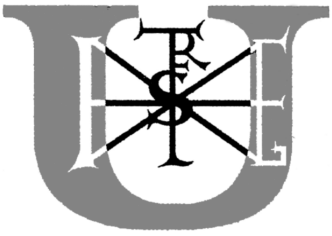


Szent István Egyetem

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 5
1.1. A téma aktualitása 5
1.2. A kutatás célja 6
1.3. Kitűzött kutatási feladatok 6
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS 7
2.1. Alapfogalmak 7
2.2. „Intelligens” anyagok 11
2.3. ER folyadékok 13
2.3.1. ER hatást befolyásoló tényezők 14
2.3.2. ER folyadékok viselkedését leíró modellek 18
2.3.3. ER folyadékok anyagai 29
2.3.4. ER folyadékok vizsgálati módszerei 37
2.3.5. ER folyadékok felhasználási területei 38
2.4. Szakirodalmi következtetések 39
2.5. Kutatási célkitűzéseim a szakirodalom tükrében 41
3. ANYAG ÉS MÓDSZER 43
3.1. Az ER vizsgáló rendszer működési elve 43
3.2. Az ER vizsgáló rendszer tervezése, szimulációja 44
3.3. Az ER vizsgáló berendezés hidraulikus és elektromos rendszere 48
3.4. A vizsgálat irányítása és mérési adatok gyűjtése 52
3.5. ER folyadék előállítása 54
3.6. ER folyadékok keverési kísérletei 54
3.7. Kísérleti terv 57
4. EREDMÉNYEK 59
4.1. A nyomásnövekedés folyamatának elemzése 59
4.2. Az elsődleges nyomásnövekedés villamos térerősség és térfogatáram függésének vizsgálata 63
4.3. Az elsődleges nyomásnövekedés adalékkoncentráció függésének vizsgálata 76
4.4. A másodlagos nyomásnövekedés villamos térerősség és térfogatáram függésének vizsgálata 80
4.5. Az másodlagos nyomásnövekedés adalékkoncentráció függésének vizsgálata 92
4.6. A másodlagos nyomásnövekedés intenzitás villamos térerősség és térfogatáram függésének vizsgálata 94
4.7. A másodlagos nyomásnövekedés intenzitás adalékkoncentráció függésének vizsgálata 106
4.8. Új tudományos eredmények 109
5. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK 113
6. ÖSSZEFOGLALÁS 115
7. SUMMARY 117

MELLÉKLETEK 119
M1. Irodalomjegyzék 120
M2. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk 129
M3. „Az ER vizsgáló rendszer működési elve” című fejezet ábra melléklete 132
M4. „A vizsgálat irányítása és mérési adatok gyűjtése” című fejezet ábra melléklete 133
M5. „Az ER vizsgáló berendezés hidraulikus és elektromos rendszere” című fejezet melléklete 135
M6. „A nyomásnövekedés folyamatának elemzése” című fejezet ábra melléklete 137
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS 141

1. BEVEZETÉS

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.

Ha a mindennapi életben használt szerkezeti anyagainkat összehasonlítjuk a biológiai anyagokkal, megállapíthatjuk, hogy igen jelentős az eltérés közöttük. Ipari anyagaink többnyire kemények, merevek és szárazak, a biológiai anyagok nagy többsége pedig lágy, rugalmas és nedves. Egy másik lényeges különbség, hogy az élő anyag a környezetével aktív kapcsolatban van, annak változásaira gyorsan reagál. A technikában használt anyagok túlnyomó részét pedig passzív környezeti kapcsolat jellemzi. Önként adódik a kérdés, hogy miért ne lehetne az aktív lágy anyagokat, a modern technikában szélesebb körben alkalmazni.

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 (ZRÍNYI 1999).

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 (GARRIDO 1993). 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. A kutatás célja

A kutatás célja - egy vizsgálatok alapján kiválasztott alapanyagokból összeállított - ER folyadék dinamikus viselkedési törvényszerűségeinek feltárása, valamint a kiválasztott ER folyadék hidraulikus rendszerekben történő vizsgálata. A kutatás során szükséges egy olyan vizsgálati eljárás kidolgozása, amely képes mérési eredmények segítségével azonosítani a Bingham-modell, és a nem-newtoni folyadékokra vonatkozó elmélet alapján létrehozott matematikai modell paramétereit.

1.3. Kitűzött kutatási feladatok

A kutatás a következő részterületek kidolgozásából áll:

- Különböző alapfolyadékok vizsgálata adalékanyagok nélkül.
- Alapfolyadékok és az adalékanyagok (ER folyadék) együttes elemzése, értékelése.
- Mérőrendszer kialakítása, amely alkalmas ER folyadékok viselkedési törvényszerűségeinek vizsgálatára.
- A kiválasztott ER folyadék dinamikus viselkedésének definiálása.
- A kiválasztott ER folyadék viselkedési törvényszerűségeinek feltárása villamos tér függvényében.
- A kiválasztott ER folyadék viselkedési törvényszerűségeinek feltárása térfogatáram függvényében.
- A kiválasztott ER folyadék viselkedési törvényszerűségeinek feltárása az adalékkoncentráció függvényében.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. Alapfogalmak

A reológia tudománya részben kapcsolódik a vegyészmérnöki tudományhoz, és részben a szilárdságtanhoz. Sok anyagnál a deformáció nem az erőhatás pillanatában, hanem időben késleltetve alakul ki. Fizikai értelemben folyásnak nevezzük azt a jelenséget, amikor erő hatására időben folytonos deformáció jön létre. A „reo" görög szó, jelentése „folyás". A reológia fizikai értelemben vett folyással foglalkozó tudomány, az azt vizsgálja, hogy a testekre ható erő milyen deformációt illetve alakváltozást hoz létre, és ez a deformáció az időben hogyan változik. A reológia kezdeteit Eugene Cook Bingham és Markus Reiner fektették le 1929. december 9-én, megalapítva a The Society of Rheology társaságot. A kezdetek idején fejlődött ki a műanyagipar. Ekkor nyilvánvalóvá vált, hogy a korábban fémekre kidolgozott elasztikus modell többé már nem elegendő az anyagok tulajdonságainak megfelelő leírásához. (MACSIHIN 1987)

<table>
<tr><td rowspan="4">Kontinuum mechanika</td><td rowspan="2">Szilárd testek mechanikája, szilárdság</td><td colspan="2">Rugalmasság</td></tr>
<tr><td>képlékenység</td><td rowspan="2">Reológia</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Áramlástan</td><td>nem-newtoni folyadékok</td></tr>
<tr><td colspan="2">newtoni folyadékok</td></tr>
</table>

2.1. ábra A reverzibilis és az irreverzibilis alakváltozások valamint a lineáris és a nemlineáris jelenségek rendszerezése

A táblázat egyesíti a reverzibilis és az irreverzibilis alakváltozások rendszerét; a lineáris és a nemlineáris jelenségeket. (VERHÁS 1985)

Erő és alakváltozás

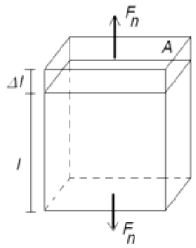
A merev testek alakja nem változik meg a külső erők hatására. A deformálható testek alakja Robert Hooke törvénye értelmében a külső erők hatására, azokkal arányosan megváltozik. A tizennyolcadik században ezt d'Alembert azzal egészítette ki, hogy egységes szemléletbe foglalta a dinamikus és a sztatikus erőket. Az alakváltozást kezdetben csak húzó igénybevételre értelmezték. A dinamikus erők a mozgásállapot megváltozásából (gyorsulásból, vagy lassulásból) származnak. A sztatikus erők az állandó, nyugvó terhelésből származnak, például súlyterhelésből. (VERHÁS 1985)

Rugalmas alakváltozások

Három típusát különböztetjük meg, egytengelyű erő hatására, térfogati összenyomáskor, és a nyírás következtében. Egytengelyű erő hatására azaz eset, mikor a terhelő erő a test valamely oldalával merőlegesen hat, és a test ebben az irányban méretváltozást szenved (húzás esetében növekszik, nyomás esetében csökken). Ebben az esetben az erő, Fn, a deformáció, Δl , az eredeti hossz, l és a keresztmetszet, A, között az összefüggést a Hooke-törvény adja meg:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{1}$$

Ahol: E a rugalmassági modulus, σ a húzó-, vagy nyomófeszültség , ε a relatív deformáció.

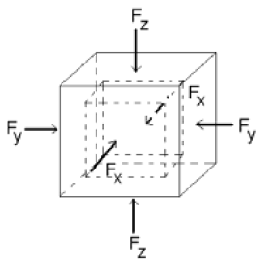


2.2. ábra Egytengelyű erő hatására fellépő egytengelyű deformáció

Minden irányból történő térfogati összenyomáskor a relatív térfogatváltozás térfogatcsökkenés, amelyet a negatív előjel mutat:

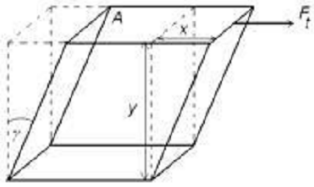
$$\kappa dp = -\frac{\Delta V}{V} \qquad \kappa = -\frac{1}{V}\frac{dV}{dt} \qquad K = \frac{1}{\kappa} = -V\frac{dp}{dV} \tag{2}$$

K-t térfogati modulusnak nevezzük, κ-t kompresszibilitásnak, p a nyomás és dp pedig a nyomásváltozás.



2.3. ábra Térfogati összenyomás hatására keletkező térfogatcsökkenés

Nyírás következtében létrejövő rugalmas alakváltozás esetében az erő párhuzamos az elmozdulás síkjával. Az alakváltozást a γ nyírási szög jellemzi.



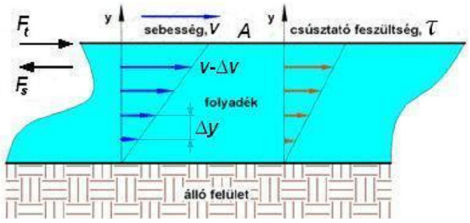
2.4. ábra Nyírás okozta alakváltozás

Az ábra alapján a nyírófeszültség és a nyírási szög közötti összefüggés:

$$\tau = G \cdot tg\gamma \tag{3}$$

Viszkózus folyás

A folyadékok a saját súlyuk hatására elnyíródnak, azaz folynak. A viszkózus folyást azzal az ábrával lehet szemléltetni, amelyet a nyírás szemléltetésére használtunk. Azonban folyás esetén a γ nyírási szög állandóan változik. Ebben az esetben az A felületről feltételezzük azt, hogy az egy síklap, amelyet Ft erővel és állandó sebességgel mozgatunk a folyadék felszínén. A folyadék teljesen nedvesíti az A lapot, így a legfelső folyadék réteg is v sebességgel halad.



2.5. ábra Viszkózus folyás

Mivel a sebesség állandó ezért a gyorsulás nulla, tehát az A lapra ható erők eredőjének is nullának kell lennie. Ezért kell még egy erőnek lennie, amely a húzóerővel együtt nulla eredő erőt ad. Valóban a legfelső és az alatta levő folyadék réteg között fellép egy súrlódási erő Fs , amely a húzó erővel összeadva kiegyenlítik egymást a legfelső rétegre. Az egyes Δy vastagságú folyadékrétegek lefelé haladva egyre kisebb sebességgel haladnak, a legfelső réteg sebessége v, a következő réteg sebessége v − Δv , a következőé v − 2Δv , és így tovább. A sebesség csökkenését $\frac{\Delta v}{\Delta y}$ hányados, illetve háttérértékben a $\frac{dv}{dy}$ sebesség gradiens mutatja, mely egyenlő a nyírási sebességgel $\frac{d\gamma}{dt}$ (ahol γ a 2.4. ábrán látható nyírási szög). (MACSIHIN 1987)

Newtoni közegek

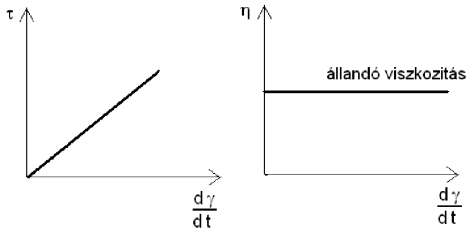
Azok a közegek, amelyek állandó τ nyírófeszültség (csúsztatófeszültség) állandó sebességű folyási jelenséget hoz létre. Ezekre a közegekre érvényes a Newton-féle súrlódási törvény:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}, \text{ illetve } \tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} \tag{4}$$

Ha ábrázoljuk a τ nyírófeszültséget a nyírási sebesség függvényében, akkor egy origóból kiinduló egyenest kapunk, amelynek a meredeksége állandó, és ez az állandó a közegre jellemző viszkozitás:

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{d\gamma}{dt}} \tag{5}$$

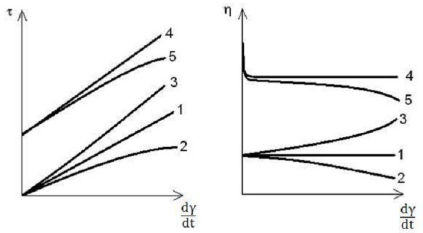
A viszkozitás mértékegysége Pas.



2.6. ábra Newtoni közeg folyásgörbéje,
a viszkozitás minden nyírási sebességnél azonos.

Nem-Newtoni közegek

Általában az anyagok nem adnak lineáris összefüggést a nyíró feszültség és a nyírási sebesség között. A következő tipikus görbéket különböztethetjük meg:



2.7. ábra Folyás (τ) és viszkozitás görbék (η)
1: newtoni; 2: pszeudoplasztikus; 3: dilatáló;
4: Bingham plasztikus (folyáshatár van); 5: pszeudoplasztikus folyáshatárral

A nem-newtoni folyadékok viszkozitása függ a nyírási körülményektől és sokszor még az időtől is. Nem newtoni folyadéknál mindig meg kell adni a viszkozitás értéke mellett, hogy milyen nyírási sebességnél mérték. Akkor beszélünk plasztikus folyásról (a 2.7. ábrán a 4. és az 5. görbe), ha egy bizonyos határértéket meg kell haladnia a nyíró feszültségnek ahhoz, hogy folyás jöjjön létre. A határértéknél kisebb nyíró feszültségnél nem történik nyírás, folyás. A határértéket folyáshatárnak nevezzük. A folyáshatárnál nagyobb nyíró feszültséget alkalmazva az anyag folyni kezd, azaz időben folyamatos deformáció jön létre. Plasztikus folyást mutat az acél is, ha a terhelés meghaladja a folyáshatárt. Ez az alapja a hidegen hengerelt acéláru előállításának. Ugyancsak plasztikus folyást mutatnak a margarinok, vajak, zsírok. A folyáshatárnál kisebb nyíró feszültségnél szilárd anyagként viselkednek, és rugalmas tulajdonságokat mutatnak. Mivel matematikai szempontból a viszkozitás a folyásgörbe differenciálhányadosa, ezért a folyáshatárnál kisebb nyíró feszültségeknél a plasztikus anyagok viszkozitása végtelen nagy. A folyáshatár nagysága a molekulák közötti kölcsönhatás mértékétől függ, annál magasabb, minél erősebb a kölcsönhatás. A folyáshatár értékét erősen befolyásolja a hőmérséklet is. (MACSIHIN 1987)

A pszeudoplasztikus folyadékoknál (2.7. ábra. 2 görbe) a növekvő nyíró feszültségeknél a viszkozitás csökken, azaz a folyás görbe konvex, amely érintőjének meredeksége csökken. Ez azt jelenti, hogy a folyás sebessége növekszik növekvő nyíró feszültségnél. A növekvő folyási ellenállás csökken a nagy nyíró feszültségeknél. Ennek oka lehet a molekulák közötti kölcsönhatás csökkenése. Például a folyás során a molekulák rendezett elhelyezkedést vesznek fel egymáshoz képest, vagy a „nyugalomban" összecsavarodott makromolekulák az áramlásban kiegyenesedhetnek, illetev a részecskék összetörhetnek, megrövidülhetnek. Általában a részecskék helyzete, szimmetriája és mérete változhat a folyás során. Ugyancsak változhat a folyás során a megkötött részecskék száma, az áramlás leválghat a részecskékből, illeteve a makromolekulák magukba zárhatnak oldószer molekulákat. Ha a változások reverzibilisek, akkor igazi pszeudoplasztikus folyásról beszélünk, ha nem reverzibilisek, akkor látszólagos pszeudoplasztikus folyásról.

2.2. „Intelligens" anyagok

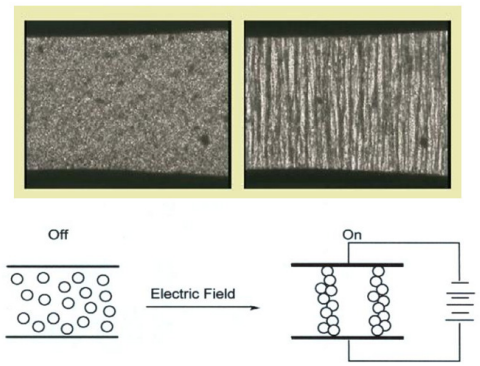
Intelligens anyagoknak azokat a multifunkcionális anyagokat nevezi a szakirodalom, amelyek közvetlen környezetük fizikai vagy kémiai állapotának egy vagy több jellemzőjét érzékelik, e jeleket feldolgozzák, majd pedig ezekre, állapotuk jelentős megváltoztatásával, gyors és egyértelmű választ adnak. Az érzékelő funkció leggyakrabban a szóban forgó anyag és környezete közötti egyensúly következtében valósulhat meg. Ez az egyensúly lehet kémiai, mechanikai vagy termodinamikai. A környezeti paraméterek változása szükségszerűen az egyensúlyi állapot megváltozását idézi elő. Az újonnan

kialakuló egyensúlyi állapotban pedig az anyag más tulajdonságokkal rendelkezik. Fontos szempont még a változást előidéző hatás (a továbbiakban inger) és az erre történő reakció (válasz) kapcsolata. Intelligens anyagokra olyan nemlineáris inger–válasz kapcsolat a jellemző, amelynél a környezeti hatás kis változására igen nagyfokú tulajdonságbeli változás következik be, azaz a válasz mértéke nem arányos, hanem jóval nagyobb az inger nagyságánál. További ismérv a megfordíthatóság, azaz a változást kiváltó hatás megszűnte után az eredeti állapotnak kell visszaállni. A gyors reakcióidő alkalmazástechnikai követelmény. (ZRÍNYI 2004)

Intelligens folyadékok

Az utóbbi időben igen nagyfokú érdeklődés mutatkozik az ún. komplex folyadékok iránt. Ezek olyan folyadék halmazállapotú anyagok, amelyek homogén eloszlású nano-, vagy mikrométeres részecskéket tartalmaznak. A kolloid mérettartományba eső részecskék speciális elektromos vagy mágneses tulajdonságokkal rendelkeznek és azt a látszatot keltik, mintha a folyadék mutatna elektromos vagy mágneses tulajdonságokat. Az intelligens folyadékok két nagy csoportját alkotják a mágneses és az elektroreológiai folyadékok. A mágneses folyadék ferro-, vagy ferrimágneses anyagok nanorészecskéit tartalmazza homogén eloszlásban. Mivel a részecskék mérete jóval kisebb a mágneses domének méreténél, ezért minden egyes részecske egyetlen elemi mágnesnek tekinthető. Ennek következtében nem érvényesülhet a szomszédos domének ellentétes irányának kedvezőtlen hatása a mágnesezettségre. Így a rendkívül kis méretű részecskék mágneses szempontból a makroszkopikus anyag telítési mágnesezettségéhez hasonlíthatók. Ennél erősebb mágnest pedig nem lehet készíteni. A maximális mágneses momentummal rendelkező részecskék folyadékban mozoghatnak. Ha nincs külső irányító hatás, akkor ezek mágneses momentuma azonos valószínűséggel mutat a tér minden irányába. Ennek az a következménye, hogy a folyadék nem mutat makroszkopikusan érzékelhető mágnesezettséget. Ha a folyadék kívülről keltett mágneses térbe kerül, akkor minden egyes mágneses momentum igyekszik a tér irányával párhuzamosan elhelyezkedni. Ennek következtében a mágneses nanorészecskék olyan kicsiny mágnesrudaknak tekinthetők, amelyek azonos állásban vannak, azaz egy kiszemelt részecske északi pólusához a tengelyirányban legközelebb álló másik részecske déli pólusa található meg. Mivel a részecskék nincsenek helyhez kötve, ezért a mágneses vonzóerők miatt elmozdulnak. Megkezdődik a részecskék összetapadása, amely egymással párhuzamosan elhelyezkedő, a mágneses tér irányába mutató tűszerű aggregátumok képződését eredményezi. A mágneses tér megszüntetése után az aggregátumok szétesnek és újra a homogén eloszlású mágneses folyadékot kapjuk vissza. A külső mágneses térrel előidézett aggregáció makroszkopikus megnyilvánulása a viszkozitás növekedésében és a folyadék megszilárdulásában mutatkozik meg. A viszkozitás növekedése, illetve a szilárdságot jellemző ún. folyáshatár értéke a mágneses tér nagyságától függ. A mágneses térrel előidézett

folyadék–szilárd "állapotváltozás" vagy ennek fordítottja igen gyorsan megy végbe. A mágneses tér ki- és bekapcsolásával pillanatszerűen változtathatjuk meg a folyadék viszkózus vagy mechanikai állapotát. A mágneses folyadékok kiváló kenő-, illetve tömítőanyagok lehetnek mozgó mágneses alkatrészek között. Ez a folyadék ugyanis indukált mágnesessége miatt nem folyik ki még az alkatrészek között lévő szélesebb résekből sem. Egy másik perspektivikus alkalmazási lehetőség olyan új típusú erőátviteli rendszerek kifejlesztése, amelyek nem tartalmazzák a súrlódáson alapuló hagyományos tárcsás erőátvitelt. az ún. elektro-reológiai folyadékok az indukált elektromos polarizáció alapján működnek. Ezek olyan, főként nem vizes folyadékok, amelyek egyenletesen eloszlatott mikro- vagy nanorészecskéket tartalmaznak. Ezek a részecskék elektromos térben polarizálódnak és az indukált dipólusok következtében – a mágneses folyadékokhoz hasonló – láncszerű aggregátumokat hoznak létre. A részecskék elektromos térrel előidézett aggregációjának a makroszkopikus megnyilvánulása a folyadék viszkozitásának növekedése, valamint a folyáshatár megjelenése. Az elektro-reológiai folyadékok konzisztenciája elektromos térrel igen széles határok között változtatható a kis viszkozitású folyadéktól a szilárd anyagok tulajdonságait mutató gél állapotig. Az elektromos és mágneses tulajdonságok kombinálhatók is. Ha például a mágneses folyadék részecskéit olyan vékony réteggel vonjuk be, amely az elektromos tér hatására polarizálódik, akkor a folyadéksajátságok egyaránt befolyásolhatók mind mágneses, mind pedig elektromos térrel.



2.8 ábra Folyadékban létrejövő effektus, bal oldali kép E=0,
jobb oldali kép E≠0 .

A mágneses vagy elektro-reológiai folyadékok a jövőben kiszoríthatják a hagyományos kuplungokat és más erőátviteli rendszereket. (ZRÍNYI 1999, KFKI 2011).

2.3. ER folyadékok

Folyadékok illetve diszperz rendszerek reológiai tulajdonságainak megváltozását külső elektromos tér hatására ER effektusnak nevezzük. A 19.

század végén felfedezték, hogy néhány szigetelő folyadék viszkozitása megváltozik villamos tér hatására (DUFF 1896). Ebben az időben ezt a jelenséget elektroviszkózus hatásnak nevezték. Andrade és munkatársai átfogó vizsgálatokat végeztek a területen (ANDRADE 1939). A viszkozitás növekedését a polarizált molekulák villamos tér irányú rendeződésével valamint az ionok elektróda felületek közeli aggregálódásával magyarázták. Ezen elmélet szerint, a nem poláris folyadékok nem mutatnak elektroviszkózus hatást. Későbbi vizsgálatok során megállapítást nyert, hogy az elektroviszkózus hatás az elektrolit oldatoknál sokkal erősebb, mint tiszta folyadékok esetén. ONSAGER (1932) használta a "ionatmoszféra" fogalmát, hogy megértsék az elektrolit oldatok esetében tapasztalható viszkozitás növekedést. Megfigyelték, hogy a látszólagos viszkozitás részecskéket tartalmazó folyadékok esetében nagymértékben függ az alkalmazott villamos tér nagyságától. 1939-ben kezdte a kutatásait Winslow amelyben alacsony viszkozitású szigetelő folyadékokba diszpergált félvezető részecskéket vizsgált. Először kapott szabadalmat 1947-ben majd 1949-ben számolt be eredményeiről (WINSLOW 1949). Vizsgálataiba szilárd alkotónak keményítőt, lisztet, zselatint és mészkövet használt, folyadék fázis pedig ásványi olaj, transzformátor olaj valamint szilikon olaj volt. Megfigyelte, hogy az elektromos mező által indukált hatás ebben az esetben sokkal erősebb, mint az úgynevezett elektroviszkózus hatás. Winslow javaslatot tett számos potenciális ER eszközre, mint például a kuplung, fék, és a szelepek azonban kutatásai nem keltenek nagy figyelmet abban az időben. Kiterjedt vizsgálatokat végzett KLASS 1967-ben és a torzított elektromos kettős réteg-modell volt a javaslata az ER hatás magyarázatára. A 1970-es években, az elektromos kettősréteg modell tovább bővült UEJIMA (1972) munkássága nyomán, majd 1984-ben DEINEGA (1984) az elektromos kettősréteg modell alapján proton polarizációs modellt javasolt.

2.3.1. ER hatást befolyásoló tényezők

Az ER hatása függ az alkalmazott villamos térerősségtől, a villamos tér frekvenciájától, részecske vezetőképességétől, részecske dielektromos tulajdonságaitól, a szilárd alkotó koncentrációjától, hőmérséklettől illetve víztartalomtól.

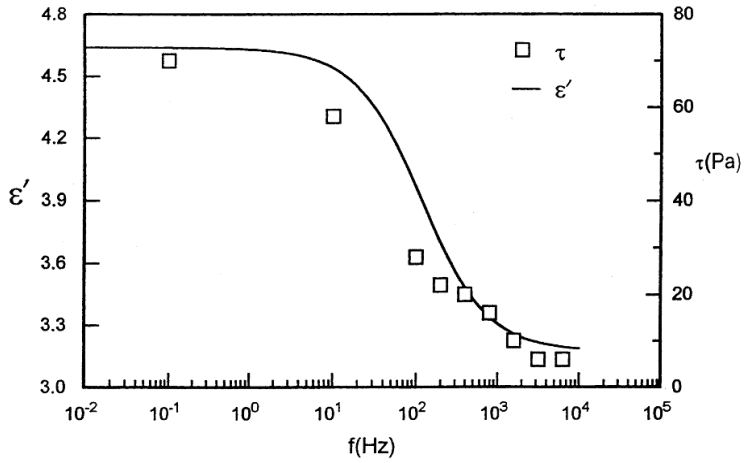
A villamos térerősség

Az elektroreológiai hatásból adódó nyírószilárdság nagyban függ az alkalmazott villamos tér nagyságától. STANGROOM (1983) szerint a nyírószilárdság egyenesen arányos az alkalmazott villamos térrel. Meghatározta a kritikus villamos tér értékét Ec: az ER folyadék nem mutat ER hatást amíg az alkalmazott villamos tér nagyobb mint a kritikus.

Ugyanakkor más kutatók (XU 1991) úgy gondolják, hogy a nyírószilárdság egyenesen arányos az elektromos térerősség négyzetével.

A villamos tér frekvenciája

Leggyakrabban egyenáramú villamos teret alkalmaznak ER hatás kimutatására, de váltakozó villamos térrel vizsgálva az ER folyadékokat könnyen meghatározható az ER hatás válaszideje. Mivel az ER folyadék válaszideje körülbelül 1 ms, a látszólagos viszkozitás és a folyási feszültség csökkenése várható a villamos tér frekvenciájának növelésétől. KLASS (1967) elsőként foglalkozott ezzel a kérdéssel, és megállapította, hogy a látszólagos viszkozitás szilika / szilikonolaj rendszer esetén csökken a villamos tér frekvenciájának növelése következtében. HAO (1998 c) használta a Wanger–Maxwell polarizációs elméletet, hogy megértse a nyírószilárdság frekvencia függését (WAGNER 1914, MORGAN 1934). Úgy találta, hogy a folyáshatár csökkenése összhangban van a teljes szuszpenzió dielektromos állandójának csökkenésével, ha a frekvencia növekszik.



2.9. ábra Nyírószilárdság 300 V/mm villamos tér alkalmazásánál és a dielektromos állandó a Wagner modell (folytonos vonal) felhasználásával a villamos térerősség frekvenciája függvényében. (HAO 1998)

A szilárd alkotó vezetőképessége

A szemcse vezetés ER effektust befolyásoló hatását BLOCK (1990) tanulmányozta, benzokinon alapú polimer/szilikon olaj használatával, és azt találta, hogy a statikus folyáshatárnak maximális szélsőértéke van megközelítőleg 10^{-5} S/m-es szemcse vezetésnél. Hasonló tendencia állapítható meg az oxidált

poliakrilnitril szilikon olajú ER rendszereknél (HAO 1997), azonban a szemcsevezetés csúcsértéke ekkor csak 10^{-7} S/m. Az ER effektus befolyásolása mellett a szemcse vezetés meghatározza a teljes szuszpenzió áram sűrűségét és az ER folyadék válaszidejét. Ez utóbbi fordítottan arányos a szemcsevezetéssel melyet kísérletileg és elméletileg is bizonyítottak.

