

# Keverős készülék hőátadási folyamatainak és teljesítményfelvételének vizsgálata

## Investigation of the heat transfer and power consumption of a mixing tank

CSÁNYI Milán<sup>1</sup>, Msc hallgató, VARJU Evelin<sup>2</sup>, adjunktus

<sup>1,2</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., D épület 106.,  
Tel.: +3614632639, <http://www.epget.bme.hu>,  
<sup>1</sup>cs.milan27@gmail.com, <sup>2</sup>varju.evelin@gpk.bme.hu

### Abstract:

Mixing is an essential process in many industries. The aim of the present research was the investigation of the mixing characteristics of the jacketed tank equipped with a heating coil, through heating and cooling measurements with different rotational speeds. During evaluation, the characteristics of heating and cooling using the jacket and the coil are compared. Nusselt equations are presented for the different heating and cooling methods. The power requirements of the mixing process are further investigated and equations are given to calculate the resistance factor regarding the different mixing operations.

**Keywords:** mixing, heat transfer, power consumption, resistance factor, Nusselt-equation

### Absztrakt:

A keverés számos iparág esetében nélkülözhetetlen folyamat. Jelen kutatás célja a csőkígyóval felszerelt duplikatúrás keverőberendezésben lejátszódó hőátadási folyamatok, valamint a keverési folyamat jellemzőinek vizsgálata különböző fordulatszámú felfűtési és hűtési mérések segítségével. A mérési eredmények kiértékelése során összehasonlításra kerültek a csőkígyóval, illetve duplikatúrával történő hőmérsékletszabályozás jellemző értékei. A számítások alapján Nusselt-egyenleteket hoztunk létre a különböző fűtési és hűtési módszerek esetére. Ezen felül vizsgáltuk a keverési teljesítményigényt, valamint a keverési ellenállás-tényező számítására alkalmas egyenleteket hoztunk létre.

**Kulcsszavak:** keverés, hőátadás, teljesítményfelvétel, ellenállás-tényező, Nusselt-egyenlet

## 1. BEVEZETÉS

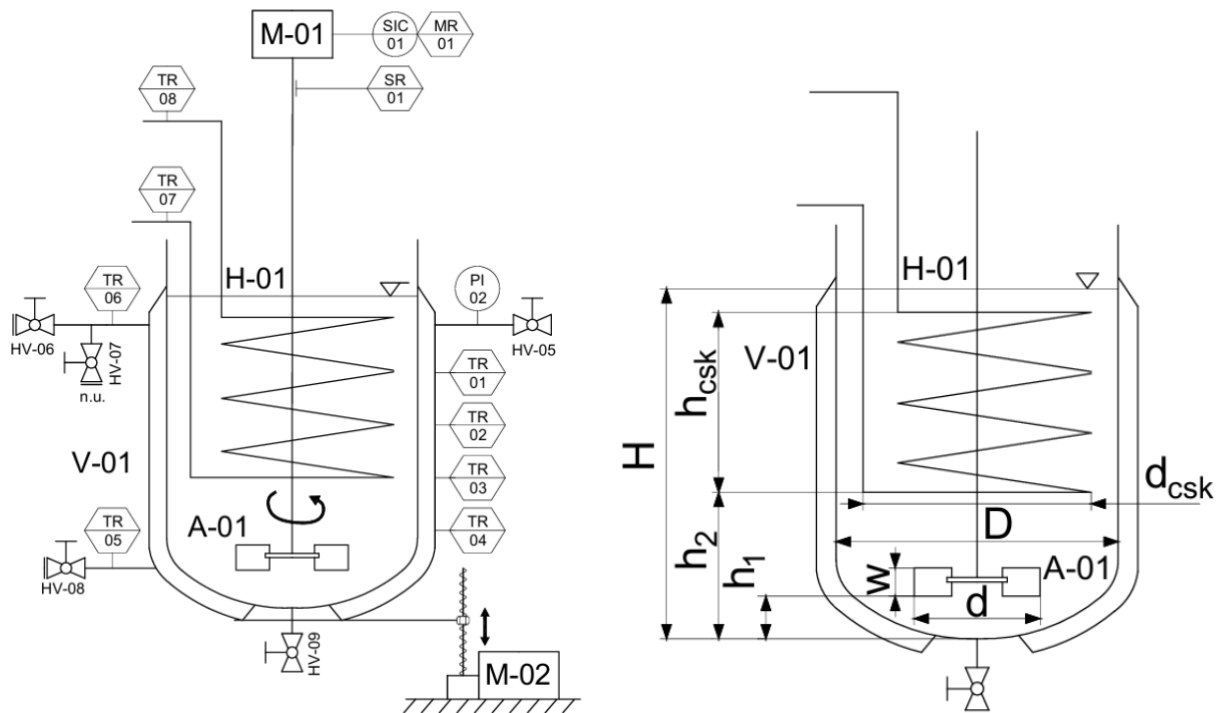
A keverés egy olyan művelet, amely a folyamat látszólagos egyszerűsége ellenére sok nagy iparág esetében nélkülözhetetlen. Legyen szó élelmiszeripari termékek előállításáról, vegyipari folyamatokról vagy kőolaj feldolgozásról, a keverési műveletek rengeteg technológia alapkövét képezik. A keverés tehát egy alapvető és gyakran használt művelet, így fontos annak optimális és céltudatos alkalmazása.

