

Μάθημα Βιοχημικές Διεργασίες (ENE.2070)

Ισοζύγια ενέργειας & Φαινόμενα Μεταφοράς
Θερμότητας στους Βιοαντιδραστήρες

Δρ. ΑΝΕΣΤΗΣ ΒΛΥΣΙΔΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος

Πανεπιστήμιο Πατρών

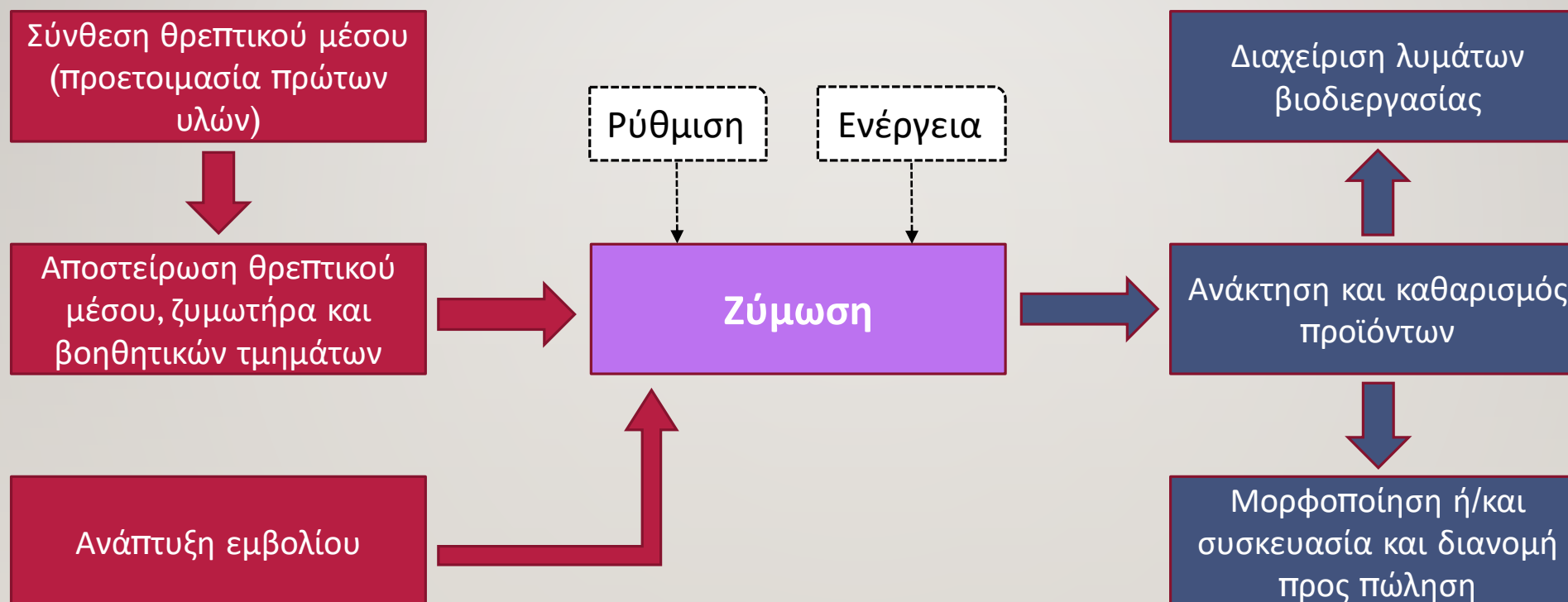
Τι μάθαμε στην προηγούμενη διάλεξη (Διάλεξη 7)

- 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
- Φαινόμενα Μεταφορά Θερμότητας στους Βιοαντιδραστήρες
 - Διατάξεις για μεταφορά θερμότητας σε βιοαντιδραστήρες
 - Τύπο της ολικής μεταφοράς θερμότητας
 - Ισοζυγία ενέργειας κατά τη διάρκεια ψύξης υγρού ζύμωσης

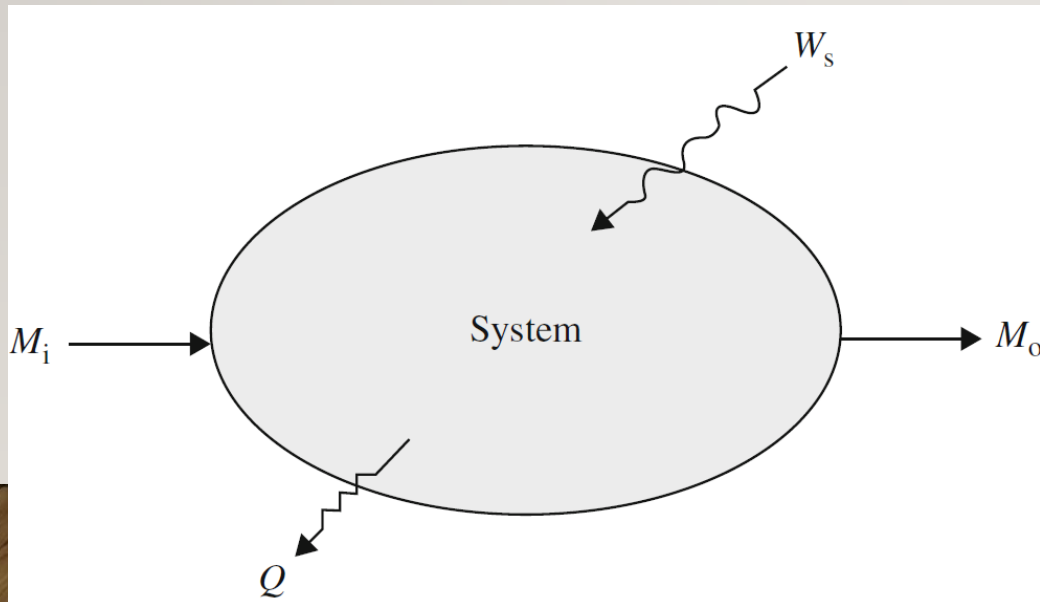
Απαραίτητα Βήματα Εφαρμογής μιας Διεργασίας Ζύμωσης



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 ταράκτρου)
 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
 - ΔE : είναι η συσσώρευση της ενέργειας

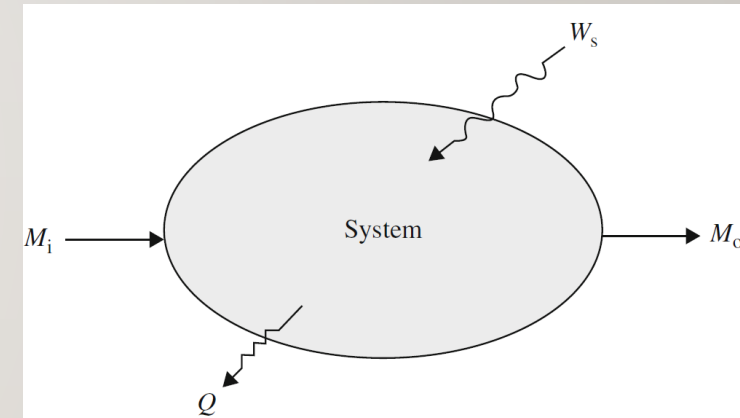
- Για πολλά συστατικά ($i=n$) έχουμε

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

- Η εξίσωση αυτή εκφράζει τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής.

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

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



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 όπου γενικά δεν συμβαίνουν υψηλές ταχύτητες ούτε μεγάλες αλλαγές στο ύψος ή το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο

- Οπότε η προηγούμενη εξίσωση μπορεί να γραφτεί:

$$\sum_{\text{εισόδου}} P_{\text{οεσ}} \text{ (Mh)} - \sum_{\text{εξόδου}} P_{\text{οεσ}} \text{ (Mh)} - Q + W_S = \Delta E$$

- Σε μόνιμες συνθήκες $\Delta E = 0$

$$\sum_{\text{εισόδου}} P_{\text{οεσ}} \text{ (Mh)} - \sum_{\text{εξόδου}} P_{\text{οεσ}} \text{ (Mh)} - Q + W_S = 0$$

- 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)

$$\sum_{\text{εισόδου}} P_{\text{οεσ}} \text{ (Mh)} - \sum_{\text{εξόδου}} P_{\text{οεσ}} \text{ (Mh)} + W_S = \Delta E$$