A szilárd alkotó dielektromos tulajdonsága

Mióta sikerült külső elektromos térrel ER effektust létrehozni, mindig is úgy gondolták, hogy ebben a polarizációnak kitüntetett szerepe van és ezért a részecskék dielektromos tulajdonságai domináns jellegűek az ER effektus szempontjából.

Úgy találták, hogy lineárisan növekvő összefüggés szerint változik a teljes ER szuszpenzió dielektromos állandója a részecskék térfogatszázalékától függően szilika/szilikon olaj rendszer esetén. Ezt elsősorban az elektromos kettősrétegek átfedésével magyarázták, melyet az 1000 Hz-nél tapasztalható dielektromos diszperzió támasztott alá. Továbbá azt is kimutatták, hogy az ER szuszpenzió dielektromos állandója az alkalmazott elektromos térerősséggel arányosan változik.

A dielektromos tulajdonságok (a részecskéké és az ER szuszpenzióé egyaránt) kutatásának legfőbb célkitűzése, azok ER effektust befolyásoló hatását leíró összefüggés felállítása volt. UEJIMA (1972) kimutatta, hogy az elektrolitokat tartalmazó ER szuszpenzióknak nagyobb a dielektromos állandójuk azoknál, melyekben nincsenek elektrolitok. Ezért adnak az elektrolit tartalmúak erősebb ER effektust. BLOCK (1990) felvetette, hogy a polarizációs sebesség és annak mértéke meghatározó jelentőségű lehet az ER reakciónál. KAWAI (1996) és IKAZAKI (1998) javaslata szerint az ideális ER folyadékra elmondható, hogy a dielektromos relaxációs frekvenciája 10^2 és 10^5 Hz közötti és a relaxációs frekvencia alatti és feletti dielektromos állandója pedig nagy. Az összes előbb említett publikációban a teljes szuszpenzió dielektromos tulajdonságai és az ER effektus közti kapcsolatot kutatták. A manapság használt ER anyagok dielektromos tulajdonságait figyelembe véve, egy tapasztalati kritérium jelenthető ki a megfelelő ER anyag kiválasztásához; a részecskék dielektromos veszteség tangense nagyjából 0,10 körüli kell legyen 1000 Hz –nél. Valamint, hogy minél nagyobb a dielektromos állandója, annál erősebb az ER effektus.

A szilárd alkotó mennyiségének aránya (koncentráció)

Az ER folyadék folyáshatára és látszólagos viszkozitása nagymértékben függ a részecskék térfogatszázalék arányától. A fibrillációs modell alapján lineáris összefüggést vezettek le a folyáshatár és a részecskék térfogatszázalék aránya között (KLINGENBERG 1990). Mindamellett egyes kutatók azt találták, hogy a folyáshatár értékének maximális szélsőértéke van a részecskék térfogatszázalék arányának növekedése során, méghozzá annak meglehetősen nagy értékénél

(BOSSIS 1997). UEJIMA (1972) úgy találta, hogy a folyáshatár csúcsértéke 10%-os tömegszázalék aránynál mérhető. BLOCK (1990) és XU (1991) eredményei alapján a folyáshatár parabolikusan növekszik a részecskék térfogatszázalék aránya szerint. HAO (1994) arra jutott, hogy létezik egy kritikus részecskék térfogatszázalék arány az ER szuszpenziók esetén. Ezt a kritikus értéket túllépve nagymértékű növekedés tapasztalható a reológiai jellemzők tekintetében. Ezt a jelenséget a perkolációs (átszűrődési) elmélettel magyarázták.

Hőmérséklet

Két oka van annak, hogy a hőmérséklet jelentősen befolyásolhatja az ER effektust. Egyrészt a hőmérséklet mindenképp változtatja az ER szuszpenzió polarizálhatóságát, mivel a részecske vezetés és a dielektromos állandó hőmérsékletfüggő. Másrészt a hőmérséklet közvetlenül hatással van a részecskék hőmozgására. Ha a Brown-mozgás felerősödik a hőmérséklet növekedésével, és az összemérhető erejű lesz a részecskék fibrillációjával, akkor az ER effektus gyengül. Az, hogy a hőmérséklet növelése erősíti, vagy gyengíti az ER effektust attól függ, hogy mely befolyásoló faktor domináns a folyamatban.

Jelentősen javult ER reakciót tapasztaltak több ER szuszpenzióban is magas hőmérsékleten, mind szervetlen mind pedig polimer rendszerek esetén (UEJIMA 1972, CONRAD 1991). A víztartalmú ER rendszerek esetén eleve könnyebbé tett elektromos kettősréteg polarizációjáról az gondolták, hogy magas hőmérsékleten hozzájárul az ER effektus erősödéséhez, míg a részecskék saját tulajdonságait (pl ion vándorlási képesség részecskén belül) csak a vízmentes ER rendszerek esetén tartották meghatározónak. A folyáshatár hőmérsékletfüggése a részecskék vezetőképességétől függ. Mint ahogy azt már említettem, létezik egy ideális részecske vezetés melynél az ER effektus különösen erős. Az emelkedő hőmérséklettel csökkenő nyírófeszültség tapasztalható azon szuszpenziók esetén, melyeknél a részecske vezetés nagyobb ennél az optimális értéknél, míg növekvő nyírófeszültség tapasztalható, ha a részecske vezetés kisebb az optimális értéknél.

A folyadék tartalmú ER szuszpenziókról úgy gondolják, hogy szűk hőmérséklet tartománnyal rendelkeznek, ami -20 és +70 fok közötti, a víz megfagyása és párolgása miatt. A vízmentes ER folyadékok szélesebb hőmérséklet tartományban működhetnek, amit csak a magas hőmérsékleteken tapasztalható nagy vezetőképesség korlátoz, mivel ezek a vízmentes ER folyadékok általában ionos vegyületekből állnak.

Víztartalom

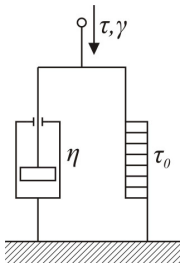
A vízmentes ER folyadékok kifejlesztése előtt, a víznek fontos szerepet tulajdonítottak az ER reakciók során. Széleskörű kutatások zajlottak, hogy meghatározzák, miként befolyásolja az ER effektust akár csak kis mennyiségű víz jelenléte is. Az ER szuszpenziók folyáshatárának egyértelműen maximuma van a víztartalom növekedésével (DEINEGA 1984). UEJIMA (1972) egy másik

tulajdonságot fedezett fel – a víztartalommal nő a viszkozitás és állandósodik, ha a vízmennyiség túllép egy bizonyos értéket. Eredetileg úgy gondolták, hogy a víz funkciója abban áll, hogy növeli a részecskék dielektromos állandóját, amely megnövekedett részecskék közti összetartó erőhöz vezet (UEJIMA 1972, DEINEGA 1984). Egy másik elképzelés szerint a víz összetapasztja a részecskéket nagy felületi feszültségének köszönhetően (STANGROOM 1983).

2.3.2. ER folyadékok viselkedését leíró modellek

A Bingham model

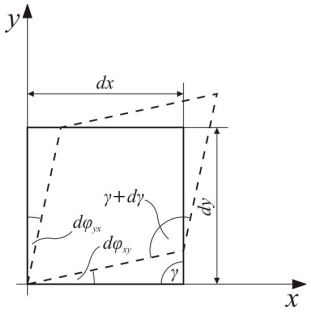
Az ER jelenséget anyagmodellként a nemnewtoni folyadékok viselkedését leíró matematikai modell kibővítésén alapuló, az ún. ER folyadékokra vonatkozó Bingham-modell írja le (LEE 2002). A Bingham-modell egy összetett viszkoplasztikus reológiai modell (Csizmadia 2003). Mint anyagmodell felbontható egy ideálisan képlékeny, és egy ideálisan viszkózus tagra (2.10. ábra).



2.10. ábra A Bingham modell felépítése elemi helyettesítő modellekkel

A nemnewtoni folyadékok viszkoplasztikus közegekre vonatkozó modellje a Bingham-modell egy speciális esete, ezért a matematikai modell létrehozásánál Newton viszkozitási törvényéből célszerű kiindulni (LAJOS 2004).

A folyadék, mint kontinuum, a szilárd testekéhez hasonló feszültség- és alakváltozási állapotvizsgálatot tesz lehetővé. Ennek megfelelően a folyadékok vizsgálatához is alkalmazható az a szilárdságtanban használt módszer, amely szerint a vizsgált kontinuumból egy elemi méretű térfogatrészt kiemelve ábrázolható a feszültség- és alakváltozási állapot.

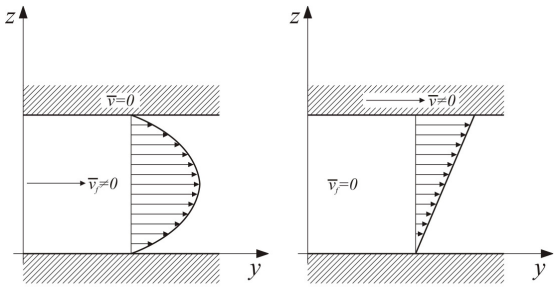


2.11. ábra Elemi folyadékhasáb deformációja

A 2.11. ábra az elemi folyadékhasáb alakváltozását mutatja. Az ábra alapján, az elemi folyadékhasábon végbemenő szögtorzulás-változás felírható a következő alakban:

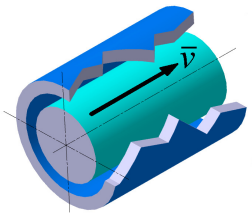
$$d\gamma = d\varphi_{xy} + d\varphi_{yx} = \frac{\partial v_y(x,y)}{\partial x}dt + \frac{\partial v_x(x,y)}{\partial y}dt \tag{6}$$

Az alkalmazott összefüggésben v_x és v_y az áramlási sebesség x és y irányú komponenseinek hely szerinti függvényei. Az összefüggés két végtelennek tekinthető sík felület között létrejövő síkáramlás esetére vonatkozik. A síkáramlás lehet stacionárius síkáramlás (2.12.a ábra), Couette-áramlás (2.12.b ábra), vagy ezek szuperpozíciója.



2.12 ábra Stacionárius síkáramlás és Couette-áramlás sebességviszonyai

A végtelennek tekintett felületek közti síkáramlás, mint áramlási modell, a vizsgálat szempontjából jó közelítéssel alkalmazható, mivel hengeres felületek közti áramlás vizsgálatára van szükség (2.13.ábra).



2.13. ábra A hengeres felületek elhelyezkedésének vázlata

A továbbiakban a (6) egyenlet átrendezésével kifejezhető a deformációsebesség, vagy más megnevezéssel, a nyírási gradiens:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{\partial v_y(x,y)}{\partial x} + \frac{\partial v_x(x,y)}{\partial y}$$

Bevezetve a $\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$ jelölést, valamint Newton viszkozitási törvényének ismeretében az egyenlet mindkét oldalát megszorozva a dinamikai viszkozitással, kifejezhető az elemi folyadékhasáb deformációját előidéző csúsztatófeszültség:

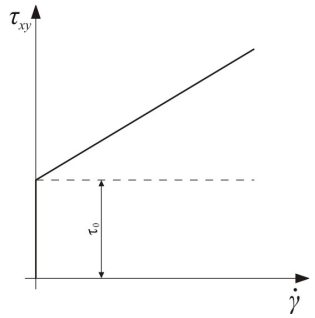
$$\tau_{xy} = \eta\dot{\gamma} = \eta\left(\frac{\partial v_y(x,y)}{\partial x} + \frac{\partial v_x(x,y)}{\partial y}\right) \tag{7}$$

A (7) összefüggés Newton viszkozitási törvényének síkáramlásra vonatkozó általános alakja. Az összefüggés alapján meghatározható a τ_{yx} csúsztatófeszültség is, mivel a feszültségtenzor mátrixa a főátlóra nézve szimmetrikus, ezáltal – a szilárd testekhez hasonlóan – a folyadékokra is érvényes a csúsztatófeszültségek dualitása.

A nemnewtoni folyadékok viszkoplasztikus közegekre vonatkozó esetében a folyadékban ébredő nyírófeszültség a newtoni folyadékokra vonatkozó összefüggéshez hasonlóan határozható meg, azzal a különbséggel, hogy a nyírási gradienstől függő taghoz hozzá kell adni egy állandó értéket, amely az anyag képlékeny viselkedéséből adódik:

$$\tau_{xy} = \eta\dot{\gamma} + \tau_0 \tag{8}$$

Ez azt fogja eredményezni, hogy a folyadékban az alakváltozás csak egy bizonyos határfeszültség elérése után indul meg, majd utána a newtoni folyadékokhoz hasonlóan ideálisan viszkózus jelleget mutatva folytatódik (2.14. ábra).



2.14. ábra Az ébredő nyírófeszültség a nyírási gradiens függvényében

Az ER folyadékok esetében az (8) összefüggésben szereplő τ_0 képlékeny tag helyettesíthető egy változó nyírófeszültség-értékkel, amely a folyadékra ható elektromos tér függvénye (CSIZMADIA 2003).

$$\tau_{xy} = \eta\dot{\gamma} + \tau(E) \tag{9}$$

Az (9) összefüggésben található nyírófeszültség-elektromos tér függvény felírható a következő alakban:

$$\tau_{xy} = \eta\dot{\gamma} + \alpha E^{\beta} \tag{10}$$

Az (10) összefüggésben szereplő α és β tagok az ER folyadéktól függő anyagállandók. Felhasználva az (9) és (10) összefüggéseket, a folyadékban ébredő csúsztatófeszültség felírható a nyírási gradiens és az elektromos tér függvényeként:

$$\tau_{xy}(\dot{\gamma}, E) = \eta\dot{\gamma} + \tau(E) = \eta\dot{\gamma} + \alpha E^{\beta} \tag{11}$$

Az (11) összefüggés az ER folyadékokra vonatkozó Bingham-modell általános alakja.

Az ER effektus mechanizmusa

Az ER effektus pontos leírására már az ER folyadékok felfedezése óta törekszenek. Így az ER jelenség magyarázatára a legkülönbözőbb modelleket és működési mechanizmusokat vetették már föl. Az alábbiakban, azon fizikai mechanizmus bemutatására törekszem, amely a mikroszkopikus anyagi jellemzők alapján következtet a makroszkopikusakra. Az olyan jelenségleíró modellek, melyek az ER vegyületek reológiai viselkedését jellemzik, nem kerülnek részletes tárgyalásra. Az egyes mechanizmusok bemutatása időrendi sorrendben történik, ezáltal szemléltetve a leírási pontosság fejlődését.

Fibrillációs modell

A fibrillációs modellt (WINSLOW 1949) dolgozta ki miután vizsgálatai során megfigyelte, hogy az ER szuszpenzióban rostszálak alakulnak ki. A diszpergált szemcsék polarizálhatóak és az ily módon létrejött dipólusok az elektromos tér iránya szerint rendeződhetnek. Kézenfekvő, hogy a polarizált részecskék közötti kölcsönhatás drámaian növelhető az ER effektus hatásaként. Mindez annak köszönhető, hogy a részecskék képesek bizonyos mértékű többlet töltés felhalmozására az egyenetlen kezdeti polarizáció és az ionos adszorpció

következtében. Az ezáltal kialakuló elektroforézis (ionok elmozdulása elektromos erőtérben) felerősítheti a részecske mozgást és a szemcsék újrarendeződéséhez vezethet. Ezt a modellt elsődleges polarizációs modellnek nevezhetjük, mivel a részecskék polarizációján alapszik.

Elektromos kettősréteg (Electric double layer - EDL) modell

Az EDL modellt elsősorban KLASS (1967 a, 1967 b) javasolta annak magyarázatára, hogy az ER effektus miért képes néhány milliszekundumos idő alatt lejátszódni valamint, hogy ebben miért játszik elsődleges szerepet a víz. Klass véleménye szerint a fibrillációs folyamat lassabb, mint az ER effektus válaszideje, ezért a fibrillációs modell nem megfelelő az ER jelenség magyarázatára. Azonban ha víz is található az ER szuszpenzióban, akkor minden szemcsét elektromos kettősréteg vesz körül. Ez az EDL réteg az ami polarizálható és eltorzítható. A szomszédos EDL rétegek közötti torzulások átfedhetik egymást, ekképpen erősen taszító elektrosztatikus kölcsönhatást hozva létre, ami az ER effektushoz vezet. UEJIMA (1972) és DEINEGA (1984) egy részletesebb EDL modellt dolgozott ki, melyben magyarázatot adtak arra, hogy az ER effektus miképpen függ a vízmennyiségtől, a térerősség változásának frekvenciájától, valamint a hőmérséklettől. Az ER effektust erősítheti, ha a töltéshordozás csak a diffúziós rétegben történik, míg gyengítheti, ha mindez a szemcsék között is megtörténik. Mindezek ellenére az EDL modell nem képes magyarázatot nyújtani arra, hogy az átlapolt elektromos kettősrétegek miért képesek több nagyságrenddel változtatni a reológiai tulajdonságokat.

Víz/detergens híd mechanizmus

A víz híd mechanizmust STANGROOM (1983) dolgozta ki a víztartalmú ER folyadékok tulajdonságainak magyarázatára. Úgy vélte az ideális ER folyadéknak a következő kritériumoknak kell megfelelnie: (a) a folyadékfázisnak hidrofilnak kell lennie; (b) a szilárd szemcséknek nem szabad víztaszítónak lenniük, és porózus felületük kell, hogy legyen bizonyos mennyiségű víz adszorbálásának érdekében; és ezek alapján (c) a szemcse felület víztartalma befolyásolja az ER effektust. Az elektromos tér hatására a vízben található ionok képesek a pórusok között mozogva egyik szemcséről a másikra jutni. Ezáltal egy adhézív (kötőjellegű) víz híd alakulhat ki a szemcsék között, ami a víz nagy felületi feszültsége miatt nagyon erős. Hasonló detergens hidat tanulmányozott KIM (1996) is. SEE (1993) és kollégái kissé módosították ezt a teóriát azzal, hogy a környező részecskék közötti elektromos energia eloszlást is figyelembe vették.

Polarizációs modell

Mind az EDL, mind a víz híd mechanizmus elméletek elvesztették gyakorlati alapjukat a vízmenetes ER folyadékok felfedezésével 1985-ben. Újra a fibrillációs modell alapján kezdtek el vizsgálódni és több próbálkozás is történt az ügyben, hogy a szemcsék közötti elektrosztatikus polarizációs erőt kvantitatív módon meghatározzák egy szemcseláncon belül. A polarizációs modell célja, hogy az anyagi jellemzők, mint például a folyadék és a szilárd részecskék dielektromos tulajdonságai, a szemcsék térfogatszázaléka, az elektromos térerősség, stb. és a teljes szuszpenzió reológiai jellemzői közötti kapcsolatot meghatározza, figyelembe véve a mikrostruktúrális jellemzőket (pl. rostszálak). Az ER rendszer egy idealizált fizikai modelljét felhasználva – egy egységes, tökéletesen gömbszerű dielektromos szféra (a részecske dielektromos állandója ε_p, átmérő $2r$) eloszlatva a folytonos newtoni közegben (a folyadék dielektromos állandója ε_m), kimutatható, hogy az elektrosztatikus erő a szemcse és a folytonos közeg dielektromos állandója közötti különbségtől függ (ADRIANI 1988, KLINGENBERG 1991, CHEN 1991, ANDERSON 1994, TAO 1994, DAVIS 1992 a, DAVIS 1993, DAVIS 1992 b). Ez általános formában a következőképpen írható:

$$F = k\varepsilon_m (2r)^2 f^2 E^2 S \tag{12}$$

ahol F az elektrosztatikus erő, k egy konstans, $f=(g-1)/(g+2)$ és $g=\varepsilon_p/\varepsilon_m$, S pedig a szemcsék mikrostruktúrájával összefüggő faktor. A rugalmassági modulus lineáris összefüggést mutat a dielektromos állandók arányával $\varepsilon_p/\varepsilon_m$ (DAVIS 1992 b), amely alapján arra következtethetünk, hogy az erős ER effektushoz a szemcsék dielektromos állandójának kell nagynak lennie.

Ezen okból kifolyólag a szélsőségesen magas dielektromos állandóval rendelkező részecskék használatának lehetőségét kezdték el kutatni, és a polarizációs modellel összhangban egy erős ER effektus elérését remélték. Egy báriumtitanát szuszpenzió ($BaTiO_3$, melynek dielektromos állandója hozzávetőlegesen 2000, kristályállapottól függően) azonban meglepő eredményeket produkál: egyen elektromágneses mező esetén inaktív, kis mennyiségű víz adszorbeálásának (ZUKOSKI 1993) vagy váltakozó elektromágneses mező alkalmazásának (RANKIN 1998) hatására aktívvá válik. Mindez arra enged következtetni, hogy a polarizációs modell tökéletesítésre szorul. Nyilvánvalóan a polarizációs modell nem veszi figyelembe az ER folyadékokkal szerzett kísérleti tapasztalatok közül azon fontos megfigyeléseket, mint a reológiai tulajdonságok változása az elektromos tér frekvenciájától és a szemcsék vezetőképességétől függően.

Konduktivitási modell

A polarizációs modellt sok hiányossága miatt módosították. Úgy gondolták a szemcsék és a folyadék fázis dielektromos állandója közötti különbség helyett inkább azok vezetőképességbeli különbsége befolyásolja az egyenáramú és a kisfrekvenciás váltakozó gerjesztéskor tapasztaltakat (ANDERSON 1994, DAVIS 1992). Mindamellett az általánosított polarizációs modell se képes teljes körű leírását adni az ER jelenségnek; például nem képes magyarázattal szolgálni arra, hogy miért tapasztalható negatív ER effektus egyes szuszpenziók esetén. ATTEN (1994) és FOULC (1994) ezért egy konduktivitási modell kidolgozását javasolta, ahol az ER effektus milyenségét a szemcsék és a folyadék vezetőképességének aránya határozza meg, ami σ_p/σ_m ha $\sigma_p>\sigma_m$; és negatív ER effektust jósol, ha $\sigma_p<\sigma_m$. Ezt a modellt később nagymértékben továbbfejlesztette TANG (1995) és WU (1996).

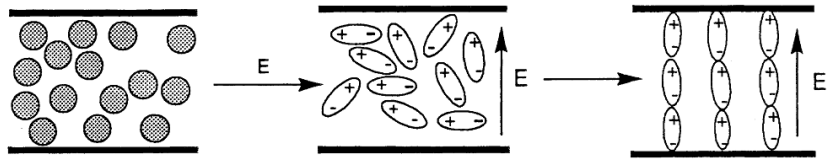
A konduktivitási modell sikeresen magyarázza meg azokat az ER jelenségeket is melyeket a polarizációs modell képtelen. Képes megbecsülni az áramsűrűséget, a folyás határt és az ER szuszpenzió hőmérséklet függését is. Viszont KHUSID és ACRIVOS (1995) rájött arra, hogy a kondukciós modell csak akkor használható, ha a szuszpenzió mikrostruktúrája már teljesen kialakult. A konduktivitási modell csak a szemcsék közötti kölcsönhatást veszi figyelembe, függetlenül az elektromos tér alkalmazása után végbemenő mikrostruktúrális változásoktól. Ennek eredményeképpen nem képes leírni a dinamikus jelenségeket, mint például az ER folyadékok válaszideje. Sőt mi több, kísérleti eredmények bizonyítják ennek a modellnek a helytelenségét. Például a magnézium-hidroxid / polimetilfenilsziloxán szuszpenziónak pozitív ER effektust kéne adnia, azonban az egyértelműen negatív ER effektusnak megfelelően viselkedik (TRLICA 1996).

A polarizáció és a konduktivitási modellnek egyaránt az a súlyos hiányossága, hogy nem veszi figyelembe az ER folyadékban végbemenő dinamikus változásokat, vagyis statikus modellek. KHUSID (1995) figyelembe vette és vizsgálta ezeket az ER folyadékokban lejátszódó dinamikus változásokat mind az elektromos tér hatására végbemenő szemcserendeződés, mind pedig a felületek polarizációja esetén. Ezzel egy kiváló kvalitatív módszert kapott, amely sokkal kifinomultabb mint a polarizációs vagy a konduktivitási modell, azonban még így is fennáll néhány ellentmondás a kísérleti eredményekkel. Ez abból fakad, hogy Khusid két alapfeltevése nem igaz általánosan az ER folyadékokra. Feltételezte egyrészt, hogy a diszpergált szemcsék és a folyadék fázis együttese belső dielektromos eloszlással rendelkezik másrészt, hogy az alkalmazott elektromos tér változása lassú a polarizációs sebességhez képest.

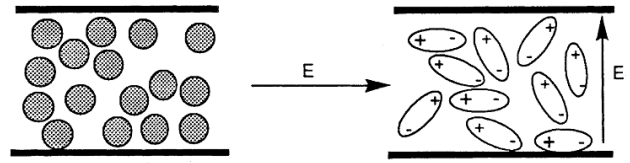
Léteznek más modellek is (SEE 1996, MA 1996), azonban egyik, így a polarizációs és a konduktivitási modell sem képes teljes körű magyarázatot adni az ER jelenségre. Mindegyikük közös hiányossága, hogy nem képesek a folyáshatárt az ER szuszpenzió komponenseinek fizikai tulajdonságai és a működési körülmények (térerősség, hőmérséklet, frekvencia, stb.) alapján megbecsülni. Emiatt nem képesek az ideális ER szuszpenzió elkészítéséhez irányt mutatni.

Dielektromos veszteség modell

Hao és kutató társai (HAO 1998 a, HAO 1999, HAO 2000) kidolgoztak egy a dielektromos veszteségen alapuló modellt, az ER mechanizmus kísérleti eredményekkel összhangban levő magyarázatára. Két dinamikus folyamatot vettek figyelembe a modell megalkotásánál. Az első lépés a szemcsék polarizációja, amelynél a részecskék dielektromos állandója a meghatározó. A második lépés a szemcsék elfordulása, amikor is a polarizált részecskék az elektromos tér erővonalainak irányában rendeződnek (2.15. ábra). Ezt a lépést a részecskék dielektromos vesztesége határozza meg. Ennek a második lépésnek nagyobb a jelentősége és ez az ami megkülönbözteti az ER aktív részecskéket, a nem ER aktívaktól. Vagyis elmondható, hogy bár mind az ER aktív, mind az ER inaktív részecskék polarizálása végbemegy elektromos tér hatására, azonban csak az ER aktívak képesek átrendeződni az elektromos tér erővonalainak irányában, rostszerű összeköttetéseket létrehozva a két elektróda között. A nem ER aktív részecskék nem képesek erre. Ennek valószínűleg az-az oka, hogy az ER aktív részecskéknek viszonylag nagy a dielektromos veszteség tangense, megközelítőleg 0,1 ha a frekvencia 1000 Hz, ami nagy mértékű felületi kötést létrehozó töltést eredményezhet. A szemcse így akár kis térerősség hatására is elfordulhat (HAO 1998 a). Az ER részecskék elektromos térerősség hatására bekövetkező elfordulása röntgendiffrakcióval detektálható (WEN 1996, LAN 1999). A nem ER aktív részecskék nem képesek kellő felületi töltést felhalmozni kis dielektromos veszteségük miatt. Bár a polarizációjuk lehetséges, összességében a részecskék közti erővektorok kioltják egymást a rendezetlen dipólus vektor irányok miatt (2.15. ábra).



