

Szent István Egyetem

**ELEKTROREOLÓGIAI FOLYADÉKOK STACIONÁRIUS
SÍKÁRAMLÁSI RENDSZERBEN**

Doktori (Ph.D) értekezés

Földi László

Gödöllő
2012

A doktori iskola

megnevezése: Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Agrárműszaki tudomány

vezetője: Dr. Farkas István
egyetemi tanár, DSc
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar

Témavezető: Dr. Jánosi László
egyetemi tanár,
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar
Gépipari Technológiai Intézet

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	4
1.1. A téma aktualitása	4
1.2. Kitűzött kutatási feladatok	4
2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	6
2.1. Az ER vizsgáló rendszer működési elve	6
2.2. ER folyadékok keverési kísérletei.....	6
2.3. Kísérleti terv	7
3. EREDMÉNYEK	8
3.1. A nyomásnövekedés folyamatának elemzése	8
3.2. Az elsődleges nyomásnövekedés villamos térerősség és térfogatáram függésének vizsgálata.....	9
3.3. Az elsődleges nyomásnövekedés adalékkoncentráció függésének vizsgálata.....	10
3.4. A másodlagos nyomásnövekedés villamos térerősség és térfogatáram függésének vizsgálata.....	11
3.5. A másodlagos nyomásnövekedés adalékkoncentráció függésének vizsgálata.....	12
3.6. A másodlagos nyomásnövekedés intenzitás villamos térerősség és térfogatáram függésének vizsgálata	13
3.7. A másodlagos nyomásnövekedés intenzitás adalékkoncentráció függésének vizsgálata.....	14
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	16
5. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK	20
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	22
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK	23

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

1.1. A téma aktualitása

A mechatronikai alkalmazásokban és kutatásokban az elmúlt évtizedben jelentős teret nyert az úgynevezett „intelligens” anyagok használata. Bizonyos területeken olyan problémák merültek fel, amelyeket már nem lehetett megoldani anyagszerkezeti változtatásokkal kialakított új anyagok felhasználásával.

Az információáramlás egy sajátos megnyilvánulása figyelhető meg az anyagtudomány egyik új irányzatában. E törekvés fő mozgatója a technikai eszközeinknél jóval tökéletesebb biológiai anyagok működésének, hatásfokának, környezetet kímélő tulajdonságainak megközelítése. A cél olyan anyagok előállítása, amelyek a környezetük változásait érzékelik, majd ezekre a változásokra a felhasználó számára kedvezően, tulajdonságuk jelentős változásával reagálnak.

Mechatronikai rendszerek kutatásában felmerült az igény olyan anyagok kifejlesztésére, amelyek a számítógéptől kapott információt megértik, majd tulajdonságaikat ennek megfelelően változtatják. A számítógéppel befolyásolható anyagi tulajdonságoknak határt szab az a kapcsolat, amit a számítógép és az anyag között létesíthetünk. Ezt az áttételt csak olyan hatások biztosíthatják, amelyek indukálásának és megszüntetésének sebessége összemérhető - vagy nagyobb - a vezérlés, valamint az anyagi tulajdonság változásának sebességénél. Szabályozástechnikai szempontból elektromos vagy mágneses tér alkalmazása tűnik a legkézenfekvőbbnek.

Az elektromos- és mágneses térre való jelentős érzékenység tipikus szilárd test tulajdonság. Ezen tulajdonságok más anyagrendszerekbe történő átvitele csak úgy lehetséges, hogy ezen anyagok kolloid mérettartományba eső részecskéit oszlatjuk el más tulajdonságot mutató anyagrendszerben (pl. folyadékban, vagy rugalmas polimerben). Ez a feladat a nanotechnológia kémiai alapjait jelentő kolloid tudomány segítségével oldható meg. Elektromos és mágneses érzékenység valósítható meg úgynevezett komplex folyadékokkal. Ezek nano-, vagy mikrométeres mérettartományba eső részecskéket tartalmaznak homogén eloszlásban. A részecskék speciális elektromos, vagy mágneses tulajdonságokkal rendelkeznek és azt a látszatot keltik, mintha a folyadék mutatna elektromos, vagy mágneses tulajdonságokat. A komplex folyadékok három nagy csoportját alkotják az elektro-reológiai (ER), a magneto-reológiai (MR)-, valamint a mágneses folyadékok. A szabályozó tér ki- és bekapcsolásával megváltoztathatjuk a folyadék fizikai, vagy mechanikai állapotát.

1.2. Kítűzött kutatási feladatok

A kutatás célja - egy vizsgálatok alapján kiválasztott alapanyagokból összeállított - ER folyadék dinamikus viselkedési törvényszerűségeinek feltárása

stacionárius síkáramlási rendszerben. A kutatás során szükséges egy olyan mérőrendszer és vizsgálati eljárás kidolgozása, amely segítségével a mért nyomásesésből és térfogatáramból dinamikusan meghatározható a folyadék ER hatásából eredő nyírószilárdság növekedése (látszólagos viszkozitás növekedés).

Céлом továbbá mérési eredmények alapján meghatározni a vizsgált ER folyadék nyírószilárdság változásából adódó nyomásnövekedésének, villamos térerősség, térfogatáram és adalékkoncentráció függését leíró matematikai modelleket.

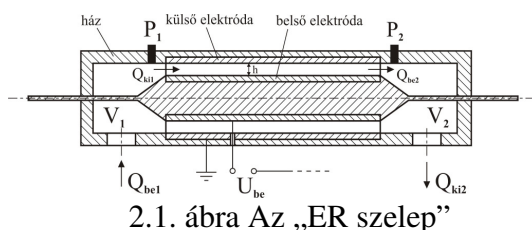
A kutatás a következő részterületek kidolgozásából áll:

- ER folyadék létrehozása különböző alapfolyadékok és adalékanyagok felhasználásával.
- Alapfolyadékok és az adalékanyagok (ER folyadék) együttes vizsgálata és értékelése, különös tekintettel az adalék kiülepedésére és átütési szilárdságra vonatkozóan.
- Új mérőrendszer és vizsgálati eljárás kidolgozása, amely alkalmas a kutatásokban leggyakrabban alkalmazott rotációs elven mérő rendszerekkel **nem mérhető** ER tulajdonságok feltárására (stacionárius síkáramlási rendszerben).
- A kiválasztott ER folyadék dinamikus viselkedésének definiálása stacionárius síkáramlási rendszerben.
- Mérési eredmények alapján a kiválasztott ER folyadék nyírószilárdság növekedésből adódó nyomásnövekedés villamos térerősség függését leíró matematikai modell meghatározása. $\Delta p_{ER} = f(E)$
- Mérési eredmények alapján a kiválasztott ER folyadék nyírószilárdság növekedésből adódó nyomásnövekedés térfogatáram függését leíró matematikai modell meghatározása. $\Delta p_{ER} = f(Q)$
- Mérési eredmények alapján a kiválasztott ER folyadék nyírószilárdság növekedésből adódó nyomásnövekedés adalékkoncentráció függését leíró matematikai modell meghatározása. $\Delta p_{ER} = f(m)$
- Mérési eredmények alapján adott adalékkoncentrációjú ER folyadék nyírószilárdság növekedésből adódó nyomásnövekedés villamos térerősség és térfogatáram függését leíró matematikai modell meghatározása. $\Delta p_{ER} = f(E, Q)$

