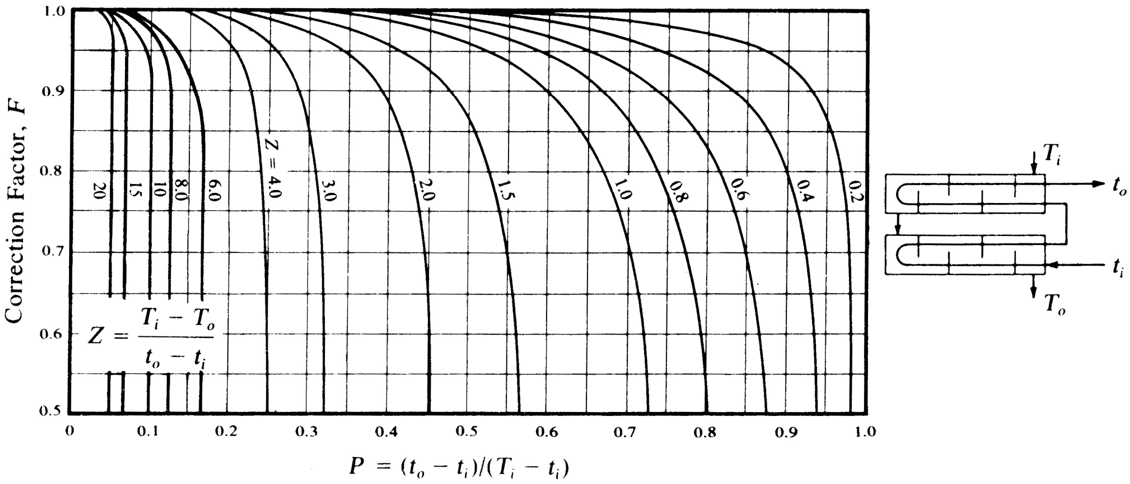
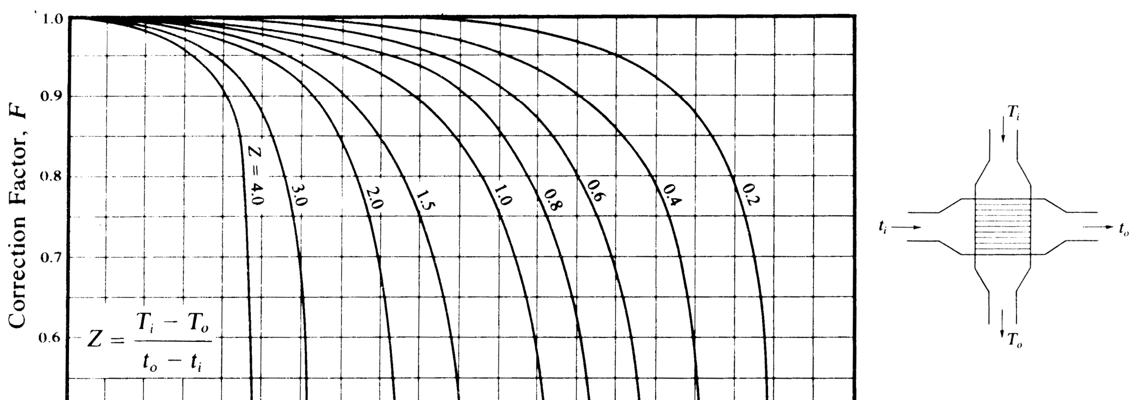
δεδομένες θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των ρευστών στον εναλλάκτη. Όταν είναι γνωστές μόνο οι θερμοκρασίες εισόδου των ρευστών, η ανάλυση αυτή δύναται να εφαρμοστεί μόνο στα πλαίσια μιας μεθόδου διαδοχικών προσεγγίσεων. Στην περίπτωση αυτή καταλληλότερη είναι η λεγόμενη *μέθοδος αποτελεσματικότητας* (NTU).

Η αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη μπορεί να ορισθεί με βάση την μέγιστη θερμορροή που θεωρητικά θα ήταν επιτεύξιμη σε έναν εναλλάκτη με αντιρροή και άπειρη επιφάνεια εναλλαγής, έτσι ώστε να υλοποιηθεί η μέγιστη δυνατή μεταβολή της θερμοκρασίας ενός εκ των ρευστών και συγκεκριμένα του ρευστού με τον μικρότερο ρυθμό θερμοχωρητικότητας C ($C \equiv \dot{m}c$).