(a)



(b)

2.15. ábra ER aktív és ER inaktív részecskék viselkedése külső villamos tér alkalmazása esetén. (a) ER aktív; (b) ER inaktív részecskék (HAO 1998 a)

Annak megértésére, hogy a nagy dielektromos veszteség miért szükséges az ER effektus végbemeneteléhez, egy elméleti közelítést dolgoztak ki (HAO 1999). Mihelyst az ER folyadék folyékony állapotból (a szemcsék elrendeződése véletlenszerű a diszperziós fázisban) szilárd állapotba (rostszálak térben centrált tetragonális térrácsnak megfelelően) megy át, az ER rendszer entrópiája nagymértékben csökken. Ennek alapján Hao és kollégái arra a megállapításra jutottak, hogy a részecskék dielektromos veszteség tangensének nagyobbnak kell lennie 0,10-nél, ami jól összhangban van a korábban elméletileg javasolt kritériummal (HAO 1997 a). Az ER effektus lejátszódásához szükséges kritérium ez alapján feltételezhetően a szemcsék felületének polarizálhatósága. Feltéttelezve, hogy a statikus dielektromos állandója a folyadék fázisnak és a szemcséknek rendre ε_{sm} és ε_{sp}, valamint a hőmérséklet T, egy erős ER effektus akkor következik be, ha $\varepsilon_{sp} > 4\varepsilon_{sm}$ és $\frac{d\varepsilon_{sp}}{dT} > 0$. Ha $\varepsilon_{sp} > 4\varepsilon_{sm}$, valamint $\frac{d\varepsilon_{sp}}{dT} < 0$ és a (13) egyenlet teljesül, akkor gyenge, vagy nem észlelhető az ER effektus. Ha $\varepsilon_{sp} > 4\varepsilon_{sm}$, valamint $\frac{d\varepsilon_{sp}}{dT} < 0$ és a (14) összefüggés teljesül, akkor negatív ER effektus várható.

$$\frac{d\varepsilon_{sp}/dT}{d\varepsilon_{sm}/dT} < \frac{(1+3\Phi)\left(2\varepsilon_{sm}+\varepsilon_{sp}\right)^3 + 54\Phi^2\varepsilon_m\left(\varepsilon_{sp}^2 - 1{,}5\varepsilon_{sm}\varepsilon_{sp} - \varepsilon_{sm}^2\right)}{27\Phi^2\varepsilon_{sm}^2\left(\varepsilon_{sp} - 4\varepsilon_{sm}\right)} \qquad (13)$$

$$\frac{d\varepsilon_{sp}/dT}{d\varepsilon_{sm}/dT} > \frac{(1+3\Phi)\left(2\varepsilon_{sm}+\varepsilon_{sp}\right)^3 + 54\Phi^2\varepsilon_m\left(\varepsilon_{sp}^2 - 1{,}5\varepsilon_{sm}\varepsilon_{sp} - \varepsilon_{sm}^2\right)}{27\Phi^2\varepsilon_{sm}^2\left(\varepsilon_{sp}-4\varepsilon_{sm}\right)} \tag{14}$$

Ahol Φ – részecske térfogat arány. Ha $\varepsilon_{sp} < 4\varepsilon_{sm}$, fizikailag nem lehetséges, hogy a $\frac{d\varepsilon_{sp}}{dT}$ tört kisebb legyen nullánál, ezért ez esetben is gyenge vagy negatív ER effektus jelentkezik. PAVLINEK kísérleti eredménye (PAVLINEK 2000) azt mutatja, hogy mindössze a szemcsék térfogatszázalék arányának változtatásával a korábban pozitív ER effektust adó rendszer negatív ER effektusúvá változtatható, mely jelenség a fentebb leírtakkal áll összhangban.

Az előzőleg bemutatott dielektromos veszteség mechanizmus alapján kidolgozásra került egy a folyáshatár kiszámítására lehetőséget adó egyenlet. Feltéve, hogy csak a felületi polarizáció játszik szerepet az ER effektus lefolyásában valamint, hogy az ER szemcsék elrendeződése térben centrált tetragonális térrácsnak megfelelő lesz elektromos tér hatására, meghatározható a folyáshatár értéke (HAO 2000):

$$\tau_y = \frac{126\Phi^2E^2}{4\pi(1-\Phi)-18\Phi}\times\left\{-\frac{3\varepsilon_{sm}\left(\xi^2+\xi-2\right)}{(2+\xi)^3}+\frac{2\beta_m T\left(\xi^2-1{,}5\xi-1\right)\left(\varepsilon_{sm}^2+\varepsilon_{sm}-2\right)}{(2+\xi)^3}+\frac{T\beta_p p(\xi-4)(\varepsilon_{sm}\xi+2)^2}{(2+\xi)^3}\right\} \tag{15}$$

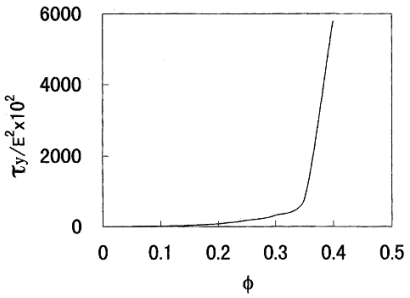
ahol τ_y a folyáshatár, β_m és β_p rendre a folyadék fázis és a szilárd részecskék lineáris hőtágulási együtthatói, illetve $\xi = \varepsilon_{sp}/\varepsilon_{sm}$, $p=[(n-1)p_s-(n+2)p_\infty]$, n konstans melynek értéke 4 és 19,7 közötti, $p_s = \frac{\varepsilon_{sp}-1}{\varepsilon_{sp}+2}$, és $p_\infty = \frac{\varepsilon_{\infty p}-1}{\varepsilon_{\infty p}+2}$.

A (15) egyenlet alapján látható, hogy az ER folyadék folyáshatára négyzetesen növekszik az alkalmazott elektromos térerősséggel, a szemcsék térfogat százalékos arányával és a folyékony fázis dielektromos állandójával arányosan, ami jól összhangban van a kísérleti tapasztalatokkal (BLOCK 1990, HAO 1994, MARSHALL 1989). Ha p pozitív érték, akkor a folyáshatár is növekszik ξ növekedésével, mivel a számláló sokkal gyorsabban növekszik ξ-vel mint a nevező, amely összhangban van a polarizációs modellel kapott eredményekkel (KLINGENBERG 1990, DAVIS 1992). Ezzel szemben, ha p negatív érték, akkor a folyáshatár csökken ξ növekedésével, ami már nem magyarázható a polarizációs modell felhasználásával, viszont kísérletileg igazolható. Sőt mi több, némely extrém esetben előfordulhat, hogy a folyáshatár negatív lesz, ami negatív ER effektushoz vezet. A p paraméter csak akkor lesz pozitív, ha a diszpergált szemcsék dielektromos veszteség tangense nagyobb mint 0,1, mint ahogy azt korábban bemutattuk kísérletileg és elméletileg (HAO 1997 b). Ezt a követelményt a fentebb vázolt folyáshatár meghatározó egyenlet tartalmazza.

A normalizált folyáshatár függését a szemcse térfogatszázalék aránytól a szilikon olajos ER rendszernek a (15) egyenlet alapján becsülhetjük, melyet a 2.16.

ábrán mutatunk be élve azzal a feltevéssel, hogy szemcse-olaj dielektromos arány ξ=10 és $\frac{d\varepsilon_{sp}}{dT} = 0,4$. Kis térfogat százalékos szemcsearány esetén, annak növekedésével a folyáshatár csak kis mértékben növekszik, ami jól összhangban van a kísérleti eredményekkel (BLOCK 1990, MARSHALL, 1989). Ha a szemcse térfogatarány megközelítőleg 0,35, akkor a folyáshatár nagymértékben növekszik, ami azt jelzi, hogy létezhet egy kritikus térfogatarány ER szuszpenziók esetén. Ez a kritikus érték a folyáshatárt meghatározó egyenletből számolva az előző értékhez közeli, nagyjából 0,37, ami a reológiai vizsgálatokból származik (HAO 1994), és ha Flory dermedéses teóriáját és az átszűrődési elméletet is alkalmazzuk, akkor 0,4-nek adódik.

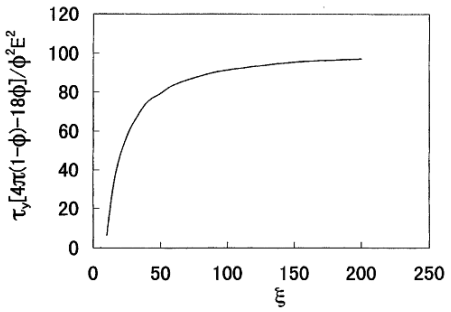
A szemcse-olaj dielektromos állandó arány ξ hatása a folyáshatárra szintén számítható a (15) egyenlet alapján. A számszerű kapcsolat szilikon olajos ER rendszer esetén a 2.17. ábrán látható. Tisztán látszik, hogy kis szemcse-olaj dielektromos állandó arány esetén annak növelésével a folyáshatár nagymértékben nő, majd lassabban kezd el nőni, ha ξ nagyobb, mint 60. Az erős növekedés ξ<50 esetén arra enged következtetni, hogy a legjobb ER effektus a körülbelül 150-es statikus dielektromos állandóval rendelkező anyagokkal érhető el. A nagy dielektromos állandóval rendelkező anyagok a legtöbbször nem adnak jó ER effektust, kivéve, ha valamilyen egyéb tulajdonságuk elősegíti azt. Meg kell jegyeznünk, hogy a fenti állítások *p* pozitív értékét feltételezve igazak. Ha *p* negatív, akkor a nagy szemcse-olaj dielektromos állandó arány nem eredményez nagyobb folyáshatárt. Erre a legjobb példa a $BaTiO_3$/szilikon olaj rendszer.



2.16. ábra Normalizált nyírószilárdság a részecske térfogat arány függvényében. A részecske és olaj dielektromos állandójának aránya $\xi = 10$ és $\frac{d\varepsilon_{sp}}{dT} = 0,4$. A 15 egyenlet alapján számítva (HAO 2000)

Mint arra HAO (2000) és kollégái rávilágítottak, a (15) egyenlet arra is megfelelő magyarázatot nyújt, hogy miért növekszik az ER effektus intenzitása a dileketromos állandók közötti különbség növekedésével a relaxációs frekvencia alatt és fölött, melyet IKAZAKI (1996) és KAWAI (1998) figyelt meg. Az

egyenletből az is látszik, hogy a szemcsevezetéssel hogyan emelkedik a folyáshatár értéke és, hogy ez miért különböző vezetési értékeknél történik különböző anyagok alkalmazása esetén (BLOCK 1990, HAO 1994). Arra is magyarázatot nyújt, hogy a folyáshatárnak miért van maximális szélsőértéke a hőmérséklet növekedésével (HAO 1996, CONRAD 1995), és miért a polarizációs sebesség határozza meg az ER effektus milyenségét. Arról is számot ad, hogy miért a lassabb polarizációs sebességek vezetnek erősebb ER effektushoz. Összefoglalva, a folyáshatárt meghatározó egyenlet a dielektromos veszteség modell alapján megfelelő magyarázattal szolgál a legtöbb eddig megismert ER jelenségre.



2.17. ábra Numerikus összefüggés a normalizált nyírószilárdság és a részecske-olaj dielektromos állandók arányának függvényében szilikon olaj alapú ER folyadék esetén. A 15 egyenlet alapján számítva (HAO 2000)

A Hao által kidolgozott egyenlet racionális kapcsolatot állít fel a folyáshatár és az ER folyadékok fizikai paraméterei között, ezzel utat mutatva egy nagyobb teljesítményű ER folyadék összetételének kidolgozásához. A (15) egyenlet alapján ehhez nagy dielektromos állandójú folyékony közeg és szilárd részecske használatára van szükség amellett, hogy a szilárd-folyadék dielektromos állandó arány is nagy, megközelítőleg 50. Emellett az eloszlatott szemcséknek nagy dielektromos veszteség tangense (legalább 0,1) kell legyen, hogy a *p* paraméter pozitív maradjon. Ezen *p* paraméter megfelelően nagy értékre való növeléséhez, hosszú relaxációs idő és a megfelelő vezetőképesség is elengedhetetlen.

A sok előnye mellett azért a (15) egyenlet is rendelkezik hiányosságokkal. Mivel az egyenletet a belső energia változás alapján vezették le statikus elektromos teret feltételezve, az nem képes figyelembe venni a folyáshatár frekvencia függését. A belső energia megváltozásának számítása oszcilláló elektromos tér esetén pedig komplikált.

2.3.3. ER folyadékok anyagai

Az ER folyadékok legtöbbször egy nem poláris részecskékből álló szigetelő folyadék és a benne eloszlatott aprószemcsés szilárd anyag elegyei. Ezen

eloszlatott szilárd részecskék lehetnek szervetlen nem-fémes vagy szerves anyagok, illetve félvezető polimerek. Ezek közül a nem-fémesek alapvetően ionos kristályok, míg a szervesek és a félvezető polimerek szerkezetükben konjugált pi-kötést tartalmaznak, és ezáltal vezető anyagok. A folyadék fázis legtöbbször polidimetilsziloxán olaj (szilikon olaj), de lehet növényi olaj (YAVUZ 2010), ásványi olaj, vagy akár klórozott hidrokarbon (szénhidrogén) olaj is. Közös tulajdonságuk, hogy kismértékű a vezetési képességük és nagy az átütési szilárdságuk. Az ideális ER folyadék a következő tulajdonságokkal rendelkezik: (a) magas a folyáshatára, amely legalább 5 kPa, ha az elektromos térerősség 2 kV/mm; (b) az ER folyadékban mérhető áramsűrűség kicsi, lehetőleg kevesebb mint 20 $\mu A/cm^2$; (c) széles hőmérséklet tartományban használható. A megfelelő elektroreológiai folyadék erős ER-effektust képes produkálni a -30 C°-tól 120 C°-ig terjedő tartományban; (d) rövid válaszidő jellemzi, mely nagyságrendileg 10^{-3} s, sőt egyes esetekben ennél gyorsabb reakció is szükséges lehet; és (e) nagy a stabilitása, vagyis ellenálló a kémiai és fizikai behatásokkal szemben. Ennek megfelelően részecskéi nem ülepedhetnek ki, valamint nem lehetnek bomlékonyak. Az ER folyadékok elméleti karakterisztikáját az 2.1.-es táblázat mutatja be. A szemcse méret 0,1 és 100 μm között van, és a térfogatszázalékos összetétele 0,05 és 0,5 közötti. Az alkalmazott elektromos térerősség 0,5-től 3 kV/mm-ig terjed.

2.1. táblázat Az ER folyadék jellemzői (HAO 2002)

	Folyékony fázis	Részecske	ER szuszpenzió
Relatív dielektromos állandó	2	2 - 10000	
Vezetőképesség S / m	10^{-10} - 10^{-16}	10^{-7}	10^{-9} – 10^{-16}
Viszkozitás elektromos mező nélkül Pa.s	0.01 - 10		0.1 - 10

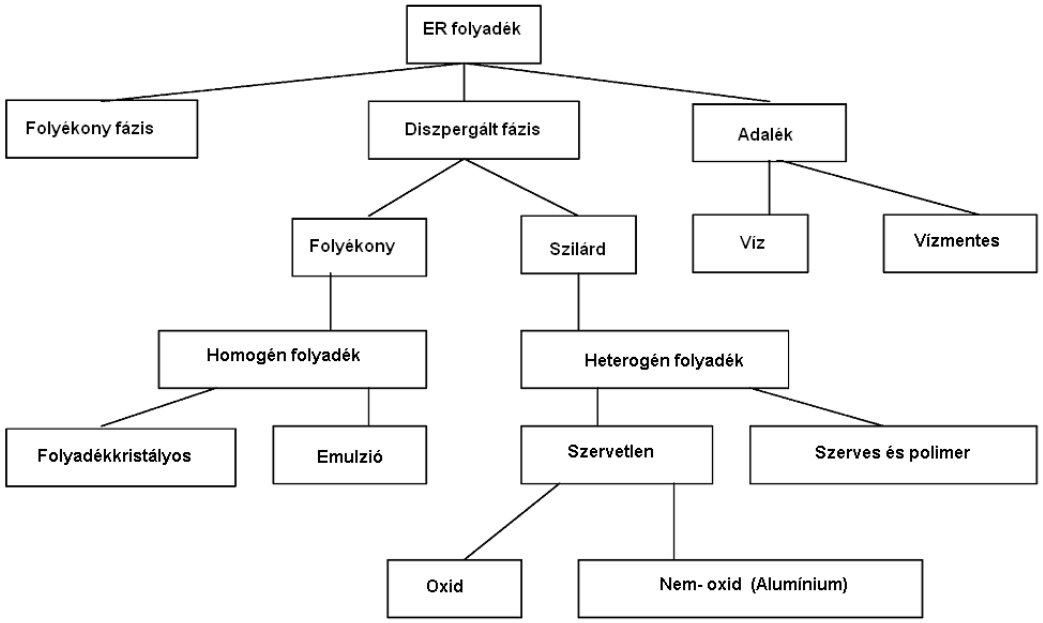
Az 1985-ös évet megelőzően az ER folyadékok kis mennyiségben vizet is tartalmaztak. Az ilyesfajta ER folyadékoknak sok hátránya van tekintve, hogy működési hőmérséklet tartományuk korlátozott a víz magas hőmérsékleten történő párolgása miatt; nagy az áramsűrűségük a víz jelentős vezetőképességének köszönhetően; valamint a berendezés korrózióját okozhatják. A vízmentes ER folyadékok az ipari alkalmazhatóság szempontjából sokkal ígéretesebbnek bizonyultak. Ezért ezt követően széleskörű kutatások kezdődtek meg e területen, ami több különböző vízmentes ER folyadék kifejlesztéséhez vezetett (HAO 2002). Az 1980-as évek végén azonban felismerték a vízmentes ER folyadékok alkalmazásának egyik legfőbb problémáját – a szemcsék kiülepedését, ami az ER folyadék teljes működésképtelenségéhez vezethet, ezáltal korlátozva a felhasználási lehetőségeket. Ezt követően olyan homogén ER folyadék kifejlesztésével kísérleteztek, melyben nincsenek eloszlatott makrorészecskék. A kis molekulájú folyékony kristályokat (LC – liquid crystalline) tanulmányozták intenzíven. Az már az 1960-as évek elején ismert volt, hogy az LC folyadékok viszkozitása elektromos tér hatására növekszik, bár ez a növekedés csak az eredeti érték néhányszorosa volt

(WYSOCKI 1969, HONDA 1978). 1992-ben extrém nagy ER effektust produkáló LC anyagot fedezett fel YANG (1992). Később más LC ER rendszereket is kifejlesztettek a működési mechanizmus tanulmányozására (NEGITA 1996, YAO 1997, TAJIRI 1997). A klórozott paraffin olaj/szilikon olaj emulziós (PAN 1997) és a polimer glikol/szilikon olaj emulziós (KIMURA 1998) rendszerekről szintén bebizonyosodott, hogy ER effektus képesek. Ezen olaj-az-olajban rendszerek reológia válaszának mechanizmusát HA (2000) írta le. A homogén ER folyadékok egy új és ígéretes fajtái az ER vegyületeknek. Mindamellett az eredendően nagyobb viszkozitás és a folyadék-folyadék extrakció nyilvánvaló akadályát jelentik ezen rendszerek alkalmazásának.

Általánosságban elmondható, hogy a legtöbb ER folyadék egy háromkomponensű rendszer – a diszpergált fázis, a diszperziós közeg és a kismennyiségű, de feltétlen szükséges adalékok, mint például szervetlen sók és víz alkotják. Az ER folyadékok heterogének vagy homogének lehetnek. A heterogének között szervetlen, szerves és polimer szemcsés vegyületek is vannak. A szervetlenek közül az oxidok és a nem-oxid anyagok meglehetősen eltérő ER effektust adnak, ezért ezeket külön fajtaként tárgyalják. A 2.18. ábra az ER folyadékok fastruktúráját mutatja be, melynek megfelelően osztályozzuk a következőkben őket.

Folyékony diszperziós közeg

Az ER vegyületek folyadék állapotú diszperziós közege általában egy szigetelő tulajdonságú olaj. Egy ideális folyékony diszperziós fázis anyagi tulajdonságait tekintve; (a) magas forrás és alacsony dermedési ponttal rendelkezik. Más szóval, a működési tartományon belül csak kis mértékben párolog; (b) kicsi a viszkozitása és ezáltal a teljes szuszpenzió viszkozitása is relatív kicsi nulla elektromos térerősség mellett; (c) magas az ellenállása és az átütési feszültsége, azaz ellenálló nagy elektromos térben is; (d) nagy a sűrűsége (> 1,2 g/cm^3 lehetőleg). A részecske ülepedés esetlegesen elhanyagolható mértékű, ha a folyadék és a szilárd fázis sűrűsége megközelítőleg azonos; (e) nagy a kémiai stabilitása. A folyadék fázis anyagi tulajdonságait tekintve nem romolhat és nem léphet kémiai reakcióba más anyagokkal miután az ER folyadék összeállt; (f) eredendően hidrofób (víztaszító) és ezért nem abszorbál nagy mennyiségű nedvességet a környezetből; és (g) nem mérgező valamint olcsó. A manapság használt olajok között megtalálható a szilikon olaj, növényi olaj, ásványi olaj, paraffin, petróleum, klórozott szénhidrogén, transzformátorolaj, stb. Nagy sűrűségű olajakat, mint a fluorozott vagy fenilezett szilikon olaj szintén használnak.



2.18. ábra Az ER anyagok besorolása

Diszpergált fázis

Szilárd szemcsés – heterogén ER vegyületek

Szervetlen oxidok: Egyes fémes oxidok vagy kerámiai anyagok számos oxidból szinterelve (magas hőmérsékleten összepréserve, összesütve) jó ER effektust adnak. Az ezeket alkalmazó ER folyadékokat a 2.2. táblázat foglalja össze. A legtöbb oxidos ER folyadék vizet tartalmaz, amely az effajta vegyületek nagy hátránya.

2.2. táblázat Szervetlen oxidok
Szervetlen oxidok

Diszpergált fázis	Diszpergens	Adalék	Hiv.
Piezoelektromos kerámiák	Ásványi olaj vagy xilol	Víz vagy glicerin	
Vas oxid	Ásványolaj frakciók vagy DBS	Víz vagy felületaktív	
Kovasav	Kerozin vagy DBS	Víz-és szappanok	
	Ásványi olaj, szilikon olaj	Víz-és glicerin oleát	(HAO
Ón-oxid	Ásványolaj-frakció	Víz vagy felületaktív	2002)
Titán-dioxid	Ásványi olaj vagy p-xilo	Víz-és glicerin	
Al_2O_3, Cu_2O, MgO, ZnO, La_2O_3, ZrO_2, Ta_2O_3, MnO_2 CoO, Nb_2O_3,	Ásványi olaj	Polybutylsuccimide	

Nem-oxid szervetlen anyagok. Javarészt a késő 80-as, korai 90-es években fejlesztették ki a nem-oxid szervetlen ER folyadékokat. Ezek szélsőségesen erős ER effektust mutattak a legcsekélyebb vízmennyiség nélkül is (annak ellenére, hogy a víztartalom növelhetné az ER effektus mértékét), ami ösztönzőleg hatott az ilyen ER vegyületek kutatására akkoriban. Közülük jelentőséggel bírnak az alumíniumszilikátok, különös tekintettel a zeolitok. A 2.3-as táblázat ez eddig előállított nemfémes szervetlen ER folyadékok közül tartalmaz néhányat.

2.3. táblázat Nem-oxid szervetlen anyagok

Nem-oxid szervetlen anyagok			
Diszpergált fázis	**Diszpergens**	**Adalék**	**Hiv.**
Alumíniumszilikát	Szilikon olaj vagy szénhidrogén	Felületaktív	
Kristályos zeolit	Szilikon olaj vagy magas dielektromos állandójú szénhidrogén		
Zeolit	Szilikon olaj vagy szénhidrogén		
Micro-üveggyöngyök	Transzformátor olaj		(HAO 2002)
Alumíniumszilikát	Szilikon olaj	Polyhydroxyls iloxane	
Szilikát, szilícium-alumínium	Ásványi olaj, polialkilén Paraffin ásványi olaj Polifenil, foszforsav	Sulfonaes Phenates Foszfonátok	
$LiN_2H_5SO_4$	Szilikon olaj	Block polimer	
BN,AlN,B_4C	Szilikon olaj	Succimide	

Szerves és polimer anyagok. Bár a nem-oxid szervetlen ER folyadék nem tartalmaz vizet és erős ER effektust ad, a vezetőképessége túlzottan nagy, különösen magas hőmérsékletek esetén. A diszpergált fázis sűrűsége jóval nagyobb, mint a diszpergáló közegé, ezért a szuszpenzió általában instabil. Az ER készülékek szempontjából a szemcsék túl kemények és abrazív hatásúak. Ezen hátrányos tulajdonságok miatt a szerves és polimer anyagokat előnyösebbnek tartják a szervetleneknél és ezért ezeknek az alkalmazása intenzíven kutatott terület. A szerves és polimer tartalmú ER folyadékok közül néhány a 2.4-es táblázatban található.

A szerves és polimer ER folyadékok két csoportra oszthatóak. Az első a konjugált π-kötést tartalmazó vegyületek. Alapvetően két módszert alkalmaznak a konjugált vegyületek vezetőképességének befolyásolására: a fémes ion vagy fémes oxid etilezését és a karbonizációs hőmérséklet kontrollálását. A benzokinon alapú polimerekben és a poliakrilonitrilben egyaránt megjelenik a konjugált π-kötés. Az ilyen vegyültek elektromos tér hatására nagymértékben polarizálhatóak, így magas a dielektromos állandójuk. A második csoportba azok a vegyületek tartoznak melyek molekula szerkezetükben erősen polarizálható csoportot tartalmaznak, úgy mint a hidroxil, ciano vagy amidcsoport, stb. Polimetakrilsav, keményítő, dextrán, stb. tartoznak ebbe a csoportba. Ezek a vegyületek mind polielektrolitok,

melyeknek nagy a molekula tömege és az elektromos töltéssűrűsége. Majd mindegyik polielektrolit, így a természetes és szintetikus egyaránt, egyértelműen produkálja az ER effektust, ami a nagymértékű nedvesség abszorbciós (megkötő) képességének köszönhető. Mégis a szerves és polimer vegyületek ER effektusa gyengébb a nem-oxid szervetlen anyagokénál.

2.4. táblázat Szerves és polimer anyagok

Szerves és polimer anyagok

Diszpergált fázis	Diszpergens	Adalék	Hiv.
Acene-kinon polimer	Klórozott szénhidrogén		
Térhálósított polyvinylsilane	Fluorozott szilikon olaj	elektrolitok	
Cellulóztartalmú anyagok	Transzformátor olaj, növényi olaj	víz vagy egyéb elektrolit	
Polifenil	Szén alapú olaj keverék	aromás hidroxil	
Polypyrroles	Transzformátor olaj, növényi olaj		
Polyanilines	Szilikon olaj		
Ionos festék anyag	ásványi olaj, szilikon olaj	hidroxil karboxil	(HAO 2002)
Nátrium carboxylmethyl Dextrán	poliklórozott bifenilek diklór-benzol	Szorbitán monooleát	
Polymeththacrylic sav kereszt kapcsolódó divinilbenzollal	Hydrycarbon	víz	
Keményítő	Ásványi olaj, transzformátor	víz	
Oxidált poliakrilnitril	Szilikon olaj		
Szénsavas aromás szulfonsav vagy só	Fluorosilicone olaj vagy más módosítottt szilikonolaj		

Folyékony – homogén ER anyagok

A homogén ER folyadékot, mely egy szigetelő olajba diszpergált folyadékból áll, a legelőnyösebb ER folyadéknak tartották eddig, mert ennél nem jelentkezik a szemcse ülepedés ami a heterogén ER vegyületeknél legtöbbször problémát jelent. Azonban ezek az ER rendszerek nem képesek erős ER effektust szolgáltatni és két fázissá történő extrakciójuk is könnyen végbemegy. Emellett nagy a viszkozitásuk nulla elektromos térerősség esetén is, amely felhasználhatóságukat korlátozza. A

homogén ER folyadékok jellemzően LC polimerek. Ezen ER folyadékok egy része az 2.5-ös táblázatban található.

2.5. táblázat homogén ER anyagok

homogén ER anyagok

Diszpergált fázis	Diszpergens	Adalék	Hiv.
Alumínium szappan	ásványi olaj, szilikon olaj	Ditertbuthyl fenol	
Poli (gamma-glutamát)	keton		
Poli (n-hexil izocianát)	p-xilol		
LC polisziloxánok	Szilikon olaj		
LC polisziloxánok			
4-n-Pentil-4-klórozott paraffin cyanobiphenyl / szilikonolaj emulzió	4-pentyloxy 4-bifenil karbonitril		(HAO 2002)
Uretán-módosított polipropilén / szilikonolaj emulziót			
Ricinusolaj / szilikonolaj emulzió			

Adalékok

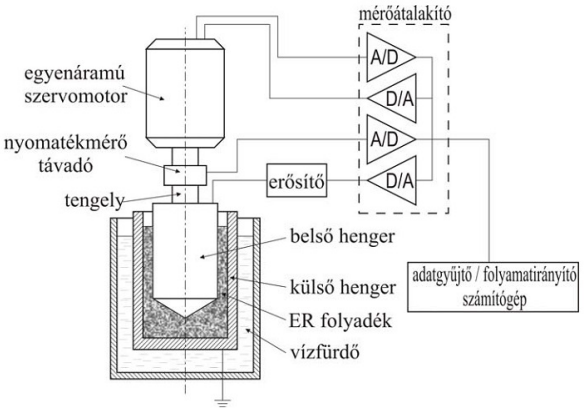
Mint már fentebb említettük, a legtöbb ER folyadék adalékokat is tartalmaz melyek tömegének maximum 5%-át teszik ki. Sok esetben ezek szükséges adalékok, melyek lehetnek víz, sav (szerves és szervetlen), alkáli sók, és detergensek (felület aktív anyagok). Az ER adalékokról BLOCK (1988) ad áttekintést. Az ER adalékanyagok legtöbbször hidralizálhatóak, és nem is lennének képesek aktiválni az ER rendszert víz nélkül. Az adalékok pontos mennyisége kritikus. Ha ez kevesebb mint 0,01 tömegszázalék akkor nem fejtik ki hatásukat, míg ha több mint 5 tömegszázalék akkor nagy mértékben növelik az elektromos áramot.

A víz mellett más poláris folyadékok is jelentősen javíthatják az ER effektust úgy, mint az alkoholok, a dimetilamin, acetamid, dietilamin, glicerin. A poláris folyadékok kis mennyisége is drámaian növelheti a diszpergált szemcsék dielektromos állandóját, ami valószínűleg az ER effektus felfedezésének lehetséges oka volt.