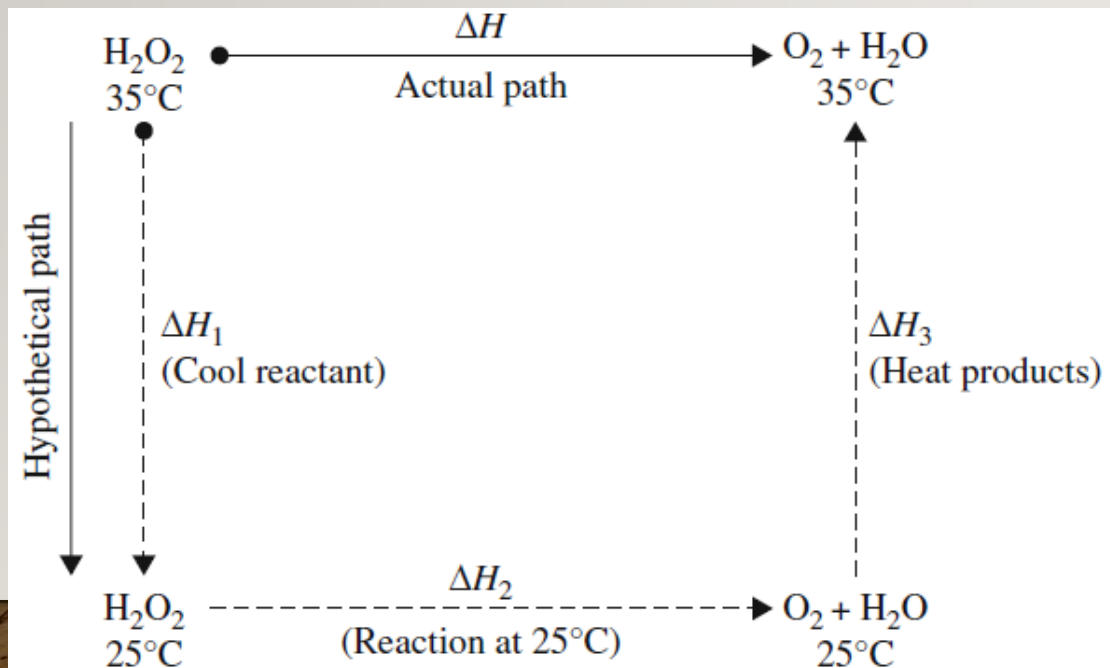
Αυτές είναι οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στα ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ των βιοδιεργασιών και μας επιτρέπουν να υπολογίζουμε:

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.

Υπολογισμός Της Αλλαγής της Ενθαλπίας

- Πάντα υπολογίζουμε την αλλαγή της ενθαλπίας μεταξύ των εισροών και των εκροών.
- Οι αλλαγές στην ενθαλπία σε μια βιοδιεργασία μπορούν να υπολογιστούν λαμβάνοντας μια σειρά υποθετικών βημάτων ή διαδρομής διαδικασίας που οδηγούν από την αρχική κατάσταση και τελικά φτάνουν στην τελική κατάσταση.



Η αλλαγή ενθαλπίας για την άμεση αντίδραση στους 35°C μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας μια εναλλακτική διαδρομή κατά την οποία:

- 1) Το H_2O_2 ψύχεται πρώτα στους 25°C ,
- 2) Το οξυγόνο και το νερό σχηματίζονται μέσω αντίδρασης στους 25°C , και
- 3) Τα προϊόντα θερμαίνονται στους 35°C .

Επειδή οι αρχικές και τελικές καταστάσεις τόσο για τις πραγματικές όσο και για τις υποθετικές διαδρομές είναι ίδιες, η συνολική αλλαγή ενθαλπίας είναι επίσης πανομοιότυπη:

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3$$

Υπολογισμός Της Αλλαγής της Ενθαλπίας

Αλλαγή στην ενθαλπία μπορεί να πραγματοποιηθεί ως αποτέλεσμα:

(i) Αλλαγής Θερμοκρασίας

(ii) Αλλαγής φάσης

(iii) Ανάδευσης ή διάλυσης

(iv) Αντίδρασης

Υπολογισμός Της Αλλαγής της Ενθαλπίας – Αλλαγή Θερμοκρασίας

- Όταν θερμότητα μεταφέρεται για να αυξήσει ή να μειώσει την θερμοκρασία ενός υλικού τότε λέγεται *αισθητή θερμότητα*
- Μεταβολή της ενθαλπίας σε ένα σύστημα λόγω της αλλαγής θερμοκρασίας λέγεται *αισθητή αλλαγή θερμότητας*.

$$\Delta H = M C_p \Delta T = M C_p (T_2 - T_1)$$

- Όπου το C_p είναι η θερμοχωρητικότητα ($\text{J gmol}^{-1} \text{K}^{-1}$ ή $\text{cal g}^{-1} \text{°C}^{-1}$) και είναι ιδιότητα της κάθε ουσίας, M είναι η μάζα
- Οι τιμές των C_p πρέπει να είναι γνωστές για να υπολογίσουμε τις αλλαγές στην ενθαλπία (ΔH) από θέρμανση ή ψύξη

$$C_p : \text{σταθερά} \quad \text{ή} \\ C_p = a + b T + c T^2 + d T^3$$

Παράδειγμα I

- Ποια είναι η αλλαγή ενθαλπίας (ΔH) 150 g formic acid από τους 25°C και 1 atm στους 70°C και 1 atm;
- Από πίνακες μπορούμε να βρούμε το C_p για το φορμικό οξύ και να δούμε ότι η τιμή του C_p μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και ίση με 0.524 cal g⁻¹ °C⁻¹

$$\Delta H = M C_p \Delta T = M C_p (T_2 - T_1)$$

- $\Delta H = M C_p (T_2 - T_1) = (150 \text{ g}) (0.524 \text{ cal g}^{-1} \text{ °C}^{-1}) (70^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 3537.0 \text{ cal} = 3.54 \text{ kcal}$

Υπολογισμός Της αλλαγής της Ενθαλπίας – Αλλαγή Φάσης

- Οι αλλαγές φάσης, όπως η εξάτμιση και η τήξη, συνοδεύονται από σχετικά μεγάλες αλλαγές στην εσωτερική ενέργεια και την ενθαλπία καθώς οι δεσμοί μεταξύ των μορίων σπάνε και αναμορφώνονται.
- Η θερμότητα που μεταφέρεται από ή προς ένα σύστημα που προκαλεί αλλαγή φάσης σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση είναι γνωστή ως λανθάνουσα θερμότητα.
- Οι τύποι λανθάνουσας θερμότητας είναι:
 - Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (Δh_v): η θερμότητα που απαιτείται για την εξάτμιση ενός υγρού
 - Λανθάνουσα θερμότητα τήξης (Δh_f): η θερμότητα που απαιτείται για την τήξη ενός στερεού
 - Λανθάνουσα θερμότητα εξάχνωσης (Δh_g): η θερμότητα που απαιτείται για την άμεση εξάτμιση ενός στερεού

Υπολογισμός Της Μεταβολής της Ενθαλπίας – Αλλαγή Φάσης

- Η συμπύκνωση αερίου σε υγρό (υγροποίηση) όπως και η αλλαγή φάσης από υγρό σε στερεό (στερεοποίηση ή τήξη) απαιτεί απομάκρυνση και όχι προσθήκη θερμότητας.
- Η λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης (ή στερεοποίησης) είναι $-\Delta h_v$ (ή $-\Delta h_f$).
- Η λανθάνουσα θερμότητα είναι ιδιότητα ουσιών και, όπως η θερμοχωρητικότητα, μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία.
- Η αλλαγή στην ενθαλπία που προκύπτει από την αλλαγή φάσης υπολογίζεται απευθείας από τη λανθάνουσα θερμότητα.
- Για παράδειγμα, η αύξηση της ενθαλπίας λόγω της εξάτμισης της υγρής μάζας M σε σταθερή θερμοκρασία είναι:

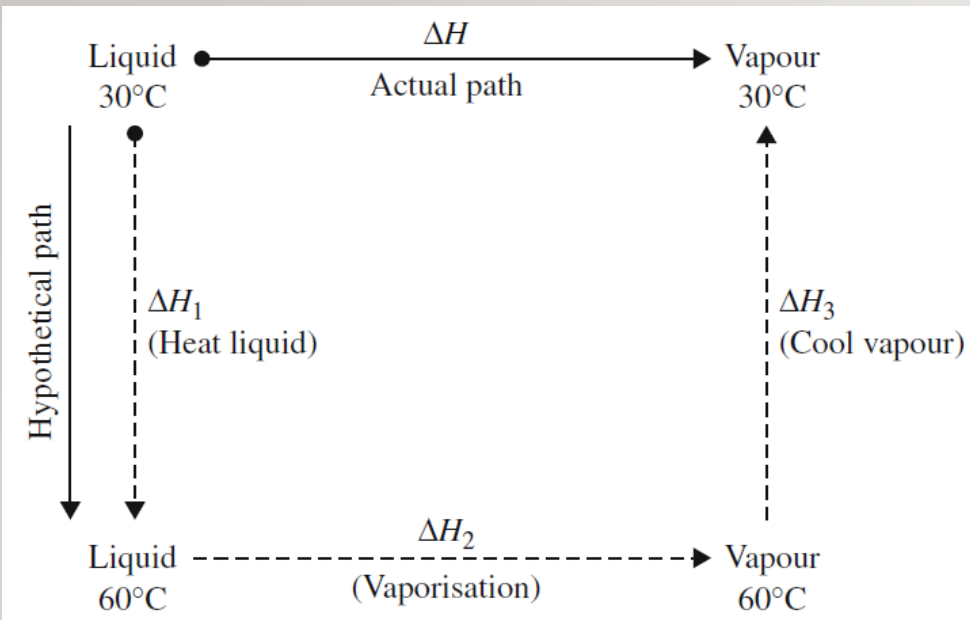
$$\Delta H = M\Delta h_v$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2