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. Az ER vizsgáló rendszer működési elve

Jelen vizsgálat fő célja az ER folyadékok és az ER jelenség vizsgálata a hidraulikus alkalmazások, ill. alkalmazhatóság szempontjából. Ebből kifolyólag a tervezett vizsgálóberendezés egy olyan, hidraulikus rendszerbe épített konstrukció, amely azon az elven alapszik, hogy amennyiben a rendszerben alkalmazott hidraulikafolyadék valamilyen ER tulajdonsággal rendelkezik, akkor az ER jelenséget kihasználva módosíthatók a rendszer hidraulikai paraméterei. Ez úgy valósítható meg, hogy a hidraulikus rendszerbe egy olyan speciális kialakítású áramlási keresztmetszet (2.1. ábra) kerül beépítésre, amely az ER jelenség kialakulásának hatására – a folyadék nyírószilárdságának növelése által – hidraulikus fojtószeleppel analóg viselkedést mutat.



Az általam kidolgozott síkáramláson alapuló rendszer esetén a vizsgálórendszerben az állandó nyírási gradienst az ER szelepen átáramló állandó térfogatáram biztosítja. Ekkor az ER szelepen mért nyomáscsökkenésből és térfogatáram felhasználásával számítható a folyadékban a villamos térerősség hatására ébredő nyírófeszültség nagysága (τ_{ER}):

$$\Delta p_{12} = \frac{12 \cdot \eta \cdot L \cdot Q}{b \cdot h^3} + \frac{2 \cdot L \cdot \tau_{ER}}{h} \Rightarrow \tau_{ER}$$

Az összefüggésben L a szelep elektródáinak hossza, η az ER folyadék dinamikai viszkozitása, b a belső elektróda kerülete, h az elektródák közötti résméret ismert paraméterek, Q és Δp_{12} az ER szelepen mért térfogatáram és nyomáscsökkenés.

2.2. ER folyadékok keverési kísérletei

ER folyadék előállítására különböző anyagú részecskéket illetve alapfolyadékokat használtam. A stabil szuszpenzió előállításához diszpergens használata szükséges. Ennek feladata, hogy megakadályozza a részecskék kiüledését, ami az ER folyadék alkalmazhatóságának alapvető kritériuma. A vizsgálatba vont anyagok: Alapfolyadékok: Szilikon olaj, SN 150A (46) ásványi olaj. Szilárd alkotó: Keményítő, Talcum, TiO_2 , PTFE, Korom. A 2.1. táblázat a keverési vizsgálatok eredményeinek kivonata látható.

2.1. táblázat Keverési vizsgálatok eredményei

Alapfolyadék	Adalék	m_a [%]	Diszpergens	m_d [%]	Kiülepedés	Átütési szilárdság [kV/mm]	Zérómező viszkozitás [mPas]
SN 150A	Talcum	5	Komad 309A	1	kiülepedett	$E_{átüt} > 10$ kV/mm	-
SN 150A	Korom	5	Komad 309A	1	kiülepedett	$E_{átüt} > 10$ kV/mm	-
SN 150A	PTFE	5	Komad 309A	1	kiülepedett	$E_{átüt} > 10$ kV/mm	-
SN 150A	TiO ₂	5	Komad 309A	2	Stabil	$E_{átüt} > 10$ kV/mm	84,2 mPas
SN 150A	TiO ₂	10	Komad 309A	4	Stabil	$E_{átüt} > 10$ kV/mm	112,3 mPas
SN 150A	TiO ₂	30	Komad 309A	6	Stabil	$E_{átüt} > 10$ kV/mm	176,8 mPas

2.3. Kísérleti terv

A vizsgálatoknál állandó térfogatáram mellett egységugrás szerűen kapcsolom a villamos teret és mérem a nyomásesést a szelepen. A mért nyomásesés időbeni változását vizsgálom. A változtatott paraméterek a szelepen átáramló ER folyadék térfogatáram (Q), a villamos térerősség (E) - amely a nagyfeszültségű erősítő által kivezérelt feszültség (U_{ki}) és az elektródák távolságából (h) számítható -, valamint az ER folyadék adalékkoncentrációja (m).

2.2. táblázat Kísérleti beállítások (Térfogatáram)

Q ₁ [liter/min]	Q ₂ [liter/min]	Q ₃ [liter/min]	Q ₄ [liter/min]	Q ₅ [liter/min]
0,42	0,65	0,85	1,05	1,3

2.3. táblázat Kísérleti beállítások (Villamos térerősség)

E ₁ [kV/mm]	E ₂ [kV/mm]	E ₃ [kV/mm]	E ₄ [kV/mm]	E ₅ [kV/mm]	E ₆ [kV/mm]
0	2	4	6	8	10

2.4. táblázat Kísérleti beállítások (Adalékkoncentráció)

m_1 [m%]	m_2 [m%]	m_3 [m%]	m_4 [m%]
0	10	20	30

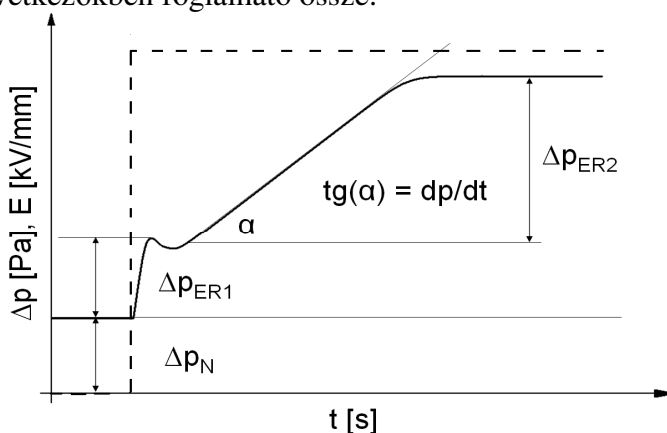
A kísérlettervem tehát 120 kísérleti beállításból áll, beállításonként 5 ismétlést végeztem.

Az előkísérletek alkalmával figyeltem meg olyan jelenségeket, melyeket az eddigi szakirodalom nem használt (abból adódóan, hogy rotációs elven mérő vizsgáló rendszerekkel ezeket a jelenségeket nem lehet kimutatni). Ilyen a Δp_2 és dp/dt , melyeknek a pontos értelmezését az eredmények fejezetben ismertetem.

