

BORDÁSCSÖVES HŐCSERÉLŐ SZERKEZETEK KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FINNED TUBE HEAT EXCHANGER STRUCTURES

Petrik Máté

ABSTRACT

Finned tube heat exchangers are preferably used in heat transfer processes where one of the media, typically the heat receiving medium, is in gas phase. Due to the material properties, the resulting heat transfer coefficient is typically low, resulting in a low heat performance. To compensate for this, an extended surface is used, which, despite the relatively low heat transfer coefficient, results in a significant increase in heat performance. As in the case of other forms of heat transfer, empirical Nu numbers can be derived from experimental investigations, this test method is also widely used for fin-tube heat exchangers. This paper presents the feasibility of experimental studies and the conclusions that can be drawn.

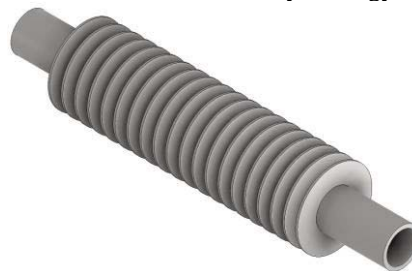
1. BEVEZETÉS

A hőcsere elő berendezések az egyik legszélesebb körben alkalmazott berendezések a vegyiparban és rokon iparágakban, például az energiaiparban és élelmiszeriparban. Az esetek többségében közvetett hőcsere megy végbe a fluidumok között (kivételek lehetnek például a hűtőtornyok, ahol a közvetlen hőátadást alkalmazzuk), a két áramló közeget a berendezés szilárd fala választja el egymástól.

A hőcsere elő szerkezetek egyik nagy csoportját a bordáscsöves hőcsere elők alkotják. Ezekről általánosságban elmondható, hogy olyan hűtési rendszerekben alkalmazzák, ahol a nagyobb hőmérsékletű folyadék entalpiájának egy részét a berendezésen keresztüláramló levegőnek adja át. A csövek belsejében áramló folyadék fázisú közeg rendszerint a többi hőcsere előnél tapasztalt hőátadási tényezőt fog eredményezni. A gáz- vagy levegőoldalon viszont a kalorikus anyagjellemzők miatt a kialakuló hőátadási tényező értéke több nagyságrenddel is kisebb lehet, nem ritka itt a $15-20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ -s érték sem. Mivel a hőátviteli tényező ettől az értéktől is kisebb értékű lesz, az épített berendezés hőteljesítménye is alacsony értékű lesz. Ezt a jellemzőt kompenzálóan a hőátadási felületet érdemes megnövelni, melynek következtében kialakultak a bordáscsöves hőcsere elők [1,2].

2. BORDÁZOTT CSÖVEK

Megjegyzendő, hogy a bordák jelentős hatással vannak az áramlási viszonyokra is, mind a geometriai viszonyokra, mind a hidraulikai átmérő vonatkozásában. Ezt a számításokban úgy vehetjük figyelembe, hogy a sima, vagyis bordátlan csőre számított hőátadási tényezőt egy korrekciós tényezővel, a bordahatásfokkal módosítjuk. Ez a kiterjesztett felület többféleképpen is kialakítható, melyek mind gyártástechnológiai szempontból, mind felhasználási szempontból eltérnek egymástól. Továbbá a bordák ezekben az esetekben más-más hatással lesznek a hőátadási tényező nagyságára [3].



1. ábra Radiális bordák

Az 1. ábra kör alakú radiális bordák ábráját mutatja. Ezek a típusok nevezhetők a legáltalánosabb bordatípusnak. A bordák jellemzően egyenlő távolságokra vannak egymástól elhelyezve és egyenlő falvastagságúak. Sok esetben passzív hűtésekhez is alkalmazhatók, például számítógépek tápegységeit ilyen bordázattal látják el. A jó hővezetési tényezőjű szerkezeti anyag nagy felületen érintkezik a levegővel, így a szabadkonvekcióra jellemző rendkívül kicsi hőátadási tényező ellenére is egy viszonylag nagy hűtőteljesítmény érhető el [4].

