XXII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, 2017. Kolozsvár, 411–414. DOI: 10.33895/mtk-2017.07.95
http://hdl.handle.net/10598/29832

TRANSZPORT ANALÓGIÁK VIZSGÁLATA ÉS ALKALMAZÁSA CSŐKÖTEGES HŐCSERÉLŐRE

TRANSPORT ANALOGIES IN SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER

Zsigmond Zalán, Molnár Orsolya

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék, Cím: 1111 Budapest, Műegyetem rkpt 3-9, Telefon: +36-1-4631106 / Fax: +36-1-4631708, zsigmond06@gmail.com

Abstract

In chemical industry, the most of production processes are based on the transfer of an extensive property. These transport phenomena may be the heat, mass, and momentum transfer. Because of the close relation among these phenomena, relation can be created between transport coefficients; these are the so-called transport analogies. In this paper relation between heat- and momentum transfer is analysed. In order to perform this analysis, measurements were made on a shell and tube heat exchanger device. Goals of our calculations are: to calculate tube side heat transfer coefficient with formulas of transport analogies; to validate these heat transfer coefficients with measured ones; finally, to find the reason of decreasing Nusselt number with increasing Reynolds number in the condenser. At the end operation of the condenser is modelled by the analogy of heat and momentum transfer.

***Keywords**: Shell and tube heat exchanger; transport analogy; friction factor*

Összefoglalás

Az élelmiszer- és vegyiparban előforduló berendezések szinte mindegyikében valamely extenzív állapotjelzők egyidejű transzportfolyamata zajlik (hő-, anyag- és impulzusátadás). Az egyes folyamatokat hasonló egyenletekkel lehet leírni, intenzitásuk nem független egymástól. A transzport tényezők között matematikai kapcsolat írható fel, ezt a kapcsolatot analógiának nevezzük. Jelen munkában egy csőköteges hőcserélőben lejátszódó hő- és impulzusátadás közötti kapcsolat vizsgálunk és a különböző analógiák eredményét mérési adatokkal vetjük össze. Számításainknak három célja volt: a kondenzátor csőoldalán vizsgáltuk a különböző analógiák pontosságát; a legpontosabbnak bizonyuló összefüggést alkalmazva a mért hőátadási tényező és áramlási sebesség közti kapcsolat rendellenes jellegének kerestük az okát; végezetül a kiválasztott analógia segítségével modelleztük a hőcserélő működését.

***Kulcsszavak:** transzport analógia; egyidejű hő- és impulzus transzport, súrlódási tényező, hőátadási tényező, csőköteges hőcserélő*

f	Csősúrlódási tényező, [-]	**z**	Konstans, [-]
j_H	Hőátadási Colburn-faktor, [-]	**α**	Hőátadási tényező, [W/(m^2*K)]
k	Hőátbocsátási tényező, [W/(m^2*K)]	**λ**	Hővezetési tényező, [W/(m*K)]
L	Vízszint, [m]	***Indexek***	
Pr	Prandtl-szám, [-]	**kond**	Kondenzációs
Re	Reynolds-szám, [-]	**mért**	Mérési adatsorra utaló
St	Hőátadási Stanton szám, [-]	**fal**	Hőcserélő csöveinek falára utaló

1. A hő- és impulzustranszport analógiája

A transzport analógiák olyan egyenleteket takarnak, melyek arra épülnek, hogy a hő-, az anyag- és az impulzusátadás jelenségei matematikailag hasonló formában írhatók le. Mindhárom transzportfolyamat egy intenzív állapotjelző gradiensének és egy vezetési tényezőnek a szorzataként írható fel [1]. Az egyidejű hő- és impulzus transzportot leíró analógiák kapcsolatot teremtenek a hőátadási- és ellenállási tényező között. Az első és egyben legegyszerűbb analógiát Osborne Reynolds állította fel a 19. században kísérleti megfigyelései alapján:

$$\frac{f}{2} = St \qquad (1)$$

Modelljében tisztán turbulens áramlást feltételezett a vizsgált térrészben, a különböző határrétegeket nem vette figyelembe. A tapasztalat azt mutatja, hogy az (1) összefüggés viszonylag jól alkalmazható csőben való áramlás vagy síklap feletti áramlás esetén, ha Pr ≈ 1 [1]. A fejlődés következő lépcsőfokát a Prandtl-Taylor analógia jelentette. E modellben a viszkózus fali réteg és a turbulens mag ellenállását sorba kapcsolva a kutatók pontosabb és szélesebb tartományban használható összefüggést alkottak.

$$\frac{f}{2} = St \cdot \left[1 + 5\sqrt{\frac{f}{2}}(Pr - 1)\right] \qquad (2)$$

A Prandtl-Taylor analógia Pr < 2 esetén használható [1]. Kármán Tódor az átmeneti határréteg figyelembe vételével tovább finomította a súrlódási és hőátadási tényező kapcsolatát leíró összefüggést:

$$\frac{f}{2} = St \cdot \left[1 + 5\sqrt{\frac{f}{2}}\left(Pr - 1 + ln\frac{1+5\cdot Pr}{6}\right)\right] \qquad (3)$$