Egy másik széleskörűen használt adalék az olyan detergens mint például, az oleát, vagy a szorbitan, stb. Anionos, kationos és nem-ionos detergenseket használnak az ER rendszereknél, míg az amfoter detergensek csak ritkán fordulnak elő. A detergensek segíthetnek az ER szuszpenzió stabilizálásában, valamint erősíthetik az ER effektust is.

2.3.4. ER folyadékok vizsgálati módszerei

Az ER folyadékok vizsgálatának módszerei – áramlástani szempontból – két fontosabb csoportra bonthatók: a stacionárius síkáramláson, és a Couette-áramláson alapuló módszerekre (LEE 2002). A mérési módszerek mindkét esetben azon az elven működnek, hogy – szabályozással – állandó értéken tartva a folyadék nyírási gradiensét, a változó villamos térerősség mellett mérik az állandó nyírási gradiens fenntartásához szükséges terhelést. Ez a Couette-áramláson alapuló módszer esetén egy speciálisan kialakított rotációs viszkoziméter – ún. rotációs elektroviszkoziméter – segítségével történik, amelynek az álló- és a forgórésze eltérő villamos potenciállal rendelkezik (2.19. ábra).



2.19. ábra Rotációs elektroviszkoziméter és mérőkör vázlata

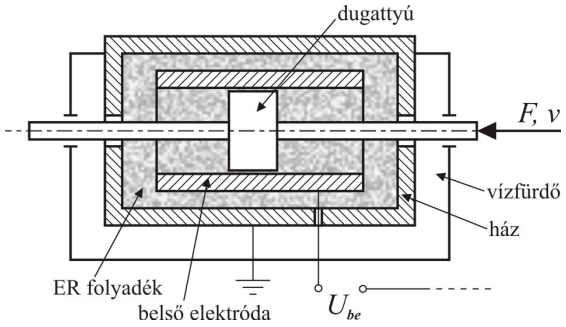
A mért nyomatékból számítható a folyadékban ébredő nyírófeszültség a sugár függvényében:

$$\tau(r) = \frac{M}{2r^2\pi \cdot h} \tag{16}$$

A (16) összefüggésben M a mért nyomaték, h a forgórész magassága (VALASEK 2003).

A stacionárius síkáramláson alapuló vizsgálati módszerek – az ER folyadékok járműtechnikai alkalmazása miatt – elsősorban jármű-lengéscsillapítókkal

megegyező eleven működő rendszerek. Ebből adódóan ezek a rendszerek a folyadék mozgatását dugattyúval végzik, ami a folyadékot egy, a dugattyú tengelyével koncentrikusan kialakított áramlási résbe kényszeríti, ahol létrehozható az ER jelenség létrejöttéhez szükséges villamos tér (2.20. ábra).



2.20. ábra Síkáramláson alapuló vizsgálórendszer vázlata

A síkáramláson alapuló rendszer esetén a vizsgálórendszerben az állandó nyírási gradienst a dugattyú állandó sebességgel történő mozgatása biztosítja. Ekkor a dugattyú mozgatásához szükséges erő felhasználásával számítható a folyadékban a villamos térerősség hatására ébredő nyírófeszültség nagysága:

$$\tau_{ER} = \frac{Fh}{2Al} - \frac{6\eta Av}{bh^2} \tag{17}$$

Az (13) összefüggésben F a dugattyúra ható erő, A a dugattyú felülete, l a belső hengeres felület hossza, η a dinamikai viszkozitás, b a belső hengeres felület kerülete, h a résméret.

2.3.5. ER folyadékok felhasználási területei

Az ER folyadékok villamos tér hatására gyorsan és reverzibilisen átalakulnak folyékony állapotból szilárd fázisba. Így jól alkalmazhatóak mechanikus – elektromos átalakítóként mechanikus elemek irányítására. Az elmúlt évtizedekben sok ER berendezést mutattak be és szabadalmaztattak, mint például: kuplung (TAN 2006, KESY 2006, HARTSOC 1991), fék (TAN 2007), csillapító berendezések (LIM 2005, WEI 2006, SUNG 2008, YEH 2011), aktuátorok (KIM 2009), üzemanyag-befecskendező szelepeket, hidraulikus szelepeket (WINSLOW 1949) és robotok kontrolling rendszereket. Ezek közül, az ER csillapító berendezéseket kaptak intenzív figyelmet, mert ezen alkalmazásoknál nem szükséges az ER folyadék nagyon magas folyáshatára, és nagyon széles hőmérséklet-tartományban alkalmazhatóak. Sok csillapító eszközre, mint például a lengéscsillapítók (HONG 2005), robot kar, motortartó bakok csapágy csillapítók (PENG 2006, VANCE 2000), szeizmikus ellenőrző keret szerkezetek (XU 2000), született javaslat. Ezen túlmenően, az ER folyadékot fel lehet használni a fotonikus kristály, mechanikus

polírozó, emberi izom stimulátor, mechanikai érzékelő vagy szeizmográf (HAO 1998 b) alkalmazásnál is. Az ER folyadékok alkalmazása jelenleg mégsem széleskörű. A legfőbb problémák a következők:

- (a) a folyáshatár nem elég magas
- (b) az üzemi hőmérséklet tartomány nem elég széles, az ER hatása jelentősen csökken, ha a hőmérséklet meghaladja a 100°C-ot
- (c) az ER folyadékok stabilitása nagyon rossz. Ha a szegregáció megtörténik, nem elérhető el ER hatás,
- (d) jelenleg a részecskék kiülepedését tekintik a legnagyobb problémának. Sok kutató igyekszik javítani az ER folyadékok ülepítő tulajdonságait (QI 1997, XIE 1997).

2.4. Szakirodalmi következtetések

Az elektroreologiai folyadékok szakirodalmát három fő csoportra lehet osztani: Az ER folyadékok anyagaival foglalkozó vizsgálatok, az ER effektus modellezésével, valamint az ER folyadékok felhasználási lehetőségeit vizsgáló kutatások.

Az ER folyadékok anyagainak vizsgálata jelentős szakirodalommal rendelkezik. Az ER folyadékok legtöbbször egy nem poláris részecskékből álló szigetelő folyadék és a benne eloszlatott aprószemcsés szilárd anyag elegyei. A heterogén ER folyadékok vizsgálta hosszú múltra tekint vissza (GOW 1990, XU 1991). A heterogén ER folyadékok alkalmazásánál a legjelentősebb probléma a részecskék kiülepedése, amely nagymértékben rontja a heterogén ER folyadék alkalmazhatóságát. A kiülepedési probléma megoldására olyan homogén ER folyadék kifejlesztésével kísérleteztek, melyben nincsenek eloszlatott mikrorészecskék. A kis molekulájú folyékony kristályokat (LC – liquid crystalline) tanulmányozták intenzíven (YANG 1992, NEGITA 1996, YAO 1997, TAJIRI 1997, HA 2000). A homogén ER folyadékok fejlesztésével nemrég kezdtek foglalkozni ennek ellenére a kutatók úgy tartják, hogy ígéretesebb terület, mint a heterogén ER folyadék. A homogén ER folyadékok eredendően nagyobb viszkozitással rendelkeznek, a villamos tér hatására bekövetkező nyírószilárdság növekedés is kisebb a heterogén ER folyadékokhoz képest, továbbá a folyadék-folyadék extrakció nyilvánvaló akadályát jelentik ezen rendszerek alkalmazásának. A Vízmentes ER folyadékok széles hőmérséklet-tartományban működhetnek (HAO 2002).

ER hatását jelentősen befolyásoló tényezők az elektromos térerősség, elektromos mező frekvenciája, a részecske vezetőképessége, a részecske dielektromos tulajdonsága, részecske térfogat aránya, a hőmérséklet, valamint a víz-tartalom (HAO 2002).

Az ER jelenséget anyagmodellként a nemnewtoni folyadékok viselkedését leíró matematikai modell kibővítésén alapuló, az ún. ER folyadékokra vonatkozó Bingham-modell írja le (LEE 2002). A Bingham-modellben az ER hatásból adódó

nyírószilárdság változást leíró tag kutatása jelenleg is folyamatos. Az ER hatás modellezésére számos elméletet dolgoztak ki:

A **fibrillációs modellt** (WINSLOW 1949) dolgozta ki. Ezt a modellt elsődleges polarizációs modellnek nevezhetjük, mivel a részecskék polarizációján alapszik.

Elektromos kettősréteg (Electric double layer - EDL) modellt KLASS (1967 a, 1967 b) javasolta, majd UEJIMA (1972) és DEINEGA (1984) egy részletesebb EDL modellt dolgozott ki, melyben magyarázatot adtak arra, hogy az ER effektus miképpen függ a vízmennyiségtől, a térerősség változásának frekvenciájától, valamint a hőmérséklettől. Az EDL modell nem képes magyarázatot nyújtani arra, hogy az átlapolt elektromos kettősrétegek miért képesek több nagyságrenddel változtatni a reológiai tulajdonságokat.

A **víz híd mechanizmust** STANGROOM (1983) dolgozta ki a víztartalmú ER folyadékok tulajdonságainak magyarázatára.

A **polarizációs modell** célja (DAVIS 1992 b), hogy az anyagi jellemzők, mint például a folyadék és a szilárd részecskék dielektromos tulajdonságai, a szemcsék térfogatszázaléka, az elektromos térerősség, és a teljes szuszpenzió reológiai jellemzői közötti kapcsolatot meghatározza.

ATTEN (1994) és FOULC (1994) egy **konduktivitási modell** kidolgozását javasolta, ahol az ER effektus milyenségét a szemcsék és a folyadék vezetőképességének aránya határozza meg. Ezt a modellt később nagymértékben továbbfejlesztette TANG (1995) és WU (1996). A polarizáció és a konduktivitási modellnek egyaránt az a súlyos hiányossága, hogy nem veszi figyelembe az ER folyadékban végbemenő dinamikus változásokat, vagyis statikus modellek.

Hao és kutató társai (HAO 1998 a, HAO 1999, HAO 2000) kidolgoztak egy a **dielektromos veszteségen** alapuló modellt, az ER mechanizmus kísérleti eredményekkel összhangban levő magyarázatára. A Hao által kidolgozott egyenlet racionális kapcsolatot állít fel a folyáshatár és az ER folyadékok fizikai paraméterei között, ezzel utat mutatva egy nagyobb teljesítményű ER folyadék összetételének kidolgozásához. A sok előnye mellett azért a dielektromos veszteségen alapuló modell is rendelkezik hiányosságokkal. Mivel az egyenletet a belső energia változás alapján vezették le statikus elektromos teret feltételezve, az nem képes figyelembe venni a folyáshatár frekvencia függését.

Az ER folyadékok vizsgálatának módszerei – áramlástani szempontból – két fontosabb csoportra bonthatók: a stacionárius síkáramláson, és a Couette-áramláson alapuló módszerekre (LEE 2002). ER folyadékok vizsgálatát a kutatók többsége rotációs elektroviszkoziméterrel végzi, így az anyagvizsgálatok jelentős része a Couette-áramláson alapuló módszert alkalmaz. Hidraulikus rendszerekben stacionárius síkáramlás alakul ki. Ezen az elven történő a vizsgálati módszerek irodalma szegényes.

Az ER folyadékok gyakorlati alkalmazása jelenleg még korlátozott, és elsősorban a járműtechnikára terjed ki. A járműtechnikai alkalmazás a legtöbb esetben lengéscsillapítást jelent (KUO 2006, NORESSON 2002, CHOI 1998), de kísérleti jelleggel már gépjármű-hajtásláncok bizonyos elemei is készülnek ER

elven alapuló berendezésekkel. Ilyen alkalmazás pl. az ER folyadékkal működő tengelykapcsoló (TAN 2006, PAPADOPOULOS 1998). A járműtechnikán kívüli alkalmazások jelenleg még nem terjedtek el, leginkább kutatás-fejlesztési téren találhatók meg. Az egyik legjelentősebb alkalmazási lehetőség, ami fejlesztés alatt áll, a hidraulikus alkalmazás. (YOSHIDA 2002, CHOI 2001, TANAKA 1997).

A létező alkalmazások és a lehetséges alkalmazásokat jellemző módon síkáramlási modellel lehet leírni. A jelenlegi kutatásokban azonban leggyakrabban viszkoziméteres vizsgálatokkal találkozhatunk, melynek eredményei csak megkérdőjelezhetően átültethetőek síkáramlási renszerekbe. Ezért a tématerület szempontjából létfontosságú lenne, hogy síkáramlási eredmények alapján folytatódjanak az ilyen jellegű kutatások

2.5. Kutatási célkitűzéseim a szakirodalom tükrében

Az elektroreologiai folyadékok szakirodalmát három fő csoportra lehet osztani: Az ER folyadékok anyagaival foglalkozó vizsgálatok, az ER effektus modellezésével, valamint az ER folyadékok felhasználási lehetőségeit vizsgáló kutatások. Az ER folyadékok vizsgálatát a kutatók jellemzően rotációs elven mérő vizsgálórendszerben hajtják végre. A hidraulikus rendszerekben azonban stacionárius síkáramlás történik. Stacionárius síkáramlási rendszerben végzett vizsgálatok irodalma szegényes. A szakirodalom áttekintésének tükrében a kutatás célkitűzése a következő:

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).

Célom 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:

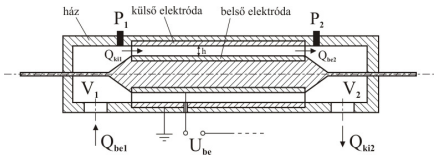
- ER folyadék létrehozása különböző alapfolyadékok és adalékanyagok felhasználásával.
- Alapfolyadékok és az adalékanyagok (ER folyadék) együttes vizsgálata és értékelése, különös tekintettel az adalék kiülepedésére és átütési szilárdságra vonatkozóan.

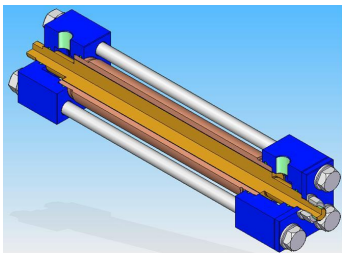
- Új mérőrendszer és vizsgálati eljárás kidolgozása, amely alkalmas a kutatásokban leggyakrabban alkalmazott rotációs elven mérő rendszerekkel **nem mérhető** ER tulajdonságok feltárására (stacionárius síkáramlási rendszerben).
- A kiválasztott ER folyadék dinamikus viselkedésének definiálása stacionárius 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. $\Delta p_{ER} = f(E,Q)$

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1. 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 (3.1. ábra) kerül beépítésre, amely az ER jelenség kialakulásának hatására – a folyadék nyírószilárdságának növelése által – hidraulikus fojtószeleppel analóg viselkedést mutat.





3.1. ábra Az „ER szelep”

A vizsgálat elve azon alapul, hogy a hidraulikus rendszert tápláló hidraulikus tápegység szabályozás nélkül is közelítőleg állandó térfogatáramot szállít, tehát nem feltétlenül szükséges a hidraulikus tápegység nagypontosságú szabályozása. Azzal a feltételezéssel élve, hogy a szállított térfogatáram a vizsgálóberendezésben, illetve a vizsgálóberendezésnek azon a részén, ahol az ER jelenség kialakul, nem változik, (a folyadék összenyomhatósága elhanyagolható) és az áramlási tulajdonságokat befolyásoló változó tényező a folyadékra ható villamos tér, akkor a vizsgálóberendezés bemenete és kimenete közti nyomásesés-változás az elektromos tér függvénye. Ezt a megfontolást figyelembe véve modellezhető a nyomásértékek ismeretében a villamos tér folyadékra gyakorolt hatása, valamint a folyadék több áramlási tulajdonsága.

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 nyomásesésből és térfogatáram felhasználásával számítható a folyadékban a villamos térerősség hatására ébredő nyírófeszültség nagysága:

$$\Delta p_{12} = \Delta p_N + \Delta p_{ER}$$

$$\Delta p_{12} = \frac{12 \cdot \eta \cdot L \cdot Q}{b \cdot h^3} + \frac{2 \cdot L \cdot \tau_{ER}}{h} \Rightarrow \tau_{ER} \tag{18}$$

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 nyomásesés (CHOI 2001).

3.2. Az ER vizsgáló rendszer tervezése, szimulációja

Az ER szelep matematikai modellje

A tervezés során az első lépés az ER szelep működését leíró matematikai modell felállítása. A szelep felépítése a matematikai modell szempontjából öt részre bontható. Ezek a következők:

- A hidraulikus kör nyomóágának matematikai leírása.
- A szelep belépő térfogatának (hidraulikus) egyensúlyi egyenletei.
- Az ER jelenség kialakulásának matematikai leírása (Bingham-modell).
- A szelep kilépő térfogatának egyensúlyi egyenletei.
- A visszafolyóág matematikai leírása.

A matematikai modell felállításánál alapvető fontosságúak a modellben alkalmazott paraméterek, jelen esetben a tervezett vizsgálóberendezés geometriai adatai, valamint az anyagjellemzők. Ezek meghatározásához a szakirodalomban található hasonló jellegű mérések során alkalmazott paraméterek szolgáltatták a kiindulási alapot. Ezeken az információkon felül konstrukciós okok is befolyásolják az alkalmazott paraméterek értékeit.

A matematikai modell felállítása

A szelepbe beáramló térfogatáram a belépő keresztmetszet előtti és utáni nyomások különbségéből, az A_1 keresztmetszetből, valamint a folyadék sűrűségűből határozható meg, a következő összefüggéssel:

$$Q_{be1} = \mu \cdot A_1 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_0 - p_1)}{\rho_f}} \tag{19}$$

A hasonló kialakítású kiömlő csatornára felírható:

$$Q_{ki2} = \mu \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_2 - p_3)}{\rho_f}} \tag{20}$$

A (18) és a (19) összefüggésekben μ az áramlási tényező, $p_{0...n}$, n=3 a szelep be- és kilépési pontján, valamint az elektródák előtt és után fellépő nyomások értéke, ρ_f a folyadék sűrűsége. A szelepen belül az elektródák előtt található egy V_1, valamint utána egy V_2 térfogatú kamra. A jelenlegi kialakításban az elektródák előtt illetve után elhelyezkedő kamrák térfogata azonos. A kamrákba be- és kilépő térfogatáramok egyensúlya, valamint a nyomásváltozás hatására bekövetkező térfogatváltozások figyelembevételével a következő egyensúlyi egyenletek írhatók fel:

$$Q_{be1} = \frac{V_1}{E_f} \cdot \frac{dp_1}{dt} + Q_{ki1} \tag{21}$$

$$Q_{be2} = \frac{V_2}{E_f} \cdot \frac{dp_2}{dt} + Q_{ki2} \tag{22}$$

A (20) és a (21) összefüggésben E_f a folyadék rugalmassági modulusa. A szelep azon részegysége, ahol az ER jelenség kialakul, a két koncentrikusan elhelyezett elektróda közti hengeres térfogat, amely az elektródák hosszából *(L)*, a belső elektróda sugarából *(r)*, valamint az elektródák között kialakított rés méretéből számítható. Azt az egyszerűsítést felhasználva, hogy az elektródák között a folyadék összenyomhatósága elhanyagolható:

$$Q_{ki1} = Q_{be2}$$

Ammenyiben az ER effektusból eredő nyírószilárdság növekedés nulla akkor az elektródák között áthaladó térfogatáramra felírható a következő összefüggés (18 egyenlet alapján):

$$Q_{ki1} = Q_{be2} = \frac{\Delta p_N \cdot b \cdot h^3}{12 \cdot \eta \cdot L} \tag{23}$$

A (22) összefüggésben L a szelep elektródáinak hossza, η az ER folyadék dinamikai viszkozitása, b a belső elektróda kerülete, h az elektródák közötti résméret.

Az ER szelepen áthaladó folyadék nyomásesése két részből adódik össze. Az első a folyadék ideálisan viszkózus tulajdonságával magyarázható (Δp_N), a

második tag a villamos térerősségből adódik (Δp_{ER}). Így a Bingham modell értelmében:

$$\Delta p_{12} = \frac{12 \cdot \eta \cdot L \cdot Q_{ki1}}{b \cdot h^3} + \frac{2 \cdot L \cdot \tau_{ER}}{h}$$

Az összeg első tagja a térfogatáramtól, a folyadék dinamikai viszkozitásától illetve a geometriai paraméterektől függ. A második tag a geometriai méretek valamint a villamos tér hatására növekvő nyírószilárdság függvénye és független a térfogatáram nagyságától. Az összefüggésben szereplő τ_{ER} nagysága az alkalmazott ER folyadék anyagjellemzőitől és a villamos tértől függ:

$$\tau_{ER} = \alpha \cdot E^{\beta}$$

Az effektus kialakulásához időre van szükség. Ezt egy csúsztatófeszültség-idő függvény jeleníti meg:

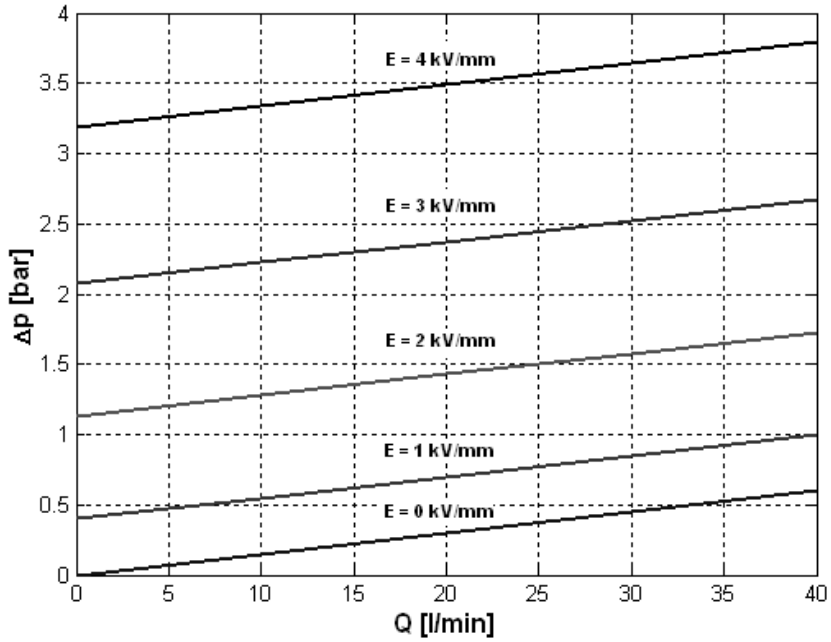
$$\tau_{ER}(t) = \alpha \cdot E^{\beta} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \tag{24}$$

A (23) összefüggésben α és β paraméterek, T időállandó, melynek értéke az alkalmazott villamos térerősségtől is függ. Az ismertetett összefüggésekkel leírható az ER szelep működése.

A szelep viselkedését leíró matematikai modell alapján az előtervezés során egy szimulációs modellt állítottam fel MATLAB program segítségével M3./1. ábra (melléklet) (FARKAS 1999). Az ER folyadék tulajdonságainak modellezésére szakirodalomban található paramétereket alkalmazva a szelep fő geometriai méreteit meghatároztam.

Bár tisztán elkülönülnek a rotációs és a síkáramlási vizsgálati elrendezésben a mérhető paraméterek típusa és jelentőségük, azonban a tervezés ebben a fázisában mégis kénytelen voltam rotációs elveken kimért paraméterek alapján dolgozni, mivel a síkáramlási kísérletek eredményei korlátozottak. A szimulációból kapott eredmények azonban nagyságrendileg megfelelőek lehetnek ahhoz, hogy a teljesen új vizsgálóberendezésemmel mérni tudjam a síkáramlási ER jelenséget.

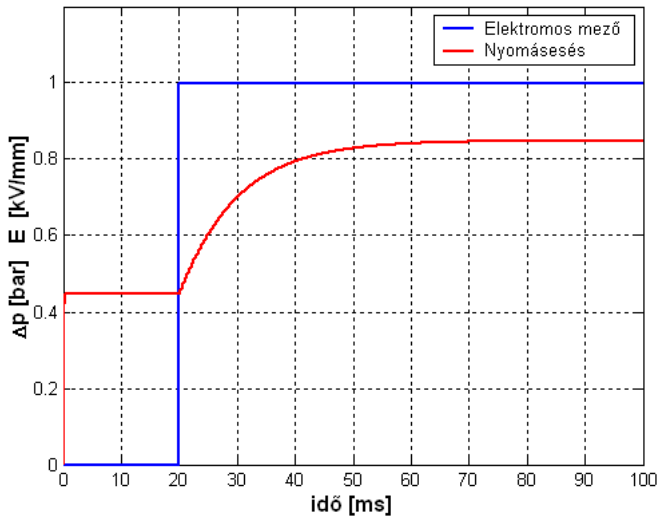
A szimulációs modell futtatásának eredményei az 3.2. ábrán láthatóak. Elsőként a szelepen eső nyomást vizsgáltam a térfogatáram illetve a villamos térerősség függvényében.



3.2. ábra. Nyomásesés a szelepen a térfogatáram és a villamos térerősség függvényében

Az 3.2. ábrán a legalsó egyenes mutatja a szelepen a nyomásesést, ha nincs villamos térerősség. Ez newtoni folyadékok tulajdonságainak megfelelő viselkedést mutat, azaz növelve az átfolyó térfogatáramot, lineárisan emelkedik. Ezt követően 1 - 4 kV/mm-ig növelve a térerősséget az egyenesek felfelé tolódnak a Bingham modellnek megfelelően.

A 3.3. ábrán a szelepen kialakuló nyomásesés időbeni változását vizsgáljuk az villamos tér egységugrás változás hatására.



3.3. ábra A rendszer válasza (nyomásesés) egységugrás vizsgálójel hatására

Ennél a szimulációs vizsgálatnál állandó Q=30 l/min térfogatáram halad át a szelepen, melynek hatására villamos tér nélkül mintegy 0,45 bar-os nyomásesés adódik. Az villamos tér nagyságát 20 ms-nál 0-ról 1 kV/mm-re növelve egységugrás szerűen, megfigyelhető, hogy a nyomásesés 30 ms alatt 0,82 bar-ra növekedett.

3.3. Az ER vizsgáló berendezés hidraulikus és elektromos rendszere

A hidraulikus rendszer összeállítása

A hidraulikus rendszerrel szemben támasztott követelmények:

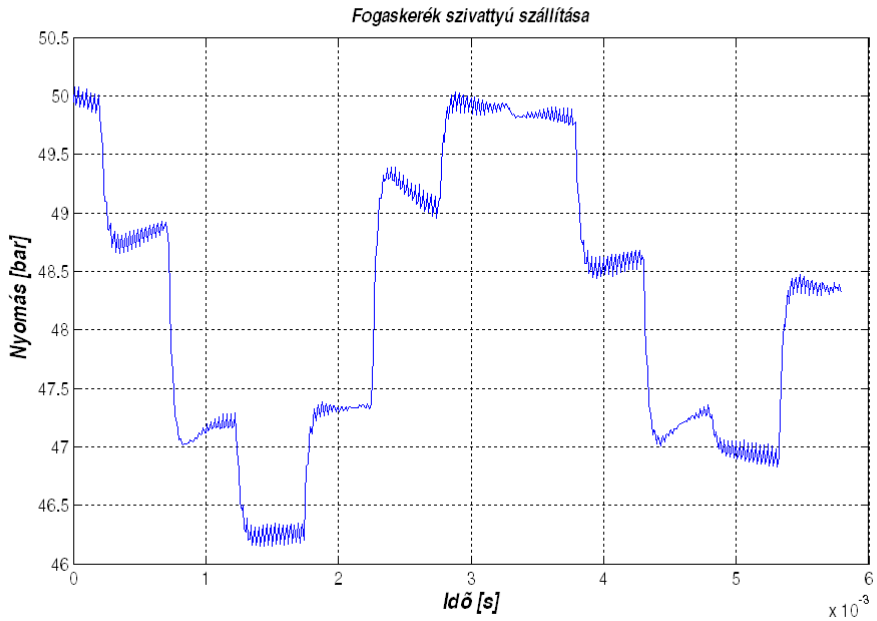
- Állandó, lüktetésmentes térfogatáram előállítása.
- Az ER folyadék hőmérsékletének állandó értéken tartása.
- A nyomás, térfogatáram, hőmérséklet, feszültség mérése.
- A hajtó rendszert tápláló hidraulika folyadék nem keveredhet a mérni kívánt ER folyadékkal.

Az állandó térfogatáram kritérium teljesítésére egy hidraulikus térfogatáram-állandósító ad lehetőséget, mely egy változtatható keresztmetszetű fojtóból, és egy nyomáskülönbség-állandósítóból áll. Funkciója: terheléstől függetlenül állandó térfogatáramot biztosít, ezzel egy munkahenger sebességét, vagy egy hidromotor fordulatszámát lehet állandó értéken tartani. Az eszköz reakcióideje nagyságrendekkel nagyobb, mint az ER folyadék válaszideje, így az állandósult térfogatáramra való beállás előtt a mérés pontatlanságokat eredményezhet. Ezek alapján a feszültséget az ER szelepre rákapcsolni csak a már állandósult térfogatáramnál lehet. Az ilyenkor létrejövő hidraulikus akadály miatt szintúgy nyomás és térfogatáram ingadozás keletkezik, melyet a térfogatáram-állandósító

csak az ER szelephez képest lassan tudja kompenzálni. E miatt kell a térfogatáramot is mérnünk egy TURBOQUANT térfogatáram mérővel, hogy a számítások során ezt matematikailag kompenzálni tudjuk.