A munkánk során a Stokes Laboratóriumban található, csőkígyóval felszerelt duplikatúrás keverőberendezésen végeztünk méréseket különböző fordulatszámok mellett, fűtést és hűtést egyaránt vizsgálva. Meghatároztuk a keverési teljesítményszükségletet és a keverési ellenállás-tényező értékét. Vizsgáltuk a berendezésben lejátszódó hőközlési folyamatokat, valamint a keverési folyamat jellemzőinek alakulását a keverési fordulatszám függvényében. Létrehoztuk a tartályban lejátszódó hőátadási folyamatok jellemzésére alkalmas dimenzió nélküli Nusselt-egyenleteket.

## 2. MÉRŐBERENDEZÉS ÉS MÉRÉS MENETE

A méréseket a BME Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék Stokes Laboratóriumában található keverőberendezésen végeztük. A keverőtartály műszerezett PID ábráját és a berendezés fő méreteit az 1. ábra szemlélteti. A mérőberendezés fő része a V-01 jelű, csőkígyóval felszerelt, duplikatúrával ellátott tartály, amiben SAE 10W-40-es olaj található. Az olaj keverését a keverőtengelyre szerelt A-01 jelű hatlapú tárcsás turbinakeverő végzi. A H-01 jelű csőkígyó a tartályból be- és kihelyezhető, helyzete menetes szárák

segítségével kerül rögzítésre. A keverőtartályon 4 csomk található. A duplikatúra külső palástján elhelyezett HV-06, HV-07, illetve HV-08 jelű gömbcsapokkal zárható csomkok a fűtő- vagy hűtőközeg áramoltatását teszik lehetővé. A duplikatúra légtelenítése a HV-05 jelű gömbcsap segítségével történik. A tartály a fenékre szerelt csomkon keresztül a HV-09 jelű szelep nyitásával üríthető. A tartály magassága az M-02 jelű szintállító motorral állítható be.



1. ábra. MÉRŐBERENDEZÉS FŐBB RÉSZEI ÉS FŐ MÉRTEI

A keverőtengelyt az M-01 jelű villanymotor hajtja, melynek fordulatszámát a hajtásszabályozón potenciométerrel lehet beállítani (SIC-01). A keverőelem fordulatszámának mérése az SR-01 jelű optikai fordulatszám-mérő segítségével történik, ami egy, a tengelyre felfestett nagyobb reflexiójú csik időegység alatti körbefordulásait méri. A hajtómotor által leadott forgatónyomaték az MR-01 jelű nyomatéktávadó segítségével mérhető. A tartályban kevert olaj hőmérséklete 4 különböző magasságban, a TR-01, TR-02, TR-03, valamint a TR-04 jelű, Cu-CuNi termoelemekkel mérhető. A fűtésre vagy hűtésre alkalmazott közeg be- és kilépő hőmérséklete duplikatúra esetén rendre a TR-06 és TR-05 jelű, míg csőkígyó használatkor rendre a TR-08 és TR-07 jelű termoelemekkel mérhető. A mért adatokat adatgyűjtő segítségével számítógépes szoftver gyűjti. A berendezés fő méretei alapján a geometriai hasonlósági számok:

$$\begin{array}{llll} \frac{D}{d} = 2,67 & \frac{D_{csk}}{d} = 1,73 & \frac{H}{d} = 3,31 & \frac{h_1}{d} = 0,73 \\ \frac{h_2}{d} = 1,93 & \frac{h_{csk}}{d} = 1,33 & \frac{w}{d} = 0,2 & \end{array}$$