Gyártástechnológiai szempontból is ezt a legegyszerűbb elkészíteni; a bordákat lemez alapanyagból valamilyen vágási technológiával kivágják (pl. lézersugár, vízsugár, plazma), majd a hagyományos csőre felhúzzák és a szabad oldaláról összehegesztik. Ilyen technikával gyakorlatilag bármilyen sűrűségű bordázás elkészíthető. Megjegyzendő, hogy bármilyen alakú bordák elkészíthetőek, de jellemzően a kör és négyzet alakzat a preferált. Ilyenkor azonban minden

adjunktus, Miskolci Egyetem, Energetika és Vegyipari Gépezeti Intézet

borda külső és belső profilját is el kell készíteni. Van olyan lehetőségünk is, amikor a belső anyagrészt nem távolítják el, hanem keresztben bevágják, és egy csővel megegyező átmérőjű munkadarabra ráhúzzák a bordát. Ilyenkor a felhajtott élek távtartóként működnek, ami a hővezetésre lesz pozitív hatással, mert nem lesz varrat, nem lesz hőhatásövezet, melyek hővezetési tényezője jellemzően kisebb, mint az alapanyagé [5]. Ilyen kialakításra mutat példát a 2. ábra.



2. ábra: Bevágással készített borda ábrája

A másik gyakran alkalmazott bordázási lehetőség a spirálbordák alkalmazása, melyet a 3. ábra mutat. Ebben az esetben a bordákat nem egyenként kell kialakítani, hanem egyetlen szalagból kerülnek kialakításra.



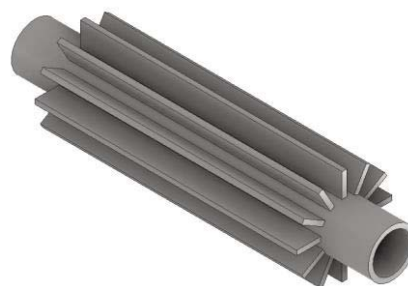
3. ábra Spirálbordák

Többféle technika is létezik az előállításukra, melyek közül a leggyakrabban alkalmazottak:

- a szalagot kézi vagy gépi erővel a csőre tekercselik, ilyen esetben nem szükséges hegeszteni,
- a csőbe a bordázásnak megfelelően a szalag lemezzvastagságával megegyező szélességű hornyot munkálnak, és a szalagot ebbe tekercselik be. Ilyenkor a szalag két végét hozzá kell hegeszteni a csőhöz.
- Hegesztéssel vagy keményforrasztással is összeköthetők az elemek, ilyenkor előkészületekre nincs szükség.

Ilyen bordázást kazánokban, kemencékben, hőhasznosítóknál alkalmaznak [6], de a társasházak lépcsőházának jellemző fűtési berendezése is.

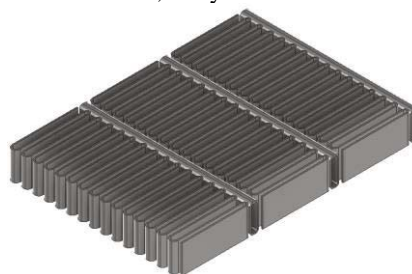
A 4. ábrán a hosszirányú bordákkal ellátott cső látható. Jellemzően ezen bordázási típus a legkevésbé elterjedt. A bordák ilyenkor is lehetnek egyenes szalagok (ahogy az ábrán is látható), de sok esetben a szalagokból U-alakú profilokat alakítanak ki, majd ezeket a profilokat lábaival kifelé rögzítik hozzá a csőhöz.



4. ábra: Axiális bordák

A hozzáférhetőség axiális bordák esetén korlátozott, így szinte kivétel nélkül ellenállás hegesztéssel készülnek. Jellemzően cső a csőben hőcserélőkben, tartályfűtő hőcserélőkben alkalmazzák. Kialakítása miatt célszerű függőlegesen beépíteni az üríthetőség és a korróziós problémák miatt [7].

A negyedik bemutatásra kerülő típus a rácsos bordás hőcserélők téma-területe, melyet az 5. ábra mutat.