A kétutas áramállandósító relatív lassú működése miatt a térfogatáram állandósítás megvalósítására alternatívaként alkalmazásra kerül egy arányos útszelep a melynek segítségével a térfogatáram nagy pontossággal és gyors válaszidővel szabályozható.

Az ER hatás nélkül a szelep nyomásesése a geometriájából valamint a folyadék alap viszkozitásából adódik, így az a térfogatáram változás hatására módosul. Ennek értelmében ezt a feladatot is a térfogatáram-állandósításnak, illetve a matematikai kompenzációnak kell megoldania. A nyomáslüktetés a tápegység fogaskerék szivattyújának a jellegzetessége. A fogaskerekek geometriájából adódóan, egyenletes forgási sebesség esetén, a fogkapcsolat ideje alatt a fog és a fogárok nem állandó mennyiségű fluidumot préselnek ki.

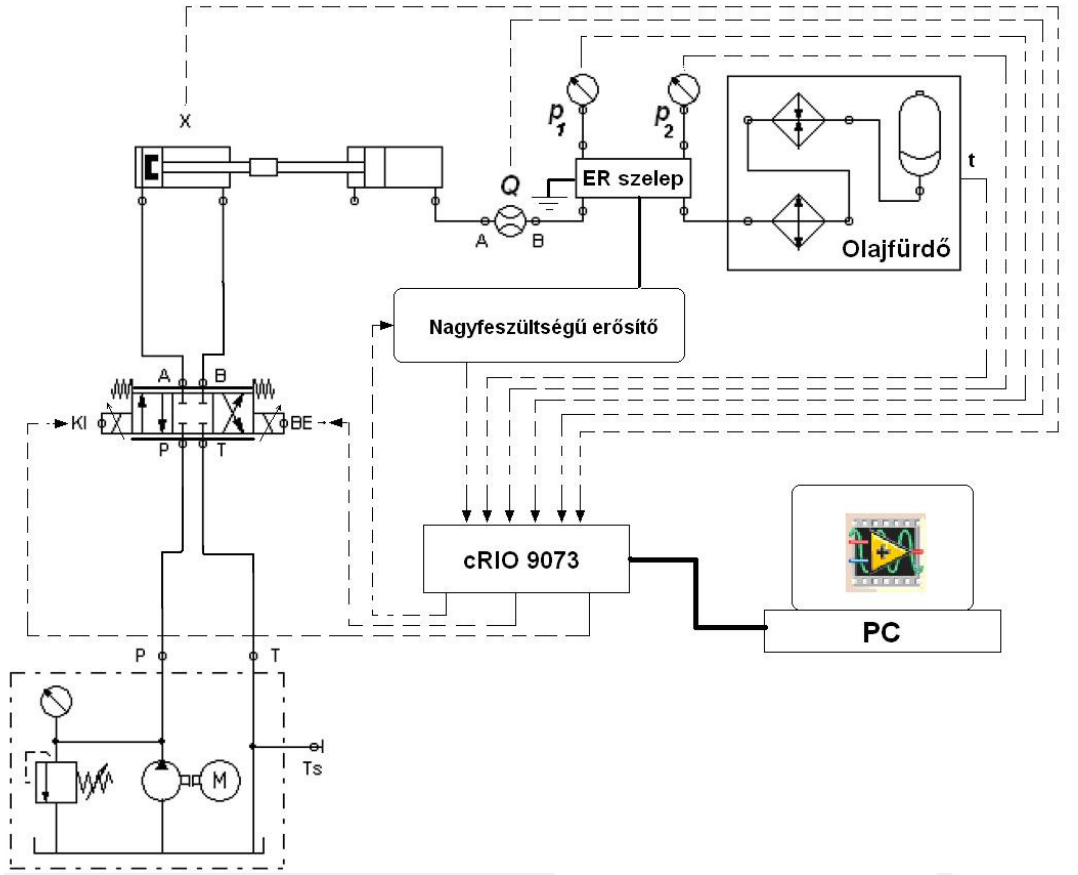


3.4. ábra Fogaskerék szivattyú nyomáslüktetése

A 3.4. diagramon látható, hogy a lüktetés periódus ideje megközelítőleg 3,5 ms, mely a feldogozott irodalom alapján az ER folyadék egységugrásra adott válaszának felfutási idejével egyezik meg. A szelepen többek közt nyomáskülönbségből számítjuk a τ_{ER}-t, így a nyomásingadozás megszüntetése létfontosságú a mérés szempontjából. A megoldás a folyadék rugalmasságának a kihasználása, egy nagyobb kompressziós tér esetén a folyadék összenyomhatósága csillapítaná ezt a lüktetést. A kompressziós terek kialakítása végett hoztam létre a

munkahenger-munkahenger energiaátszármaztatást. A nyomó munkahenger meghajtása normál hidraulikus rendszerrel történik, mely a másik munkahengert hajtja. A hajtott munkahenger egyik oldalát, hidraulikus csatlakozás nélkül, levegővel engedjük megtelni, illetve visszajáratásnál kiürülni. A másik oldalát használjuk az ER folyadékkal töltött kör ellátására (dugattyús szivattyú). Az így keletkezett két kompressziós tér, képes a nyomáslüktetést megszüntetni, másrészt az ER folyadék mennyiség felhasználását is csökkenti. Továbbá ezzel a lépéssel megoldást nyert a hidraulika olaj és az ER folyadék elkülönítése egymástól.

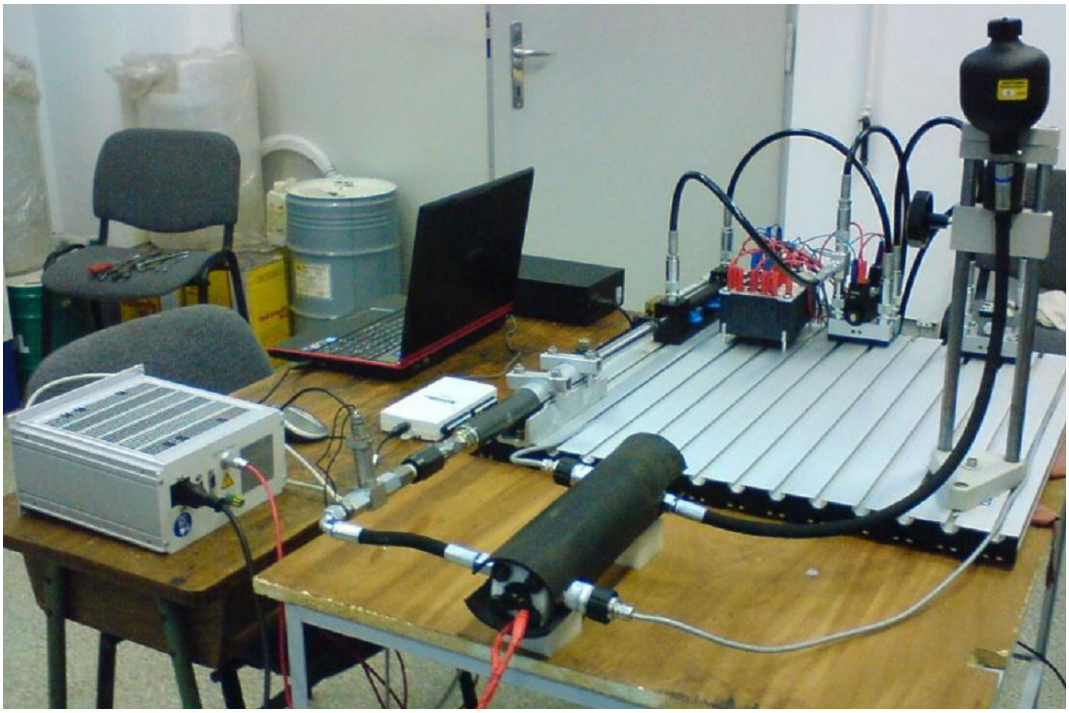
További, a kapcsolási rajzon (3.5. ábra) feltüntetett elemek funkciója: a hidro-akkumulátor nem csak a folyadék tárolását, és hűtési lehetőségét valósítja meg, 6 bar-ra nitrogénnel feltöltött membránja képes a meghajtott munkahengert visszajáratásnál a mérés szempontjából kezdeti pozícióba visszajuttatni. A térfogatáram-mérő előtt elhelyezett csővezetékbe építhető fojtószelep elzáró szelepként funkcionál a körben, hiszen feltöltésként a hajtott munkahengert használtuk töltésre, és a fojtószelep meggátolta, hogy szerelés közben folyadék szökjön el. Az útváltó pedig a hajtó munkahenger kivezérlését, és úszó állapotba helyezését teszi lehetővé. Az ismertetett mérőrendszer hidraulikus kapcsolása a M5./1. ábrán (melléklet) látható, illetve elemeinek listája a M5./1. táblázatban (melléklet) található.



3.5. ábra A mérőrendszer hidraulikus és elektromos kapcsolása

Az elektronikus rendszer összeállítás

Az elektronikus rendszer főbb részei, egy 24 V-os egyenáramú tápegység (National Instruments gyártmány), egy elektromos kapcsolótábla (Festo gyártmány), egy NI CompactRIO™ típusú ipari vezérlő, RheCon 2.0 típusú nagyfeszültségű erősítő, valamint a hidraulikus rendszer összeállításánál már felsorolt elektrohidraulikus elemek (útjeladó, áramlásmérő, nyomásszenzorok, útváltók). Az alkalmazott NI CompactRIO™ típusú ipari vezérlő moduláris felépítésű, ezen modulok közül én az analóg-digitális konvertert használtam az útjeladó elmozdulással arányos feszültségjelének a mérésére a szabályozáshoz, valamint az analóg nyomásszenzorok bar-ban kifejezett nyomás értékeknek megfelelő feszültségjeleinek mérésére adatgyűjtés céljából. Az arányos útváltót pedig egy arányos erősítőkártyán keresztül analóg kimeneti modult felhasználva vezéreltem. A CompactRIO™ kommunikációja a számítógéppel egy Ethernet kábelen történt. A mérőrendszer elektromos kapcsolása az M5./2. ábrán (melléklet) látható.



3.6. ábra ER mérőrendszer

3.4. A vizsgálat irányítása és mérési adatok gyűjtése

Valós szabályozás egy az NI CompactRIO™-n futó valósidejű szabályozó algoritmus, és egy a személyi számítógépen futó az adatbevitelért és megjelenítésért, valamint adatmentésért felelős program egységéből áll M4./1-2-3. ábra (melléklet). Ezek együttese képes a hidraulikus munkahenger nagy dinamikájú mozgásához igazodó gyors számítási és lassú adatmentési folyamatokat ellátni. A valósidejű szabályozást a NI CompactRIO™-ba épített úgynevezett FPGA (Field-Programmable Gate Array - Helyszínen Programozható, Logikai Kapukat Tartalmazó Tömb) egységgel valósítottam meg M4./4.ábra (melléklet). Ez egy a CPU architektúrától teljesen eltérő felépítésű, számításokat végző elem, mely 3 fő részből áll, a konfigurálható logikai egységekből, az ezek közötti újraprogramozható összekötésekből, valamint a ki- és bemeneti blokkokból. Az FPGA-n futó valósidejű szabályozó programot a National Instruments LabVIEW 2009-es szoftvercsomag FPGA Toolkit-ének segítségével készítettem el. Ez egy a LabVIEW felületéhez hasonló grafikus programozási részből, valamint egy az elkészült programot az FPGA-ra kódoló és optimalizáló Xilinx Compile Server-ből áll. A mérési adatok mintavételezési frekvenciája 10 kHz a mért adatokat PC-n szöveges állományban mentem.

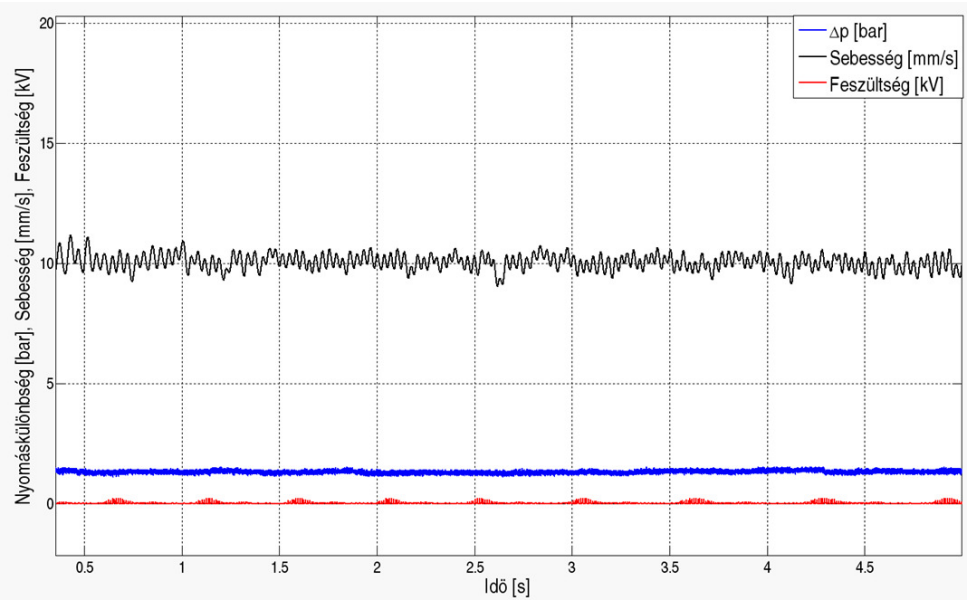
Mért adatok:

- Hajtó munkahenger pozíciója
- ER szelep belépő csatlakozóján mért nyomás
- ER szelep kilépő csatlakozóján mért nyomás
- Hőmérséklet
- Kivezérelt feszültség
- ER szelep elektródái között átfolyó áramerősség
- ER szelepen átfolyó térfogatáram

A mérési adatok utófeldolgozását MATLAB program segítségével hajtottam végre.

A mérőrendszer validálása

A mérések megkezdése előtt szükséges a mérőrendszer mérési pontosságának meghatározása. Erre a célra ismert viszkozitású szilikonolajat használtam. A gyártó által adatlapon feltüntetett viszkozitás 25°C-on η = 50 mPas. A mérőrendszer feltöltését és légtelenítését követően a szilikon olaj hőmérsékletét szabályozható olaj fürdővel 25 °C-ra állítottam. Ezután villamos tér bekapcsolása nélkül állandó térfogatáramot biztosítva mértem a nyomásesést az ER szelepen.



3.7. ábra a mérőrendszer validálása

A mért nyomásesésből és térfogatáramból meghatároztam a folyadék viszkozitását.

$$\eta = \frac{\Delta p \cdot b \cdot h^3}{12 \cdot L \cdot Q} \tag{25}$$

Az összefüggésben L a szelep elektródáinak hossza, η a folyadék dinamikai viszkozitása, b a belső elektróda kerülete, h az elektródák közötti résméret Q térfogatáram, Δp nyomásesés a szelepen. A mért viszkozitás $\eta = 0{,}0503 \pm 0{,}00062\ Pas$. A mérőrendszerem helyes működését ezzel a méréssel sikerült bizonyítanom.

3.5. ER folyadék előállítása

A vizsgálatokat egy németországi cég (FluDiCon) által gyártott ER folyadékkal kezdtem. Ezzel a folyadékkal a célom a vizsgáló berendezés tesztelése volt. A további méréseket saját magam által előállított ER folyadékkal kívánom végezni. Ehhez szükséges különböző alapanyagok vizsgálata és a keverési kísérletek alapján kiválasztani azt az anyagpárosítást, amely alkalmas ER folyadék előállítására.

3.6. 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 kiülepedését, ami az ER folyadék alkalmazhatóságának alapvető kritériuma. A vizsgálatba vont anyagok:

Alapfolyadékok:

- Szilikon olaj
- SN 150A (46) ásványi olaj

Diszpergensek:

- Komad 309A
- Komad 308

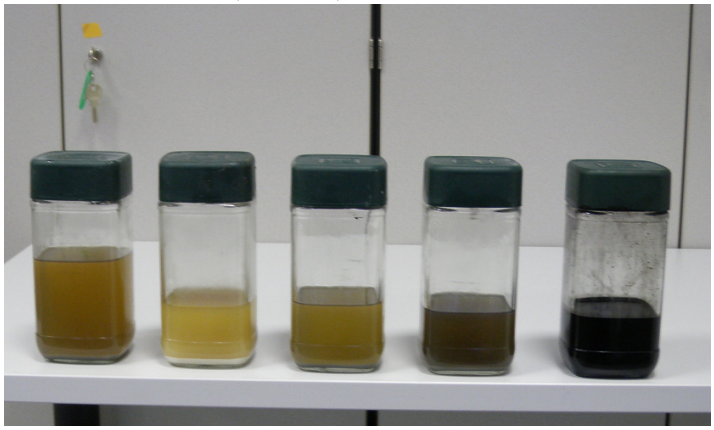
Szilárd alkotó:

- Keményítő
- Talcum (LUZENAC H100)
- TiO_2 (CINKARNA RC8203)
- PTFE (ZONIL MP 1000)
- Korom

Keverési arány:

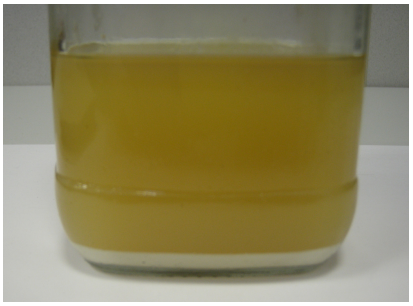
- 0 tömegszázalék
- 10 tömegszázalék
- 20 tömegszázalék
- 30 tömegszázalék

A 3.8. képen SN 150 A ásványi olajjal végzett kísérletek eredményei láthatóak. Felhasznált szilárd alkotók: teflon, korom, talcum különböző koncentrációban.



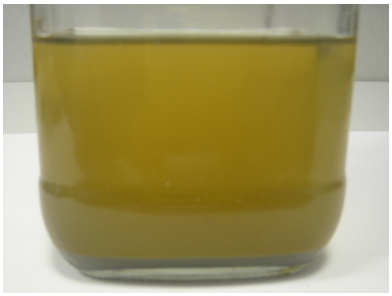
3.8. ábra Keverési minták

A keverés technológiája: Bázisolajba (SN-150A) beadagolom a diszpergenst (Komad 309/A) adott mennyiségbe. Az összekevert anyagot olajfürdőben felmelegítem 70 ^{o}C –ra 40 percig keverem hőntartás mellett. Ezt követően intenzív keverés mellett hozzáadagolom az adalékot (20 perc). Ezt követően 40 percig keverem maximális fordulaton hőntatrtás mellett.



3.8. ábra PTFE 5%

A 3.8. ábrán SN 150A bázisolajba 5%-os koncentrációba bekevert teflon szuszpenzió látható 20 perc ülepedési időt követően. Az üveg alján jól kivehető, hogy a részecskék kiülepedtek.



3.9. ábra Talcum 5%

A 3.9. ábrán SN 150A bázisolajba 5%-os koncentrációba bekevert talcum szuszpenzió látható 20 perc ülepedési időt követően. Az üveg alján jól kivehető, hogy a részecskék kiülepedtek. Korommal végzett kísérletek hasonló eredménnyel zárultak.

3.10. ábra TiO_2 10 %

A 3.10. ábrán SN 150A bázisolajba 10%-os koncentrációba bekevert TiO_2 szuszpenzió látható 24 óra ülepedési időt követően. Ebben az esetben stabil szuszpenziót kaptam, amely szerkezetét tekintve alkalmas ER folyadékként történő alkalmazásra. A 3.1. táblázat a keverési vizsgálatok eredményeinek kivonata látható.

3.1. 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

3.7. 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).

Kísérleteknél alkalmazott térfogatáramok:

3.2. 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

A villamos teret a következő lépésekben változtatom:

3.3. 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

Az alkalmazott ER folyadék adalékkoncentrációi:

3.4. 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, illetve beállításonként 5 ismétlés fogok végezni, hogy megfelelően le tudjam írni a jelenségeket. Az összesen 600 mérésből a következő paramétereket fogom meghatározni:

Δp_N	-	alap viszkozitásból adódó nyomásnövekedés	[Pa]
Δp_1	-	ER hatásból adódó elsődleges nyomásnövekedés	[Pa]
Δp_2	-	ER hatásból adódó másodlagos nyomásnövekedés	[Pa]
dp/dt	-	másodlagos nyomásnövekedés intenzitása	[Pa/s]
τ_1	-	elsődleges nyomásnövekedés válaszideje	[s]

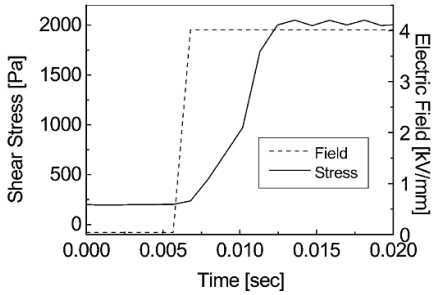
Az előkísérletek alkalmával figyeltem meg olyan jelenségeket, melyet az eddigi szakirodalom nem használt (abból adódóan, hogy rotációs elven mérő vizsgáló rendszerekkel ezeket a jelenségeket nem lehet kimutatni). Ilyen a Δp_2 és dp/dt, melyeknek a pontos értelmezését az eredmények fejezetben ismertetem.

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”. Addig végeztem a keverést, amíg a folyadék kiindulási viszkozitási értékét el nem érte.

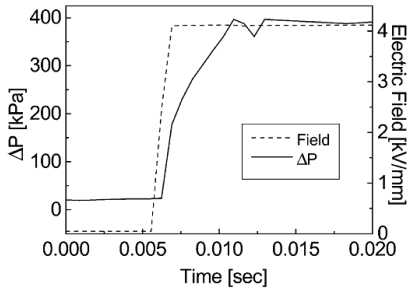
4. EREDMÉNYEK

4.1. A nyomásnövekedés folyamatának elemzése

A vizsgálatok során a nyomásnövekedés az előzetesen feltételezett lefutással és a szakirodalomban bemutatottal szemben más jelleget mutat. A következő ábrák tipikus nyomás felfutást mutatnak Couette-áramlás (share mode) és stacionárius síkáramlás (flow mode) módban (LEE 2002).

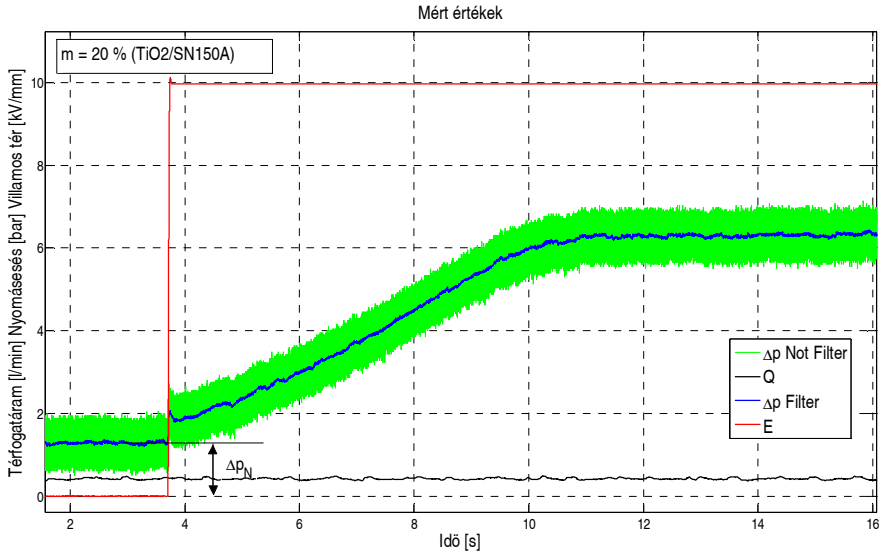


4.1. ábra Nyomás felfutás Couette-áramlás (share) módban (LEE 2002)



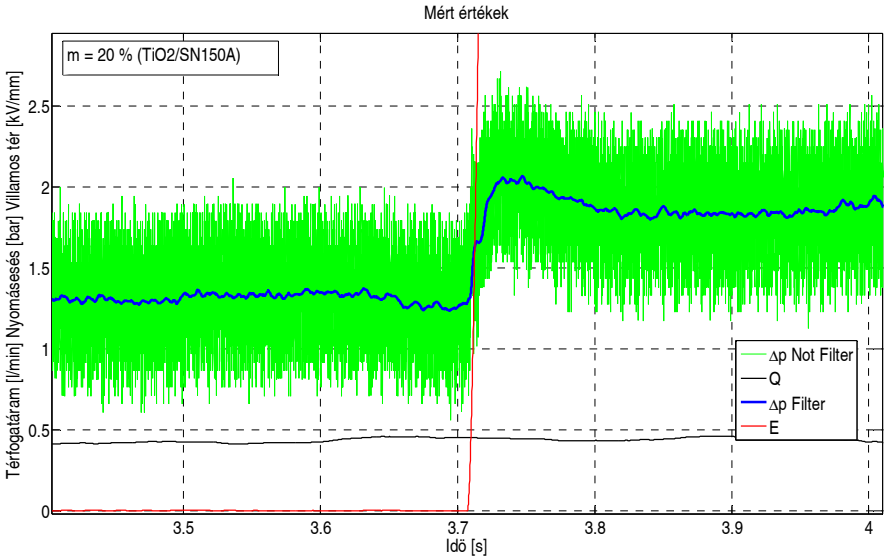
4.2. ábra Nyomás felfutás stacionárius síkáramlás (flow) módban (LEE 2002)

Az általam létrehozott vizsgálati rendszerben (ER szelep) stacionárius síkáramlás történik. A szakirodalomban látott nyomásfelfutással ellenben az általam vizsgált esetek mindegyikében ettől eltérő nyomásfelfutást tapasztaltam. A következőkben egy jellemző mérési eredményt mutatok be és elemzem annak lefutását.



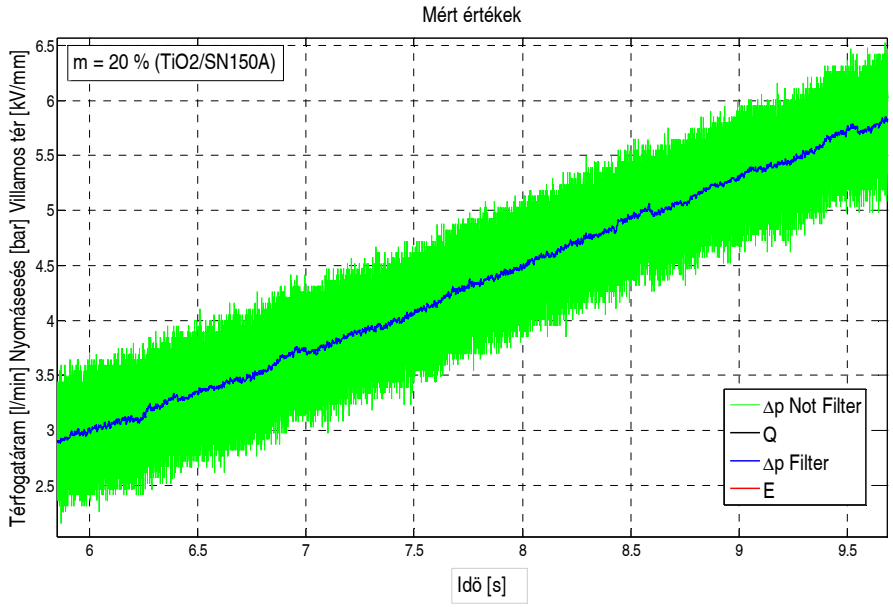
4.3. ábra Nyomásfelfutás jellege állandó térfogatáram és egységugrás alakú villamos tér bekapcsolását követően. (m = 20 %, E = 10 kV/mm, Q = 0,42 L/min)

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



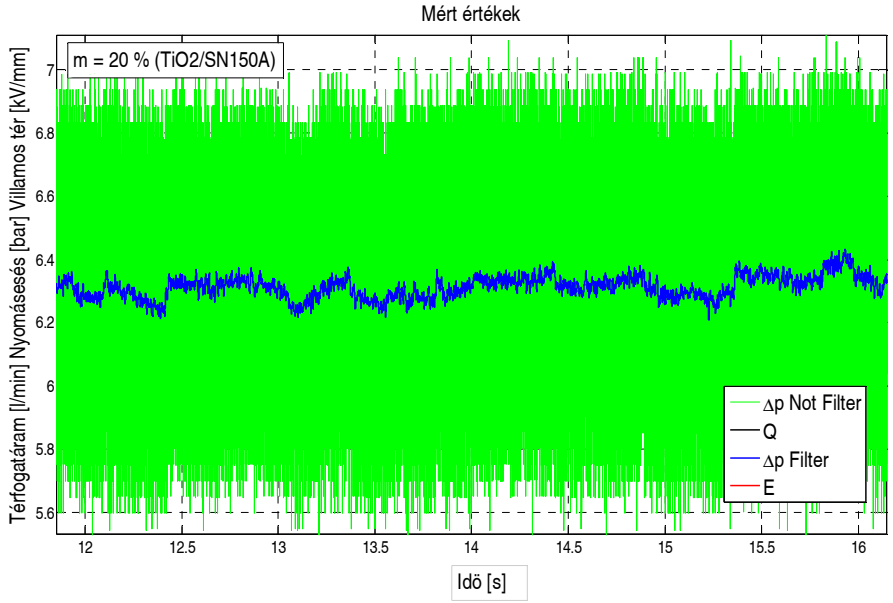
4.4. ábra Nyomásfelfutás jellege állandó térfogatáram és egységugrás alakú villamos tér bekapcsolását követően. Részlet. (m = 20 %, E = 10 kV/mm, Q = 0,42 L/min)

A villamos tér bekapcsolását követően egy gyors nyomásnövekedés tapasztalható melynek válaszideje (τ_1) ennél a mérésnél 28 ms. 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}**).