A munkánk során felfűtési méréseket végeztünk csőkígyó és duplikatúra segítségével, illetve hűtési méréseket csőkígyó alkalmazásával. A mérés elején a tartály magasságát az M-02 motor segítségével a megfelelő magasságba kell állítani. Csőkígyóval végzett mérés esetén a menetes szárák segítségével a H-01 jelű csőkígyót teljesen bele kell engedni a tartályba és rögzíteni, míg a duplikatúrával végzett mérések esetében a csőkígyó ki kell emelni a tartályból. A csőkígyó vagy a duplikatúra csomkjaira az alkalmazott fűtő- vagy hűtőközeg csatlakoztatása rugalmas tömlő segítségével történik. A felfűtési mérések során 1,5 bar nyomású gőzt használtunk, melynek a folyamat során teljes kondenzációját feltételeztük. A kilépő kondenzátum kondenz sorra volt vezetve, ahol annak tömegárama köbözéssel meghatározható. A hűtési mérések során a csőkígyóban hűtővíz áramlott, mely utána csatornára került kiengedésre. A hűtővíz térfogatárama beépített rotaméterről olvasható le. A különböző hőmérsékletszabályozási méréseket 200, 300, 400 és 500 1/min fordulatszámokon végeztük. A kevert olaj hőmérsékletét fűtés során 30°C-ról 80°C-ra, míg hűtésnél 80°C-ról 30°C-ra változtattuk. A mérések során 5mp-es mintavételezési időt alkalmaztunk.

### 3. A KIÉRTÉKELÉS MÓDSZERE

A kutatás célja a keverőberendezés teljesítményfelvételének meghatározása, valamint a hőátadás vizsgálatával a folyamatot jellemző Nusselt-egyenlet felírása. A mérések során rögzítettük a kevert olaj hőmérsékletét ( $T_1; T_2; T_3$ ), a fűtőgőz be- és kilépő hőmérsékletét ( $T_{g\ddot{o}z,be}; T_{g\ddot{o}z,ki}$ ), a hűtőközeg be- és kilépő hőmérsékletét ( $T_{v\ddot{i}z,be}; T_{v\ddot{i}z,ki}$ ), a hűtővíz térfogatáramát ( $\dot{V}_{v\ddot{i}z}$ ), a keverés során fellépő nyomaték értéket ( $M$ ), a keverési fordulatszámot ( $n$ ), és a kondenzátum átlagos tömegáramát ( $\dot{m}_{kond}$ ). A teljesítményfelvétel ( $P$ ) meghatározásához a keverési fordulatszám és a mért nyomaték ( $M$ ) alapján az alábbi összefüggést alkalmaztuk:

$$P = M2\pi n \quad (1)$$

A fordulatszám meghatározását követően számítható a keverési ellenállás-tényező értéke:

$$\zeta = \frac{P}{d^5 n^3 \rho_{olaj}} \quad (2)$$

Az ellenállás-tényező dimenzió nélküli összefüggések segítségével is felírható:

$$\zeta = A Re^{-a} Fr^{-b}, \quad (3)$$

ahol a Reynolds-szám és a Froud-szám keverésre módosítva az alábbi összefüggésekkel határozhatóak meg:

$$Re = \frac{d^2 n \rho_{olaj}}{\mu_{olaj}} \quad Fr = \frac{dn^2}{g} \quad (4)$$

A keverési folyamatot jellemző Nusselt-egyenlet kísérleti mérések alapján határozhatjuk meg. Általánosságban a Nusselt-egyenlet a már sokszorosan igazolt alábbi formában kereshető:

$$Nu = K Re^a Pr^b \left( \frac{\mu_{olaj}}{\mu_{fal}} \right)^c, \quad (5)$$

ahol a Nusselt-szám és a Prandtl-szám keverésre az alábbiak szerint számítható:

$$Nu = \frac{\alpha_{olaj} D}{\lambda_{olaj}} \quad Pr = \frac{c_{olaj} \mu_{olaj}}{\lambda_{olaj}} \quad (6)$$

A  $Pr$ -szám kitevőjének 1/3, míg a viszkozitási hányados kitevőjének pedig 0,14 – 0,24 érték felvétele javasolt [1].