3. EREDMÉNYEK

3.1. A nyomásnövekedés folyamatának elemzése

Az általam létrehozott vizsgálati rendszerben (ER szelep) stacionárius síkáramlás történik. A szakirodalomban látott nyomásfelfutással ellenben az általam vizsgált esetek mindegyikében ettől eltérő nyomásfelfutást tapasztaltam, amely a következőkben foglalható össze:



Δp_N	-	alap viszkozitásból adódó nyomásnövekedés	[Pa]
Δp_{ER1}	-	ER hatásból adódó elsődleges nyomásnövekedés	[Pa]
Δp_{ER2}	-	ER hatásból adódó másodlagos nyomásnövekedés	[Pa]
dp/dt	-	másodlagos nyomásnövekedés intenzitása	[Pa/s]
E	-	villamos térerősség	[kV/mm]

3.1. ábra A nyomásnövekedés szakaszai stacionárius síkáramlási rendszerben

A nyomás felfutás több részből áll. A villamos tér bekapcsolását megelőző szakasz nyomása az ER folyadék alap viszkozitásából adódik (Δp_N).

A villamos tér bekapcsolását követően egy gyors nyomásnövekedés tapasztalható melynek válaszideje 20 - 40 ms közötti érték. A nyomásesés ezt követően csökken, elér egy minimális értéket, majd ismét növekszik. Ennek a szakasznak a maximuma és minimuma közötti rész átlagértékét - az alapviszkozitásból adódó nyomásnövekedés (Δp_N) levonása után - **elsődleges nyomásnövekedésnek** nevezem (Δp_{ER1}).

A másodlagos nyomásnövekedés egy maximális értékig folytatódik. Ennek a másodlagos nyomásnövekedésnek az intenzitása több nagyságrenddel kisebb az elsődleges nyomásnövekedéshez képest. Jellege lineáris trenddel közelíthető, ennek a szakasznak a meredekségét **másodlagos nyomásnövekedés intenzitásának** nevezem (dp/dt).

A nyomásnövekedés által elért maximális értéket - az alapviszkozitásból adódó nyomásnövekedés (Δp_N) és az elsődleges nyomásnövekedés (Δp_{ER1}) értékének levonása után - a továbbiakban **másodlagos nyomásnövekedésnek** nevezem (Δp_{ER2}).

3.2. Az elsődleges nyomásnövekedés villamos térerősség és térfogatáram függésének vizsgálata

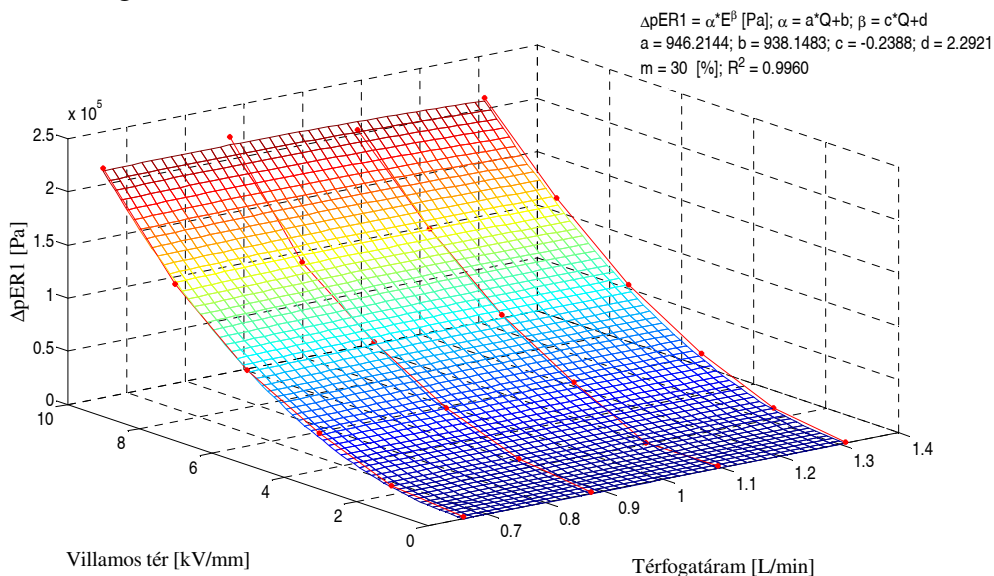
Miután megvizsgáltam az elsődleges nyomásnövekedések függését az egyes változóktól (E, Q) képet kaptam a nyomásnövekedési folyamat matematikai közelítő összefüggéseiről. A mérések eredményeiből látható volt, hogy az elsődleges nyomásnövekedés villamos térerősség függése hatványfüggvénnyel jól közelíthető. Azonban a vizsgálatok eredményeként az is látható, hogy az elsődleges nyomásnövekedés értéke a térfogatáram függvényében kismértékben, de változik. A változás lineáris trenddel közelíthető. Ennek okán az elsődleges nyomásnövekedés villamos tér és térfogatáram közelítésére a következő alakú függvényt választottam:

$$\Delta p_{ER1} = (a \cdot Q + b) \cdot E^{c \cdot Q + d}$$

Ahol:

- Q térfogatáram [L/min]
- E villamos térerősség [kV/mm]
- a $\left[\frac{\text{Pa} \cdot \text{mm} \cdot \text{min}}{\text{kV} \cdot \text{L}} \right]$, b $\left[\frac{\text{Pa} \cdot \text{mm}}{\text{kV}} \right]$, c $\left[\frac{\text{min}}{\text{L}} \right]$, és d [-] paraméterek

Az ábra az elsődleges nyomásnövekedést (Δp_{ER1}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál. Az ábrán látható továbbá az ismertetett alakú függvény, amelynek paramétereit (a, b, c, d) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg.



3.2. ábra Elsődleges nyomásnövekedés a villamos térerősség és térfogatáram függvényében (m = 30 % adalékkoncentráció TiO₂/SN150A keverék)

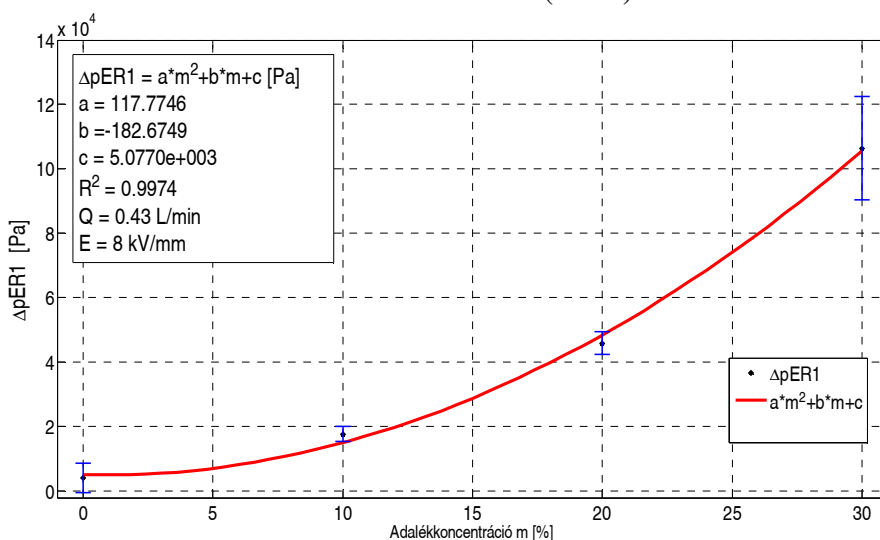
A közelítő függvény, amellyel meghatározható az elsődleges nyomásnövekedés értéke a villamos térerősség és térfogatáram függvényében ($p = 99\%$ valószínűségi szinten) $m = 30\%$ adalékkoncentrációjú $\text{TiO}_2/\text{SN150A}$ keverék esetén, $Q = 0,66 - 1,31$ L/min és $E = 0 - 10$ kV/mm érvényességi tartományban:

$$\Delta p_{ER1} = (946,2144 \cdot Q + 938,1483) \cdot E^{-0,2388 \cdot Q + 2,2921} \pm 16010 \text{ [Pa]}$$