- 50 grams αέριας βενζαλδεΐδης συμπυκνώνονται στους 179°C. Ποια είναι η ενθαλπία του υγρού σε σχέση με το αέριο;
- Δεδομένα: MW:106.12 και το σημείο βρασμού της βενζαλδεΐδης είναι 179°C.
- Από καταστατικούς πίνακες βρίσκουμε ότι η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (Δh_v) είναι ίση με 38.40 kJ g⁻¹.
- Άρα για την συμπύκνωση η λανθάνουσα θερμότητα είναι -38.40 kJ g⁻¹
- $$\Delta H = M\Delta h_v = 50 \text{ g} (1 \text{ g mol} / 106.12 \text{ g}) (-38.40 \text{ kJ g mol}^{-1}) = -18.09 \text{ kJ}$$
- Η ενθαλπία του υγρού είναι μικρότερη από αυτή του αερίου.

Πώς μπορούμε να προσδιορίσουμε το ΔH όταν η λανθάνουσα θερμότητα στην θερμοκρασία που θέλουμε δεν αναφέρεται στους πίνακες (δλδ είναι διαφορετική από την θερμοκρασία του σημείου βρασμού) ;

Υπολογισμός Αλλαγής της Ενθαλπίας – Αλλαγή Φάσης



$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3$$

- Αυτό το πρόβλημα ξεπερνιέται χρησιμοποιώντας μια υποθετική διαδρομή.
- Ας υποθέσουμε ότι ένα υγρό εξατμίζεται ισοθερμικά στους 30°C, αλλά οι 'πινακοποιημένες' τιμές για την λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσης αναφέρονται στους 60°C.
- ΥΠΟΘΕΤΙΚΗ ΔΙΑΔΡΟΜΗ
- 1) Το υγρό θερμαίνεται από τους 30°C στους 60°C,
- 2) Εξατμίζεται στους 60°C και
- 3) Ο ατμός ψύχεται στους 30°C.
- Η συνολική αλλαγή ενθαλπίας για αυτή την υποθετική διαδρομή είναι η ίδια σαν να συνέβη εξατμίση απευθείας στους 30°C.
- ΔH_1 και ΔH_3 μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας τιμές θερμοχωρητικότητας (όπως είδαμε στο πρώτο παράδειγμα).
- Το ΔH_2 είναι η λανθάνουσα θερμότητα σε κανονικές συνθήκες που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας δεδομένα Δh_v που είναι διαθέσιμα από πίνακες.

Υπολογισμός Αλλαγής της Ενθαλπίας – Ανάμιξη και Διάλυση

- Όταν ενώσεις αναμιγνύονται ή διαλύονται, οι δεσμοί μεταξύ των μορίων του διαλύτη και της διαλυμένης ουσίας σπάνε και αναμορφώνονται.
- Σε πραγματικά διαλύματα, μια καθαρή απορρόφηση ή απελευθέρωση ενέργειας συνοδεύει αυτές τις διαδικασίες με αποτέλεσμα αλλαγές στην εσωτερική ενέργεια και την ενθαλπία του μείγματος.
- Πχ αραιώση του θεικού οξέος με νερό έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση ενέργειας.
- Σε αυτά τα διαλύματα υπάρχει ένας πρόσθετος ενεργειακός όρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την αξιολόγηση της ενθαλπίας: the **integral heat of mixing** or **integral heat of solution**, Δh_m .

$$H_{\text{mixture}} = H_A + H_B + \Delta H_m$$

- όπου το H_A είναι η ενθαλπία της ένωσης A, το H_B είναι η ενθαλπία της ένωσης B και το ΔH_m είναι η θερμότητα ανάμιξης.

Στα βιολογικά συστήματα, δεν συμβαίνουν συχνά σημαντικές αλλαγές στην ενθαλπία λόγω θερμότητας ανάμιξης. Τα περισσότερα διαλύματα που συναντάμε σε ζυμώσεις είναι αραιά υδατικά μίγματα.

Υπολογισμός Αλλαγής της Ενθαλπίας – Λόγω Αντίδρασης

- Οι αντιδράσεις στις βιοδιεργασίες εμφανίζονται ως αποτέλεσμα της ενζυμικής ενεργότητας και του κυτταρικού μεταβολισμού.
- Κατά τη διάρκεια της αντίδρασης, εμφανίζονται σχετικά μεγάλες αλλαγές στην εσωτερική ενέργεια και την ενθαλπία καθώς οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων αναδιατάσσονται.
- Η θερμότητα της αντίδρασης ΔH_{rxn} είναι η ενέργεια που απελευθερώνεται ή απορροφάται κατά τη διάρκεια της αντίδρασης και ισούται με τη διαφορά στην ενθαλπία των αντιδρώντων με των προϊόντων:

$$\Delta H_{\text{rxn}} = \sum_{\text{products}} Mh - \sum_{\text{reactants}} Mh$$

$$\Delta H_{\text{rxn}} = \sum_{\text{products}} nh - \sum_{\text{reactants}} nh$$

M είναι η μάζα και n είναι τα moles
 h είναι η ειδική ενθαλπία (είτε ανά μάζα είτε ανά γραμμομόριο)

Τα M και n αντιπροσωπεύουν τις ποσότητες που παίρνουν μέρος στην αντίδραση και όχι τις συνολικές ποσότητες του συστήματος.

Υπολογισμός Αλλαγής της Ενθαλπίας – Λόγω Αντίδρασης

- Σε μια εξώθερμη αντίδραση πλεόνασμα ενέργειας απελευθερώνεται ως θερμότητα και η τιμή ΔH_{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 ΔH_{rxn} είναι θετικό.

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

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

Υπολογισμός της θερμότητας της αντίδρασης ΔH_{rxn}

- Το ΔH_{rxn} υπολογίζεται από τη θερμότητα καύσης των μεμονωμένων ενώσεων.
- Η θερμότητα καύσης (Δh_c) ορίζεται ως η θερμότητα που αναπτύχθηκε κατά την αντίδραση μιας ουσίας με το οξυγόνο για να δώσει ορισμένα προϊόντα οξείδωσης όπως αέριο CO_2 , υγρό H_2O και αέριο N_2 .
- Η πρότυπη θερμότητα καύσης (Δh_c°) είναι η ειδική αλλαγή ενθαλπίας που σχετίζεται με την αντίδραση σε πρότυπες συνθήκες ($25^\circ C$ και 1 atm).
- Κατά συνθήκη, η Δh_c° 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 ΔH_{rxn}

- Πρότυπες θερμότητες καύσης χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της πρότυπης θερμότητας της αντίδρασης ΔH_{rxn}

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

- Δh_c° είναι η πρότυπη θερμότητα καύσης ανά γραμμομόριο.
- n είναι τα γραμμομόρια 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.

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 Κ.Σ.):



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

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

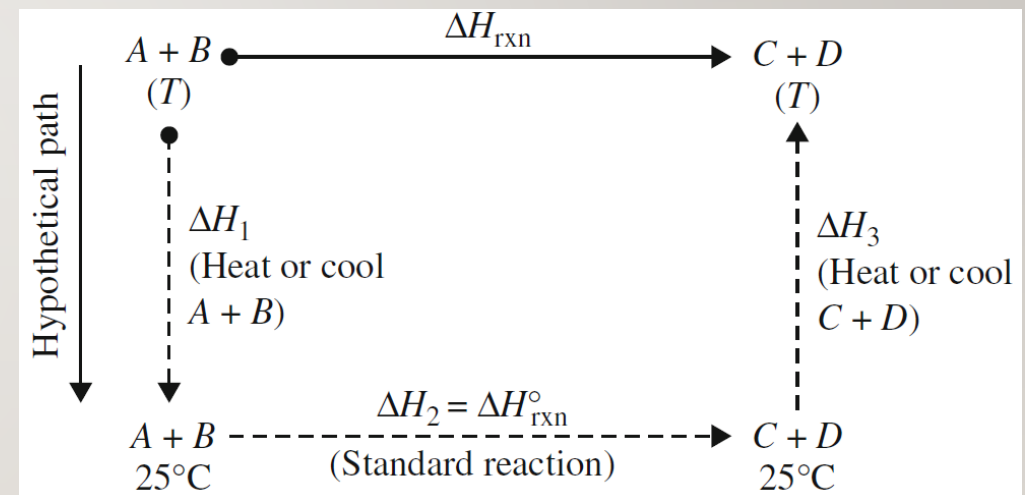
- $\Delta H_{\text{rxn}} = 1 \text{ gmol} (-1328.8 \text{ kJ gmol}^{-1}) - 1 \text{ gmol} (1334.0 \text{ kJ gmol}^{-1}) = 5.2 \text{ kJ}$
- Αφού το ΔH_{rxn} είναι θετικό, η αντίδραση είναι ενδόθερμη και άρα έχουμε απορρόφηση θερμότητας.