A hőátadás vizsgálatánál a hőátbocsátás alapegyenletéből indultunk ki:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{k\ddot{u}ls\ddot{o}}} + \frac{1}{\alpha_{olaj}} + \frac{1}{\left(\frac{\lambda}{s}\right)_{fal}}} \quad (7)$$

Az összefüggésben szereplő külső oldali hőátadási tényező ( $\alpha_{k\ddot{u}ls\ddot{o}}$ ) a hőmérséklet szabályozás módja alapján különböző kritériumoknak megfelelően kondenzációra és vízűtés esetére empirikus egyenletek alapján meghatározható [2], [3]. Csőkipóval végzett felfűtésnél vízszintes cső belső felületén, míg duplikatúra esetében egyedülálló függőleges cső külső felületén történő filmkondenzációt feltételeztünk. Csőkipó hűtés esetén simafalú csőspirálban történő átmeneti áramlást feltételeztünk.

A hőátbocsátási tényező ( $k$ ) a mérések alapján is számítható:

$$k = \frac{m_{olaj} c_{olaj} \frac{\Delta T_{olaj}}{\Delta t}}{\Delta T_{k\ddot{u}ls\ddot{o}} A_{h\ddot{o}atad\ddot{o}}} \quad (8)$$

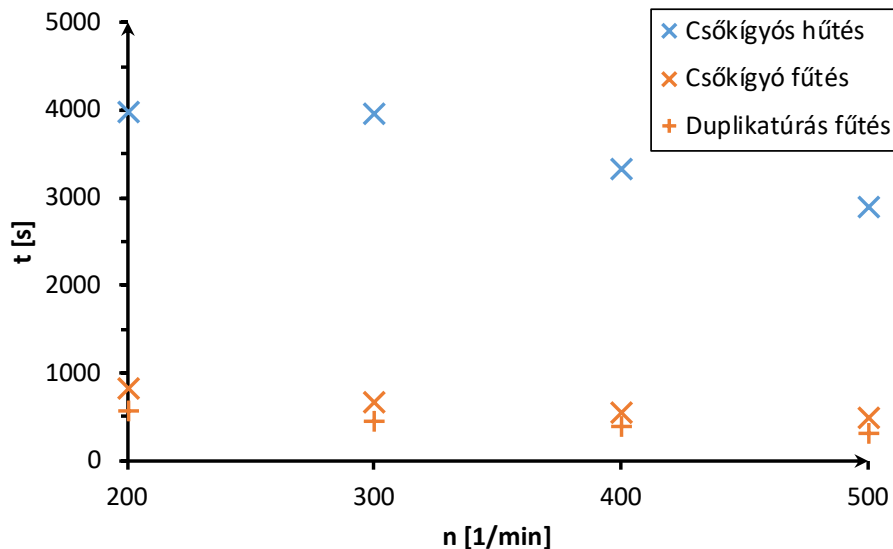
Így a (7) egyenletből kifejezve, az egyenlet átrendezésével fűtés és hűtés esetén az olajoldali hőátadási tényező ( $\alpha_{olaj}$ ) meghatározható. Az olajoldali hőátadási tényező ismeretében számítható a Nusselt-szám. Ezt követően a (5) egyenletben szereplő dimenzió nélküli számok ismertek és az egyenlet átrendezését és  $Y$ -nal való egyenlővé tételét követően a hiányzó  $K$  és a konstansok a mérési pontokra illesztett függvény segítségével meghatározhatók:

$$Y = \frac{Nu}{Pr^b \left( \frac{\mu_{olaj}}{\mu_{fal}} \right)^c} = K Re^a \quad (9)$$

## 4. EREDMÉNYEK

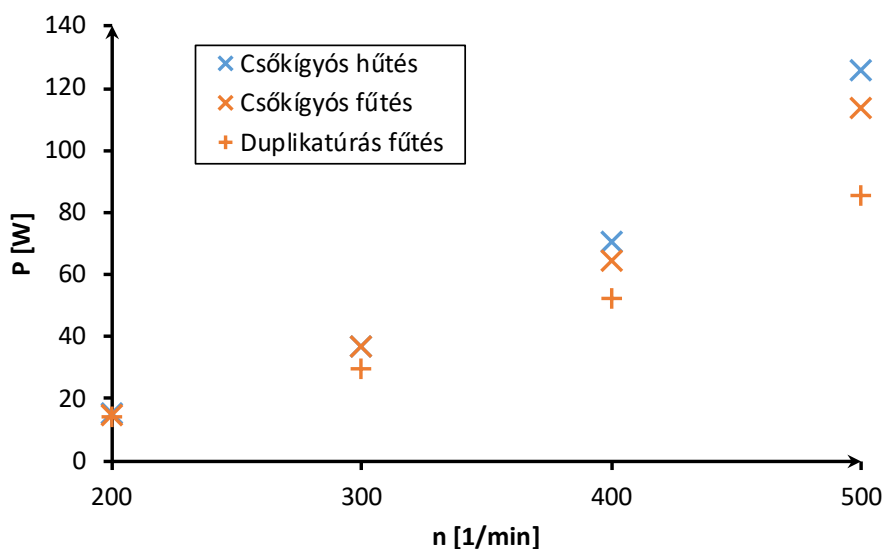
A munkánk során különböző hőmérsékletszabályozási módszerekkel vizsgáltuk a Stokes Laboratóriumban található, csőkígyóval felszerelt duplikatúrás keverőberendezés üzemi jellemzőit.