A meghatározott összefüggéssel stacionárius síkáramlási rendszerben a térfogatáram és villamos térerősség ismeretében meghatározható az elsődleges nyomásnövekedés értéke.

3.3. Az elsődleges nyomásnövekedés adalékkoncentráció függésének vizsgálata

A diagram az elsődleges nyomásnövekedés (Δp_{ER1}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (adalékkoncentráció $m = 0, 10, 20, 30\%$) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$).



3.3. ábra Elsődleges nyomásnövekedés adalékkoncentráció függvénye 0,43 l/min térfogatáram esetén

Az adalékkoncentráció és elsődleges nyomásesést összefüggését a,

$$\Delta p_{ER1} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$$

alakú függvénnyel közelítem, ahol m adalékkoncentráció [%], a [Pa], b [Pa] és c [Pa] paraméterek.

A folytonos vonal az ismertett alakú függvényt ábrázolja, amelynek paramétereit (a , b , c) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg.

3.4. A másodlagos nyomásnövekedés villamos térerősség és térfogatáram függésének vizsgálata

Miután megvizsgáltam a másodlagos nyomásnövekedések függését az egyes változóktól (E, Q) képet kaptam a nyomásnövekedési folyamat matematikai összefüggéseiről. A mérések eredményeiből látható volt, hogy a másodlagos nyomásnövekedés villamos térerősség függése autokatalitikus függvényt jól közelíthető. A vizsgálatok eredményeként az is látható, hogy a térfogatáram függvényében a másodlagos nyomásnövekedés szintén autokatalitikus jelleg szerint változik. Ennek tükrében a másodlagos nyomásnövekedés villamos térerősség és térfogatáram közelítésére a következő alakú függvényt választottam:

$$\Delta p_{ER2} = (a \cdot E + b) \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{c+d \cdot Q}} \right) + (\alpha \cdot Q + \beta) \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{\gamma + \delta \cdot E}} \right)$$

Ahol:

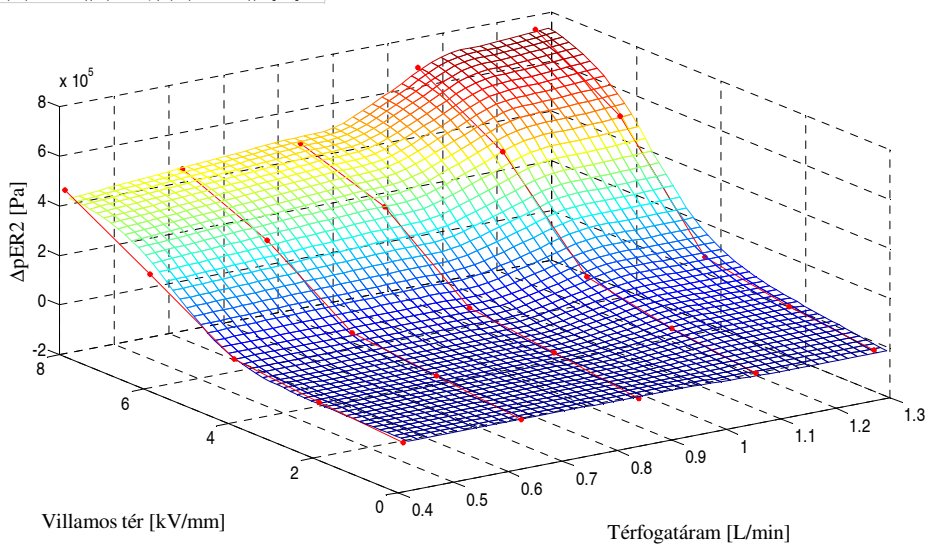
- Q térfogatáram [L/min]
- E villamos térerősség [kV/mm]
- a [mm/kV], b [Pa], c [-], d [min/L], α [min/L], β [Pa], γ [-], és δ [mm/kV]

paraméterek

A függvényt az egyes kísérleti beállításoknál mért másodlagos nyomásnövekedés átlagértékeire illeszttem. A paramétereket a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg.

$\Delta p_{ER2} = (a \cdot Q + b) \cdot (1 / (1 + e^{c+d \cdot E})) + (\alpha \cdot E + \beta) \cdot (1 / (1 + e^{\gamma + \delta \cdot Q}))$ [Pa];

a = 21928 ;
b = -8848.9;
c = 229.72;
d = -229.17
 α = 173360;
 β = 361380;
 γ = 8.06;
 δ = -1.46 ;
m = 30 %;
 $R^2 = 0.9980$



3.4. ábra Másodlagos nyomásnövekedés a villamos térerősség és térfogatáram függvényében (m = 30 % adalékkoncentráció TiO₂/SN150A keverék)

Az ábra a másodlagos nyomásnövekedést (Δp_{ER2}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál. Az ábrán látható továbbá az ismertetett alakú függvény.

A közelítő függvény, amellyel meghatározható a másodlagos nyomásnövekedés értéke a villamos térerősség és térfogatáram függvényében ($p = 99\%$ valószínűségi szinten) $m = 30\%$ adalékkoncentrációjú $TiO_2/SN150A$ keverék esetén, $Q = 0,42 - 1,31$ L/min és $E = 0 - 8$ kV/mm érvényességi tartományban:

$$\Delta p_{ER2} = (21928 \cdot Q - 8848,9) \cdot \left(\frac{I}{I + e^{-229,72 - 229,17 \cdot E}} \right) + (173360 \cdot E + 361380) \cdot \left(\frac{I}{I + e^{8,06 - 1,46 \cdot Q}} \right) \pm 91117 \text{ [Pa]}$$