Υπολογισμός της θερμότητας αντίδρασης σε μη πρότυπες συνθήκες

- Όταν η αντίδραση δεν λαμβάνει μέρος σε πρότυπες συνθήκες (25°C, 1 atm) όπως στο προηγούμενο παράδειγμα.



- $\Delta H_{rxn}^o = -2805 \text{ kJ}$
- Εάν η αντίδραση συμβεί στους 37°C αντί για 25°C
 - $\Delta H_{rxn}^o = -2801.7 \text{ kJ}$
 - Καθώς τα $\Delta H_1 = -4.8 \text{ kJ}$ και $\Delta H_3 = 8.1 \text{ kJ}$



- Όταν η θερμότητα της αντίδρασης είναι πολύ πιο σημαντική σε σύγκριση με άλλους λόγους αλλαγής ενθαλπίας, τότε το ΔH_{rxn}^o μπορεί να θεωρηθεί ίσο με το ΔH_{rxn} ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία αντίδρασης.

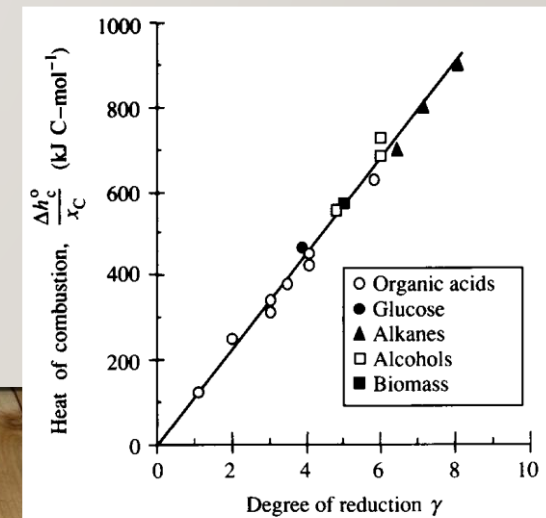
Θερμότητα Αντίδρασης για Βιοδιεργασίες με Παραγωγή Βιομάζας



- Οι θερμότητες αντίδρασης για ανάπτυξη κυττάρων μπορούν να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας στοιχειομετρία και το σκεπτικό των διαθέσιμων ηλεκτρονίων.
- Έχει αποδειχθεί ότι το ΔH_{rxn} μπορεί να θεωρηθεί ίσο με το ΔH_{rxn}^0 ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία αντίδρασης.
- Έχει βρεθεί εμπειρικά ότι η ενεργειακή περιεκτικότητα των οργανικών ενώσεων σχετίζεται με τον βαθμό αναγωγής ως εξής:

$$\Delta h_c^0 = - q \gamma x_c \quad (q = 115 \text{ kJ gmol}^{-1})$$

Δh_c^0 είναι η πρότυπη θερμότητα καύσης σε κανονικές συνθήκες, q είναι η θερμότητα που παράχθηκε ανά gmol διαθέσιμων ηλεκτρονίων που μεταφέρονται στο O_2 κατά την καύση, το γ είναι ο βαθμός αναγωγής της ένωσης, και το x_c είναι ο αριθμός ατόμων άνθρακα στο μοριακό τύπο.



Θερμότητα της αντίδρασης με οξυγόνο ως δέκτης ηλεκτρονίων

$\Delta h^{\circ}_c = - q \gamma \times_c \quad (q = 115 \text{ kJ gmol}^{-1})$

- Η θερμότητα καύσης είναι ανάλογη του βαθμού αναγωγής ο οποίος παίζει σημαντικό ρόλο για τον προσδιορισμό της θερμότητας της αντίδρασης για αερόβιες καλλιέργειες.
- Το μοριακό οξυγόνο O_2 δέχεται τέσσερα ηλεκτρόνια (δλδ για ένα mol O_2 που καταναλώνεται κατά την αναπνοή, τέσσερα moles ηλεκτρονίων πρέπει να μεταφερθούν).
- Εάν δεχτούμε την τιμή των 115 kJ ενέργειας που απελευθερώνεται ανά gmol ηλεκτρονίων που μεταφέρονται, η ποσότητα ενέργειας που απελευθερώνεται από την κατανάλωση ενός gmol O_2 είναι επομένως (4×115) kJ, ή 460 kJ.
- Έτσι, η θερμότητα της αντίδρασης για αερόβιο μεταβολισμό είναι περίπου ~ 460 kJ ανά gmol 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 (NH₃) 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 Δh_c° είναι η πρότυπη θερμότητα καύσης. Οι πρότυπες θερμότητες καύσης για το υπόστρωμα, την NH₃ και τα προϊόντα μπορούν να βρεθούν σε πίνακες, αλλά

- Ποια είναι η πρότυπη θερμότητα καύσης της βιομάζας;

Πρότυπη θερμότητα καύσης της βιομάζας

- Εάν υποθέσουμε τον μέσο μοριακό τύπο για την βιομάζα ($\text{CH}_{1.8}\text{O}_{0.5}\text{N}_{0.2}$), τότε η αντίδραση για την καύση των κυττάρων είναι:
- $\text{CH}_{1.8}\text{O}_{0.5}\text{N}_{0.2} + 1.2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 0.9 \text{H}_2\text{O} + 0.1 \text{N}_2$
- Παίρνοντας τον προηγούμενο τύπο:
- $\Delta h_c^o = -q \gamma x_c$ ($q = 115 \text{ kJ gmol}^{-1}$; $\gamma = 4.80$; $\text{MW}_{\text{cells}} = 25.9$)

$$\Delta h_c \text{ for bacteria} \simeq -23.2 \text{ kJ g}^{-1}$$

$$\Delta h_c \text{ for yeast} \simeq -21.2 \text{ kJ g}^{-1}$$

Η εξίσωση ισοζυγίου ενέργειας για την καλλιέργεια κυττάρων

- 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 θερμότητες 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. Εάν η εξάτμιση ελέγχεται, τότε τα λανθάνοντα φαινόμενα θερμότητας μπορούν επίσης να αγνοηθούν.
- Ανά κυβικό μέτρο υγρού ζύμωσης, οι μεταβολικές αντιδράσεις συνήθως παράγουν θερμότητα **5 - 20 kJ ανά δευτερόλεπτο** για ανάπτυξη σε υπόστρωμα υδατανθράκων και έως 60 kJ s^{-1} για ανάπτυξη σε υποστρώματα υδρογονανθράκων.
- Για λόγους σύγκρισης, η εξάτμιση του υγρού ζύμωσης αφαιρεί μόνο περίπου **$0.5 \text{ kJ s}^{-1} \text{ m}^{-3}$** ως λανθάνουσα θερμότητα. Η εισροή ενέργειας που οφείλεται στο μηχανικό έργο του άξονα κυμαίνεται μεταξύ **$0.5 - 5 \text{ kJ s}^{-1} \text{ m}^{-3}$** σε δεξαμενές μεγάλης κλίμακας και **$10 - 20 \text{ kJ s}^{-1} \text{ m}^{-3}$** σε μικρές δεξαμενές.