A mérések eredményei alapján megállapítható, hogy a fordulatszám növelésével a műveleti idő csökkent, ezt a 2. ábra szemlélteti. A műveleti idő hűtés esetén jelentősen megnőtt a fűtési mérésekhez képest. A mérőberendezés felépítése és az alkalmazott mérési beállítások mellett a duplikatúrával gyorsabb felfűtés volt elérhető a vizsgált fordulatszám-tartományban, mint csőkígyó használata esetén.



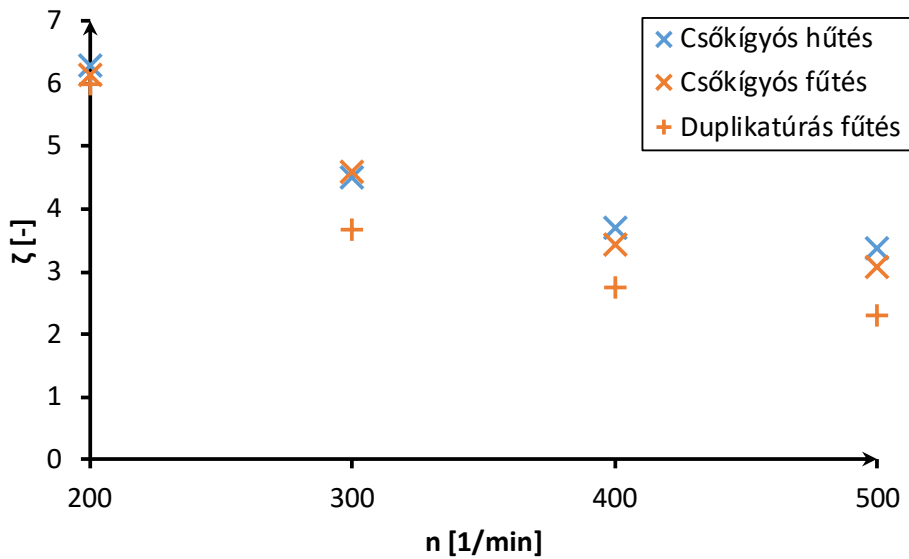
2. ábra. Műveleti idő a különböző fordulatszámú fűtési és hűtési mérések esetében

A fordulatszám növelésével a szükséges keverési teljesítmény jelentősen megnőtt, ami a 3. ábrán látható. Alacsony keverési fordulatszám esetében a különböző mérési módszerekhez tartozó átlagos keverési teljesítményszükséglet hasonló értéket adott. A fordulatszám növelésével a duplikatúra alkalmazásához képest a csőkígyó használata esetén a teljesítményfelvétel számottevően megnőtt. Ennek oka, hogy a folyadékba helyezett test többletellenállást jelent a keverés szempontjából. Csőkígyóval végzett hűtés esetén a folyamat végéhez érve a hűtési sebesség csökkent, így huzamosabb ideig történt magasabb viszkozitású keverés.