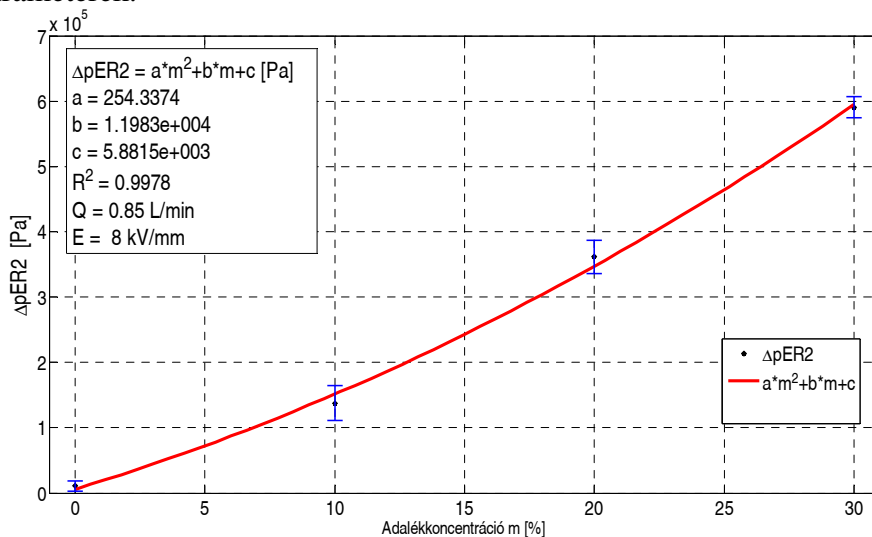
A meghatározott összefüggéssel stacionárius síkáramlási rendszerben a térfogatáram és villamos térerősség ismeretében meghatározható a másodlagos nyomásnövekedés értéke.

3.5. A másodlagos nyomásnövekedés adalékkoncentráció függésének vizsgálata

Az adalékkoncentráció és másodlagos nyomásesés összefüggését a,

$$\Delta p_{ER2} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$$

alakú függvénnyel közelítem, ahol m [%] adalékkoncentráció, a [Pa], b [Pa] és c [Pa] paraméterek.



3.5. ábra Másodlagos nyomásnövekedés adalékkoncentráció függvénye $E = 8$ kV/mm villamos térerősség és $Q = 0,85$ L/min térfogatáram esetén

A diagram a másodlagos nyomásnövekedés (Δp_{ER2}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (adalékkoncentráció $m = 0, 10, 20, 30\%$) valamint az

egy- kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). A folytonos vonal az ismertett alakú függvényt ábrázolja.

A másodlagos nyomásnövekedés átlagértékeire illesztett függvény korrelációs együtthatója minden vizsgátnál nagyobb, mint 0,95. A másodlagos nyomásnövekedés a,

$$\Delta p_{ER2} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$$

alakú függvénnyel közelíthető.

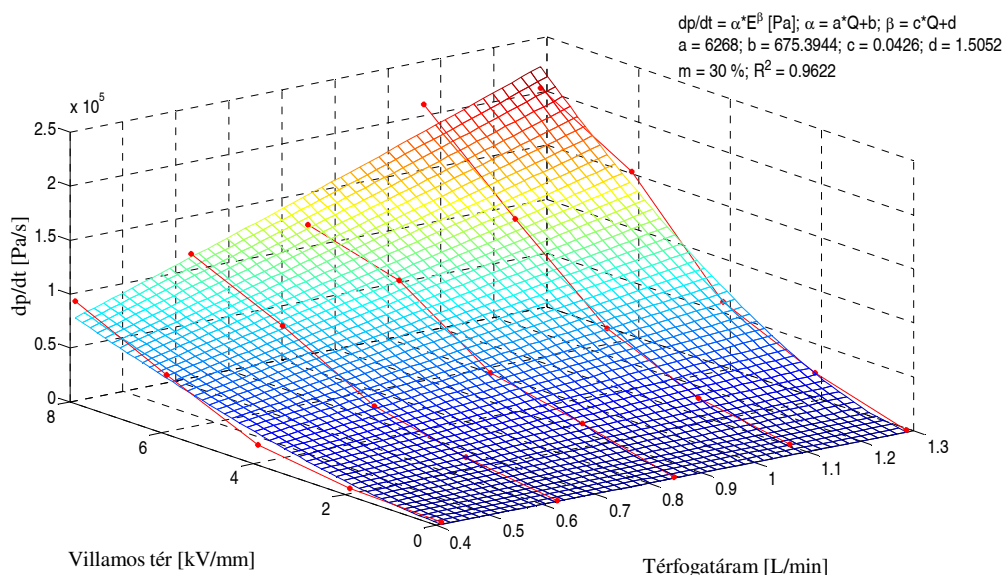
3.6. A másodlagos nyomásnövekedés intenzitás villamos térerősség és térfogatáram függésének vizsgálata

Miután megvizsgáltam a másodlagos nyomásnövekedés intenzitásának függését az egyes változóktól (E, Q) képet kaptam a nyomásnövekedési folyamat matematikai összefüggéseiről. A mérések eredményeiből látható volt, hogy a másodlagos nyomásnövekedés intenzitása villamos térerősség függése hatványfüggvénnyel jól közelíthető. A vizsgálatok eredményeként az is látható, hogy a másodlagos nyomásnövekedés intenzitásának értéke a térfogatáram függvényében változik. Ezek ismeretében a másodlagos nyomásnövekedés intenzitásának villamos térerősség és térfogatáram közelítésére a következő alakú függvényt választottam:

$$\frac{dp}{dt} = (a \cdot Q + b) \cdot E^{c \cdot Q + d}$$

Ahol:

- Q térfogatáram [L/min]
- E villamos térerősség [kV/mm]
- a $\left[\frac{Pa \cdot min \cdot mm}{L \cdot kV \cdot s} \right]$, b $\left[\frac{Pa \cdot mm}{kV \cdot s} \right]$, c $\left[\frac{min}{L} \right]$, és d [-] paraméterek



3.6. ábra Másodlagos nyomásnövekedés intenzitása az villamos térerősség és térfogatáram függvényében ($m = 30\%$ adalékkoncentráció $\text{TiO}_2/\text{SN150A}$ keverék)

Az ábra a másodlagos nyomásnövekedés intenzitás átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál. Az ábrán látható továbbá az ismertetett alakú függvényt, amelynek paramétereit (a , b , c , d) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg.

A közelítő függvény, amellyel meghatározható a másodlagos nyomásnövekedés intenzitásának értéke a villamos térerősség és térfogatáram függvényében ($p = 99\%$ valószínűségi szinten) $m = 30\%$ adalékkoncentrációjú $\text{TiO}_2/\text{SN150A}$ keverék esetén, $Q = 0,41 - 1,31$ L/min és $E = 0 - 8$ kV/mm érvényességi tartományban:

$$\frac{dp}{dt} = (6268,0 \cdot Q + 675,3944) \cdot E^{0,0426 \cdot Q + 1,5052} \pm 43020 \text{ [Pa / s]}$$