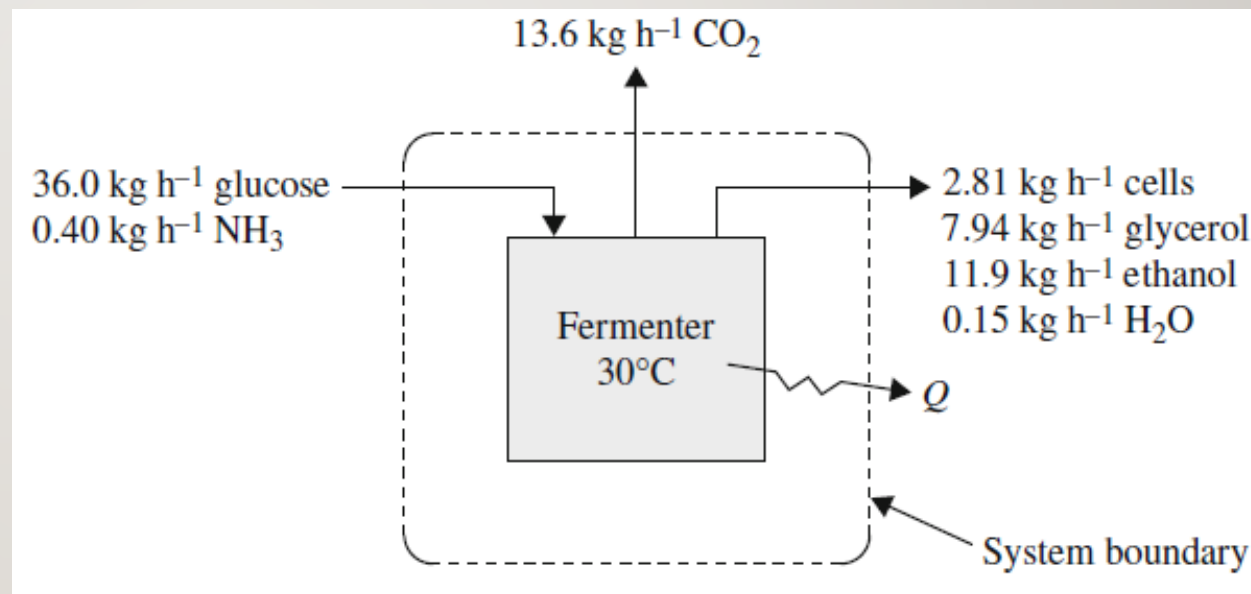
Η εξίσωση ισοζυγίου της ενέργειας για την καλλιέργεια κυττάρων

- Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω η εξίσωση ισοζυγίου ενέργειας είναι:
- $-\Delta H_{\text{rxn}} - M_v \Delta h_v - Q + W_s = \Delta E$
- 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)

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3: ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΑΝΑΕΡΟΒΙΟ ΖΥΜΩΤΗΡΑ

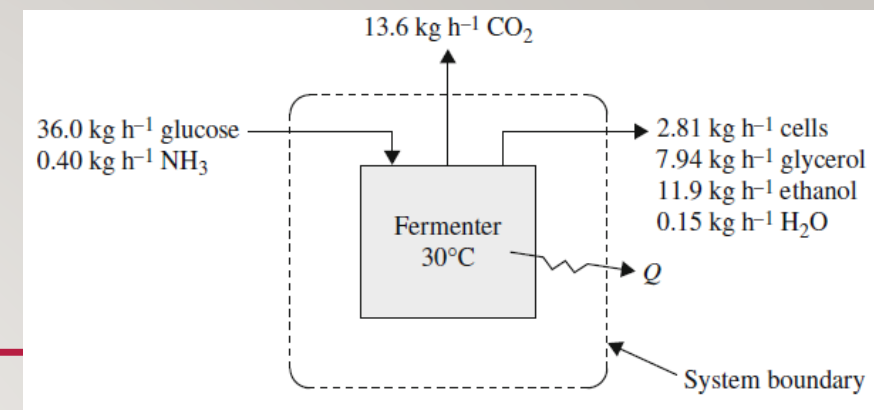
Ο *Saccharomyces cerevisiae* αναπτύσσεται αναερόβια σε συνεχή καλλιέργεια στους 30°C. Η γλυκόζη χρησιμοποιείται ως πηγή άνθρακα και η αμμωνία ως πηγή αζώτου. Παράγεται ένα μείγμα γλυκερόλης και αιθανόλης. Σε σταθερές συνθήκες, οι ροές μάζας προς και από τον αντιδραστήρα έχουν ως εξής:

Γλυκόζη in	36.0 kg h ⁻¹
NH ₃ in	0.40 kg h ⁻¹
Βιομάζα out	2.81 kg h ⁻¹
Γλυκερόλη out	7.94 kg h ⁻¹
Αιθανόλη out	11.9 kg h ⁻¹
CO ₂ out	13.6 kg h ⁻¹
H ₂ O out	0.15 kg h ⁻¹



Να υπολογίσετε τις απαιτήσεις σε νερό ψύξης ούτως ώστε η θερμοκρασία της ζύμωσης να παραμένει σταθερή.

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

$$\text{MW glucose} = 180$$

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

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

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

$$(\Delta h_c^\circ)_{\text{glucose}} = -2805.0 \text{ kJ g mol}^{-1}$$

$$(\Delta h_c^\circ)_{\text{NH}_3} = -382.6 \text{ kJ g mol}^{-1}$$

$$(\Delta h_c^\circ)_{\text{glycerol}} = -1655.4 \text{ kJ g mol}^{-1}$$

$$(\Delta h_c^\circ)_{\text{ethanol}} = -1366.8 \text{ kJ g mol}^{-1}$$

$$(\Delta h_c^\circ)_{\text{yeast}} = -21.2 \text{ kJ g}^{-1}$$

ΛΥΣΗ ΆΣΚΗΣΗΣ (ΣΥΝΕΧΕΙΑ)

- Δεύτερο βήμα: Γράφουμε την αντίδραση και τα Ισοζύγια Μάζας και Ενέργειας
- Γλυκόζη + NH₃ → Βιομάζα + Γλυκερόλη + Αιθανόλη + CO₂ + H₂O
- Το ισοζύγιο μάζας δίνεται από την εκφώνηση της άσκησης
- 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 θερμότητα της αντίδρασης ΔH_{rxn}

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

ΛΥΣΗ ΆΣΚΗΣΗΣ (ΣΥΝΕΧΕΙΑ)

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

- Γλυκόζη + NH₃ → Βιομάζα + Γλυκερόλη + Αιθανόλη + CO₂ + H₂O
- Η θερμότητα καύσης για το CO₂ και το H₂O 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 / gmol σε kJ / kg

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

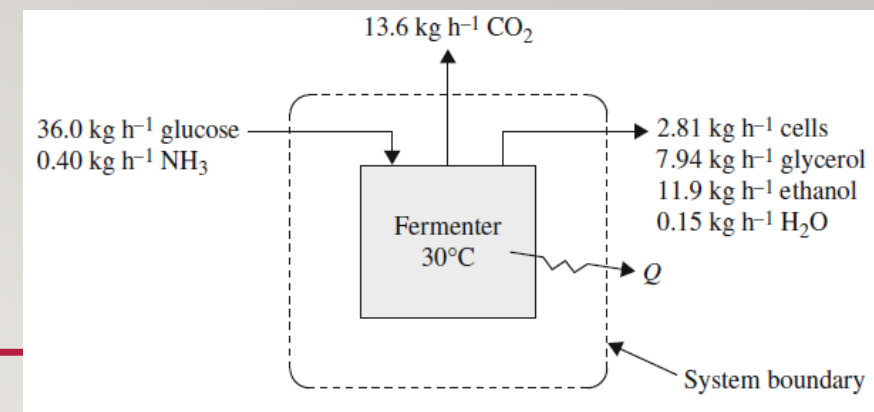
$$(\Delta h_c^{\circ})_{\text{A}} = -382.6 \frac{\text{kJ}}{\text{gmol}} \cdot \left| \frac{1 \text{ gmol}}{17 \text{ g}} \right| \cdot \left| \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right| = -2.251 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}$$

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

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

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

ΛΥΣΗ ΆΣΚΗΣΗΣ (ΣΥΝΕΧΕΙΑ)



$$\begin{aligned}\Delta H_{\text{rxn}} &= (36.0 \text{ kg}) (-1.558 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}) + (0.4 \text{ kg}) (-2.251 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}) \\ &\quad - (2.81 \text{ kg}) (-2.120 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}) - (7.94 \text{ kg}) (-1.799 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}) \\ &\quad - (11.9 \text{ kg}) (-2.971 \times 10^4 \text{ kJ kg}^{-1}) \\ \Delta H_{\text{rxn}} &= -1.392 \times 10^4 \text{ kJ}\end{aligned}$$

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

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4: ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΑΕΡΟΒΙΕΣ ΖΥΜΩΣΕΙΣ

