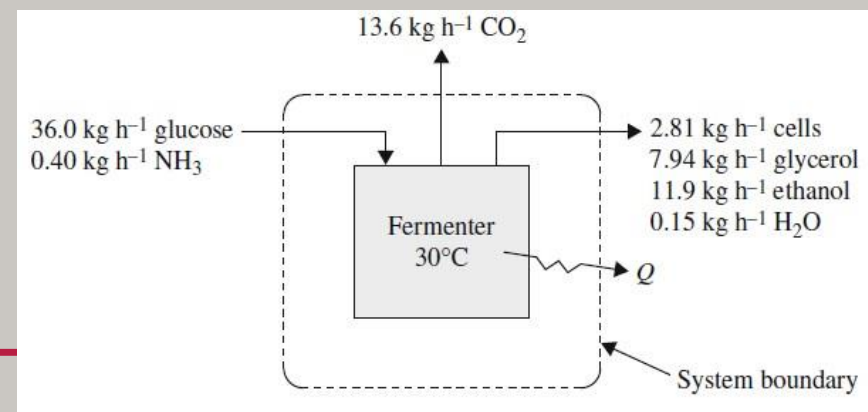
Ο *Saccharomyces cerevisiae* αναπτύσσεται αναερόβια σε συνεχή καλλιέργεια στους 30°C. Η γλυκόζη χρησιμοποιείται ως πηγή άνθρακα και η αμμωνία ως πηγή αζώτου. Παράγεται ένα μείγμα γλυκερόλης και αιθανόλης. Σε σταθερές συνθήκες, οι ροές μάζας προς και από τον αντιδραστήρα έχουν ως εξής:

Γλυκόζη in	36.0 kg h <sup>-1</sup>
NH <sub>3</sub> in	0.40 kg h <sup>-1</sup>
Βιομάζα out	2.81 kg h <sup>-1</sup>
Γλυκερόλη out	7.94 kg h <sup>-1</sup>
Αιθανόλη out	11.9 kg h <sup>-1</sup>
CO <sub>2</sub> out	13.6 kg h <sup>-1</sup>
H <sub>2</sub> O out	0.15 kg h <sup>-1</sup>



Να υπολογίσετε τις απαιτήσεις σε νερό ψύξης ούτως ώστε η θερμοκρασία της ζύμωσης να παραμένει σταθερή. (Να υπολογιστεί η θερμότητα που πρέπει να απομακρυνθεί ώστε να διατηρήσουμε την θερμοκρασία του ζυμωτήρα δλδ για  $\Delta E = 0$ ).

# ΛΥΣΗ ΆΣΚΗΣΗΣ



- Πρώτο βήμα: τι δεδομένα έχουμε και τι δεδομένα μπορούμε να υποθέσουμε/βρούμε
  - Μόνιμες συνθήκες
  - Δεν έχουμε μηχανικό έργο ( $W_s = 0$ )
  - Δεν έχουμε εξάτμιση
  - Αμελητέα αισθητή αλλαγή θερμότητας.
  - Εξτρά δεδομένα: (i) Μοριακά βάρη και (ii) Πρότυπες θερμότητες καύσης

$$\text{MW glucose} = 180 \text{ g/mol}$$

$$\text{MW NH}_3 = 17$$

$$\text{MW glycerol} = 92$$

$$\text{MW ethanol} = 46$$

$$(\Delta h_c^\circ)_G = -1.558 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$(\Delta h_c^\circ)_A = -2.251 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$(\Delta h_c^\circ)_B = -2.120 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$(\Delta h_c^\circ)_{\text{Gly}} = -1.799 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$(\Delta h_c^\circ)_E = -2.971 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}$$