5. ábra Lamellás kialakítás

Míg az eddig bemutatott bordázott csöveket olyan területeken alkalmazzák, ahol az üzemelés során szabadkonvekciós hőátadás alakul ki, addig a rácsos bordás hőcserélők esetén mindkét hőcserélőben részt vevő közeg kényszeráramoltatott, viszont a beépítési térfogat korlátozott. Ennek megfelelően két leggyakoribb alkalmazási területük a gépjárművek és a számítástechnika. A működési elvük teljesen azonos, mindössze a beépített méretükben van különbség: a hűtendő térfogat és a levegő között a hőcsere a hűtőközeggel valósítható meg. Gépkocsik esetén a hagyományos és elektromos meghajtással épített típusok esetén is jelentőségük van (előbbi esetben a belső égésű motorblokkot, utóbbi esetben az akkumulátor egységet szükséges hűteni), a számítógépek esetén pedig a processzor hűtésében játszik szerepet.

Az ábrán látható vékony csatornában párhuzamosan áramlik a hűtőközeg, a levegő pedig a bordák közötti réseken áramlik keresztül. Bárán kijelenthető, hogy ez az a hőcserélő típus, amelynek a hőátviteli tényezője a legnehezebben határozható meg, mert ez tartalmazza a legtöbb geometriai adatot és számítási bizonytalanságot [8-10]. Néhány, a bizonytalansági faktort növelő tényező:

- a hűtőközeg csatornái jellemzően nem kör keresztmetszetűek, hanem lekerekített téglalap

alakúak, és míg a kis méretek miatt az áramlást jellemző Reynolds szám a lamináris tartományba esik, addig a valóságban szinte bizonyosan az átmeneti áramlásra jellemző áramlási kép alakul ki.

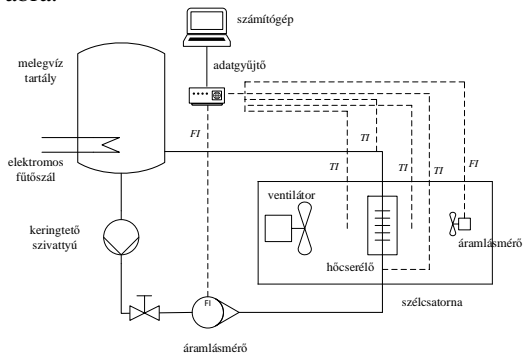
- A berendezések a csőoldalon kétjáratúak, viszont mindkét közeget tekintve keresztáramban áramlik egymáshoz képest a levegő és hűtőfolyadék.
- A csatornák jellemzően 15-28 sorban és 2-3 oszlopban kerülnek kialakításra. Az osztókamra és a belépő csonek geometriai kialakítása függvényében a csatornában tapasztalt eltérés a 10-15%-ot is meghaladhatja.
- A berendezések négyszögletesek, a légáramlást biztosító ventilátorok azonban kör alakúak, így a levegő áramlási sebessége is a pozíciótól függő érték lesz.

Az előző felsorolásból látható az analitikus számítás komplexitása. Ahogy a többi hőátadási formánál, ezek esetében is a kísérleti vizsgálatokból levont következtetések fogják a tapasztalati összefüggéseken szereplő konstansokat eredményezni. Jelen cikk célja, hogy a kísérleti vizsgálatok megvalósítása során milyen szempontokat kell szem előtt tartani.

3. KÍSÉRLETI BERENDEZÉS ÖSSZEÁLLÍTÁSA

A kísérleti vizsgálatok elvégzéséhez olyan mérőkört szükséges kialakítani, melyben négy egység összehangolt működése valósul meg: a melegvíz kör, a hűtőlevegő kör, a vizsgált berendezés és adatgyűjtés.

Egy ilyen mérőkör sematikus kialakítását mutatja a 6. ábra.



6. ábra: Mérőkör sematikus kialakítása

3.1. A melegvíz kör

A melegvízkör feladata a nagyobb hőmérsékletű (jellemzően 85-95°C) hűtőfolyadék szerepének betöltése. A kör megépítéséhez négy berendezés szükséges. Egy nagyobb térfogatú nyomástartó edényre, mely valamilyen elektromos vagy termikus módon fűthető; egy keringtető szivattyúra, mely a melegvíz szállítását biztosítja; egy áramlásmérőre, hogy információt kapjunk a keringtetett mennyiségre, valamint az ezeket összekötő csővezetékre és szerelvényeire. Az edény méretét a vizsgált hőcserélő

teljesítményének függvényében kell meghatározni, mérés során biztosítani kell, hogy 5-10 percnyi mérés során nem szabad számottevően lehűlnie, mert ezzel a stationer működésre vonatkozó feltételek nem teljesülnének.