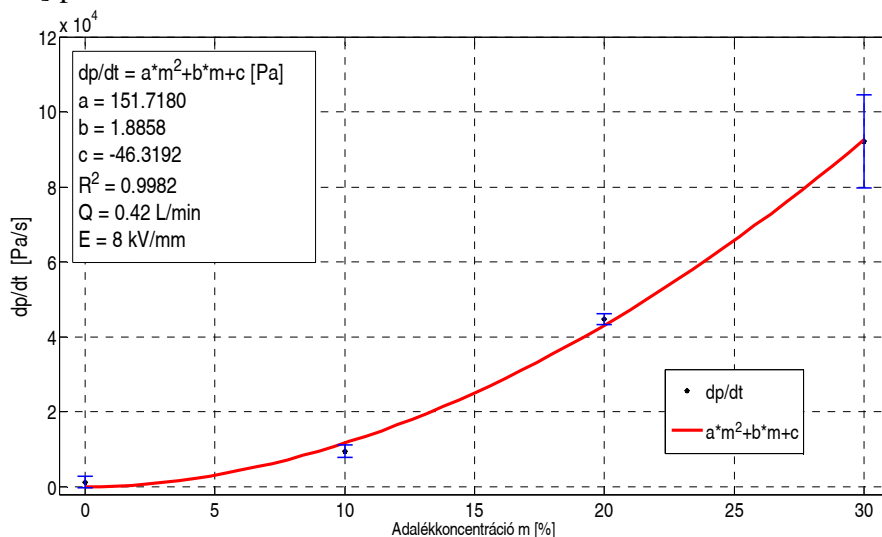
A meghatározott összefüggéssel stacionárius síkáramlási rendszerben a térfogatáram és villamos térerősség ismeretében meghatározható a másodlagos nyomásnövekedés intenzitásának értéke.

3.7. A másodlagos nyomásnövekedés intenzitás adalékkoncentráció függésének vizsgálata

Az adalékkoncentráció és másodlagos nyomásnövekedés intenzitásának összefüggését a,

$$\frac{dp}{dt} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$$

alakú függvénnyel közelítem, ahol m [%] adalékkoncentráció, a [Pa/s], b [Pa/s] és c [Pa/s] paraméterek.



3.7. ábra Másodlagos nyomásnövekedés intenzitása és adalékkoncentráció függvénye $E = 8$ kV/mm villamos térerősség és $Q = 0,42$ L/min térfogatáram esetén

A diagram a másodlagos nyomásnövekedés intenzitás átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (adalékkoncentráció $m = 0, 10, 20, 30$ %) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). A folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ábrázolja.

A másodlagos nyomásnövekedés intenzitás átlagértékeire illesztett függvény korrelációs együtthatója minden vizsgált mérésnél nagyobb, mint 0,95. A másodlagos nyomásnövekedés intenzitása a,

$$\frac{dp}{dt} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$$

alakú függvénnyel közelíthető.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Az új tudományos eredmények a következő feltételek esetén érvényesek: A vizsgálatokat SN 150 A ásványi olaj 5 μm átlagos részecske méretű TiO_2 keverékkel végeztem. A stabil keverék kialakításához Komad 309A típusú diszpergenst használtam. A keverési arány 0-tól 30 tömegszázalékig terjed, az alkalmazott villamos térerősség nagysága 0-tól 8 kV/mm. A térfogatáramot 0,66 - 1,3 L/min tartományban változtattam. Az ER folyadék vizsgálati hőmérséklete: 25°C. A tézisekben alkalmazott jelölések: Δp_{ER1} - elsődleges nyomásnövekedés [Pa]; Δp_{ER2} - másodlagos nyomásnövekedés [Pa]; dp/dt - másodlagos nyomásnövekedés intenzitása [Pa/s]; E - villamos térerősség [kV/mm]; Q - térfogatáram [L/min]; m - adalékkoncentráció [%] a, b, c, d, α , β , γ , δ paraméterek.

1. tézis.

Megállapítottam, hogy síkáramlási rendszerben egységgrás alakú villamos térerősség változás hatására a nyírószilárdság változásból adódó nyomásnövekedés két szakaszból áll: a villamos tér bekapcsolását követő gyors **elsődleges** nyomásnövekedés, illetve egy **másodlagos** lassúbb (hosszabb válaszidejű) szakaszból. Megállapítottam továbbá, hogy az elsődleges nyomásnövekedés intenzitása legalább egy nagyságrenddel nagyobb, mint a másodlagos nyomásnövekedés intenzitása. Ennek igazolására mérőrendszert és vizsgálati eljárást dolgoztam ki.

2. tézis.

Igazoltam, hogy az **elsődleges** nyomásnövekedés mértéke az alkalmazott villamos térerősségtől, az adalékkoncentrációtól, valamint a térfogatáramtól függ.

2/a. Igazoltam, hogy a villamos tér bekapcsolását követő **elsődleges** nyomásnövekedés mértéke adott adalék koncentráció alkalmazása esetén, hatványfüggvénnyel közelíthető összefüggést mutat az alkalmazott villamos térerősséggel. Az összefüggést az alábbi egyenlet írja le:

$$\Delta p_{ER1} = \alpha \cdot E^\beta$$

(Az egyenlet paramétereit a térfogatáram és az adalékkoncentráció függvényében kell meghatározni.)

2/b. Igazoltam, hogy a villamos tér bekapcsolását követő **elsődleges** nyomásnövekedés mértéke adott villamos térerősség alkalmazása esetén

másodfokú polinommal közelíthető összefüggést mutat a folyadék adalékanyag koncentrációjával.

$$\Delta p_{ER1} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$$

(Az egyenlet paramétereit az alkalmazott villamos térerősség és a térfogatáram függvényében kell meghatározni.)

3. tézis.

Igazoltam, hogy a szakirodalomban nem tárgyalt **másodlagos** nyomásnövekedés mértéke a villamos térerősségtől, az adalékkoncentrációtól, valamint a térfogatáramtól függ.

3/a. Igazoltam, hogy a villamos tér bekapcsolását követő **másodlagos** nyomásnövekedés mértéke adott adalék koncentráció esetén, autokatalitikus függvénnyel közelíthető összefüggést mutat a villamos térerősséggel. Az összefüggést az alábbi egyenlet írja le:

$$\Delta p_{ER2} = \alpha \cdot \left(\frac{I}{I + e^{\beta + \gamma \cdot E}} \right)$$

(Az egyenlet paramétereit a térfogatáram és az adalékkoncentráció függvényében kell meghatározni.)

3/b. Igazoltam, hogy a villamos tér bekapcsolását követő **másodlagos** nyomásnövekedés mértéke – adott villamos térerősség alkalmazása esetén - másodfokú polinommal közelíthető összefüggést mutat a folyadék adalékanyag koncentrációjával. Az összefüggést az alábbi egyenlet írja le:

$$\Delta p_{ER2} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$$

(Az egyenlet paramétereit az alkalmazott villamos térerősség és a térfogatáram nagyságának függvényében kell meghatározni.)

4. tézis.

Méréseimmel igazoltam, hogy a másodlagos nyomás növekedés intenzitása (dp/dt) az alkalmazott villamos térerősségtől, az adalék koncentrációtól, valamint a térfogatáramtól függ.