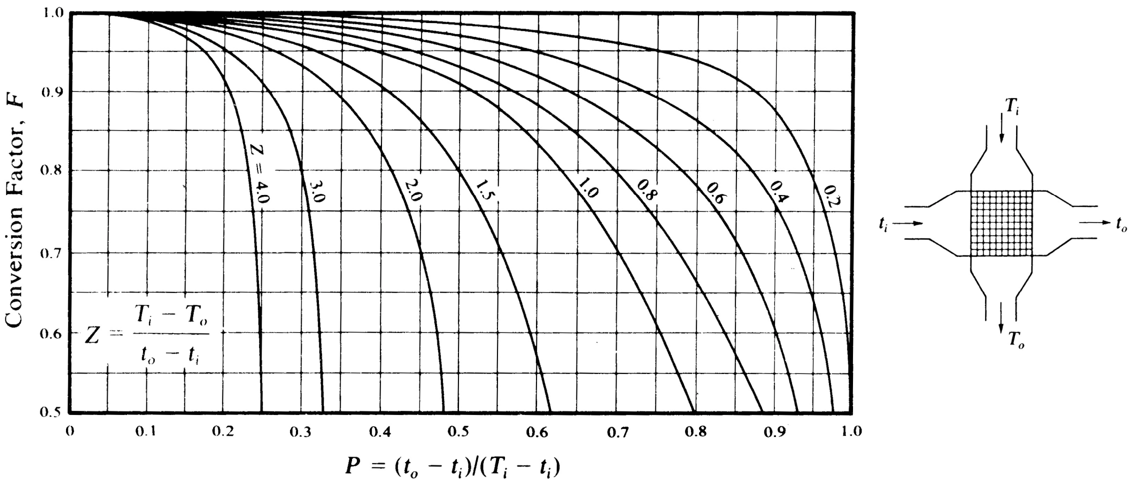
Σχήμα ΕΘ-6. Εναλλάκτης διπλής διαδρομής στο κέλυφος και δυο φορές άρτιου αριθμού διαδρόμων στους σωλήνες



Σχήμα ΕΘ-7. Εναλλάκτης σταυρωτής ροής με ανάμιξη ενός εκ των ρευστών

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην χρήση του όρου *αποτελεσματικότητα* (effectiveness) του εναλλάκτη,

$$\varepsilon \equiv \frac{\text{πραγματική μετάδοση θερμότητας}}{\text{μέγιστη δυνατή μετάδοση θερμότητας}} = \frac{q_{actual}}{q_{\max}} \qquad (\text{ΕΘ.15})$$



Σχήμα ΕΘ-8. Εναλλάκτης σταυρωτής ροής χωρίς ανάμιξη των ρευστών

όπου η μέγιστη δυνατή μετάδοση θερμότητας, q_{max}, είναι εκείνη που θα προέκυπτε αν στο ρευστό συνέβαινε μια θερμοκρασιακή μεταβολή ίση με την μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά που μπορεί να υπάρξει (θερμοκρασία του εισερχόμενου θερμού ρευστού μείον την θερμοκρασία του εισερχόμενου ψυχρού ρευστού). Η εν προκειμένω μέθοδος αξιοποιεί τον βαθμό αποτελεσματικότητας *ε,* έτσι ώστε να μην λαμβάνεται υπ' όψιν η άγνωστη θερμοκρασία εξόδου, και προσδιορίζει την αποτελεσματικότητα εκφρασμένη ως προς άλλες γνωστές παραμέτρους ($\dot{m}$, *c*, *A* και *U*). Ισχύει λοιπόν:

$$q_{actual} = C_h(T_{hi} - T_{ho}) = C_c(T_{co} - T_{ci}) \qquad \text{(ΕΘ.16)}$$

Η ανωτέρω σχέση είναι ενδεικτική του γεγονότος ότι η ενέργεια που δίνει το θερμό ρευστό πηγαίνει στο ψυχρό ρευστό. Η μέγιστη δυνατή μετάδοση θερμότητας λαμβάνει χώρα, όταν στο ρευστό με μικρότερο *C* συμβαίνει η μέγιστη θερμοκρασιακή μεταβολή, δηλαδή όταν:

$$q_{\max} = C_{\min}(T_{hi} - T_{ci}) \qquad \text{(ΕΘ.17)}$$

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η μέγιστη δυνατή μετάδοση θερμότητας μπορεί να επιτευχθεί σε εναλλάκτη αντιρροής άπειρης επιφάνειας. Από συνδυασμό των σχέσεων (ΕΘ.15) και (ΕΘ.17) εξάγεται η βασική εξίσωση για τον υπολογισμό του μεταδιδόμενου θερμικού φορτίου σε εναλλάκτες, στην περίπτωση που οι θερμοκρασίες εξόδου είναι άγνωστες:

$$q_{actual} = \varepsilon\, C_{\min}(T_{hi} - T_{ci}) \qquad \text{(ΕΘ.18)}$$

ΕΘ.4.1 ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΟΜΟΡΡΟΗΣ

Ο υπολογισμός της μέσης λογαριθμικής διαφοράς θερμοκρασίας γίνεται για έναν απλό εναλλάκτη ομορροής, όπως αυτός του σχήματος ΕΘ-4, σύμφωνα με τις υποθέσεις που έγιναν παραπάνω. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (ΕΘ.15), (ΕΘ.16) και (ΕΘ.17) λαμβάνονται οι παρακάτω δυο εκφράσεις για την αποτελεσματικότητα:

$$\varepsilon = \frac{C_h(T_{hi} - T_{ho})}{C_{\min}(T_{hi} - T_{ci})} = \frac{C_c(T_{co} - T_{ci})}{C_{\min}(T_{hi} - T_{ci})} \qquad \text{(ΕΘ.19)}$$

Εφόσον είτε το θερμό είτε το ψυχρό ρευστό δύνανται να έχουν την ελάχιστη τιμή της *C*, υπάρχουν δύο πιθανές τιμές της αποτελεσματικότητας,

$$C_h < C_c: \qquad \varepsilon_h = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{hi} - T_{ci}}$$

$$\& \qquad (\text{ΕΘ.20})$$

$$C_c < C_h: \qquad \varepsilon_c = \frac{T_{co} - T_{ci}}{T_{hi} - T_{ci}}$$

όπου οι δείκτες στην αποτελεσματικότητα, *ε*, δηλώνουν ποιο ρευστό χαρακτηρίζεται από την ελάχιστη τιμή *C*. Η σχέση (ΕΘ.9) μπορεί να αποδοθεί με όρους *C* ως ακολούθως:

$$\ln\frac{T_{ho} - T_{co}}{T_{hi} - T_{ci}} = -UA\left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right) \qquad (\text{ΕΘ.21})$$

ή

$$\frac{T_{ho} - T_{co}}{T_{hi} - T_{ci}} = e^{-\frac{UA}{C_h}\left(1+\frac{C_h}{C_c}\right)} \qquad (\text{ΕΘ.22})$$

Από το ισοζύγιο ενέργειας (ΕΘ.16) έχουμε:

$$T_{co} = T_{ci} + \frac{C_h}{C_c}(T_{ho} - T_{hi}) \qquad (\text{ΕΘ.23})$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (ΕΘ.22) και (ΕΘ.23) με την πρώτη εκ των εξισώσεων (ΕΘ.20), για την οποία πραγματοποιείται η παραδοχή ότι το θερμότερο ρευστό φέρει την μικρότερη τιμή της *C*, λαμβάνεται η παρακάτω έκφραση της αποτελεσματικότητας:

$$\varepsilon_h = \frac{1 - e^{-\frac{UA}{C_h}\left(1+\frac{C_h}{C_c}\right)}}{1 + \frac{C_h}{C_c}} \qquad (\text{ΕΘ.24})$$

Στην περίπτωση που η μικρότερη τιμή της *C* αντιστοιχεί στο ψυχρό ρευστό, εφαρμόζεται κατ' αναλογία η σχέση (ΕΘ.25):

$$\varepsilon_c = \frac{1 - e^{-\frac{UA}{C_c}\left(1+\frac{C_c}{C_h}\right)}}{1 + \frac{C_c}{C_h}} \qquad (\text{ΕΘ.25})$$

Οι σχέσεις (ΕΘ.24) και (ΕΘ.25) μπορούν να εκφραστούν ταυτόχρονα ως εξής:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-\frac{UA}{C_{\min}}\left(1+\frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)}}{1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}} \qquad (\text{ΕΘ.26})$$