3.2. Levegőkör

A levegőkör feladata, hogy biztosítsa a berendezésen keresztülráramló levegő mozgását. Ez esetén célszerű olyan áramlási viszonyokat biztosítani, amilyen viszonyok a működés közben ébrednek. Alapvetően két módszer alkalmazható: szélcsatornában végzett mérések, amivel a mozgó gépjármű haladása modellezhető, valamint ventilátorral történő légszállítás. Utóbbi esetben akkor járunk el a legjobban, ha azzal a ventilátorral hozzuk létre az áramlást, amit üzem közben is alkalmazni fogunk. Itt visszautalnánk a pozícionálási problémákra is; annak is jelentősége lesz, hogy a ventilátor tengelye a hőcserélőhöz képest hol helyezkedik el.

3.3. Adatgyűjtés és feldolgozás

A vizsgálat gyakorlatilag legfontosabb elemei. A kísérletek során mind a levegőkörre, mind a melegvíz körre vonatkozóan információt kell kapnunk az áramlási sebességekre vagy térfogatáramokra, a be- és kilépő hőmérsékletekre, valamint a melegvízkör nyomására. Célszerű a vizsgálatokat tiszta közegekkel elvégezni így javasolt a melegvízkörnél a tiszta víz alkalmazása, de desztillált víz alkalmazása még pontosabb eredményt szolgáltat. A levegő esetén a páratartalom ismerete feltétlenül szükséges, mely zárt laboratóriumban jellemzően nem változik pillanatszerűen, így ennek a folyamatos detektálása nem szükséges.

A nyomás, hőmérséklet, páratartalom ismeretében a vizsgált közegek anyagjellemzői meghatározhatóvá válnak. Javasolt a kiértékelés során a mérés hőmérséklet tartományában az anyagjellemzőkből egy polinomfüggvényt meghatározni [11].

A hőmérséklet detektálására K-típusú hőelemek ajánlottak [12]. Ezek a legszélesebben alkalmazott hőelemek közé tartoznak, több előnyös tulajdonságuk miatt is:

- a hőmérséklet tartományuk -270°C és $+1260^{\circ}\text{C}$ között változik,
- hosszú élettartammal rendelkeznek,
- olcsók,
- gyors visszajelzést szolgáltatnak,
- pontossága $\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ vagy $\pm 0,75\%$.

A közegek áramlási sebessége lesz a másik fontos paraméter a kiértékelés során. Mivel a hőátadási tényezők a Re szám függvényeként értelmezhetők, ezért a vizsgálatok során az egyik közeg és a hajtóerőt szolgáltató hőmérséklet-különbség változatlansága mellett vizsgálhatóvá válik a hőátadási tényező értéke.

Mivel a víz zárt csővezetékben, a levegő pedig szabadon áramlik, így a mérési módjuk és eszközeik is különböznek egymástól. A csővezeteki áramlás indukciós, ultrahangos turbinás készülékekkel vagy rotaméterrel mérhető, míg légáramlás esetén szárnykerekű légsebességmérővel történhet.

4. KIÉRTÉKELÉS

A kísérleti vizsgálatok során a hőmérséklet értékeket elegendő 1-5 Hz mintavételezési frekvenciával detektálni. A mért értékek ismeretében a kalorikus anyagi jellemzők meghatározhatók, az áramlási viszonyok és a hőátadó felület pedig a vizsgált berendezés és csővezeteki elemek geometriai méreteiből adódnak.

A kísérleti berendezéssel így gyakorlatilag egy egyszerűsített modell alkotható meg. A kapcsolatot a hőátadásra jellemző fizikai paraméterek között különböző hasonlósági kritériumokkal lehet felállítani. A hőátadás hasonlósági kritériuma a Nu szám, mely empirikus összefüggése jellemzően az alábbi alakban fejezhető ki:

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^m \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_w} \right)^{0,14}, \quad (1)$$

ahol

- C egy konfigurációtól függő tényező [-],
- Re a vizsgált közeg Reynolds száma [-],
- Pr a vizsgált közeg Prandtl száma [-],
- η a közeg közepes hőmérsékleten vett dinamikai viszkozitása [Pa·s],
- η_w a közeg dinamikai viszkozitása a fal hőmérsékletén [Pa·s],
- n, m empirikus kitevők [-].