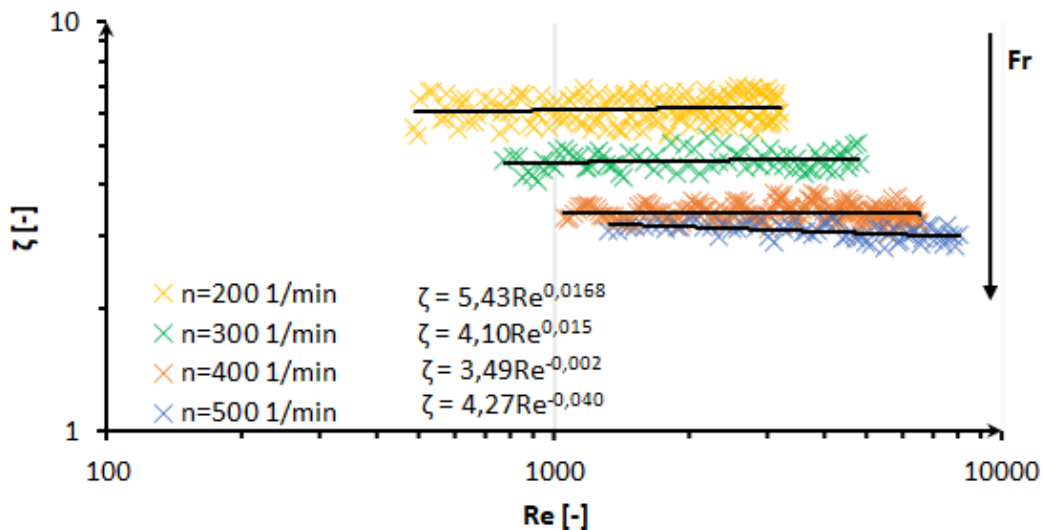
3. ábra. Átlagos keverési teljesítményszükséglet a különböző műveletek során a vizsgált fordulatszámokon

A keverési ellenállás-tényező átlagos értékeit a 4. ábra szemlélteti. A fordulatszám növelésével a keverési ellenállás-tényező értéke csökkent. Duplikatúra alkalmazása esetén az ellenállás-tényező értéke alacsonyabb volt a csőkígyóval végzett mérésekhez képest. Ennek oka, mint az már korábban említésre került, hogy a folyadékba helyezett csőkígyó többletellenállást jelent a keverés szempontjából.



4. ábra. Átlagos keverési ellenállás-tényező a különböző műveletek során a vizsgált fordulatszámokon

A mérések alapján a keverési ellenállás-tényező számítására alkalmas összefüggéseket határoztunk meg. A csőkígyóval történő fűtéshez tartozó összefüggések az 5. ábrán, a többi esetre táblázatos formában kerülnek bemutatásra az 1. táblázatban.

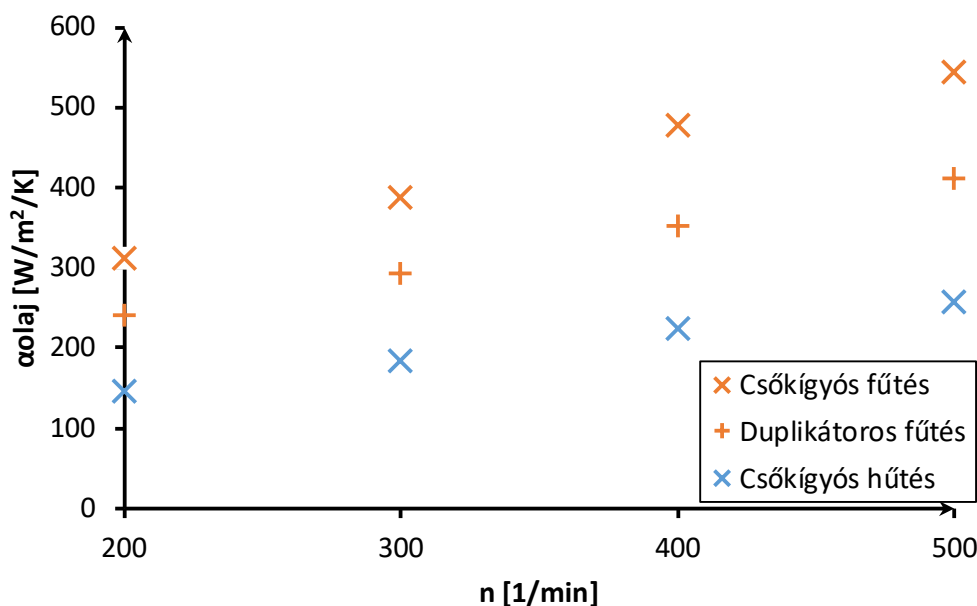


5. ábra. A keverési ellenállás-tényező a  $Re$ -szám függvényében csőkígyós fűtés esetében

A turbulens tartományban a  $Fr$ -számnak meghatározó szerepe van, míg a  $Re$ -számtól szinte függetlenné válik a keverési ellenállás-tényező értéke. A csőkígyóval végzett mérések esetén a mérések a turbulens tartományba estek, mivel az illesztett egyenesek közel vízszintesek voltak a logaritmikus skála esetén. Duplikatúrás fűtésnél azonban az illesztett hatványfüggvények negatív meredekségűek, a keverési ellenállás-tényező csökkenést mutat a tartományon. Feltehetőleg a mérési eredmények az átmeneti tartományba estek.