4/a. Igazoltam, hogy a villamos tér bekapcsolását követő **másodlagos** nyomásnövekedés intenzitása (dp/dt) adott adalék koncentráció alkalmazása esetén hatványfüggvénnyel közelíthető összefüggést mutat az alkalmazott villamos térerősséggel. Az összefüggést az alábbi egyenlet írja le:

$$\frac{dp}{dt} = \alpha \cdot E^\beta$$

(Az egyenlet paramétereit térfogatáram és adalékkoncentráció függvényében kell meghatározni.)

4/b. Igazoltam, hogy a villamos tér bekapcsolását követő **másodlagos** nyomásnövekedés intenzitása (dp/dt) adott villamos térerősség alkalmazása esetén másodfokú polinommal közelíthető összefüggést mutat a folyadék adalékanyag koncentrációjával. Az összefüggést az alábbi egyenlet írja le:

$$\frac{dp}{dt} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$$

(Az egyenlet paramétereit az alkalmazott villamos térerősség és a térfogatáram nagyságának függvényében kell meghatározni.)

5. tézis.

Mérési eredmények alapján meghatároztam az **elsődleges** és **másodlagos nyomásnövekedés** valamint a **másodlagos nyomásnövekedés intenzitásának** térfogatáram és villamos térerősség függését, adott adalékkoncentrációjú ER folyadékokra vonatkozóan.

5/a. Az **elsődleges nyomásnövekedés** villamos térerősség és térfogatáram $\Delta p_{ER1} = f(E, Q)$ közötti összefüggés, adott adalékkoncentrációjú ER folyadék esetén a,

$$\Delta p_{ER1} = (a \cdot Q + b) \cdot E^{c \cdot Q + d}$$

alakú függvénnyel közelíthető (az egyenlet paramétereit az alkalmazott adalékkoncentráció függvényében kell meghatározni).

5/b. A **másodlagos nyomásnövekedés** villamos térerősség és térfogatáram $\Delta p_{ER2} = f(E, Q)$ közötti összefüggés, adott adalékkoncentrációjú ER folyadék esetén a,

$$\Delta p_{ER2} = (a \cdot E + b) \cdot \left(\frac{I}{1 + e^{c+d \cdot Q}} \right) + (\alpha \cdot Q + \beta) \cdot \left(\frac{I}{1 + e^{\gamma + \delta \cdot E}} \right)$$

alakú függvénnyel közelíthető (az egyenlet paramétereit az alkalmazott adalékkoncentráció függvényében kell meghatározni).

5/c. A **másodlagos nyomásnövekedés intenzitása** villamos térerősség

és térfogatáram $\frac{dp}{dt} = f(E, Q)$ közötti összefüggés, adott adalékkoncentrációjú ER folyadék esetén a,

$$\frac{dp}{dt} = (a \cdot Q + b) \cdot E^{c \cdot Q + d}$$

alakú függvénnyel közelíthető (az egyenlet paramétereit az alkalmazott adalékkoncentráció függvényében kell meghatározni).

5. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK

A munkám során a vizsgált anyag viselkedésével kapcsolatban számos olyan tapasztalatot szereztem melyeknek elméleti és gyakorlati vonatkozásai vannak.

A törvényszerűségek és az alapösszefüggések feltárásához egyfajta alapolajt és adalékanyagot használtam. A dolgozatban feltárt összefüggések szorossága, a függő és független változók közötti korrelációk mértékei arra utalnak, hogy olyan törvényszerűségekkel állunk szemben, melyek tendenciái azonosak, mértékei azonban egymástól eltérőek lehetnek és az alkalmazott anyagok egyedi jellemzőitől függenek. Ezen okfejtés alapján levonható az a következtetés, hogy a kidolgozott eljárás módszerként alkalmazható bármely más anyagpárosítás jellemzőinek meghatározásához. A megállapított egyenletek általános alakjai azonosak, a paraméterei viszont egymástól eltérőek. A további, különböző anyagpárosításra vonatkozó, paramétereket a későbbiekben ismételt mérésekkel kell megállapítani. A feltárt összefüggések, tehát az egyedi anyagpárosítástól eltérően, szélesebb körben lesznek érvényesek.

Mérések közben megfigyeltem, hogy a vizsgált jelenségre hatást gyakorolt a mérések között eltelt időtartam. Feltehetően az adalékanyag folyadékban való eloszlása, lokális koncentrációja befolyásolja a mérések eredményeit. Ezen tapasztalatok alapján a méréseimet úgy állítottam össze, hogy minden egyes ismétlés azonos kiindulási feltételek mellett történhessék. Ezt úgy oldottam meg, hogy minden egyes mérési beállítás előtt a vizsgált anyagot keveréssel, villamos tér alkalmazás nélkül, „homogenizáltam” vagyis addig végeztem a keverést, amíg a folyadék kiindulási viszkozitási értékét el nem értem. Labor körülmények között ez a módszer biztosíthatja a mérések azonos feltételeit, de a valóságban ezeket a hatásokat is ismerni kell. Ennek okán olyan új vizsgálatok kidolgozását és elvégzését javaslom, melyekkel változó kiindulási körülmények között is definiálható a folyadék viselkedése. Ez azt jelenti, hogy az ER hatás közben a szelep bármely keresztmetszetében ismernünk kell az adalékanyag koncentrációját.

Méréseim során megfigyeltem azt is, hogy a térfogatáram különböző hatással van a másodlagos nyomásnövekedésre. Ha a térfogatáramot növeltem, egyre erőteljesebbé vált a másodlagos nyomásnövekedés intenzitása. Érdekes jelenségnek tapasztaltam, hogy az intenzitás növekedés mértéke is változott a térfogatáram függvényében. Ezt a befolyást úgy kerültem el, hogy minden mérési beállítást azonos térfogatáramon hajtottam végre. A jövőben ezért a térfogatáram hatását a másodlagos nyomásnövekedésre is javaslom megvizsgálni.

Vizsgálataimat állandó folyadék hőmérsékleten hajtottam végre. Közismert, hogy a folyadék viszkozitását annak hőmérséklete jelentősen befolyásolja, de nem ismert a folyadék hőmérséklet hatása az ER jelenségre a jelen kutatásban alkalmazott anyagkombináció esetében. További kutatási feladatként ennek feltárását is elkerülhetetlennek tartom.

A műszaki életben gyakran előforduló szűrőtechnikai problémák egy része összefüggésbe hozható a szűrendő anyagban diszpergált idegen anyagok mennyiségével és minőségével. Tekintettel arra, hogy az ER hatás következtében irányítható a folyadékban lévő polarizálható részecskék koncentrációja, ezért ez a hatás alkalmasá teszi a módszert egyfajta szűrőként történő felhasználásra. Ez a technika ipari körülmények közötti alkalmazást tesz lehetővé.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

ELEKTROREOLÓGIAI FOLYADÉKOK STACIONÁRIUS SÍKÁRAMLÁSI RENDSZERBEN

Munkám során első lépésként áttekintettem a hazai és a nemzetközi szakirodalmat. A szakirodalom feldolgozása alapján megállapítottam, hogy az ER folyadékok vizsgálatának módszerei – áramlástani szempontból – két fontosabb csoportra oszthatók: a stacionárius síkáramláson (Flow mode), és a Couette-áramláson (Share mode) alapuló módszerekre. ER folyadékok vizsgálatát a kutatók többsége rotációs elektroviszkóziméterrel végzi, így az anyagvizsgálatok jelentős része a Couette-áramláson alapuló módszert alkalmazza, azonban hidraulikus rendszerekben stacionárius síkáramlás alakul ki. Tekintettel arra, hogy az ER szelep alkalmazási területeit főleg hidraulikus energiaátvitelt megvalósító körökre szánom, ezért az ilyen körülmények között kialakuló stacioner síkáramlási viszonyokat elemzem. Ezen az elven történő vizsgálati módszerek irodalma azonban szegényes.