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

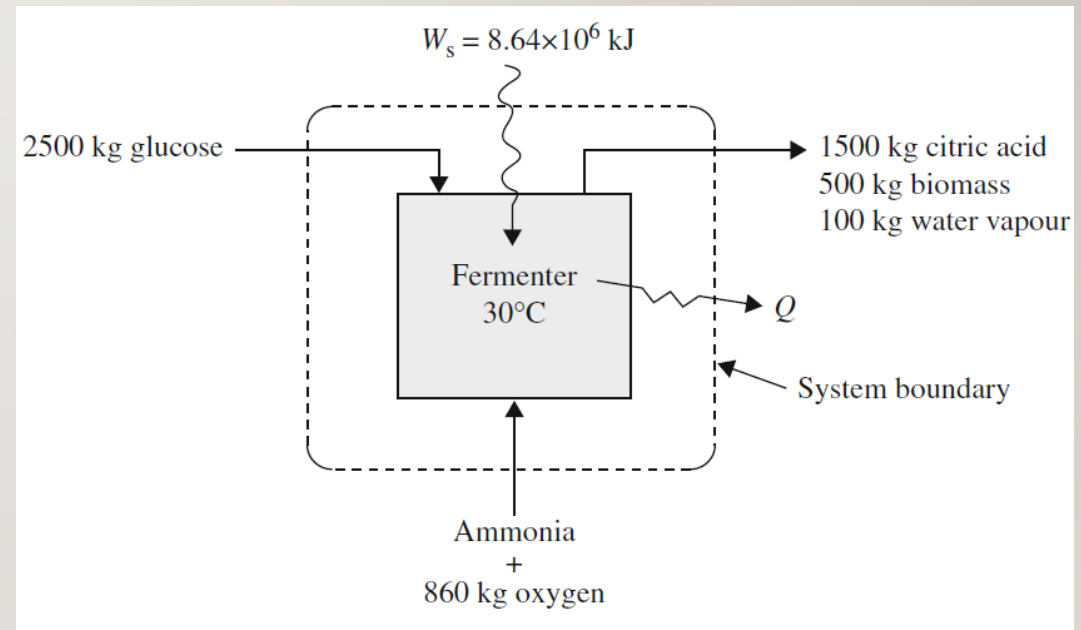
Σε διάστημα δύο ημερών, καταναλώνονται 2500 kg γλυκόζης και 860 kg οξυγόνου για την παραγωγή 1500 kg κιτρικού οξέος, 500 kg βιομάζας και άλλων προϊόντων.

Η αμμωνία χρησιμοποιείται ως πηγή αζώτου.

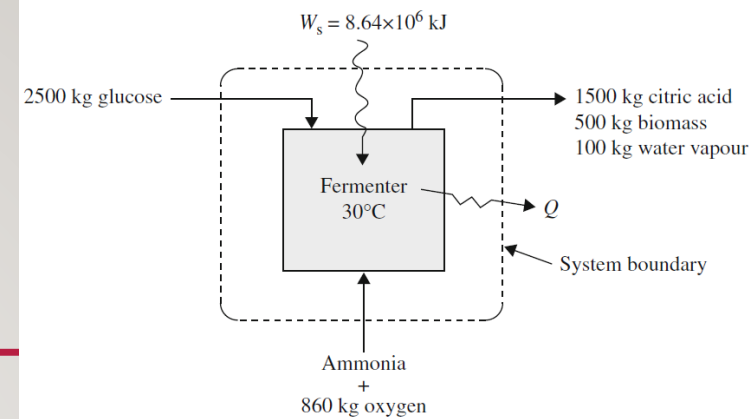
Ισχύς μπαίνει στο σύστημα υπό μηχανική ανάδευση του υγρού ζύμωσης και είναι ίση με περίπου 15 kW.

Περίπου 100 kg νερού εξατμίζονται κατά την περίοδο καλλιέργειας.

Υπολογίστε τις απαιτήσεις σε ψύξη.



ΛΥΣΗ ΆΣΚΗΣΗΣ



- Πρώτο βήμα: τι δεδομένα έχουμε και τι δεδομένα μπορούμε να υποθέσουμε/βρούμε
 - Αμελητέα αισθητή αλλαγή θερμότητας.
 - Αερόβια ζύμωση: Θερμότητα αντίδρασης $-460 \text{ kJ gmol}^{-1} \text{ O}_2$ που καταναλώνεται
 - Εξτρά δεδομένα: η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισής για το νερό στους 30°C
 - $\Delta h_v = 2430.7 \text{ kJ kg}^{-1}$
- Δεύτερο βήμα: Γράφουμε την αντίδραση και το Ισοζύγιο Ενέργειας
- Γλυκόζη + O_2 + $\text{NH}_3 \rightarrow$ Βιομάζα + Κιτρικό οξύ + CO_2 + H_2O
- Ισοζύγιο Ενέργειας:
 - $-\Delta H_{\text{rxn}} - M_v \Delta h_v - Q + W_s = \Delta E$; Όμως εμείς θέλουμε το Q για $\Delta E = 0$

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

ΛΥΣΗ ΆΣΚΗΣΗΣ (ΣΥΝΕΧΕΙΑ)

- Η θερμότητα της αντίδρασης ΔH_{rxn} εξαρτάται από την ποσότητα του οξυγόνου που καταναλώθηκε:

$$\Delta H_{\text{rxn}} = (-460 \text{ kJ gmol}^{-1}) (860 \text{ kg}) \cdot \left| \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right| \cdot \left| \frac{1 \text{ gmol}}{32 \text{ g}} \right|$$
$$\Delta H_{\text{rxn}} = -1.24 \times 10^7 \text{ kJ}$$

- Η θερμότητα που χάνεται εξαιτίας της εξάτμισης είναι:
 - $M_v \Delta h_v = (100 \text{ kg}) (2430.7 \text{ kJ kg}^{-1}) = 2.43 \times 10^5 \text{ kJ}$
- Η ισχύς που μπαίνει λόγω μηχανικής ανάδευσης είναι 15 kW ή 15 kJ s⁻¹
- Για διάρκεια 2 ημερών υπολογίζω το W_s

ΛΥΣΗ ΆΣΚΗΣΗΣ (ΣΥΝΕΧΕΙΑ)

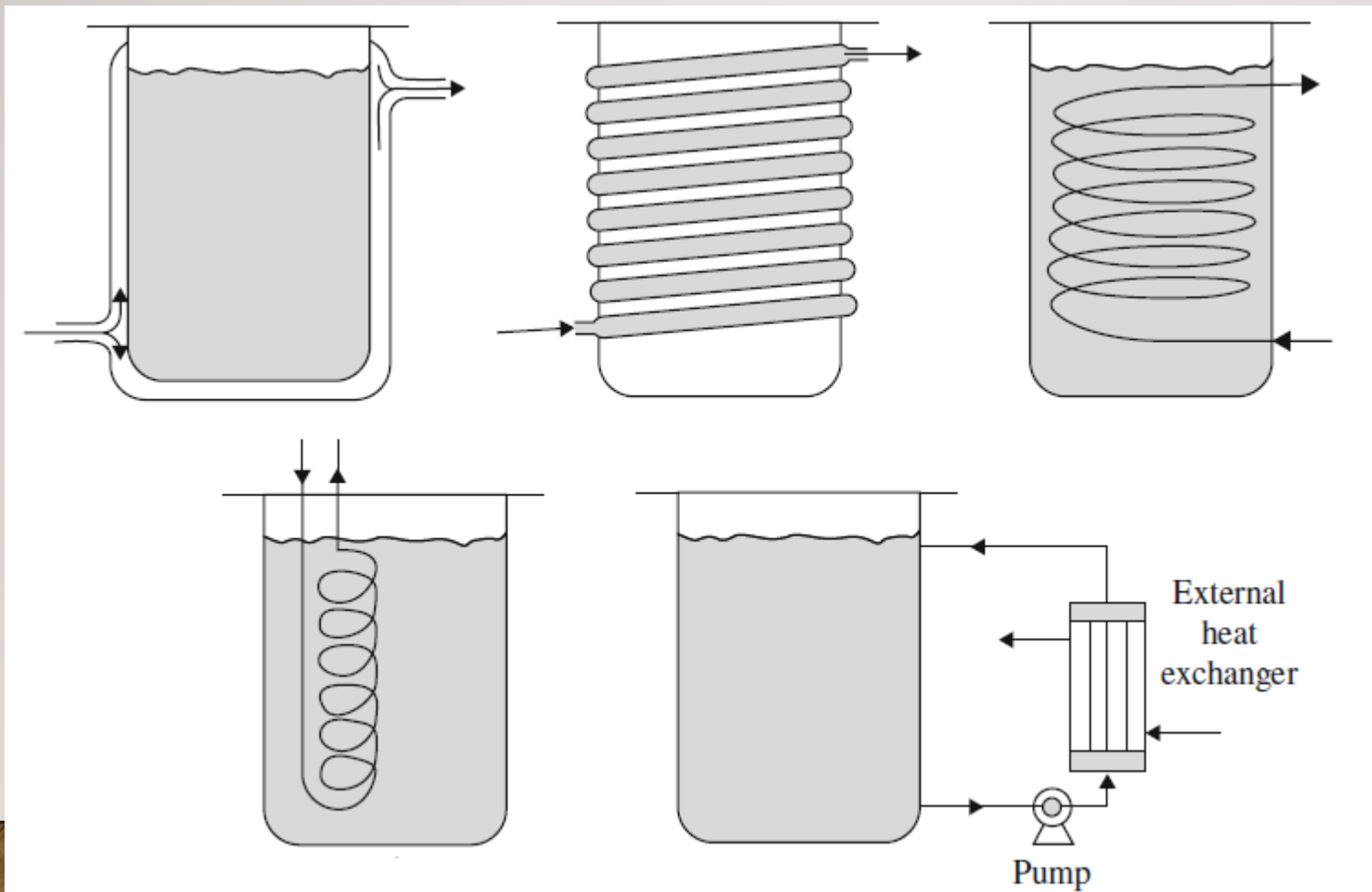
- Αντικαθιστώντας τα προηγούμενα αποτέλεσμα στην εξίσωση του Ισοζυγίου Ενέργειας:
- $-\Delta H_{\text{rxn}} - M_v \Delta h_v - Q + W_s = 0$

$$-(-1.24 \times 10^7 \text{ kJ}) - (2.43 \times 10^5 \text{ kJ}) - Q + (2.59 \times 10^6 \text{ kJ}) = 0$$
$$Q = 1.47 \times 10^7 \text{ kJ}$$

- Βλέπουμε ότι το Q είναι θετικό, δείχνοντας ότι θερμότητα πρέπει να απομακρυνθεί από το σύστημα.
- Επίσης μπορούμε να συγκρίνουμε ποιοι όροι του Ι.Ε. είναι και οι πιο σημαντικοί.