Από την ανωτέρω συνδυαστική σχέση απορρέει η αποτελεσματικότητα για έναν εναλλάκτη ομορροής ως συνάρτηση δύο αδιάστατων λόγων. Ένας από αυτούς τους αδιάστατους λόγους ($UA/C_{\min}$) καλείται *αριθμός μονάδων μεταφοράς* (number of transfer units, NTU), δηλαδή:

$$\mathrm{NTU} \equiv UA/C_{\min} \qquad (\text{ΕΘ}.27)$$

Ο όρος NTU μπορεί να θεωρηθεί ως παράγοντας μεγέθους για έναν εναλλάκτη θερμότητας. Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι η σχέση (ΕΘ.26) περιέχει μόνο τον ολικό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας, την επιφάνεια του εναλλάκτη, τις ιδιότητες και τις παροχές των ρευστών. Οι σχέσεις της αποτελεσματικότητας για διάφορες περιπτώσεις δίνονται στον πίνακα ΕΘ-2, όπου $C \equiv C_{\min}/C_{\max}$. Επιπροσθέτως είναι απαραίτητο να σημειωθεί πως για έναν εξατμιστή ή συμπυκνωτή ισχύει η ισότητα $C = 0$, δεδομένου ότι ένα από τα ρευστά παραμένει σε σταθερή θερμοκρασία, καθιστώντας έτσι την ειδική θερμότητα του άπειρη.

Συμπερασματικά η μέθοδος υπολογισμού με βάση την μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά είναι κατάλληλη, όταν οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των ρευστών είναι γνωστές

Πίνακας ΕΘ-2

Τύπος Εναλλάκτη	**Βαθμός Αποτελεσματικότητας**	**Αντίστοιχο Σχήμα**
Ομορροής και μονής διαδρομής	$\varepsilon = \dfrac{1-\exp[-\mathrm{NTU}(1+C)]}{1+C}$	Σχήμα ΕΘ-9
Αντιρροής και μονής διαδρομής	$\varepsilon = \dfrac{1-\exp[-\mathrm{NTU}(1-C)]}{1-C\exp[-\mathrm{NTU}(1-C)]}$	Σχήμα ΕΘ-10
Αυλών-κελύφους μιας διαδρομής στο κέλυφος και 2, 4, 6, κλπ. διαδρομών στους αυλούς	$\varepsilon_1 = 2\left[1+C+\dfrac{1+\exp[-\mathrm{NTU}(1+C^2)^{1/2}]}{1-\exp[-\mathrm{NTU}(1+C^2)^{1/2}]}(1+C^2)^{1/2}\right]^{-1}$	Σχήμα ΕΘ-11
Αυλών-κελύφους n διαδρομών στο κέλυφος και 2n, 4n, 6n, κλπ. διαδρομών στους αυλούς	$\varepsilon_n = \left[\left(\dfrac{1-\varepsilon_1 C}{1-\varepsilon_1}\right)^n - 1\right]\left[\left(\dfrac{1-\varepsilon_1 C}{1-\varepsilon_1}\right)^n - C\right]^{-1}$	Σχήμα ΕΘ-12 για n = 2
Σταυρωτής ροής (χωρίς ανάμιξη ρευμάτων)	$\varepsilon \approx 1-\exp\{C(\mathrm{NTU})^{0.22}[\exp[-C(\mathrm{NTU})^{0.78}]-1]\}$	Σχήμα ΕΘ-13
Σταυρωτής ροής (με ανάμιξη και των δύο ρευμάτων)	$\varepsilon = \mathrm{NTU}\left[\dfrac{\mathrm{NTU}}{1-\exp(-\mathrm{NTU})}+\dfrac{(\mathrm{NTU})(C)}{1-\exp[-(\mathrm{NTU})(C)]}-1\right]^{-1}$	------------
Σταυρωτής ροής (χωρίς ανάμιξη στο ρεύμα με C_{min})	$\varepsilon = C\{1-\exp[-C[1-\exp(-\mathrm{NTU})]]\}$	Σχήμα ΕΘ-14 (διακεκομμένες γραμμές)
Σταυρωτής ροής (χωρίς ανάμιξη στο ρεύμα με C_{max})	$\varepsilon = 1-\exp\{-C[1-\exp(-\mathrm{NTU})(C)]]\}$	Σχήμα ΕΘ-14 (συνεχείς γραμμές)

και όταν τα ζητούμενα του προβλήματος αφορούν την εύρεση του είδους του εναλλάκτη και της απαιτούμενης επιφάνειας εναλλαγής για την εξασφάλιση της βέλτιστης διεξαγωγής της διεργασίας. Η μέθοδος NTU προσφέρεται όταν έχει τεθεί ως στόχος ο υπολογισμός της