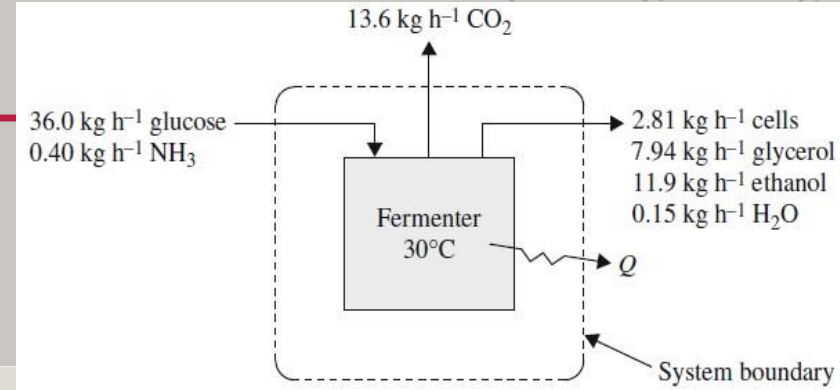
## ΛΥΣΗ ΆΣΚΗΣΗΣ (ΣΥΝΕΧΕΙΑ)

---

- Δεύτερο βήμα: Γράφουμε την αντίδραση και το Ισοζύγιο Ενέργειας
- Γλυκόζη +  $\text{NH}_3 \rightarrow$  Βιομάζα + Γλυκερόλη + Αιθανόλη +  $\text{CO}_2$  +  $\text{H}_2\text{O}$
- Ισοζύγιο Ενέργειας:
- $-\Delta H_{\text{rxn}} - M_v \Delta h_v - Q + W_s = 0 \quad ; W_s = 0 ; M_v = 0$
- $-\Delta H_{\text{rxn}} - Q = 0$
- Πρέπει να βρω την θερμοότητα της αντίδρασης  $\Delta H_{\text{rxn}}$

# ΛΥΣΗ ΆΣΚΗΣΗΣ (ΣΥΝΕΧΕΙΑ)

- Γλυκόζη + NH<sub>3</sub> → Βιομάζα + Γλυκερόλη + Αιθανόλη + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O
- Η θερμότητα καύσης για το CO<sub>2</sub> και το H<sub>2</sub>O είναι μηδέν.



$$\Delta H_{rxn} = (n\Delta h_c^o)_{\text{Γλυκόζη}} + (n\Delta h_c^o)_{\text{Αμμωνία}} - (n\Delta h_c^o)_{\text{Βιομάζα}} - (n\Delta h_c^o)_{\text{Γλυκερόλη}} - (n\Delta h_c^o)_{\text{Αιθανόλη}}$$

$$\Delta H_{rxn} = (M\Delta h_c^o)_{\text{Γλυκόζη}} + (M\Delta h_c^o)_{\text{Αμμωνία}} - (M\Delta h_c^o)_{\text{Βιομάζα}} - (M\Delta h_c^o)_{\text{Γλυκερόλη}} - (M\Delta h_c^o)_{\text{Αιθανόλη}}$$

$$\Delta H_{rxn} = (36.0 \text{ kg}) (-1.558 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}) + (0.4 \text{ kg}) (-2.251 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}) - (2.81 \text{ kg}) (-2.120 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}) - (7.94 \text{ kg}) (-1.799 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}) - (11.9 \text{ kg}) (-2.971 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1})$$

$$\Delta H_{rxn} = -1.392 \times 10^4 \text{ kJ}$$

Γλυκόζη  $(\Delta h_c^o)_G = -1.558 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}$

Αμμωνία  $(\Delta h_c^o)_A = -2.251 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}$

Βιομάζα  $(\Delta h_c^o)_B = -2.120 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}$

Γλυκερόλη  $(\Delta h_c^o)_{Gly} = -1.799 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}$

Αιθανόλη  $(\Delta h_c^o)_E = -2.971 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}$

- Αντικαθιστώντας το παραπάνω αποτέλεσμα στην εξίσωση Ισοζ. Ενέργειας:
- $-\Delta H_{rxn} - Q = 0 \rightarrow Q = 1.392 \times 10^4 \text{ kJ}$
- Βλέπουμε ότι το Q είναι θετικό, δείχνοντας ότι θερμότητα πρέπει να απομακρυνθεί από το σύστημα.



