

## 8. Hőtani és elválasztási műveletek

### 8.1. Elméleti bevezetés a hőtani mérésekhez

A hőcsere (hőleadás vagy hőfelvétel) csaknem valamennyi vegyipari műveletben előfordul (anyagok felmelegítése, lehűtése a kívánt hőmérsékletre, bepárlás, desztillálás, reakcióhő elvonása, stb.).

A hőközlés vagy hőelvonás rendszerint hőcserélő felületen keresztül történik. A hőcserélő felület a hőcserélő készülék belsejét két különálló térrészre bontja: egyikben a hőleadó, a másikban a hőfelvevő anyag helyezkedik el. Ezek általában fluidumok (folyadékok vagy gázok). A hőcserélő készüléken való átáramlásuk iránya szerint megkülönböztetünk időbeli egyenáramú, továbbá egyáramú (e kettő instacionárius), valamint egyen-, ellen-, vegyes- és keresztáramú készülékeket (ez utóbbiak stacionárius működésűek).

A hőcserélő készülékek vizsgálatánál a kiindulás a hőcserélő teljes hőmérlege:

$$\sum (Gi)_{be} - \sum (Gi)_{ki} + \sum \dot{Q}_{be} - \sum \dot{Q}_{ki} = 0 \quad (8.1-1)$$

ahol

$G$  hőcserélőbe be- ill. kilépő anyagok tömegárama, kg/s

$I$  hőcserélőbe be- ill. kilépő anyagok fajlagos entalpiája, J/kg

$\dot{Q}$  anyagáram nélkül belépő hőáram (pl. elektromos fűtés, vagy sugárzás) ill. kilépő hőáram (pl. hőveszteség), W

Az (8.1-1) egyenlet nem tartalmazza a hőcserélő készülék szerkezeti anyagában, sem a hőcserélőbe betöltött (és esetleg az időben változó mennyiségű) közegekben akkumulálódó hőmennyiséget, ezért szigorúan csak állandósult (stacionárius) állapotra érvényes: vagyis akkor, ha az egyenletnek egyetlen tagja sem változik az időben. Az (8.1-1) hőmérlegben szereplő mennyiségek mindegyike mérhető a hőveszteség kivételével, ezt a teljes hőmérlegből szokás számítani.

A fűtőfelületen átadott hőáramot az (8.1-1) teljes hőmérlegen kívül a hőleadó, vagy a hőfelvevő közeg részleges hőmérlegéből is meg lehet határozni. Esetenként mérlegelni kell, hogy a készülék hővesztesége átadódott-e a fűtőfelületen. A teljes hőmérleget azonban a módszeres hibák elkerülése céljából akkor is fel kell írni.

A fűtőfelületen a hőáramsűrűség ( $\dot{Q}/A$ ) a hőátbocsátás kinetikus egyenletéből adódik:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = k(\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (8.1-2)$$

ahol

$k$  hőátbocsátási tényező, W/m<sup>2</sup>K

$\vartheta_1$  a melegebb folyadék hőmérséklete a folyadék belsejében mérve, °C

$\vartheta_2$  a hidegebb folyadék hőmérséklete a folyadék belsejében mérve, °C.

A hőcserélőben a fűtőfelület mentén rendszerint változik a  $(\vartheta_1 - \vartheta_2)$ ,  $q/A$  és valószínűleg  $k$  is, de ennek megállapítására igen sok helyen kellene mérni, mind a hőfokkülönbséget, mind a hőáramsűrűségeket. Ehelyett, ha feltételezzük  $k$  és a hőkapacitásáramok (ami a tömegáram és a fajhő szorzata) állandóságát a fűtőfelület mentén, különböző típusú (egyen-, ellen-, vegyesáramú) hőcserélőkben a folyadék-hőmérsékletek lefutása a fűtőfelület mentén kiszámítható akkor is, ha csak két helyen mérjük a hőmérsékleteket: a fűtőfelület elején és a végén ("be" ill. "ki" index a képletben). E mérésekből, a levezetések alapján a fűtőfelület mentén az átlagos hőfokkülönbség egyen- és ellenáramú hőcserélőkben (a vegyesáramú hőcserélőkre nézve lásd a szakirodalmat):

$$(\vartheta_1 - \vartheta_2)_{\text{átl}} = (\Delta\vartheta)_{\text{átl}} = \frac{(\vartheta_1 - \vartheta_2)_{\text{be}} - (\vartheta_1 - \vartheta_2)_{\text{ki}}}{\ln \frac{(\vartheta_1 - \vartheta_2)_{\text{be}}}{(\vartheta_1 - \vartheta_2)_{\text{ki}}}} \quad (8.1-3)$$

Az átlagos hőmérsékletkülönbséggel az egész hőcserélőben átadott hőáram fejezhető ki, amit a hőcserélő hőmérlegéből kaptunk (és amit nem szabad összetéveszteni a hőáramsűrűséggel, mert az a fűtőfelület különböző pontjain különböző):

$$\dot{Q} = kA(\Delta\vartheta)_{\text{átl}} \quad (8.1-4)$$

Ezt az egyenletet használjuk a hőátbocsátási tényező meghatározására.

A hőátbocsátási tényező értéke jellemző a hőcserélő készülék szerkezetére, de függ a hőleadó és hőfelvevő közeg fizikai tulajdonságaitól és tömegáramától is. Ezeknek az üzemeltetési paramétereknek a hatása  $k$  értékére kísérletileg csak nagy nehézségek árán határozható meg, mert a paraméterek a fűtőfelület egyik oldalán sem változtathatók egymástól függetlenül: pl. a fűtőközeg tömegáramának változtatásával a hőfelvevő közeg átlaghőmérséklete, ezzel fizikai tulajdonságai is változnak.