A C, m, n konstansok meghatározásához a legkisebb négyzetek módszere alkalmazandó [13].

A vázolt mérési összeállítással nem csupán a stacioner hőátadási folyamatokat, hanem az időben változó folyamatokat is lehet modellezni. Ekkor a felfűtési és lehűlési folyamat során a hőcserélő berendezés viselkedésére kapunk mért értékeket.

Egy valós autóhűtő radiátor a saját ventilátoraival végzett kísérletei alapján a Nu számra vonatkozóan a következő összefüggést határozta meg [14]:

$$Nu = 0,817 \cdot Re^{0,6} \cdot \left(\frac{A}{A_{i0}} \right)^{-0,39} \cdot Pr^m, \quad (2)$$

ahol A a teljes hőátadó felület, A_{i0} pedig a bordázatlan cső hőátadó felület.

5. IRODALOM

- [1] SADEGHIANJAHROMI, A., & WANG, C.-C.: *Heat transfer enhancement in fin-and-tube heat exchangers – A review on different mechanisms*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 137, 110470. (2021).
- [2] KOCUREK, R., & ADAMIEC, J.: *Manufacturing Technologies of Finned Tubes*. Advances in Materials Sciences, 13(3). (2013).
- [3] PETRACCI, I., MANNI, L., & GORI, F.: *Numerical simulation of the optimal spacing for a radial finned tube cooled by a rectangular jet. I – Average thermal results*. International Journal of Thermal Sciences, 104, 54–67. (2016).
- [4] TAHSEEN, T. A., ISHAK, M., & RAHMAN, M. M.: *An overview on thermal and fluid flow characteristics in a plain plate finned and un-finned tube banks heat exchanger*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43, 363–380. (2015).
- [5] FENG, Z., MA, N., LI, W., NARASAKI, K., & LU, F.: *Efficient analysis of welding thermal conduction using the Newton–Raphson method, implicit method, and their combination*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 111(7–8), 1929–1940. (2020).
- [6] PONGSOI, P., PIKULKAJORN, S., & WONGWISES, S.: *Heat transfer and flow characteristics of spiral fin-and-tube heat exchangers: A review*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 79, 417–431. (2014).
- [7] NÓBREGA, C. R. E. S., ISMAIL, K. A. R., & LINO, F. A. M.: *Solidification around axial finned tube submersed in PCM: Modeling and experiments*. Journal of Energy Storage, 29, 101438. (2020).
- [8] ZHANG, X., HUANG, Y., SONG, J., MA, Z., CHEN, L., & LI, T.: *Numerical investigation of the air-side performance of louver fin-and-tube radiators having rectangular, tapered and airfoil section configuration*. Energy Reports, 8, 11799–11809. (2022).
- [9] PETRIK, M., & SZEPESI, G.: *Experimental and numerical investigation of the air side heat transfer of a finned tubes heat exchanger*. Processes, 8(7). (2020).
- [10] SALEEM, A., & KIM, M.-H.: *Airside Thermal Performance of Louvered Fin Flat-Tube Heat Exchangers with Different Redirection Louvers*. Energies, 15(16), 5904. (2022).
- [11] CUNIS, T.: *The pwpfit Toolbox for Polynomial and Piece-wise Polynomial Data Fitting*. IFAC-PapersOnLine, 51(15), 682–687. (2018).
- [12] MANJHI, S. K., & KUMAR, R.: *Performance assessment of K-type, E-type and J-type coaxial thermocouples on the solar light beam for short duration transient measurements*. Measurement, 146, 343–355. (2019).
- [13] JIANG, B.-N.: *On the least-squares method*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 152(1), 239–257. (1998).
- [14] PETRIK, M., ERDŐS, A., JÁRMAI, K., SZEPESI, G.: *Experimental Investigation of the Air-Side Heat Transfer Coefficient on Louver Finned Tube Automotive Radiator*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 22 pp. 401-416. (2021)