## ΠΑΡΑΛΛΑΓΗ ΑΣΚΗΣΗΣ

$$\Delta H_{\text{rxn}}^{\circ} = \sum_{\text{reactants}} n \Delta h_c^{\circ} - \sum_{\text{products}} n \Delta h_c^{\circ}$$

- Γλυκόζη + NH<sub>3</sub> → Βιομάζα + Γλυκερόλη + Αιθανόλη + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O
- Η θερμότητα καύσης για το CO<sub>2</sub> και το H<sub>2</sub>O είναι μηδέν.
- $\Delta H_{\text{rxn}} = (n \Delta h_c^{\circ})_{\text{Γλυκόζη}} + (n \Delta h_c^{\circ})_{\text{Αμμωνία}} - (n \Delta h_c^{\circ})_{\text{Βιομάζα}} - (n \Delta h_c^{\circ})_{\text{Γλυκερόλη}} - (n \Delta h_c^{\circ})_{\text{Αιθανόλη}}$
- $\Delta H_{\text{rxn}} = (M \Delta h_c^{\circ})_{\text{Γλυκόζη}} + (M \Delta h_c^{\circ})_{\text{Αμμωνία}} - (M \Delta h_c^{\circ})_{\text{Βιομάζα}} - (M \Delta h_c^{\circ})_{\text{Γλυκερόλη}} - (M \Delta h_c^{\circ})_{\text{Αιθανόλη}}$
- Πρέπει να μετατρέψουμε τις μονάδες από kJ / mol σε kJ / kg

- $\Delta h_c$  cells = -21,2 kJ/g
- $(\Delta h_c^{\circ})_{\text{glu}} = -2805 \text{ kJ/ mol}$
- $(\Delta h_c^{\circ})_{\text{NH}_3} = -382,6 \text{ kJ/ mol}$
- $(\Delta h_c^{\circ})_{\text{glycerol}} = -1655.4 \text{ kJ/ mol}$
- $(\Delta h_c^{\circ})_{\text{ethanol}} = -1366,8 \text{ kJ/ mol}$

$$(\Delta h_c^{\circ})_{\text{G}} = -2805.0 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \cdot \left| \frac{1 \text{ mol}}{180 \text{ g}} \right| \cdot \left| \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right| = -1.558 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$(\Delta h_c^{\circ})_{\text{A}} = -382.6 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \cdot \left| \frac{1 \text{ mol}}{17 \text{ g}} \right| \cdot \left| \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right| = -2.251 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$(\Delta h_c^{\circ})_{\text{B}} = -21.2 \frac{\text{kJ}}{\text{g}} \cdot \left| \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right| = -2.120 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$(\Delta h_c^{\circ})_{\text{Gly}} = -1655.4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \cdot \left| \frac{1 \text{ mol}}{92 \text{ g}} \right| \cdot \left| \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right| = -1.799 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$(\Delta h_c^{\circ})_{\text{E}} = -1366.8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \cdot \left| \frac{1 \text{ mol}}{46 \text{ g}} \right| \cdot \left| \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right| = -2.971 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}$$

Ισοζύγια μάζας  
& Στοιχειομετρία

Κινητική Ενζυμικών  
αντιδράσεων

Κινητική ανάπτυξης  
μικροβίων & παραγωγή  
Μεταβολικών προϊόντων

Εισαγωγικό  
Μάθημα



Σχεδιασμός &  
Μηχανική  
Βιοαντιδραστήρων

Κατάντι διεργασίες  
σε συστήματα  
βιοδιεργασιών

Κλιμάκωση βιοδιεργασιών,  
Φαινόμενα μεταφοράς  
μάζας σε έναν αντιδραστήρα

Φαινόμενα μεταφοράς  
ενέργειας σε έναν  
αντιδραστήρα

# Βιβλιογραφία

---



Michael L. Shuler, Fikret Kargi, ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΒΙΟΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ Βασικές Έννοιες, 2005, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ.

Λυμπεράτος Γ., Παύλου Στ., Εισαγωγή στη ΒΙΟΧΗΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ, Εκδόσεις Τζιόλα, 2011