A  $k$  hőátbocsátási tényező fizikai értelme: a hő átvezetési tényezője azon az úton, amelyen a hő a melegebb közegből a hidegebbe áthalad. Ezen az úton a hőáram a következő ellenállásokkal találkozik:

1. a melegebb közeg oldalán a fűtőfelületig a (fiktív) lamináris határréteg ellenállása:  $1/\alpha_1$  ( $\alpha_1$  a hőátadási tényező);
2. a melegebb közeg oldalán a fűtőfelületre rakódott szennyezések ellenállása, a hőcserélő felület anyagának termikus ellenállása és a hidegebb közeg oldalán keletkezett lerakódások ellenállása:  $\Sigma(s/\lambda)$  ( $s$  az egyes rétegek vastagsága,  $\lambda$  a hővezetési tényezőjük);

3. a hidegebb fluidumban a (fiktív) lamináris határréteg ellenállása a felülettől a folyadékba áthaladó hőárammal szemben:  $1/\alpha_2$ .

A hőátbocsátási tényező reciproka összegzi ezeket az ellenállásokat:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (8.1-5)$$

maga a hőátbocsátási tényező tehát mindig kisebb, mint az összetevő vezetési tényezők legkisebbike:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (8.1-6)$$

A (8.1-4), (8.1-5), (8.1-6) egyenletek sík fűtőfelületre vonatkoznak. Nem sík felület esetében a hőátbocsátási tényező formatényezőket is tartalmaz:  $n$ - rétegű ( $L$ -hosszúságú és  $d$ -átmérőjű) hengeres falon át bocsátott hőmennyiség a hőátadási tényezőkkel felírva:

$$\dot{Q} = \frac{\pi \cdot L (\vartheta_1 - \vartheta_2)_{\text{átl}}}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}} \quad (8.1-7)$$

Egy üzemi hőcserélő jellemzésére elegendő a hőátbocsátási tényező meghatározása, ha a feldolgozott folyadékoknak sem mennyisége, sem fizikai tulajdonságai nem változnak jelentősen. Kellemetlen meglepetéseket kerülhetünk azonban el, ha megvizsgáljuk a hőátbocsátás részfolyamatait is.

A fűtőfelület egyik oldalán – a fűtő vagy a hűtő közegben – történő változások hatását elkülönítve lehet vizsgálni a hőátadási tényezők segítségével. Az  $\alpha$  hőátadási tényező kísérleti meghatározása a definíciós egyenlet alapján történik:

$$\dot{Q} = \alpha A (\vartheta_B - \vartheta_I) \quad (8.1-8)$$

ahol

- $\dot{Q}$  folyadékból a fűtőfelületnek átadott hőáram, W
- $A$  fűtőfelület nagysága a vizsgált közeg oldalán,  $m^2$
- $\vartheta_B$  folyadék belsejének hőmérséklete,  $^{\circ}C$
- $\vartheta_I$  hőmérséklet a hőcserélő felület és a folyadék érintkezési pontján,  $^{\circ}C$

Az  $\alpha$  meghatározásához tehát ismerni kell a fűtőfelület hőmérsékletét, amelynek meghatározásához három módszert ismertetünk:

1. A falhőmérsékletet a fűtőfelülethez forrasztott termoelemmel mérjük. A falhőmérséklet fűtőfelület menti átlagértékének meghatározásához a felület több pontján kell termoelemeket elhelyezni. A felületi hőmérséklet mérésének ez a módja nagyon pontos kivitelezést igényel.
2. A felület hőmérséklete kis kiterjedésű fűtőfelület, pl. fűtőszál esetében a fűtőszál elektromos ellenállásának mérésével is meghatározható.
3. Bizonyos esetekben a hátbocsátásban résztvevő hőátadási tényezők egyike a mérhető üzemi paraméterek függvényében elegendő pontossággal számítható. Ekkor az ismeretlen hőátadási tényezőt is ki tudjuk számítani a (8.1-4) és (8.1-5) egyenletek alapján:

Sík fűtőfelületre:

$$\dot{Q} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} A(\vartheta_1 - \vartheta_2)_{\text{átl}} \quad (8.1-9)$$

innen

$$\frac{1}{\alpha_1} = \frac{A(\vartheta_1 - \vartheta_2)_{\text{átl}}}{\dot{Q}} - \left[ \sum \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right] \quad (8.1-10)$$

Hengeres fűtőfelületre a (8.1-7) egyenletből:

$$\frac{1}{\alpha_1 d_1} = \frac{\pi L(\vartheta_1 - \vartheta_2)_{\text{átl}}}{\dot{Q}} - \left[ \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}} \right] \quad (8.1-11)$$

Hőátadási tényezők kiszámítására (8.1-a fluidumok áramlási sebességének és fizikai állandóinak felhasználásával) a szakirodalomban számos képlet és diagram található. Ezek is alkalmasak a hőcserélő működésének elemzésére, de ezt célszerű kísérletekkel összekapcsolni. Nagyon ügyeljünk arra, hogy csak hasonló folyamatokat hasonlítsunk össze, a képlet meghatározásához alkalmazott kísérleti feltételek a hasonlósági elmélet értelmében hasonlóak legyenek a vizsgált hőcserélő működéséhez.