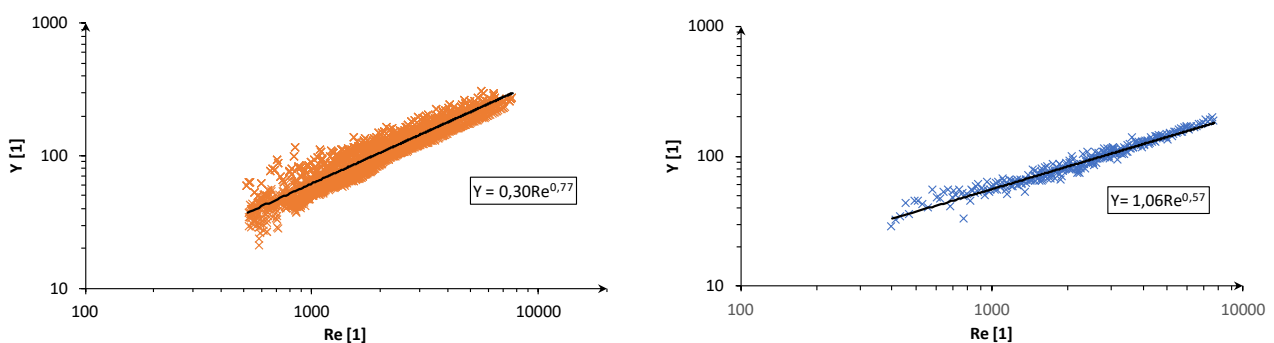
$n$ [1/min]	$Fr$ [1]	$\zeta(Re)$	
		Csőkígyós hűtés	Duplikatúrás fűtés
100	0,17	$4,63Re^{0,044}$	$8,5Re^{-0,049}$
200	0,38	$3,9Re^{0,021}$	$6,7Re^{-0,079}$
300	0,68	$4,0Re^{-0,011}$	$6,1Re^{-0,100}$
400	1,06	$3,8Re^{-0,015}$	$5,25Re^{-0,101}$

A fordulatszám növelésével jelentős javulást lehet elérni az olajoldali hőátadási tényezőben, ahogy az a 6. ábrán látható. A hőátadás javulásának oka, hogy a keverési fordulatszámmal együtt a keverési  $Re$ -szám is nőtt. Minél turbulensebb a tartályban a folyadék áramlása, annál jobbák a hőátadási viszonyok. Ebből az is következik, hogy amennyiben a többi befolyásoló érték állandó, úgy a fordulatszám növelésével gyorsabban elérhető a kívánt olajhőmérséklet, azaz rövidebb a műveleti idő. A kapott eredmények alapján látható, hogy csőkígyós gőzfűtés esetén legmagasabb az olajoldali hőátadási tényező értéke, ezt követi a duplikatúrás gőzfűtés, míg a legalacsonyabb érték csőkígyós vízűtés esetén mérhető.



6. ábra. Átlagos olajoldali hőátadási tényező a különböző műveletek során a vizsgált fordulatszámokon

A Nusselt-egyenletekhez szükséges hiányzó  $K$  és  $a$  értékek meghatározása függvényillesztéssel a 7. ábrán látható csőkígyós és duplikatúrás hőmérsékletszabályozásra.



7. ábra. Nusselt-egyenletek hiányzó paramétereinek meghatározása hatványfüggvény illesztéssel  
 a) csőkígyós mérési pontok alapján, b) duplikatúrás mérési pontok alapján