4.5. ábra Nyomásfelfutás jellege állandó térfogatáram és egységugrás alakú villamos tér bekapcsolását követően. Részlet. (m = 20 %, E = 10 kV/mm, Q = 0,42 L/min)

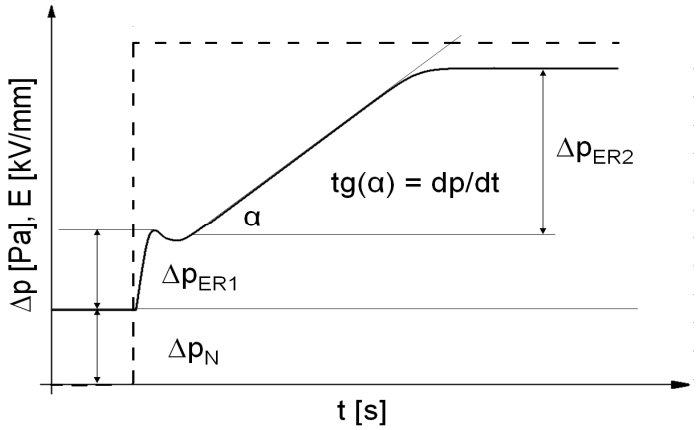
A másodlagos nyomásnövekedés egy maximális értékig folytatódik. Ennek a másodlagos nyomásnövekedésnek az intenzitása több nagyságrenddel kisebb az elsődleges nyomásnövekedéshez képest. Jellege lineáris trenddel közelíthető, ennek a szakasznak a meredekségét **másodlagos nyomásnövekedés intenzitásának**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



4.6. ábra Nyomásfelfutás jellege állandó térfogatáram és egységugrás alakú villamos tér bekapcsolását követően. Részlet. (m = 20 %, E = 10 kV/mm, Q = 0,42 L/min)

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

A nyomásfelfutás intenzitása az elsődleges nyomásnövekedésnél 48,9 bar/s míg a másodlagos nyomásnövekedésnél 0,6947 bar/s. Ez ennél a mérésnél 70,4 szer gyorsabban növekszik a nyomás az első szakaszban, mint a másodikban.



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]

4.7. ábra A nyomásnövekedés szakaszai stacionárius síkáramlási rendszerben

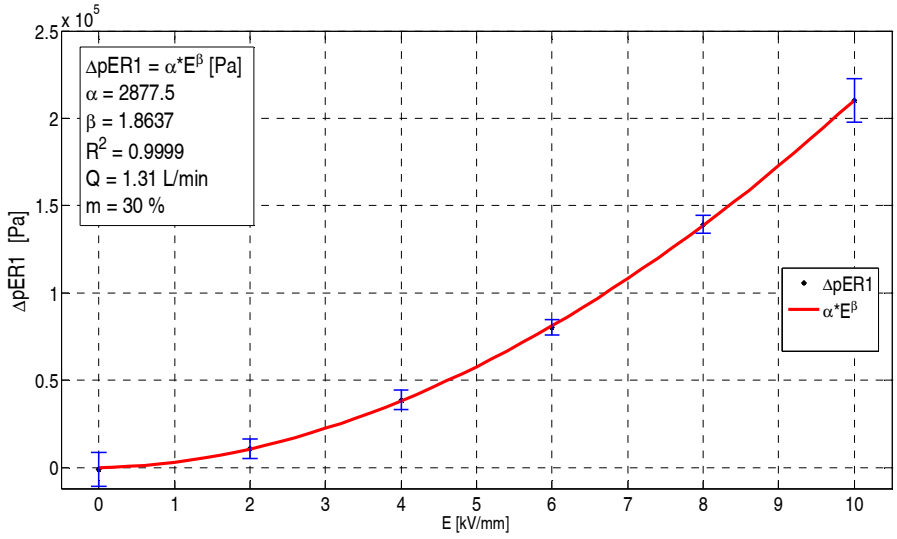
Megjegyzés: A villamos térerősség SI mértékegysége [V/m], de a szakirodalomban elterjedt mértékegység a [kV/mm]. Ugyanígy a térfogatáram esetében a hidraulikában elterjedt mértékegység a [liter/min]. A továbbiakban a diagramokon ezeket a mértékegységeket használom. A liter esetében a L betűt használom az egyértelmű jelölés érdekében ugyanis a doktori szabályzat által előírt betűtípus esetében a kis l betű könnyen összetéveszthető az 1 számmal.

4.2. Az elsődleges nyomásnövekedés villamos térerősség és térfogatáram függésének vizsgálata

Ennél a vizsgálatnál a 30 tömegszázalékos adalék koncentrációjú TiO_2/SN 150A keveréket alkalmaztam. Szakirodalom alapján az összefüggést a,

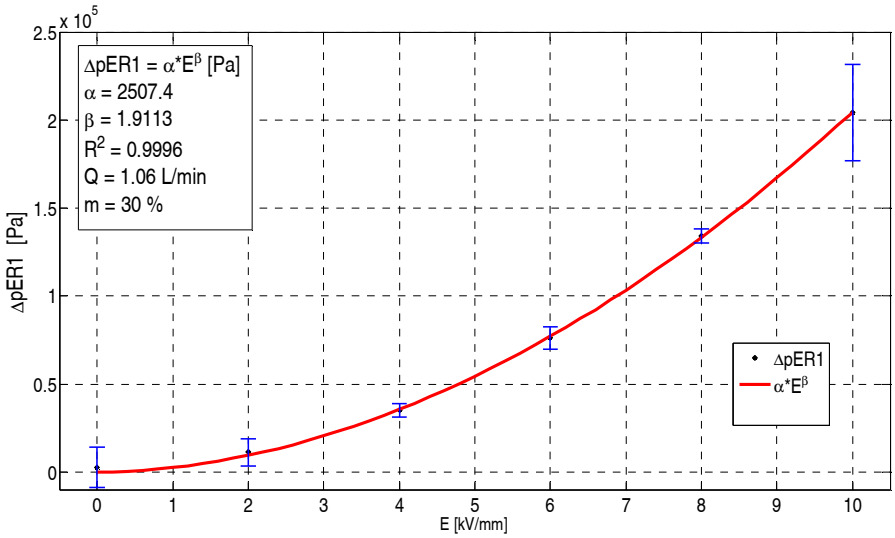
$$\Delta p_{ER1} = \alpha \cdot E^{\beta} \tag{26}$$

alakú hatványfüggvénnyel közelítem, ahol E [kV/mm] villamos térerősség, α [Pa · mm/kV] és β [-] paraméterek. A következőkben különböző térfogatáramoknál végzett kísérletet mutatok be. A diagramokon látható a különböző villamos tér alkalmazásánál mért nyomásesések átlagértéke valamint azok szórása. A piros függvény az ismertetett alakú összefüggés a legkisebb négyzetek módszere alapján az átlagértékekre illesztve.



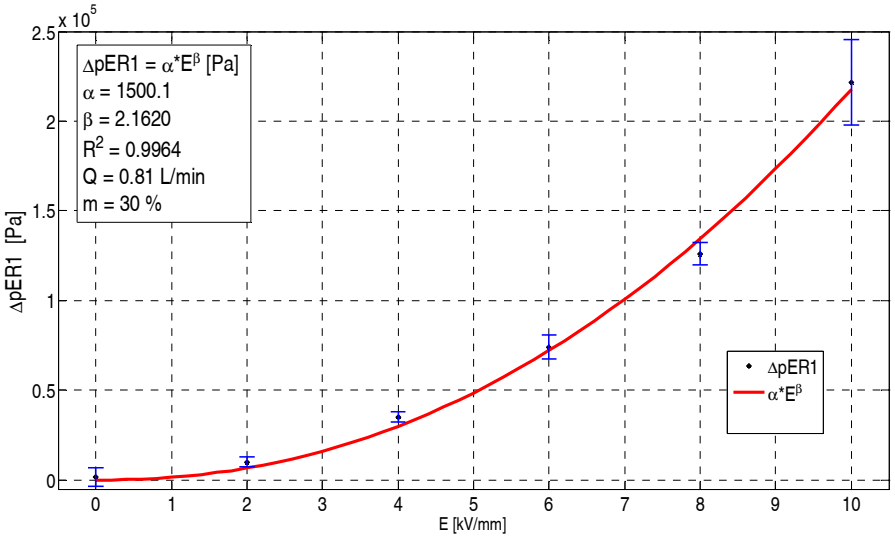
4.8. ábra Elsődleges nyomásnövekedés villamos térerősség függvénye 1,31 L/min térfogatáram esetén

A diagram az elsődleges nyomásnövekedés (Δp_{ER1}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Villamos térerősség: E = 0, 2, 4, 6, 8, 10 kV/mm) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\Delta p_{ER1} = \alpha \cdot E^{\beta}$) ábrázolja, amelynek paramétereit (α, β) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, térfogatáram 1,31 L/min.



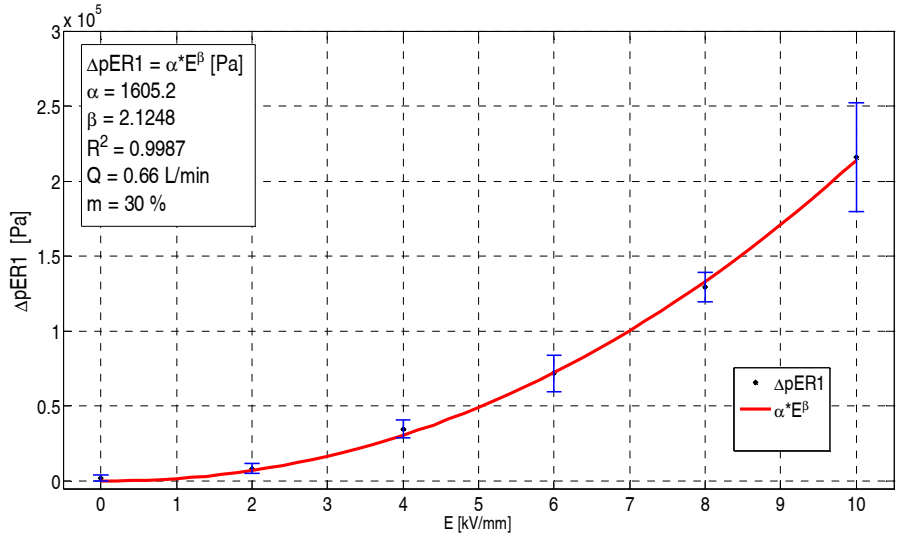
4.9. ábra Elsődleges nyomásnövekedés villamos térerősség függvénye 1,06 L/min térfogatáram esetén

A diagram az elsődleges nyomásnövekedés (Δp_{ER1}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Villamos térerősség: E = 0, 2, 4, 6, 8, 10 kV/mm) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\Delta p_{ER1} = \alpha \cdot E^{\beta}$) ábrázolja, amelynek paramétereit (α, β) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, térfogatáram 1,06 L/min.



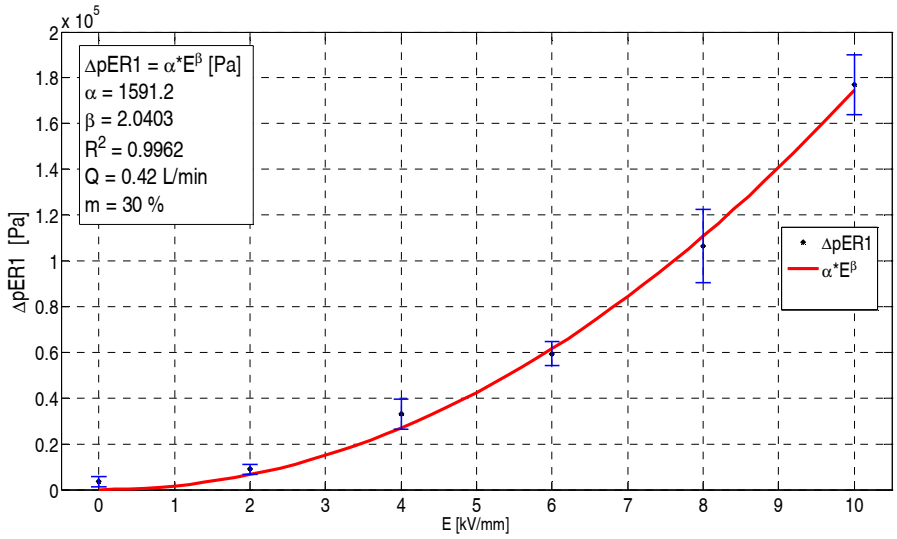
4.10. ábra Elsődleges nyomásnövekedés villamos térerősség függvénye 0,81 L/min térfogatáram esetén

A diagram az elsődleges nyomásnövekedés (Δp_{ER1}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Villamos térerősség: E = 0, 2, 4, 6, 8, 10 kV/mm) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\Delta p_{ER1} = \alpha \cdot E^{\beta}$) ábrázolja, amelynek paramétereit (α, β) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, térfogatáram 0,81 L/min.



4.11. ábra Elsődleges nyomásnövekedés villamos térerősség függvénye 0,66 L/min térfogatáram esetén

A diagram az elsődleges nyomásnövekedés (Δp_{ER1}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Villamos térerősség: E = 0, 2, 4, 6, 8, 10 kV/mm) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\Delta p_{ER1} = \alpha \cdot E^{\beta}$) ábrázolja, amelynek paramétereit (α, β) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, térfogatáram 0,66 L/min.



4.12. ábra Elsődleges nyomásnövekedés villamos térerősség függvénye 0,42 L/min térfogatáram esetén

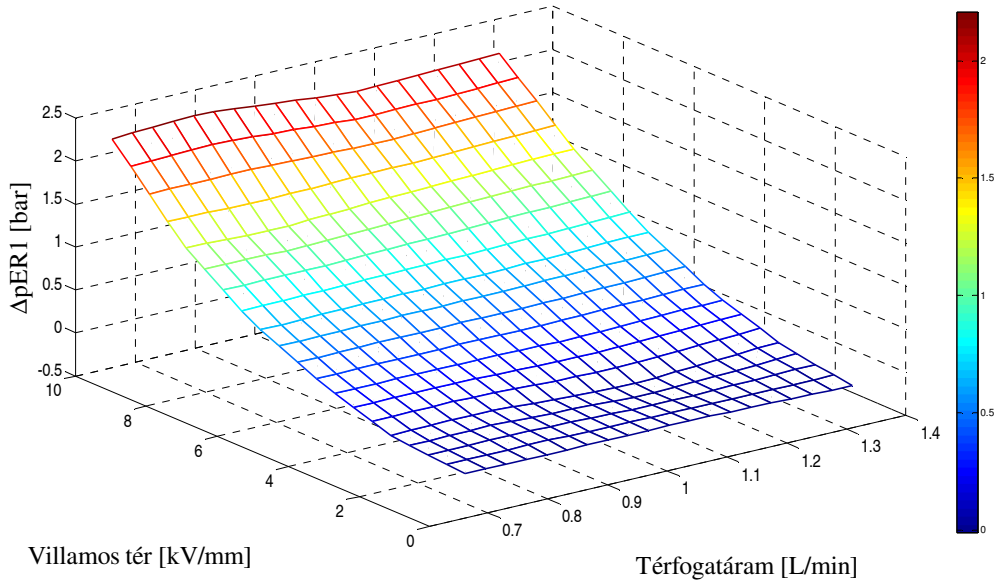
A diagram az elsődleges nyomásnövekedés (Δp_{ER1}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Villamos térerősség: E = 0, 2, 4, 6, 8, 10 kV/mm) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\Delta p_{ER1} = \alpha \cdot E^{\beta}$) ábrázolja, amelynek paramétereit (α, β) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, térfogatáram 0,42 L/min.

Az illesztés eredményeit táblázatban foglaltam össze:

4.1. táblázat Függvényillesztés eredményei (Elsődleges nyomásnövekedés - villamos térerősség, $\Delta p_{ER1} = \alpha \cdot E^{\beta}$)

R^2	α [Pa · mm/kV]	β [-]	m [%]	Q [l/min]
0,9962	1,59E+03	2,0403	30	0,42
0,9987	1,61E+03	2,1248	30	0,66
0,9964	1,50E+03	2,1620	30	0,81
0,9996	2,51E+03	1,9113	30	1,06
0,9999	2,88E+03	1,8637	30	1,31

Az eredmények könnyebb átláthatóságának érdekében a mérési eredményeket célszerű 3 dimenzióban ábrázolni:



4.13. ábra Elsődleges nyomásnövekedés a villamos térerősség és térfogatáram függvényében (m = 30 % adalékkoncentráció TiO_2/SN150A keverék)

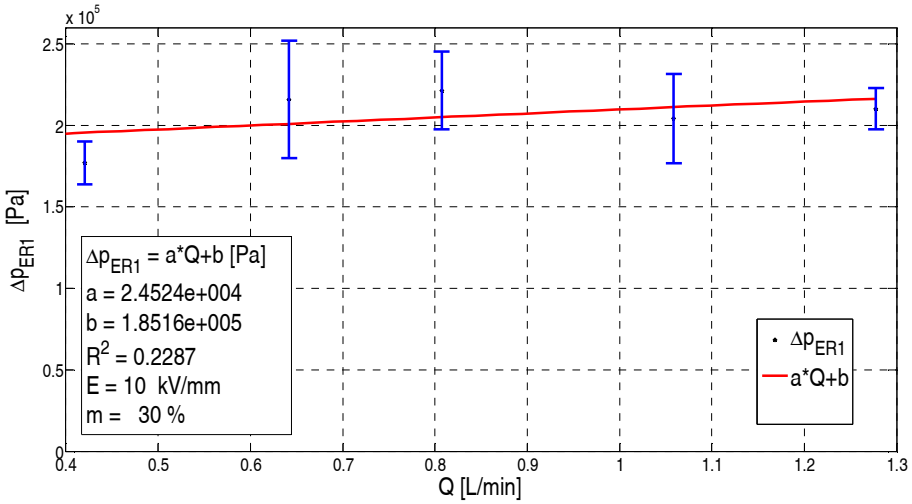
Az ábra az elsőleges nyomásnövekedés átlagértékeit (Δp_{ER1}) ábrázolja a villamos térerősség (E) és térfogatáram (Q) függvényében. Rögzített paraméterek: tömegkoncentráció m = 30 %

Az elsődleges nyomnövekedés térfogatáram függésének vizsgálata.

Az elsődleges nyomásnövekedés térfogatáramtól láthatóan csak kismértékben függ (4.13. ábra). Az összefüggés jellegét lineáris függvénnyel közelítem:

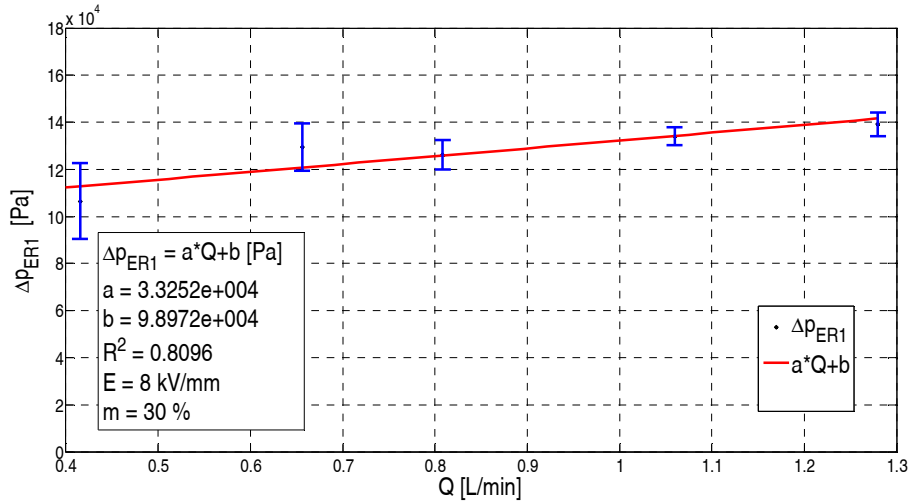
$$\Delta p_{ER2} = a \cdot Q + b \tag{27}$$

Ahol, Q [L/min] térfogatáram, a $[\mathrm{Pa \cdot min/L}]$ és b [Pa] paraméterek. A következőkben különböző villamos tér alkalmazásánál végzett kísérletet mutatok be. A diagramokon látható a különböző térfogatáram alkalmazásánál mért nyomásesések átlagértéke valamint azok szórása. A piros függvény az ismertetett alakú összefüggés a legkisebb négyzetek módszere alapján az átlagértékekre illesztve.



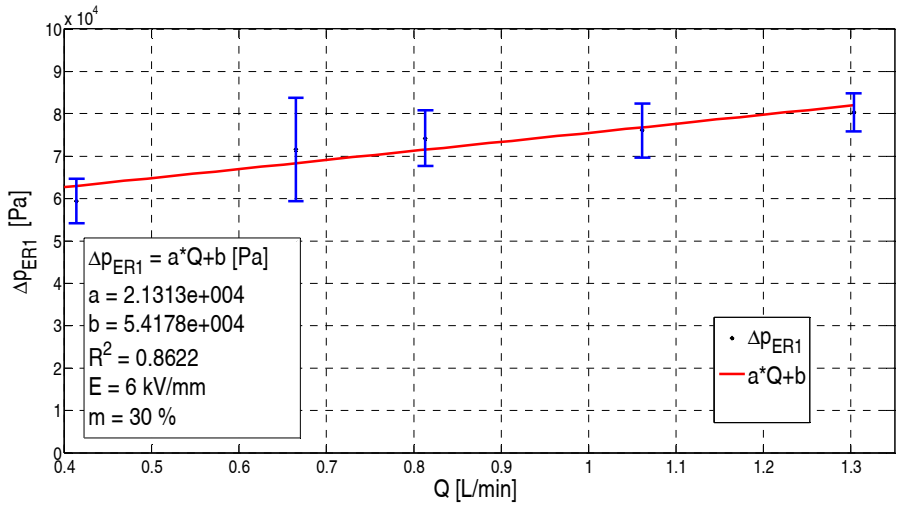
4.14. ábra Elsődleges nyomásnövekedés térfogatáram függvénye E = 10 kV/mm villamos tér esetén

A diagram az elsődleges nyomásnövekedés (Δp_{ER1}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Térfogatáram: Q = 0,41; 0,66; 0,81; 1,06; 1,30 l/min) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\Delta p_{ER1} = a \cdot Q + b$) ábrázolja, amelynek paramétereit (a, b) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, villamos térerősség 10 kV/mm.



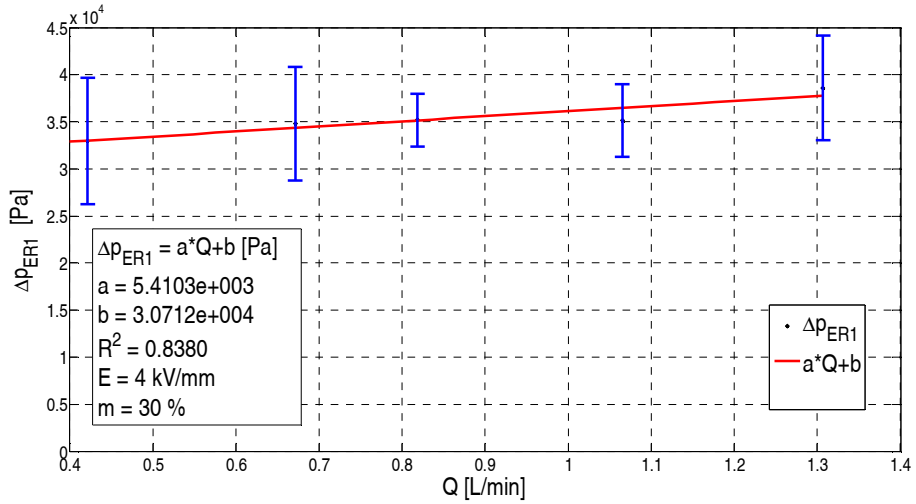
4.15. ábra Elsődleges nyomásnövekedés térfogatáram függvénye E = 8 kV/mm villamos térerősség esetén

A diagram az elsődleges nyomásnövekedés (Δp_{ER1}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Térfogatáram: Q = 0,41; 0,66; 0,81; 1,06; 1,30 l/min) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\Delta p_{ER1} = a \cdot Q + b$) ábrázolja, amelynek paramétereit (a, b) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, villamos térerősség 8 kV/mm.



4.16. ábra Elsődleges nyomásnövekedés térfogatáram függvénye E = 6 kV/mm villamos térerősség esetén

A diagram az elsődleges nyomásnövekedés (Δp_{ER1}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Térfogatáram: Q = 0,41; 0,66; 0,81; 1,06; 1,30 l/min) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\Delta p_{ER1} = a \cdot Q + b$) ábrázolja, amelynek paramétereit (a, b) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, villamos térerősség 6 kV/mm.



4.17. ábra Elsődleges nyomásnövekedés térfogatáram függvénye E = 4 kV/mm villamos térerősség esetén

A diagram az elsődleges nyomásnövekedés (Δp_{ER1}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Térfogatáram: Q = 0,41; 0,66; 0,81; 1,06; 1,30 l/min) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\Delta p_{ER1} = a \cdot Q + b$) ábrázolja, amelynek paramétereit (a, b) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, villamos térerősség 4 kV/mm.

A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a térfogatáram növekedésével az elsődleges nyomásesés kismértékű növekvő tendenciát mutat, jelentős hatása nincs. Az egyértelmű lineáris kapcsolat nem igazolható. A térfogatáram és elsődleges nyomásnövekedés kapcsolata további vizsgálatot igényel.

Elsődleges nyomásnövekedés a villamos térerősség és térfogatáram függvényében adott adalékkoncentráció esetén

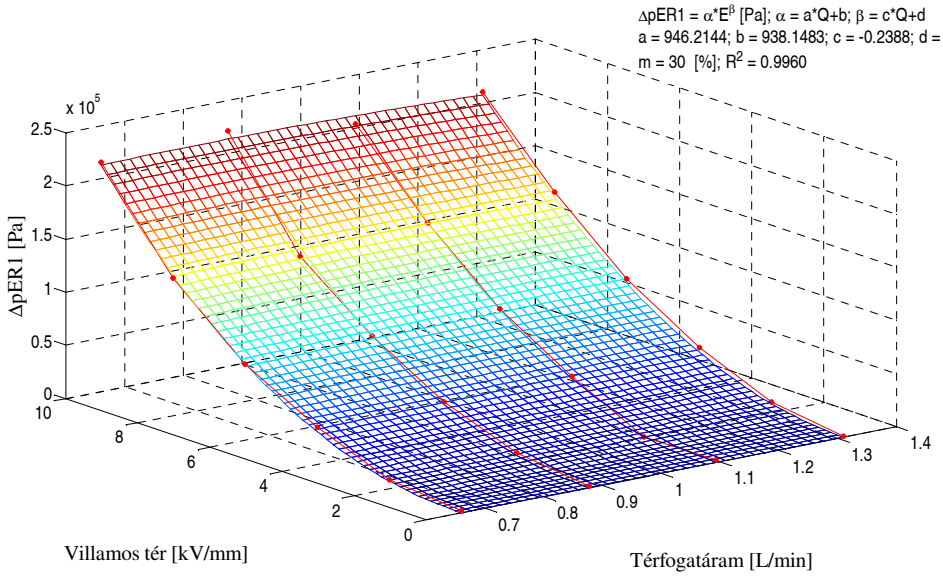
Miután megvizsgáltam az elsődleges nyomásnövekedések függését az egyes változóktól (E, Q) képet kaptam a nyomásnövekedési folyamat matematikai közelítő összefüggéseiről. Célom az adott adalékkoncentrációjú (TiO_2/SN150A) ER folyadékok viselkedésének definiálása a villamos tér és térfogatáram függvényében. Ennek érdekében minden vizsgált paraméter esetében felállítok egy kétváltozós függvényt. Első lépésként egy alkalmas függvényt kell választani, amely paramétereinek identifikálásával elő tudom állítani a legjobban illeszkedő térbeli függvényt. A mérések eredményeiből látható volt, hogy az elsődleges nyomásnövekedés villamos térerősség függése hatványfüggvénnyel jól közelíthető.

Azonban a vizsgálatok eredményeként az is látható, hogy az α és β paraméterek értéke a térfogatáram függvényében kismértékben, de változnak (4.1. táblázat). Ennek tükrében az elsődleges nyomásnövekedés villamos tér és térfogatáram közelítésére a következő alakú függvényt választottam:

$$\Delta p_{ER1} = (a \cdot Q + b) \cdot E^{c \cdot Q + d} \tag{28}$$

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

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



4.18. ábra Elsődleges nyomásnövekedés a villamos térerősség és térfogatáram függvényében (m = 30 % adalékkoncentráció TiO_2/SN150A keverék)

Az ábra az elsődleges nyomásnövekedést (Δp_{ER1}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Villamos térerősség: E = 0, 2, 4, 6, 8, 10 kV/mm, Térfogatáram: 0,66; 0,81; 1,06; 1,31; L/min) Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. Az ábrán látható továbbá az ismertetett alakú függvény ($\Delta p_{ER1} = (a \cdot Q + b) \cdot E^{c \cdot Q + d}$), amelynek paramétereit (a, b, c, d) a legkisebb

négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméter: adalékkoncentráció 30 %.