Ennek tükrében a munkámat egy stacionárius síkáramláson alapuló vizsgálati módszer kidolgozásával folytattam, melynek eredményeként kidolgoztam egy ún. ER szelepre alapozott vizsgálati koncepciót.

Kialakítottam az ER szelepre alapozott vizsgálati módszert és megvalósítottam a vizsgáló berendezést. Ezen belül összeállítottam a mérőberendezés hidraulikus és elektromos rendszerét. Elkészítettem a mérésadatgyűjtő illetve mérésirányító algoritmusát.

Keverési kísérletek alapján ER folyadékot (SN 150 A + TiO₂) állítottam elő, valamint elvégeztem az alapfolyadék vizsgálatát átütési szilárdság és zéró mező viszkozitás tekintetében 0, 10, 20 30 tömegszázalékos adalékkoncentráció esetén.

Vizsgálataim során meghatároztam az általam előállított (SN 150 A + TiO₂) ER folyadék, jellemző nyomásfelfutási folyamatát egységugrás alakú villamos térerősség változás hatására stacionárius síkáramlási rendszerben. Ennek eredményeként definiáltam az elsődleges és másodlagos nyomásnövekedést, illetve ennek intenzitását.

Meghatároztam az elsődleges nyomásnövekedés villamos térerősség, térfogatáram és adalékkoncentráció függését és megállapítottam, hogy az elsődleges nyomásnövekedés csak kismértékben függ a térfogatáramtól. Meghatároztam a másodlagos nyomásnövekedés és annak, intenzitásának villamos térerősség, térfogatáram és adalékkoncentráció függését.

Vizsgálataim alapján megfogalmaztam az új tudományos eredményeimet, továbbá javaslatokat tettem az elért eredmények gyakorlati hasznosítására, és további kutatási feladatok elvégzésére.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk világnyelven

Földi L., Sárközi E., Jánosi L.: Mathematical Analysis of Electro-Rheological Flow Control Valve R & D Mechanical Engineering Letters, 2008. Vol. 1., Hungary, pp. 107-112. HU ISSN 2060-3789

Földi L., Jánosi L.: Design of electro-rheological flow control valve. R & D Mechanical Engineering Letters, 2009.Vol. 2., Hungary, pp. 161-165. HU ISSN 2060-3789

Földi L., Jánosi L.: Short response time fluid flow control by new development ER valve. R & D Mechanical Engineering Letters, 2009.Vol 3., Hungary, pp. 102-110. HU ISSN 2060-3789

L. Földi, Z. Béres, E. Sárközi, L. Jánosi: Novel cylinder positioning system with solenoid valves. R & D Mechanical Engineering Letters, 2010.Vol 4., Hungary, pp. 151-165. HU ISSN 2060-3789

Földi L., Jánosi L.: Analysis of electro-rheological fluid in hydraulic system. Sustainable Construction & Design, 2010. Vol. 1. pp. 121-126. ISBN: 978-9-49072-600-3, ISSN: 2032-7471

Földi L., Jánosi L.: Test of the electro-rheological attributions of silicon oil without additives under flow mode. R & D Mechanical Engineering Letters, 2011.Vol 5., Hungary, pp. 121-127. HU ISSN 2060-3789, CD-ROM ISSN 2060-3797

Földi L., Beres Z., Sarkozi E.: Novel cylinder positioning system realised by using solenoid valves. Sustainable Construction & Design, 2011. Vol. 2. Issue 1. pp. 142-151. ISSN 2032-7471

Lektorált cikk magyar nyelven

Dr. Szabó I. - **Földi L.** - Madarász L.: Egy különleges mérnöki feladat: A "PHILIPS" hidromechanikus számítógép rekonstrukciós újratervezése. Gép, LIX. Évfolyam 2008/3 22-24. o. ISSN 0016-8572

Nemzetközi konferencia proceedings

Földi L., Jánosi L.: Development of measuring system for testing electro-rheological effect. International Multidisciplinary Conference, 9th Edition, 19-21 May, 2011, Baia Mare – Nyiregyhaza, Romania – Hungary, pp. 103-108. ISBN 978-615-5097-18-8

Jánosi L, **Földi L.:** Electrorheological properties of TiO₂/mineral oil suspensions under flow mode. 1st Regional Conference - Mechatronics in Practice and Education (MECH-CONF 2011) December 08 – 10, 2011 Subotica, Serbia. pp. 153-158. ISBN 978-86-85409-67-7

Magyar nyelvű proceedings

Jánosi L, Sárközi E, **Földi L,** Józsa N. Kopásvizsgálatok növényi olajjal. XI. Nemzetközi Pneumatika-Hidraulika Konferencia. Miskolc, Magyarország, 2004.09.21-2004.09.23. Miskolc: 155-161. o.

Jánosi L, Valasek I, **Földi L.** Elektro-reológiai folyadékok hidraulikus alkalmazásai. Nemzetközi Mechatronika Szimpózium, BMF, Bánki Donát Gépészmérnöki Főiskolai Kar. Budapest, Magyarország, 2005.11.04. Budapest: 133-139. o. (ISBN:978-963-7154-59-1)

Jánosi L, **Földi L,** Horváth I. Gyulladásí kisédelem vizsgálatok növényi eredetű hajtóanyagokkal. MTA Agrár Műszaki Bizottság XXXI. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás. Gödöllő, Magyarország, 2007.01.23 Gödöllő: 133-139. o.

Földi L, Jánosi L. Elektroreológiai folyadékkal működő áramlásszabályozó szelep működésének vizsgálata szimulációs kísérleteken keresztül. Magyar Tudományos Akadémia Agrártudományok Osztálya Agrárműszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Nr. 32. Gödöllő: FVM Mezőgazdasági Gépesítési Intézet - Szent István Egyetem Gépészmérnöki Kar, 2008. 303-309. o. (ISBN:978-963-611-449-7)

Földi L, Jánosi L. Hydraulic cylinder positioning by electro-rheological valve. Nemzetközi Mechatronika Szimpózium, Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, 2009. november 10. Budapest, Magyarország, 2009.11.09 Budapest: Bánki Donát Műszaki Főiskola, 40-46. o.(ISBN:978-963-7154-59-1)