Thomas Chilton és Allan Colburn a Prandtl-Taylor analógiát szélesebb Pr tartományra kiterjesztve egy egyszerűbb, empirikus összefüggést alkotott, mely már folyadékok áramlásának vizsgálatakor is igen pontos eredményt ad [2]:

$$\frac{f}{2} = St \cdot Pr^{z} = j_H \qquad (4)$$

A Chilton-Colburn analógiát gyakran alkalmazzák termikus berendezések, pl. hőcserélők méretezésénél, optimalizálásánál [3, 4]. A Friend-Metzner analógia szintén tapasztalati alapon felállított összefüggés, mely széles Pr-szám tartományban használható:

$$\frac{f}{2} = St \cdot \left(1{,}20 + 11{,}8 \cdot \sqrt{\frac{f}{2}} \cdot (Pr - 1) \cdot Pr^{-\frac{1}{3}}\right) \qquad (5)$$

Ezeken kívül még két speciálisabb összefüggést is vizsgáltunk. Az egyik a Deissler-analógia; mely főként nagyobb Pr-számú anyagok (pl. termoolajok) esetén alkalmazható [1]:

$$St = 0{,}111 \cdot \sqrt{\frac{f}{2}} \cdot Pr^{-\frac{3}{4}} \qquad (6)$$

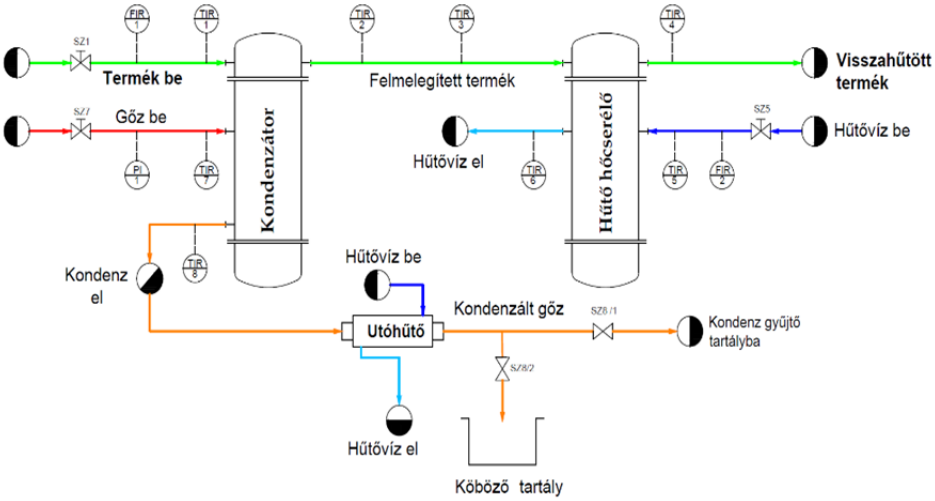
A Martinelli-analógia pedig főként kis Pr-számú anyagok (pl. folyékony fémek) vizsgálatára alkalmas [5].

2. Az analógiák vizsgálata csőköteges hőcserélőben

Munkánk során egy kéttestes csőköteges hőcserélő mérőállomáson (**1. ábra**) végeztünk méréseket. Az első test csőoldalon kétjáratú, köpenyoldalon gőzzel fűtött hőcserélő. Cső oldalon vizet áramoltattunk, melyet a második testben hűtővízzel visszahűtöttünk.

Munkánk során a kondenzátor csőoldali hőátadási tényezőjét határoztuk meg méréssel, illetve az analógiák segítségével. A hőátadási tényező kifejezhető a mért hőátbocsátási tényezővel, köpenyoldali kondenzációs hőátadási tényezővel és a fal termikus ellenállásával:

$$\alpha_{mért} = \frac{1}{\frac{1}{k} - \frac{1}{\alpha_{kond}} - \left(\frac{s}{\lambda}\right)_{fal}} \qquad (7)$$



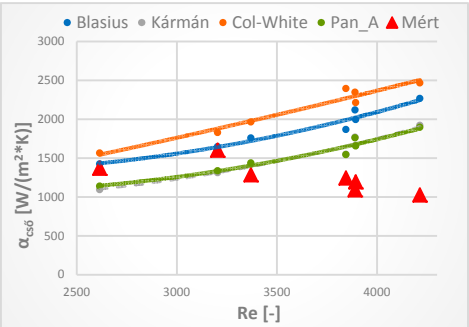
1. ábra. *A mérőberendezés vázlata*

A (7)-es egyenletben a külső és belső felületeket egyenlőnek feltételeztük. A csőoldali hőátadási tényező értéke transzport analógiákkal is meghatározható, ehhez ismernünk kell a vizsgált közeg áramlási sebességét és anyagjellemzőit, illetve a csősúrlódási tényező értékét. A csősúrlódási tényezőt közvetetten, a cső jellemzőiből és az áramlási sebességből számoltuk, öt különböző modell szerint [6]. A Blasius és Panhandle összefüggések az átmeneti és turbulens tartományban érvényesek és hidraulikailag sima csövet feltételeznek. A Colebrook-White implicit egyenlet figyelembe veszi a csőérdességet is és szintén átmeneti-turbulens áramlások esetén használják. A vizsgált csőbeli áramlás a Reynolds szám alapján ámenetinek számít, ezért a lamináris tartományon érvényes Hagen-Poiseuilles egyenlet, illetve a tisztán turbulens, sima csövekre alkalmazható Kármán-összefüggés kevéssé releváns.