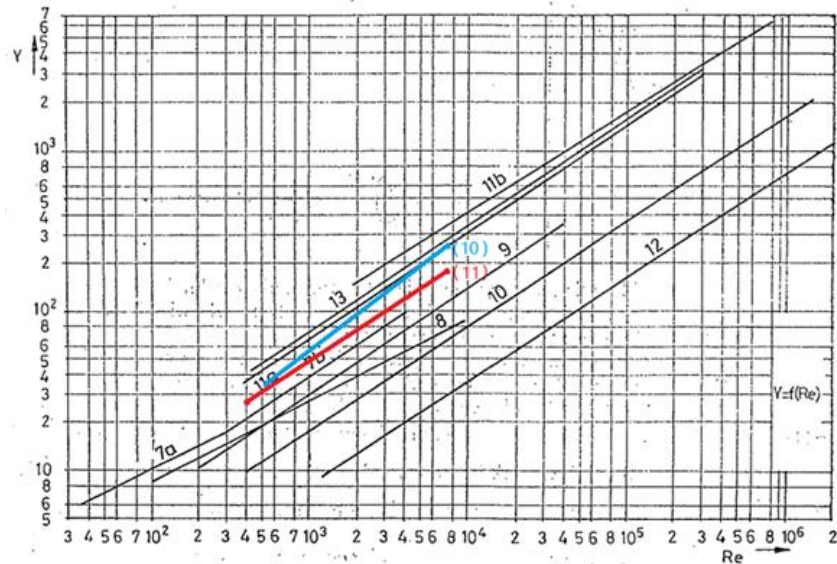
A meghatározott Nusselt-egyenletek és azok értelmezési tartománya:

$$Nu_{csk} = 0,3Re^{0,77}Pr^{0,33} \left( \frac{\mu}{\mu_{fal}} \right)^{0,24} \quad (10) \quad Nu_d = 1,06Re^{0,57}Pr^{0,33} \left( \frac{\mu}{\mu_{fal}} \right)^{0,24} \quad (11)$$

$$520 \leq Re \leq 7700 \quad 400 \leq Re \leq 7600$$

$$320 \leq Pr \leq 1800 \quad 320 \leq Pr \leq 2300$$

A létrehozott egyenleteket összevetettük a szakirodalomban található korábbi eredményeket bemutató diagrammal. A 8. ábrán a színnel jelölt egyenesek a Stokes Laboratóriumban található keverőberendezésre érvényes  $Y - Re$  összefüggéseket mutatják. Látható, hogy a mérési eredmények értelmezhetők, megfelelő tartományba esnek, valamint a többi görbéhez hasonló tendenciát mutatnak.



8. ábra:  $Y$  értékek a  $Re$ -szám függvényében különböző keverőberendezés kialakításokra, valamint a (10) és (11) egyenletekre. [4]

- (7a, Horgonykeverő; 7b, Horgonykeverő, 8 Propellerkeverő;  
 9, Propellerkeverő diffúzorral; 10, Turbókeverő csőkígyóval, torlólappal;  
 11a, Turbókeverő csőkígyóval; 11b, Turbókeverő csőkígyóval;  
 12, Turbókeverő függőleges, egyenes csövekkel; 13, Turbókeverő torlólappal)

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánk során egy keverési művelet teljesítményigényét, valamint a berendezésben lezajló hőátadást vizsgáltuk. A mérési eredmények alapján megállapítottuk, hogy a fordulatszám növelésével a teljesítményszükséglet jelentősen megnőtt, illetve a keverési ellenállástényező értéke csökkent. A csőkígyó alkalmazása esetén a keverési teljesítményszükséglet, valamint a keverési ellenállás-tényező értéke is magasabb volt, mint a duplikatúrás mérések esetén. A műveleti idő gőzfűtés esetén sokkal rövidebb volt, mint vízhűtésnél. A leggyorsabb felfűtés minden fordulatszám esetén duplikatúrával volt elérhető. Alapvetően a csőkígyó jobb hőátadást biztosít, de kisebb felülete miatt amennyiben a kevert közeg mihamarabbi felfűtése fontos szempont, úgy duplikatúrás gőzfűtés javasolt ezen berendezés esetén. Létrehoztuk a keverési ellenállástényező számítására alkalmas összefüggéseket és a hőátadási folyamatokat jellemző Nusselt-egyenleteket.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Fejes Gábor, *Ipari Keverőberendezések*. Műszaki Könyvkiadó, 1970.  
 [2] Bihari Péter, *Műszaki hőtan*. Edutus Főiskola, 2011.  
 [3] Bihari Péter, Both Soma, Dobai Attila, Györke Gábor, „Hőtan Segédlet”. 2020.  
 [4] Dr. Krekács Sándor, Dr. Magassy Zoltán, Dr. Pálfi Zoltán, és Dr. Rátkai György, *VEGYIPARI KÉSZÜLÉKEK Szerkesztési atlasz*. Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1986.