A korrelációs koefficiens értéke R^2 = 0,9960. Paraméterek: a = 946,2144; b = 938,1483; c = -0,2388; d = 2.2921. A 30 % adalékkoncentrációjú (TiO_2/SN150A) ER folyadék elsődleges nyomásnövekedését közelítő függvény:

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

Az összefüggés érvényes, ha térfogatáramot (Q) L/min és a villamos térerősséget (E) kV/mm mértékegységbe helyettesítjük be. A paraméterek értéke amennyiben SI mértékegységben helyettesítünk az összefüggésbe a 4.2. táblázatban találhatóak.

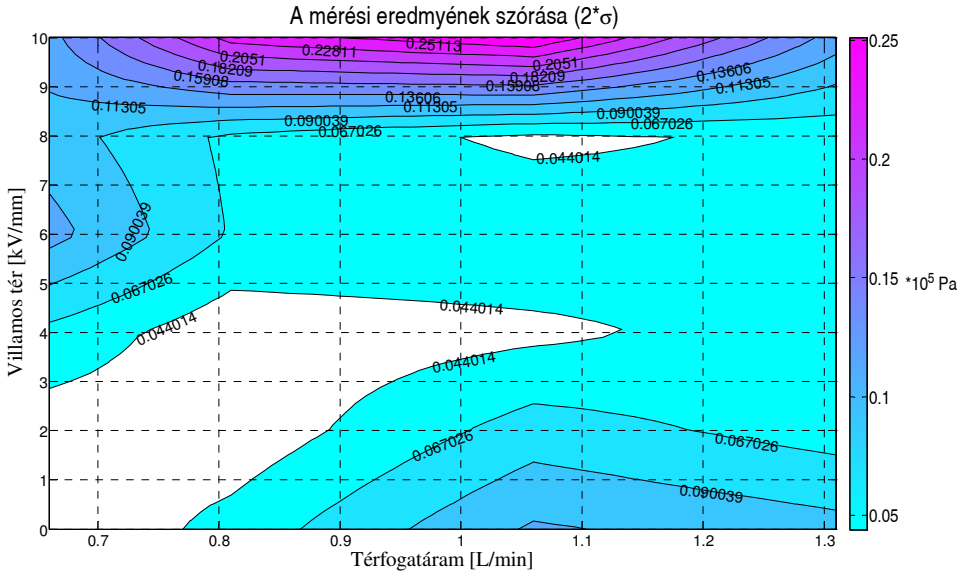
4.2 táblázat Függvényillesztés eredményei (Elsődleges nyomásnövekedés – villamos térerősség, térfogatáram függvényében ($\Delta p_{ER1} = (a \cdot Q + b) \cdot E^{c \cdot Q + d}$)

Paraméter	érték	mértékegység	érték	mértékegység (SI)
a	946.2144	$\left[\frac{Pa \cdot mm \cdot min}{kV \cdot L}\right]$	1,1814e-005	$\left[\frac{Pa \cdot s}{V \cdot m^2}\right]$
b	938,1483	$\left[\frac{Pa \cdot mm}{kV}\right]$	7,2511e-010	$\left[\frac{Pa \cdot m}{V}\right]$
c	-0,2388	$\left[\frac{min}{L}\right]$	-835,8080	$\left[\frac{s}{m^3}\right]$
d	2,2921	[-]	2,0657	[-]

Ahhoz, hogy képet kapjunk a kapott eredmény alkalmazhatóságának feltételeiről szükséges meghatároznom az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó (Villamos térerősség: E = 0, 2, 4, 6, 8, 10 kV/mm, Térfogatáram: 0,66; 0,81; 1,06; 1,31; L/min) mérési eredményhalmaz szórást. Normál eloszlás esetén az átlag $\pm 2\sigma$ tartományba esik a mintaelemek 95 %-a. A teljes vizsgálati tartományon a szórási mátrix:

$$2\sigma = \begin{bmatrix} 0.0210 & 0.0525 & 0.1162 & 0.0980 \\ 0.0315 & 0.0280 & 0.0778 & 0.0570 \\ 0.0606 & 0.0280 & 0.0385 & 0.0558 \\ 0.1217 & 0.0653 & 0.0636 & 0.0454 \\ 0.1004 & 0.0621 & 0.0379 & 0.0509 \\ 0.1287 & 0.2382 & 0.2741 & 0.1261 \end{bmatrix} \cdot 10^5 \; Pa$$

A jobb áttekinthetőség érdekében síkbeli szintvonalas ábrázolást alkalmaztam, amely a szórás kétszeres (2σ) értékét mutatja a vizsgálati tartományban.



4.19. ábra Elsődleges nyomásnövekedés szórásai mátrixa (2σ). (m = 30 % adalékkoncentráció TiO_2/SN150A keverék)

A függvény hibahatárának meghatározásához ellenőrizni kell, hogy az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásnégyzetek azonos elméleti szórásnégyzethez tartoznak-e (Fisher próba). A Fisher próba alapján a különböző kísérleti beállításokhoz tartozó szórásnégyzetek azonos elméleti szórásnégyzethez tartoznak ha:

$$F_{kis} = \frac{s_{max}^2}{s_{min}^2} \leq F_{tábl}$$

Egyenlőtlenség fennáll. Ehhez meg kell határozni a F táblázati értékét, amit a maximális és minimális szórásokhoz tarozó szabadságfokok alapján táblázatból határoztam meg. $\alpha = 0{,}001$ szignifikancia szinten $F_{tábl} = 999$.

$$F_{kis} = \frac{s_{max}^2}{s_{min}^2} = \frac{0{,}1370^2}{0{,}0140^2} = 95{,}8478 \leq F_{tábl} \Rightarrow megfelel!$$

A függvény hibahatárának meghatározásához ki kell számolni a függvény szórását valamint az illeszkedési szórást.

$$S_{fv} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} s^2}{N}} = 0{,}1550$$

Ahol N a kísérleti beállítások száma

Ezek után az illeszkedési szórást kell meghatározni, és Fisher próbával ellenőrizni kell, hogy azonos elméleti szórásnégyzethez tartozik e a függvény szórása illetve az illeszkedési szórás.

$$S_{ill} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (\Delta p_{ER1_atl_i} - (a \cdot Q + b) \cdot E_{_i}^{\,c \cdot Q + d})^2}{N - 4}} = 0{,}0428$$

Szórásnégyzetek egyezőségének vizsgálata α = 0,001 szignifikanciaszinten, F_{kisill} = 3.7353

$$F_{kisill} = \frac{s_{ill}^{\,2}}{s_{fv}^{\,2}} \le F_{tábl}$$

$$F_{kisill} = \frac{s_{ill}^{\,2}}{s_{fv}^{\,2}} = \frac{0{,}0428^2}{0{,}1550^2} = 0{,}0764 \le 3{,}7353 \Rightarrow megfelel!$$

Tehát a szórások azonos elméleti szórásnégyzethez tartoznak. Azaz a választott függvény megfelelő! A közelítő függvény hibahatára meghatározható az illeszkedési szórásból. Itt t értéke a Student táblázatból (α = 0,001) t = 3,7453.

$$\Delta = t \cdot S_{ill}\text{, Hibahatár} = 0{,}1601 \cdot 10^5 \ Pa$$

A közelítő függvény, amellyel meghatározható az elsődleges nyomásnövekedés értéke a villamos térerősség és térfogatáram függvényében (p = 99 % valószínűségi szinten) m = 30 % adalékkoncentrációjú TiO_2/SN150A keverék esetén, Q = 0,66 – 1,31 L/min és E = 0 – 10 kV/mm érvényességi tartományban:

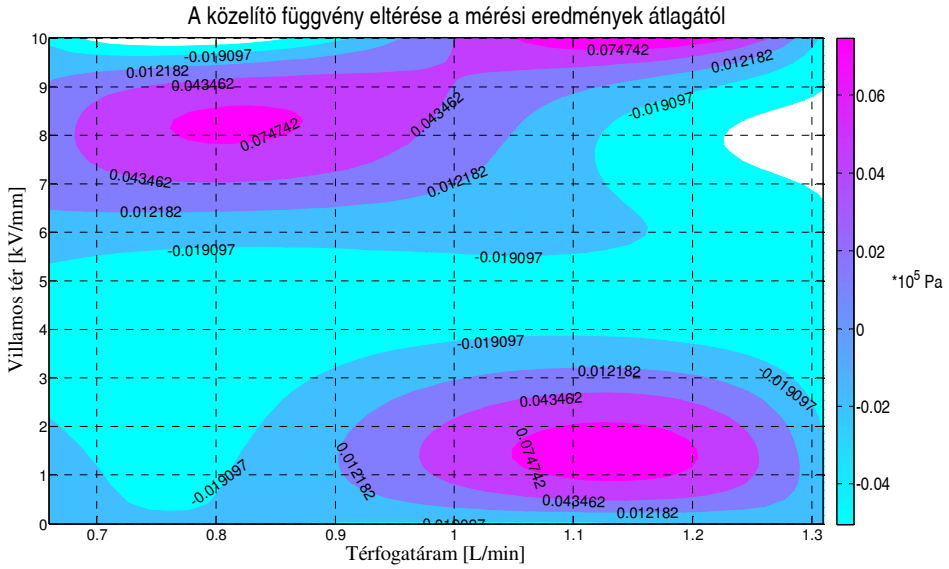
$$\Delta p_{ER1} = (946{,}2144 \cdot Q + 938{,}1483) \cdot E^{-0{,}2388 \cdot Q + 2{,}2921} \pm 16010 \quad [Pa]$$

A kapott összefüggés ellenőrzése érdekében kiszámítottam az illesztett közelítő függvény eltérését a mérési eredmények átlagától. Az eltérésmátrix:

$$\Delta p_{ER1_SZ} - \Delta p_{ER1_M} = \begin{bmatrix} -0.0190 & -0.0181 & -0.0256 & -0.0096 \\ -0.0114 & -0.0206 & 0.0736 & -0.0170 \\ -0.0400 & -0.0281 & -0.0155 & -0.0413 \\ 0.0070 & 0.0040 & -0.0035 & -0.0420 \\ 0.0348 & 0.0874 & 0.0101 & -0.0517 \\ -0.0280 & -0.0762 & 0.0759 & -0.0256 \end{bmatrix} \cdot 10^5 \ Pa$$

A legnagyobb eltérés 0,0874 bar

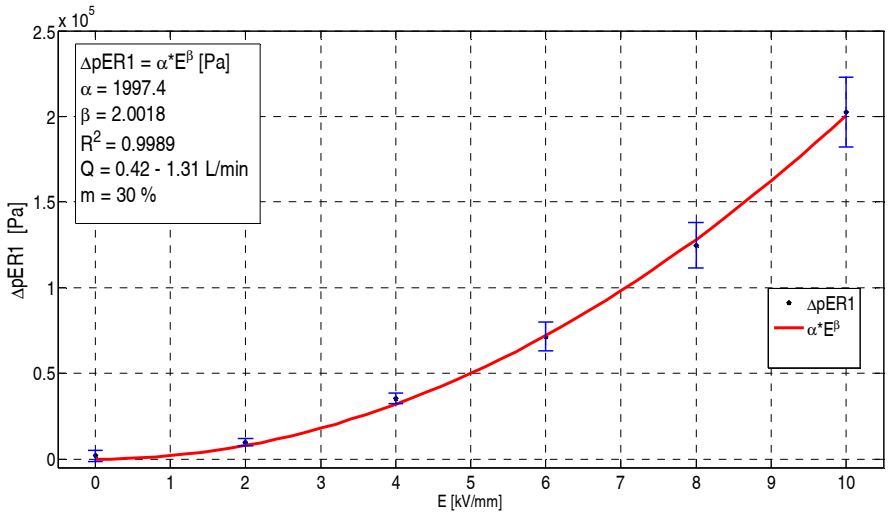
Az értékeket szintvonalas megjelenítéssel ábrázolom a könnyebb átláthatóság érdekében a teljes vizsgálati tartományban.



4.20. ábra Elsődleges nyomásnövekedés átlagértékeire illesztett közelítő függvény eltérése a mérési eredmények átlagértékeitől. (m = 30 % adalékkoncentráció TiO_2/SN150A keverék)

A meghatározott összefüggéssel stacionárius síkáramlási rendszerben (például: lengéscsillapító, hidraulikus alkalmazás) a térfogatáram és villamos térerősség ismeretében meghatározható az elsődleges nyomásnövekedés közelítő értéke.

A vizsgálatok alapján látható, hogy elsődleges nyomásnövekedés csak kis mértékben függ a térfogatáramtól. Ezáltal az elsődleges nyomásnövekedés villamos tér összefüggés közelíthető egy függvénnyel az összes mért térfogatáram esetén.



4.21. ábra Elsődleges nyomásnövekedés villamos térerősség függvénye az összes vizsgált térfogatáram esetén

A diagram az elsődleges nyomásnövekedés (Δp_{ER1}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Villamos térerősség: E = 0, 2, 4, 6, 8, 10 kV/mm) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\Delta p_{ER1} = \alpha \cdot E^{\beta}$) ábrázolja, amelynek paramétereit (α, β) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméter: adalékkoncentráció 30 %, térfogatáram 0,42; 0,66; 0,81; 1,06; 1,31 L/min. Így a közelítő függvény, amely leírja a 30 százalékos adalékkoncentrációjú TiO_2/SN150A keverék elsődleges nyomásnövekedését a villamos térerősség függvényében:

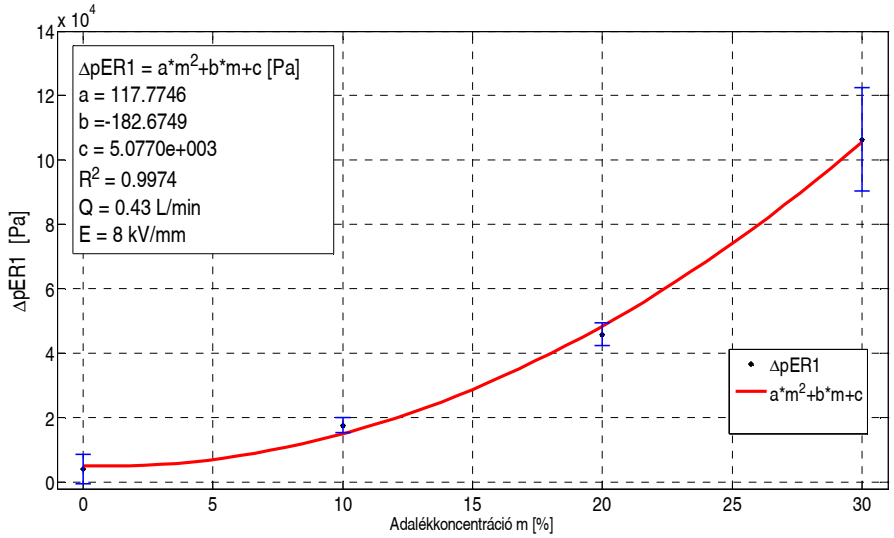
$$\Delta p_{ER1} = 1997{,}4 \cdot E^{2{,}0018} \ [Pa] .$$

4.3. Az elsődleges nyomásnövekedés adalékkoncentráció függésének vizsgálata

Ennél a vizsgálatnál állandó 8 kV/mm villamos teret alkalmaztam. Az adalékkoncentráció és elsődleges nyomásesést a,

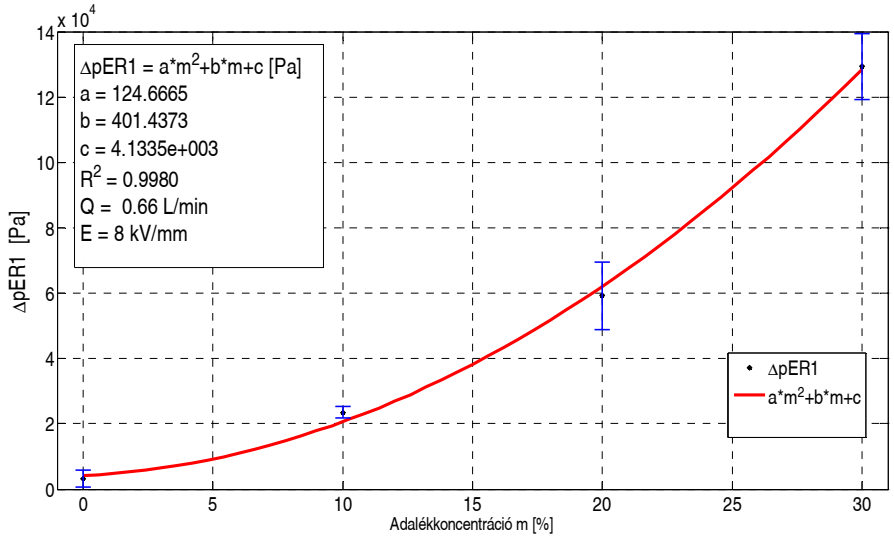
$$\Delta p_{ER1} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c \qquad (29)$$

alakú függvénnyel közelítem, ahol m adalékkoncentráció [%], a [Pa], b [Pa] és c [Pa] paraméterek. A következőkben különböző térfogatáramnál végzett kísérletet mutatok be. A diagramokon látható a különböző adalékkoncentráció alkalmazásánál mért nyomásesések átlagértéke valamint azok szórása. A piros függvény az ismertetett alakú összefüggés a legkisebb négyzetek módszere alapján az átlagértékekre illesztve.



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

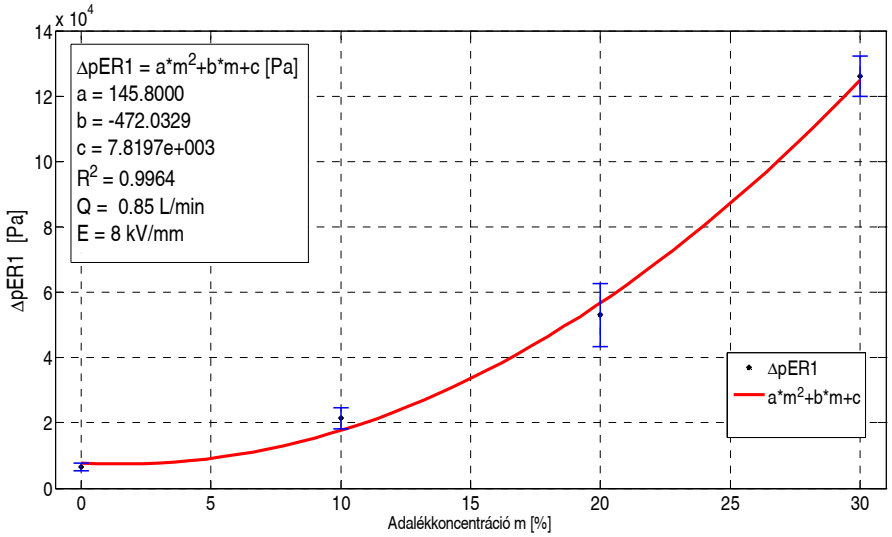
A diagram az elsődleges nyomásnövekedés (Δp_{ER1}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (adalékkoncentráció m = 0, 10, 20, 30 %) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\Delta p_{ER1} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$) ábrázolja, amelynek paramétereit (a, b, c) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: villamos térerősség E = 8 kV/mm, térfogatáram 0,43 L/min.



4.23. ábra Elsődleges nyomásnövekedés adalékkoncentráció függvénye 0,66 l/min térfogatáram esetén

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 ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\Delta p_{ER1} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$) ábrázolja, amelynek paramétereit (a, b, c) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: villamos térerősség E = 8 kV/mm, térfogatáram 0,66 L/min.



4.24. ábra Elsődleges nyomásnövekedés adalékkoncentráció függvénye 0,85 l/min térfogatáram esetén

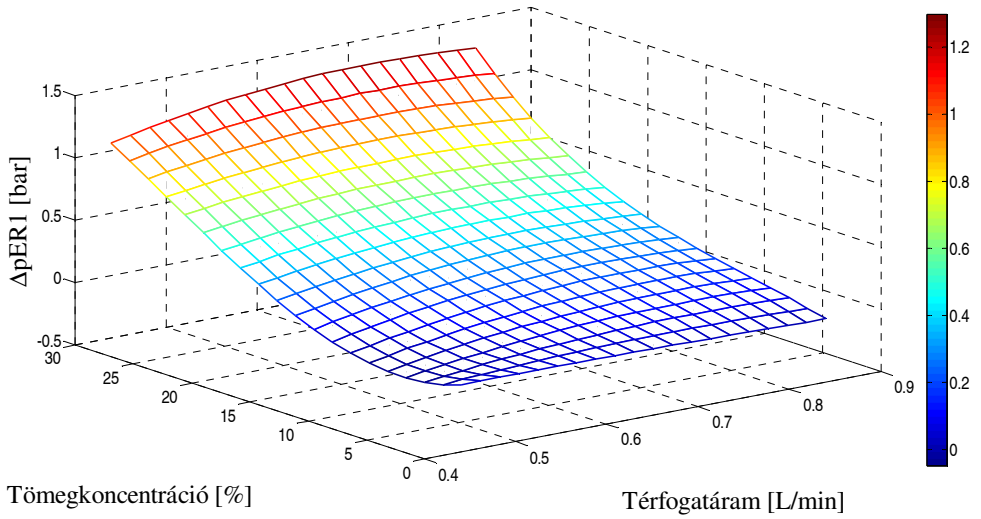
A diagram az elsődleges nyomásnövekedés (Δp_{ER1}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (adalékkoncentráció m = 0, 10, 20, 30 %) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\Delta p_{ER1} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$) ábrázolja, amelynek paramétereit (a, b, c) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: villamos térerősség E = 8 kV/mm, térfogatáram 0,85 L/min.

Az illesztés eredményeit táblázatban foglaltam össze:

4.3 táblázat Függvényillesztés eredményei (Elsődleges nyomásnövekedés - adalékkoncentráció, $\Delta p_{ER1} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$)

R^2	a [Pa]	b [Pa]	c [Pa]	Q [l/min]
0,9974	117,7746	-182,6749	5,08E+03	0,43
0,998	124,6665	401,4373	4,13E+03	0,66
0,9964	145,8000	-472,0329	7,82E+03	0,85

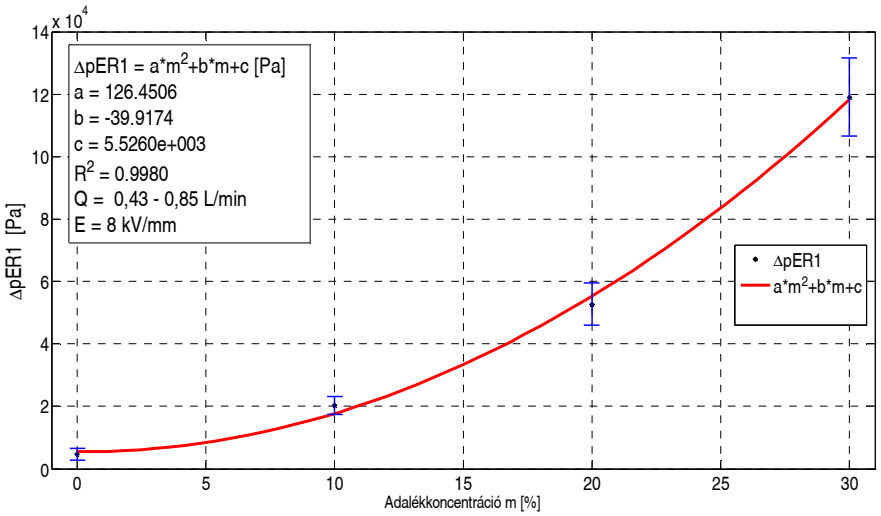
Az eredmények könnyebb átláthatóságának érdekében a mérési eredményeket célszerű 3 dimenziós megjelenítéssel ábrázolni:



4.25. ábra Elsődleges nyomásnövekedés az adalékkoncentráció és térfogatáram függvényében (TiO_2/SN150A keverék)

Az ábra az elsőleges nyomásnövekedés átlagértékeit (Δp_{ER1}) ábrázolja az adalékkoncentráció (m) és térfogatáram (Q) függvényében. Rögzített paraméterek: villamos térerősség E = 8 kV/mm.

A 4.25. ábrából látható, hogy elsődleges nyomásnövekedést kis mértékben függ a térfogatáramtól. A 30 %-os minta vizsgálatoknál már bizonyítottam statisztikai módszerekkel, hogy a térfogatáram hatása kismértékű. Most amikor a több adalékanyag koncentrációt vizsgáltam, szintén arra a megállapításra jutottam, hogy ezekben a körülményekben sem játszik meghatározó szerepet a térfogatáram. Vagyis hasonlóan, mint az előző fejezetben részletesen bemutatott statisztikai számítás alapján, létrehozható egy olyan függvény, mely az adalékanyag hatását globálisan írja le (4.26 ábra). A korábbi részeredményeknek megfelelően az elsődleges nyomásnövekedés másodfokú polinommal írható le az adalékkoncentráció függvényében (a térfogatáram hatásának elhanyagolása mellett).



4.26. ábra Elsődleges nyomásnövekedés adalékkoncentráció függvénye az összes vizsgált térfogatáram esetén

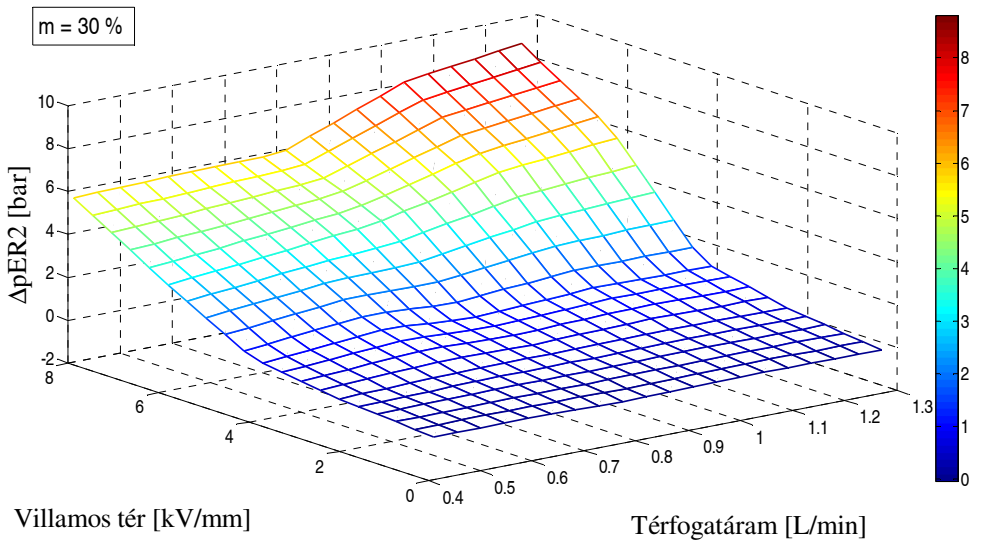
A diagram az elsődleges nyomásnövekedés (Δp_{ER1}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (adalékkoncentráció m = 0, 10, 20, 30 % összes mért térfogatáramnál) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\Delta p_{ER1} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$) ábrázolja, amelynek paramétereit (a, b, c) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: villamos térerősség E = 8 kV/mm, térfogatáram: 0,85; 0,66; 0,43 L/min.

$$\Delta p_{ER1} = 126{,}4506 \cdot m^2 - 39{,}9174 \cdot m + 5526 \ [Pa]$$

4.4. A másodlagos nyomásnövekedés villamos térerősség és térfogatáram függésének vizsgálata

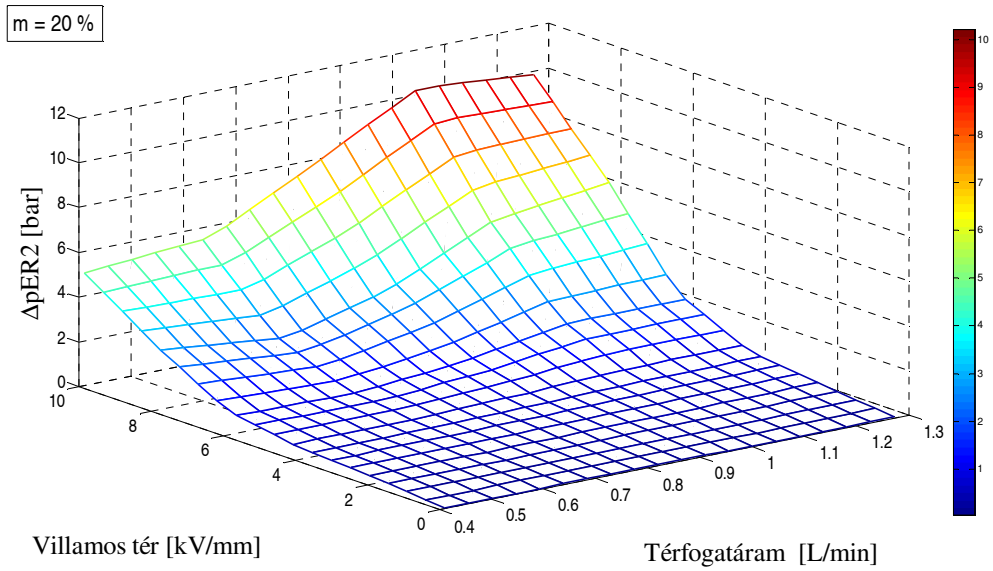
A másodlagos nyomásnövekedés mérési eredményeinek áttekintése adott adalékanyag koncentráció mellett.