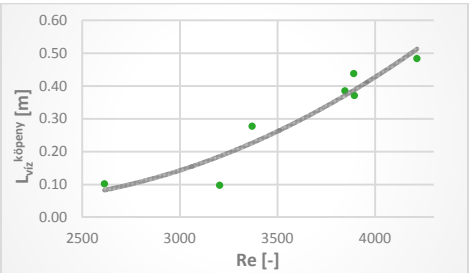
A mért hőátadási tényezők növekvő Re számok mellett irreális módon csökkenni kezdenek (2. ábra), mely okát a köpenytér kondenzvízzel való feltelítődésében látjuk a hőcserélő nem megfelelő beépítése következtében. A hőátadási viszonyok leromlottak, mert a köpenytér elárasztott részén nem gőz kondenzáció, hanem egyszerű konvektív hőátadás ment végbe. Ez kihatott a csőoldali hőátadási tényezőre is. Ezért megkerestük a kis térfogatáramokon legjobb közelítést adó analógiát. (a Friend-Metzner analógia Blasius-egyenlettel). Az analógiák és a mért adatsor közti eltérést a két legkisebb térfogatáram érték esetén vizsgáljuk, ahol a mért értékek még helyes tendenciát mutatnak. A Reynolds- és a Prandtl analógiák pontatlannak bizonyultak; előbbi esetén az αmért-től való átlagos eltérés 72,5%, utóbbinál pedig 14,5%. A Kármán-analógia pontosabb eredményeket adott, az átlagos eltérés a mért adatsortól 5%-nak adódott. A Chilton-Colburn analógia pontatlanabb eredményt adott (8,5%), míg Deissler empirikus egyenlete nagy szórást mutatott a vizsgált Re-szám tartományon (44,4%). A legpontosabb eredményt a Friend-Metzner analógia szolgáltatta a Blasius egyenlettel. A mért hőátadási tényező analógiától való eltérése 3,4%-os (**2. ábra**).

Így ezzel a kiválasztott analógiával modelleztük a hőcserélő működését a nagyobb Re szám tartományokban. A modell által előrejelzett nagyobb hőátadási tényezőhöz értelemszerűen nagyobb hőátbocsátási

tényező és kisebb hőátadó felület tartozik. A csökkent hőátadási felületből kiszámítható a kondenzvíz feltételezett szintje a köpenytérben (**3. ábra**).



2.ábra. *Friend-Metzner analógia*



3.ábra. *Kondenzvíz szintje a köpenytérben*

Végül javaslatot tettünk a kondenzátor rendellenes működésének kiküszöbölésére. A problémát az jelentette, hogy a hőcserélő kondenz elvezetése és a kondenzsor között túl kicsi volt a szintkülönbség, ami miatt a kondenzátum áramlásának biztosításához kicsi volt a hidrosztatikai nyomáskülönbség. Több megoldási lehetőség közül egy kondenzátemelő szivattyú beépítését javasoltam a kondenzvíz zavartalan elvezetésének biztosítására [7].

3. Összegzés

A vizsgálat alapján elmondhatjuk, hogy a hő- és impulzusátadás közti hasonlóságra épülő egyenletek csőköteges hőcserélőben való alkalmazása eredményes volt. Az analógiák segítségemre voltak a feltelítődés jelenségének vizsgálatánál, és a valós hőátadó felület nagyságának modellezésénél.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] Szentgyörgyi Sándor: *Transzportfolyamatok*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1979.

[2] Robert S. Brodkey, Harry C. Hershey: *Transport Phenomena: A unified approach*. McGraw-Hill Chemical Engineering Series, 1988.

[3] Z. Astolfi-Filho, E. Oliveira: *Friction factors, convective heat transfer coefficients and the Colburn analogy for industrial sugarcane juices*. Biochemical Engineering Journal, 60 (2012), 111-118.

[4] L. Jonghyeok, L. Kwan-Soo: Friction and Colburn factor correlations and shape optimization of chevron-type plate heat exchangers. Applied Thermal Engineering, 89 (2015), 62-69.

[5] *Analogies among Mass, Heat, and Momentum Transfer* pages.upd.edu.ph/sites/default/files/tptumolva/files/24b.pptx

[6] Dr. Garbai László: *Távhőellátás*. Budapest, 2009.

[7] http://www.goztechnika.hu /keszletlista/pdf/561.pdf