Φαινόμενα Μεταφορά ενέργειας στους Βιοαντιδραστήρες

Διατάξεις για μεταφορά θερμότητας σε βιοαντιδραστήρες



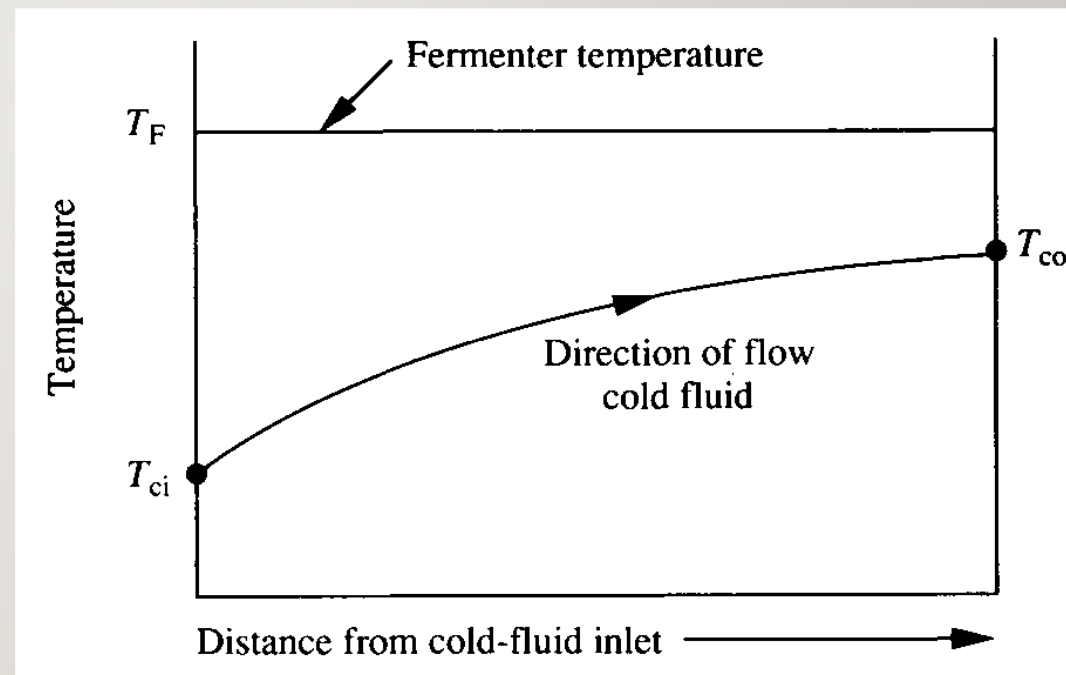
- (a) Εξωτερικό περίβλημα
- (b) Εξωτερικό σπείραμα
- (c) Εσωτερικό σπείραμα
- (d) Εσωτερικό σπείραμα ρυθμιζόμενο σε μεγάλους αντιδραστήρες
- (e) Εξωτερικού εναλλάκτη θερμότητας

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφορετικών διατάξεων μεταφοράς θερμότητας στους βιοαντιδραστήρες

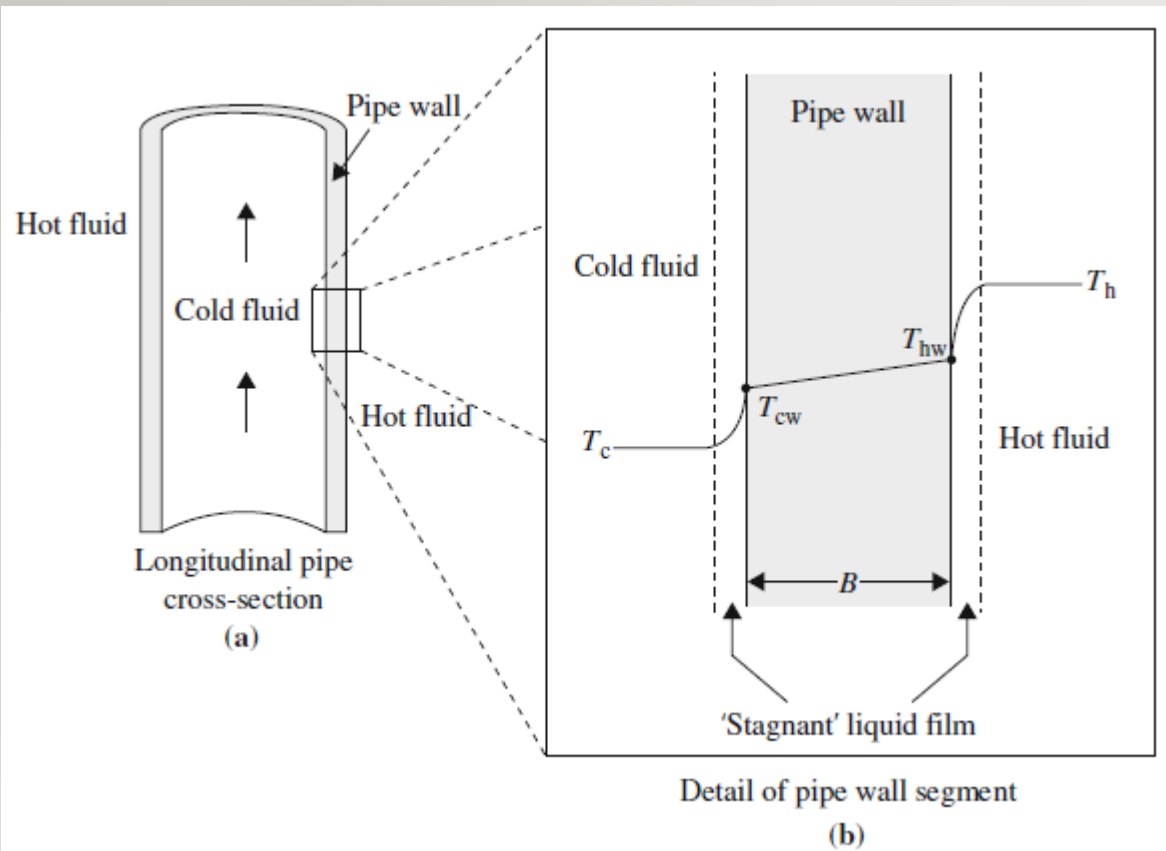
- Η επιφάνεια που διατίθεται για μεταφορά θερμότητας είναι χαμηλότερη στους βιοαντιδραστήρες με εξωτερικό περίβλημα και σπείραμα από ό,τι σε αυτούς που έχουν εσωτερικά σπειράματα που είναι πλήρως βυθισμένα στο υγρό ζύμωσης.
- Τα εξωτερικό περίβλημα και σπείραμα παρέχουν επαρκή μεταφορά θερμότητας σε μικρής κλίμακας βιοαντιδραστήρες. Ωστόσο, είναι πιθανό να μην επαρκούν για ζύμωση μεγάλης κλίμακας όπου οι εσωτερικές κατασκευές είναι πιο αποτελεσματικές.
- Τα εσωτερικά σπειράματα ενδέχεται να εμποδίζουν την ανάμιξη του υγρού, να καθιστούν δύσκολο τον καθαρισμό του αντιδραστήρα και να προάγουν την ανάπτυξη βιοφίλμ στην επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας.
- Οι εξωτερικοί εναλλάκτες θερμότητας είναι εύκολο να κλιμακωθούν, αλλά πρέπει να πληρούνται οι ασηπτικές συνθήκες, τα κύτταρα πρέπει να είναι σε θέση να αντέχουν στις διατμητικές δυνάμεις που επιβάλλονται κατά την άντληση και, σε αερόβιες ζυμώσεις, ο χρόνος παραμονής στον εναλλάκτη θερμότητας πρέπει να είναι αρκετά μικρός ώστε να μην εξαντλείται το οξυγόνο στο μέσο ζύμωσης.

Μεταβολή της θερμοκρασίας του νερού ψύξης για τον έλεγχο της θερμοκρασίας σε μια ζύμωση

- Όταν χρησιμοποιείται νερό ψύξης για απομάκρυνση της θερμότητας από τον βιοαντιδραστήρα, η διακύμανση της θερμοκρασίας του νερού μέσω της απόστασης του σπειράματος ή του περιβλήματος είναι όπως φαίνεται στο Σχήμα.

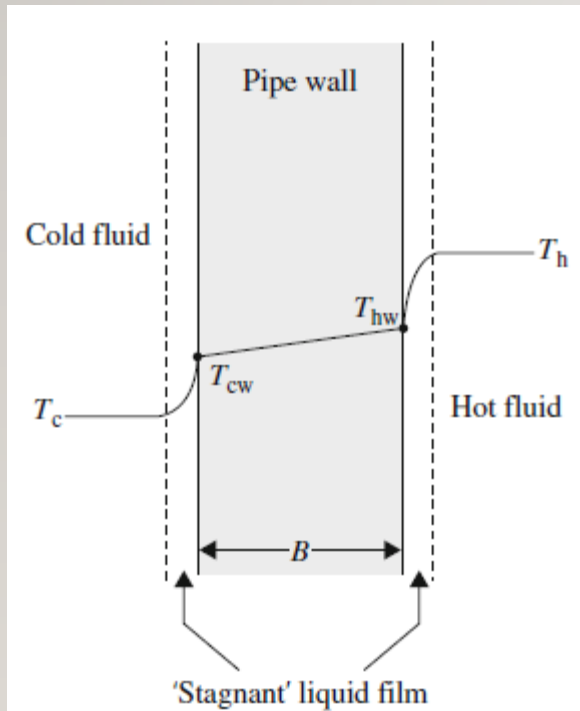


Γραφική απεικόνιση της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ υγρών που χωρίζονται από τοίχωμα σωλήνα



- Η θερμότητα που ανταλλάσσεται μεταξύ των ρευστών συναντά τρεις μεγάλες θερμικές αντιστάσεις στη σειρά:
 - Αντίσταση του θερμού υγρού στον τοίχο,
 - Αντίσταση λόγω του ίδιου του τοίχου και
 - Αντίσταση του ψυχρού υγρού στον τοίχο.
- Η ολική μεταφορά θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:
 - $Q = U A \Delta T = U A (T_h - T_c)$
 - U = ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ($W m^{-2} K^{-1}$)
 - A = η επιφάνεια της μεταφοράς θερμότητας (m^2)
 - ΔT = η ολική διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του θερμού και του ψυχρού ρεύματος

Ολική αντίσταση



- Η ολική αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας είναι ο λόγος της διαφοράς θερμοκρασίας (ΔT) προς τον ρυθμό της μεταφοράς θερμότητας (Q):

- $R_T = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{1}{UA}$ και $R_T = R_h + R_w + R_c$

Ισοζυγία ενέργειας κατά τη διάρκεια ψύξης υγρού ζύμωσης

$$\frac{dE}{dt} = -\Delta\hat{H}_{\text{rxn}} - \hat{M}_v \Delta h_v - \hat{Q} + \hat{W}_s$$

- Όπου το $\Delta\hat{H}_{\text{rxn}}$ είναι ο ρυθμός απορρόφησης ή έκλυσης θερμότητας λόγω μεταβολικής αντίδρασης
- \hat{M}_v είναι ο ρυθμός μάζας υγρού που εξατμίζεται και φεύγει από το σύστημα
- Δh_v είναι η λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσεως
- \hat{W}_s είναι ο ρυθμός του μηχανικού έργου που προσδίδεται στο σύστημα
- Σε μόνιμες συνθήκες όπου $dE/dt = 0$ λύνω ως προς \hat{Q} και μπορώ να χρησιμοποιήσω εξισώσεις όπως η παρακάτω ούτως ώστε να υπολογίσω άγνωστες λειτουργικές συνθήκες.

$$\hat{Q} = \hat{M}_c C_{pc} (T_{co} - T_{ci})$$

Ισοζυγία ενέργειας κατά τη διάρκεια ψύξης υγρού ζύμωσης (συνέχεια)

$$\hat{Q} = \hat{M}_c C_{pc} (T_{co} - T_{ci})$$

- Όπου C_{pc} είναι η θερμοχωρητικότητα του ψυχρού ρευστού
- T_{ci} και T_{co} είναι η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του ψυχρού ρευστού, αντίστοιχα
- M_c είναι ο ρυθμός μάζας του ψυχρού ρευστού

Παράδειγμα 5: Υπολογισμός της θερμοκρασίας εξόδου του νερού ψύξης

Ένας βιοαντιδραστήρας 150 m^3 λειτουργεί στους 35°C για την παραγωγή βιομάζας από γλυκόζη. Ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου από την καλλιέργεια είναι $1.5 \text{ kg m}^{-3} \text{ h}^{-1}$. Ο αναδευτήρας δίδει θερμότητα μέσω μηχανικού έργου με ρυθμό 1 kW m^{-3} . Περίπου $60 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ νερού ψύξης που διατίθενται από ένα κοντινό ποτάμι στους 10°C διέρχονται από ένα εσωτερικό σπείραμα στη δεξαμενή ζύμωσης. Εάν το σύστημα λειτουργεί σε σταθερή κατάσταση, ποια είναι η θερμοκρασία εξόδου του νερού ψύξης;

ΛΥΣΗ ΑΣΚΗΣΗΣ

- Ο ρυθμός της θερμότητας της αντίδρασης $\Delta\hat{H}_{\text{rxn}}$ στις αερόβιες ζυμώσεις μπορεί να υπολογιστεί απευθείας από τη ζήτηση σε οξυγόνο (~460 kJ θερμότητας εκλύονται για κάθε gmol οξυγόνου που καταναλώνεται).

$$\Delta\hat{H}_{\text{rxn}} = \frac{-460 \text{ kJ}}{\text{gmol}} \cdot \left| \frac{1 \text{ gmol}}{32 \text{ g}} \right| \cdot \left| \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right| \cdot (1.5 \text{ kg m}^{-3} \text{ h}^{-1}) \cdot \left| \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right| \cdot 150 \text{ m}^3 = -898 \text{ kJ s}^{-1}$$

- Εξώθερμη αντίδραση
- Μηχανικό έργο: $1 \text{ kW m}^{-3} (150 \text{ m}^3) = 150 \text{ kW}$

$$\hat{Q} = -\Delta\hat{H}_{\text{rxn}} - \hat{M}_v \Delta h_v + \hat{W}_s = (898 - 0 + 150) \text{ kW} = 1048 \text{ kW}$$

ΛΥΣΗ ΑΣΚΗΣΗΣ (ΣΥΝΕΧΕΙΑ)

$$\hat{Q} = \hat{M}_c C_{pc}(T_{co} - T_{ci})$$

- Για το M_c μετατρέπω τις μονάδες από $m^3 h^{-1}$ σε $kg s^{-1}$ αφού η πυκνότητα του νερού είναι $1000 kg / m^3$
- Βρίσκω το C_{pc} από πίνακες ($4.19 \times 10^3 J kg^{-1} C^{-1}$)
- Χρησιμοποιώ την εξίσωση για να υπολογίσω την θερμοκρασία εξόδου του ψυχρού νερού από τον βιοαντιδραστήρα.
- $T_{co} = 25^\circ C$

Δομή Μαθήματος

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

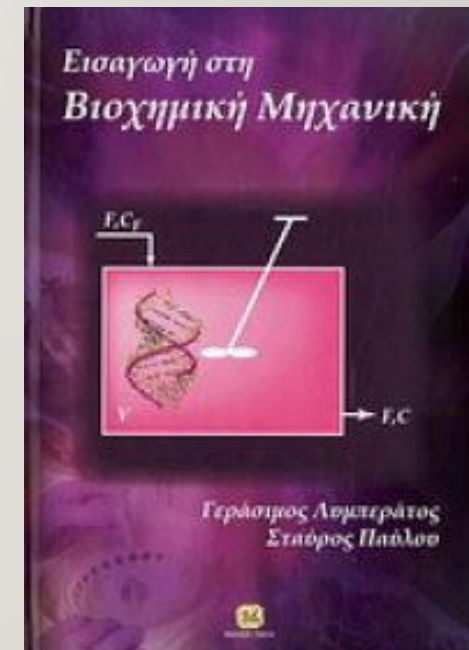
Φαινόμενα μεταφοράς
ενέργειας σε έναν
αντιδραστήρα

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



Τι μάθαμε σήμερα

- 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
- Φαινόμενα Μεταφορά Θερμότητας στους Βιοαντιδραστήρες
 - Διατάξεις για μεταφορά θερμότητας σε βιοαντιδραστήρες
 - Τύπο της ολικής μεταφοράς θερμότητας
 - Ισοζυγία ενέργειας κατά τη διάρκεια ψύξης υγρού ζύμωσης