A következőkben a m = 30 % és m = 20 % adalékkoncentrációjú TiO_2/SN150A keverék villamos térerősség és térfogatáram függését ábrázolom. A 4.27. és 4.28. ábrák a másodlagos nyomásnövekedést ábrázolják a villamos térerősség és térfogatáram függvényében.



4.27. ábra Másodlagos nyomásnövekedés az villamos térerősség és térfogatáram függvényében (m = 30 % adalékkoncentráció TiO_2/SN150A keverék)

A 4.27. ábra a másodlagos nyomásnövekedés átlagértékeit (Δp_{ER2}) ábrázolja a villamos térerősség (E) és térfogatáram (Q) függvényében. Rögzített paraméterek: tömegkoncentráció m = 30 %.



4.28. ábra Másodlagos nyomásnövekedés az villamos térerősség és térfogatáram függvényében (m = 20 % adalékkoncentráció TiO_2/SN150A keverék)

A 4.28. ábra a másodlagos nyomásnövekedés átlagértékeit (Δp_{ER2}) ábrázolja a villamos térerősség (E) és térfogatáram (Q) függvényében. Rögzített paraméterek: tömegkoncentráció m = 20 %.

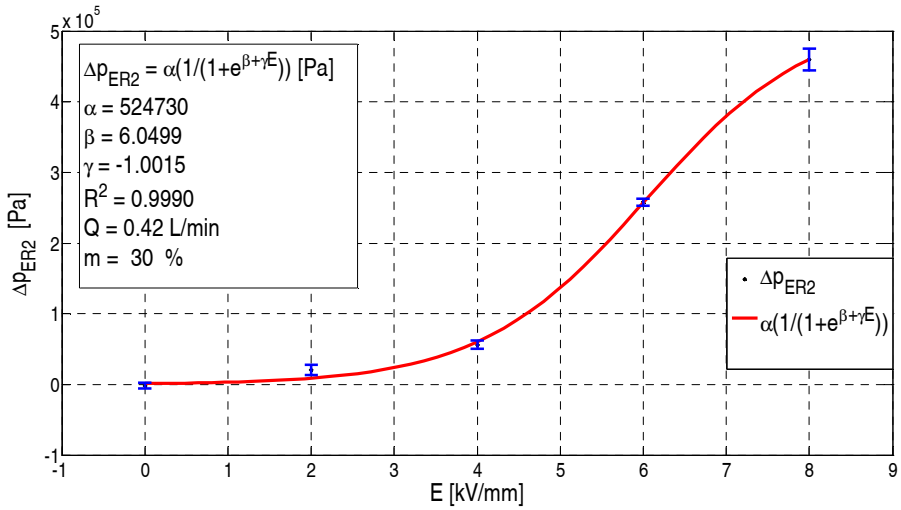
Az ábrákon látható, hogy mind a két paraméter (E, Q) hatással van a másodlagos nyomásnövekedés értékére.

A másodlagos nyomásnövekedés villamos térerősség függésének vizsgálata állandó adalékkoncentráció és térfogatáram esetén.

A másodlagos nyomásnövekedést nem közelíthető az elsődleges nyomásnövekedéshez hasonló függvénnyel. A másodlagos nyomásnövekedés villamos térerősség függvényében 5 kV/mm-t meghaladóan telítődés jelleget mutat. Ennek tükrében az összefüggést autokatalitikus függvényalakkal közelítem:

$$\Delta p_{ER2} = \alpha \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{\beta + \gamma \cdot E}} \right) \tag{30}$$

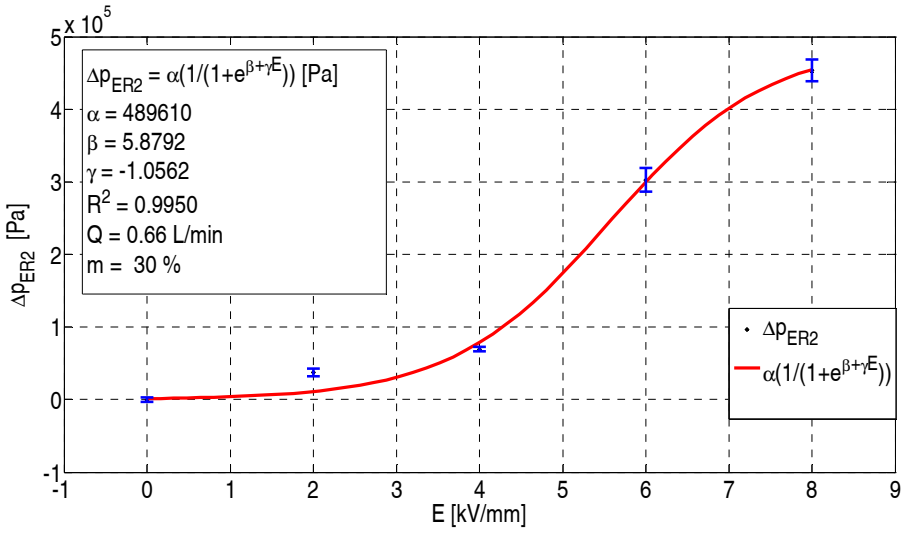
Ahol, E [kV/mm] villamos térerősség, α [Pa] β [-] és γ [mm/kV] paraméterek. A következőkben különböző térfogatáramnál végzett kísérletet mutatok be. A diagramokon látható a különböző villamos térerősség alkalmazásánál mért nyomásesések átlagértéke valamint azok szórása. A piros függvény az ismertetett alakú összefüggés a legkisebb négyzetek módszere alapján az átlagértékekre illesztve.



4.29. ábra Másodlagos nyomásnövekedés villamos térerősség függvénye 0,42 l/min térfogatáram esetén

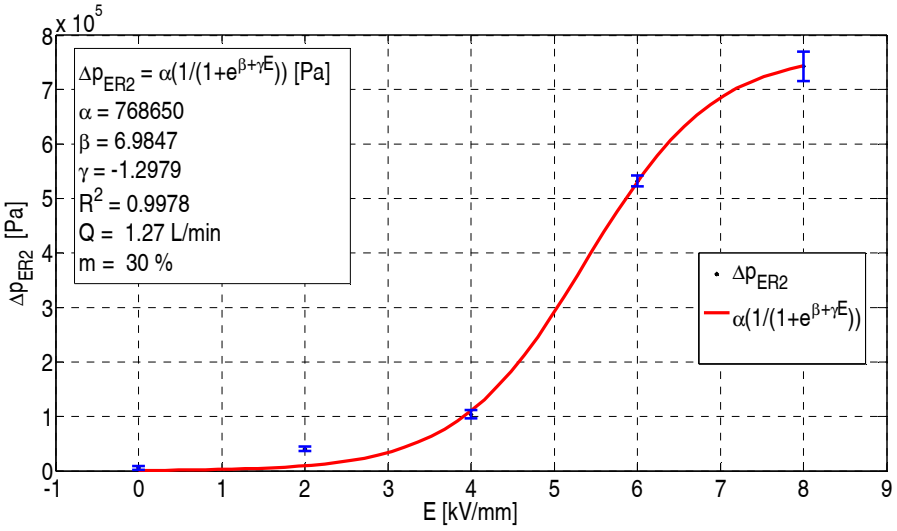
A diagram a másodlagos nyomásnövekedés (Δp_{ER2}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Villamos térerősség: E = 0, 2, 4, 6, 8 kV/mm) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ábrázolja, amelynek paramétereit (α, β, γ) a legkisebb négyzetek

módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, térfogatáram 0,42 L/min.



4.30. ábra Másodlagos nyomásnövekedés villamos térerősség függvénye 0,66 l/min térfogatáram esetén

A diagram a másodlagos nyomásnövekedés (Δp_{ER2}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Villamos térerősség: E = 0, 2, 4, 6, 8 kV/mm) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ábrázolja, amelynek paramétereit (α, β, γ) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, térfogatáram 0,66 L/min.



4.31. ábra Másodlagos nyomásnövekedés villamos térerősség függvénye 1,27 l/min térfogatáram esetén

A diagram a másodlagos nyomásnövekedés (Δp_{ER2}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Villamos térerősség: E = 0, 2, 4, 6, 8 kV/mm) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ábrázolja, amelynek paramétereit (α, β, γ) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, térfogatáram 1,27 L/min.

Az eredményeket táblázatban foglaltam össze:

4.4 táblázat Függvényillesztés eredményei (Másodlagos nyomásnövekedés – villamos térerősség, $\Delta p_{ER2} = \alpha \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{\beta + \gamma \cdot E}} \right)$)

R^2	α [Pa]	β [-]	γ [mm/kV]	m [%]	Q [l/min]
0,9990	5,24730	6,0499	-1,0015	30	0,42
0,9950	489610	5,8792	-1,0562	30	0,66
0,9978	768650	6,9847	-1,2979	30	1,27

A másodlagos nyomásnövekedés átlagértékeire illesztett függvény korrelációs együtthatója minden vizsgáltnál nagyobb mint 0,95. Így kimondható, hogy a másodlagos nyomásnövekedés

$$\Delta p_{ER2} = \alpha \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{\beta + \gamma \cdot E}} \right)$$

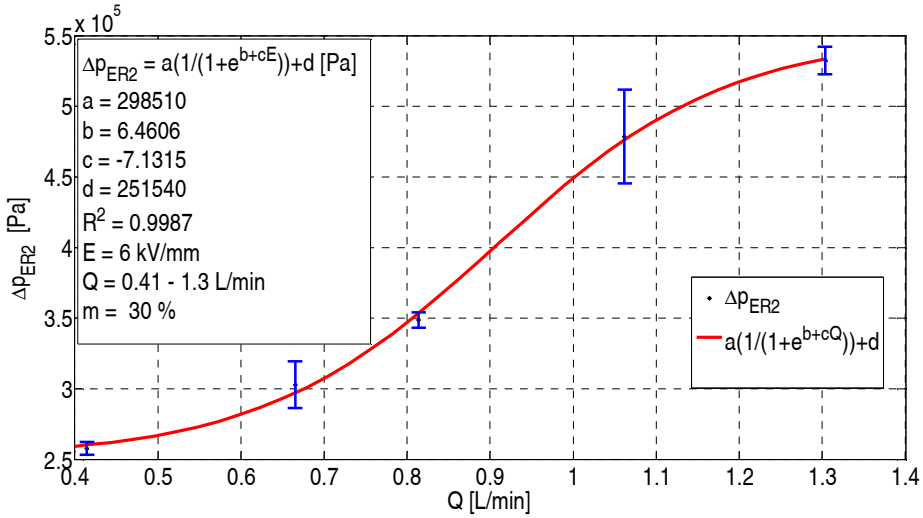
alakú autokatalitikus függvénnyel közelíthető.

A másodlagos nyomásnövekedés térfogatáram függésének vizsgálata.

A másodlagos nyomásnövekedés térfogatáram függését szintén autokatalitikus függvénnyel közelítem:

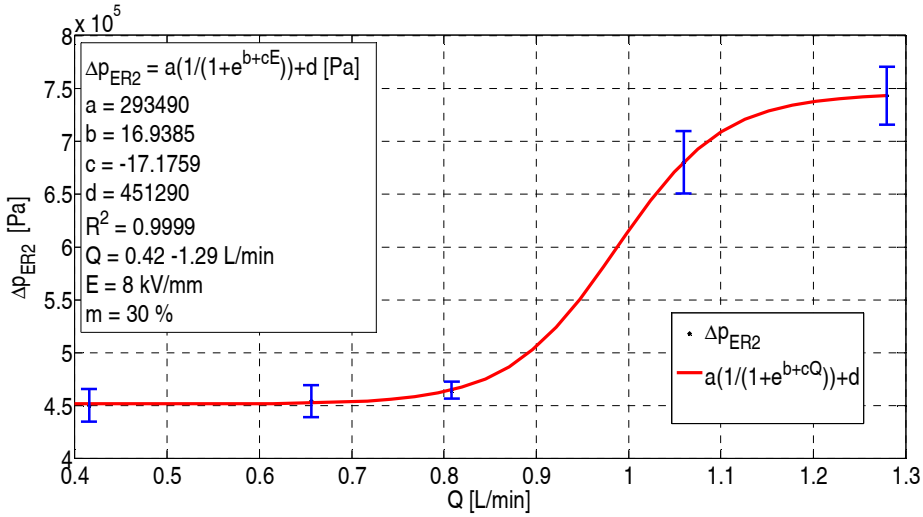
$$\Delta p_{ER2} = a \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{b + c \cdot Q}} \right) + d \tag{31}$$

Ahol, Q [L/min] térfogatáram, a [Pa], b [-], c [min/L] és d [Pa] paraméterek. A következőkben különböző villamos térerősség alkalmazásánál végzett kísérletet mutatok be. A diagramokon látható a különböző térfogatáram alkalmazásánál mért nyomásesések átlagértéke valamint azok szórása. A piros függvény az ismertetett alakú összefüggés a legkisebb négyzetek módszere alapján az átlagértékekre illesztve.



4.32. ábra Másodlagos nyomásnövekedés térfogatáram függvénye E = 6 kV/mm villamos térerősség esetén

A diagram a másodlagos nyomásnövekedés (Δp_{ER2}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Térfogatáram: Q = 0,41; 0,66; 0,81; 1,06; 1,30 L/min) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ábrázolja, amelynek paramétereit (a, b, c, d) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, villamos térerősség 6 kV/mm.



4.33. ábra Másodlagos nyomásnövekedés térfogatáram függvénye E = 8 kV/mm villamos térerősség esetén

A diagram a másodlagos nyomásnövekedés (Δp_{ER2}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Térfogatáram: Q = 0,41; 0,66; 0,81; 1,06; 1,28 l/min) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ábrázolja, amelynek paramétereit (a, b, c, d) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, villamos térerősség 8 kV/mm.

A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a térfogatáram növekedésével a másodlagos nyomásesés növekvő tendenciát mutat. 6 kV/mm feletti villamos térerőség esetén egyértelműen autokatalitikus függvény szerint változik. Azonban 6 kV/mm-nél kisebb villamos térerősségnél egyértelmű függvénykapcsolat kapcsolat nem igazolható. A térfogatáram és másodlagos nyomásnövekedés kapcsolata további vizsgálatot igényel.

Másodlagos nyomásnövekedés a villamos térerősség és térfogatáram függvényében adott adalékkoncentráció esetén

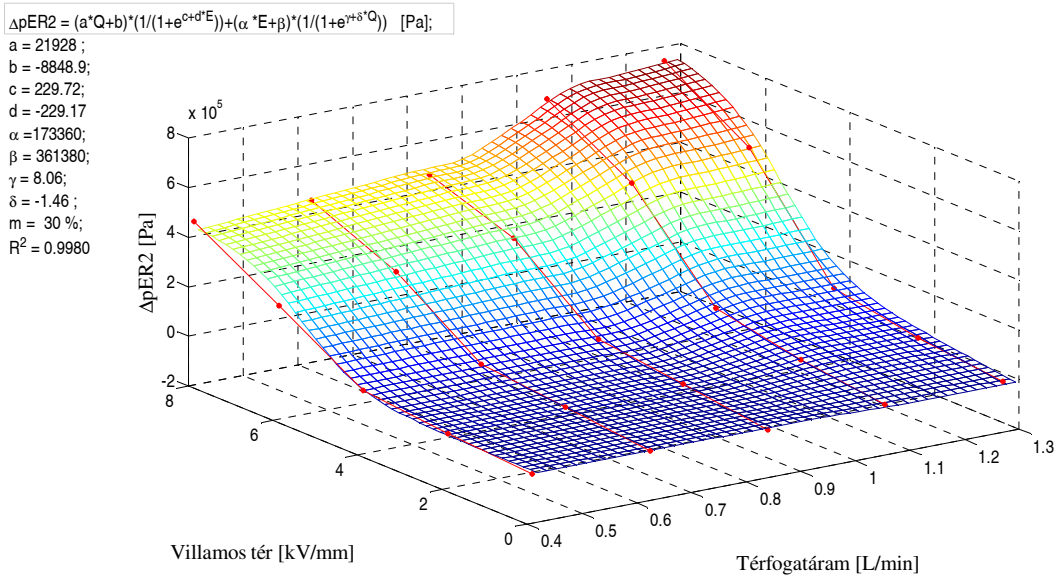
Miután megvizsgáltam a másodlagos nyomásnövekedések függését az egyes változóktól (E, Q) képet kaptam a nyomásnövekedési folyamat matematikai összefüggéseiről. Célom az adott adalékkoncentrációjú (TiO_2/SN150A) ER folyadékok viselkedésének definiálása a villamos térerősség és térfogatáram függvényében. Ennek érdekében minden vizsgált paraméter esetében felállítok egy kétváltozós függvényt. Első lépésként egy alkalmas függvényt kell választani, amely paramétereinek identifikálásával elő tudom állítani a legjobban illeszkedő térbeli függvényt. A mérések eredményeiből látható volt, hogy a másodlagos nyomásnövekedés villamos térerősség függése autokatalitikus függvénnyel jól közelíthető. Azonban a vizsgálatok eredményeként az is látható, hogy a térfogatáram függvényében a másodlagos nyomásnövekedés szintén autokatalitikus jelleg szerint változik. Ennek okán a másodlagos nyomásnövekedés villamos térerősség és térfogatáram közelítésére a következő alakú függvényt választottam:

$$\Delta p_{ER2} = (a \cdot E + b) \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{c + d \cdot Q}} \right) + (\alpha \cdot Q + \beta) \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{\gamma + \delta \cdot E}} \right) \tag{32}$$

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 illesztettem. A paramétereket a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg.



4.34. ábra Másodlagos nyomásnövekedés a villamos térerősség és térfogatáram függvényében (m = 30 % adalékkoncentráció TiO_2/SN150A keverék)

Az ábra a másodlagos nyomásnövekedést (Δp_{ER2}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Villamos térerősség: E = 0, 2, 4, 6, 8 kV/mm, Térfogatáram: 0,42; 0,66; 0,81; 1,06; 1,31; L/min) Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. Az ábrán látható továbbá az ismertetett alakú függvényt $\Delta p_{ER2} = (a \cdot E + b) \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{c+d \cdot Q}} \right) + (\alpha \cdot Q + \beta) \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{\gamma + \delta \cdot E}} \right)$, amelynek paramétereit (a, b, c, d, α, β, γ, és δ) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméter: adalékkoncentráció 30 %.

A korrelációs koefficiens értéke R^2 = 0,9980. Paraméterek: a = 21928; b = -8848,9; c = 229,72; d = -229,17; α = 173360; β = 361380; γ = 8,06; δ = -1,46.

A 30 % adalékkoncentrációjú (TiO_2/SN150A) ER folyadék másodlagos nyomásnövekedését közelítő függvény:

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

Az összefüggés érvényes, ha térfogatáramot (Q) L/min és a villamos térerősséget (E) kV/mm mértékegységbe helyettesítjük be. A paraméterek értéke amennyiben SI mértékegységben helyettesítünk az összefüggésbe a 4.5. táblázatban találhatóak.

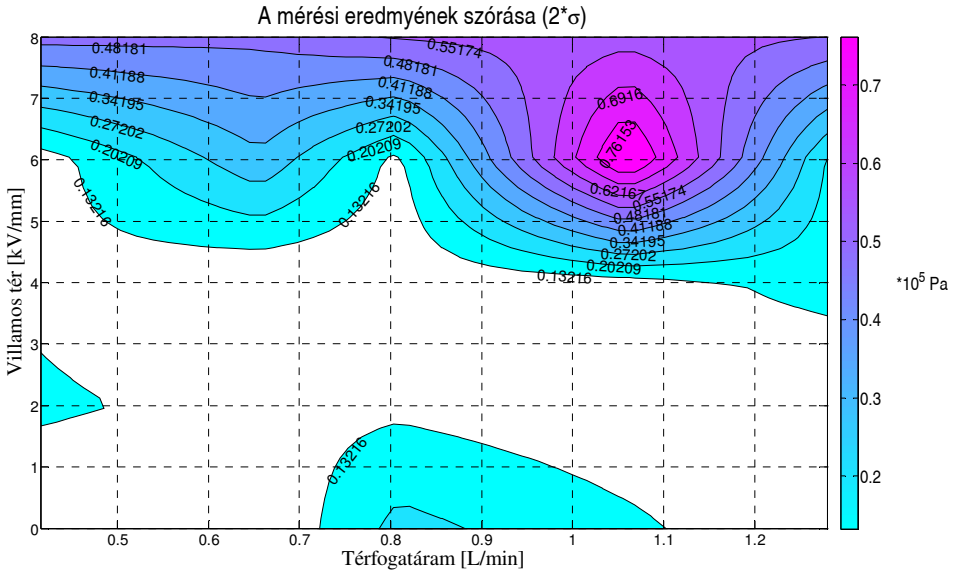
4.5 táblázat Függvényillesztés eredményei (Másodlagos nyomásnövekedés – villamos térerősség, térfogatáram $\Delta p_{ER2} = (a \cdot E + b) \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{c+d \cdot Q}} \right) + (\alpha \cdot Q + \beta) \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{\gamma + \delta \cdot E}} \right)$)

Paraméter	érték	mértékegység	érték	mértékegység (SI)
a	21928	[mm/kV]	0,0219	[m/V]
b	-8848,9	[Pa]	-8848,9	[Pa]
c	229,72	[-]	229,72	[-]
d	-229,17	[min/L]	-13750542	[s/m^3]
α	173360	[min/L]	1,0402e+010	[s/m^3]
β	361380	[Pa]	361380	[Pa]
γ	8,06	[-]	8,06	[-]
δ	-1,46	[mm/kV]	-1,4643e-006	[m/V]

Ahhoz, hogy képet kapjunk a kapott eredmény alkalmazhatóságának feltételeiről szükséges meghatároznom az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó (Villamos térerősség: E = 0, 2, 4, 6, 8 kV/mm, Térfogatáram: 0,42; 0,66; 0,81; 1,06; 1,31; L/min) mérési eredményhalmaz szórást. Normál eloszlás esetén az átlag $\pm 2\sigma$ tartományba esik a mintaelemek 95 %-a. A teljes vizsgálati tartományon a szórási mátrix:

$$2\sigma = \begin{bmatrix} 0.0799 & 0.0614 & 0.2247 & 0.1474 & 0.0694 \\ 0.1428 & 0.1103 & 0.1166 & 0.0806 & 0.0624 \\ 0.1181 & 0.0611 & 0.0808 & 0.1010 & 0.1576 \\ 0.0942 & 0.3263 & 0.1076 & 0.8625 & 0.1959 \\ 0.5087 & 0.5006 & 0.5605 & 0.5928 & 0.5507 \end{bmatrix} \cdot 10^5 \, Pa$$

A jobb áttekinthetőség érdekében síkbeli szintvonalas ábrázolást alkalmaztam, amely a szórás kétszeres (2σ) értékét mutatja a vizsgálati tartományban.



4.35. ábra Másodlagos nyomásnövekedés szórási mátrixa (2σ). (m = 30 % adalékkoncentráció TiO_2/SN150A keverék)

A függvény hibahatárának meghatározásához ellenőrizni kell, hogy az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásnégyzetek azonos elméleti szórásnégyzethez tartoznak-e (Fisher próba). A Fisher próba alapján a különböző kísérleti beállításokhoz tartozó szórásnégyzetek azonos elméleti szórásnégyzethez tartoznak ha:

$$F_{kis} = \frac{s_{max}^{\ 2}}{s_{min}^{\ 2}} \leq F_{tábl}$$

Egyenlőtlenség fennáll. Ehhez meg kell határozni a F táblázati értékét, amit a maximális és minimális szórásokhoz tarozó szabadságfokok alapján táblázatból határoztam meg. $\alpha = 0{,}001$ szignifikancia szinten $F_{tábl} = 999$.

$$F_{kis} = \frac{s_{max}^{\ 2}}{s_{min}^{\ 2}} = \frac{0{,}4312^2}{0{,}0305^2} = 199{,}152 \leq F_{tábl} \Rightarrow megfelel!$$

A függvény hibahatárának meghatározásához ki kell számolni a függvény szórását valamint az illeszkedési szórást.

$$S_{fv} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} s^{\ 2}}{N}} = 0{,}1407$$

Ahol N a kísérleti beállítások száma

Ezek után az illeszkedési szórást kell meghatározni, és Fisher próbával ellenőrizni kell, hogy azonos elméleti szórásnégyzethez tartozik e a függvény szórása illetve az illeszkedési szórás.

$$S_{ill} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left[\Delta p_{ER2_atl_i} - \left((a\cdot Q_i + b)\cdot\left(\frac{1}{1+e^{c+d\cdot E_i}}\right) + (\alpha\cdot E_i + \beta)\cdot\left(\frac{1}{1+e^{\gamma+\delta\cdot Q_i}}\right)\right)\right]^2}{N-8}} = 0{,}2434$$

Szórásnégyzetek egyezőségének vizsgálata α = 0,001 szignifikanciaszinten, F_{kisill} = 3.7353

$$F_{kisill} = \frac{s_{ill}^{\ 2}}{s_{fv}^{\ 2}} \le F_{tábl}$$

$$F_{kisill} = \frac{s_{ill}^{\ 2}}{s_{fv}^{\ 2}} = \frac{0{,}2434^2}{0{,}1407^2} = 2{,}9956 \le 3{,}7353 \Rightarrow Megfelelő$$

Tehát a szórások azonos elméleti szórásnégyzethez tartoznak. Azaz a választott függvény megfelelő! A közelítő függvény hibahatára meghatározható az illeszkedési szórásból. Itt t értéke a Student táblázatból (α = 0,001) t = 3,7453.

$$\Delta = t \cdot S_{ill}\text{, Hibahatár} = 0{,}9117 \cdot 10^5\ Pa$$

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:

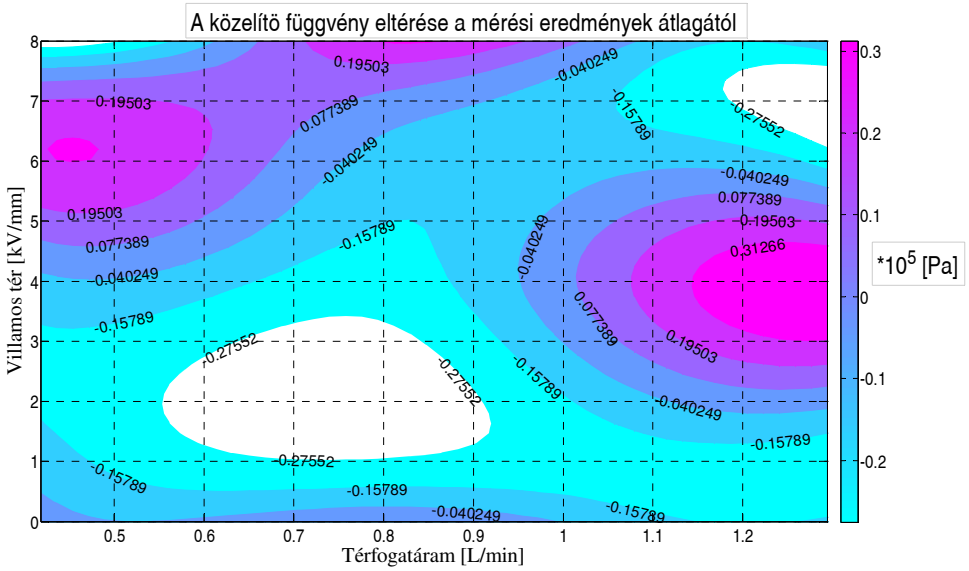
$$\Delta p_{ER2} = (21928\cdot Q - 8848{,}9)\cdot\left(\frac{1}{1+e^{229{,}72-229{,}17\cdot E}}\right) + (173360\cdot E + 361380)\cdot\left(\frac{1}{1+e^{8{,}06-1{,}46\cdot Q}}\right) \pm 91117\ [Pa]$$

A függvény ellenőrzése érdekében kiszámítottam az illesztett közelítő függvény eltérését a mérési eredmények átlagától. Az eltérésmátrix:

$$\Delta p_{ER2_SZ} - \Delta p_{ER2_M} = \begin{bmatrix} 0.0188 & 0.0064 & 0.0663 & -0.1027 & -0.1347 \\ -0.1754 & -0.3402 & -0.3518 & -0.0955 & -0.0054 \\ -0.0674 & -0.1571 & -0.2105 & 0.1742 & 0.4240 \\ 0.3029 & 0.1057 & -0.1005 & -0.0793 & -0.2067 \\ -0.3695 & 0.0609 & 0.3249 & -0.0094 & -0.0545 \end{bmatrix} \cdot 10^5 \ Pa$$

A legnagyobb eltérés = *0,4240* bar

Az értékeket szintvonalas megjelenítéssel ábrázolom a könnyebb átláthatóság érdekében a teljes vizsgálati tartományban.



4.36. ábra Másodlagos nyomásnövekedés átlagértékeire illesztett közelítő függvény eltérése a mérési eredmények átlagértékeitől. (m = 30 % adalékkoncentráció TiO_2/SN150A keverék)

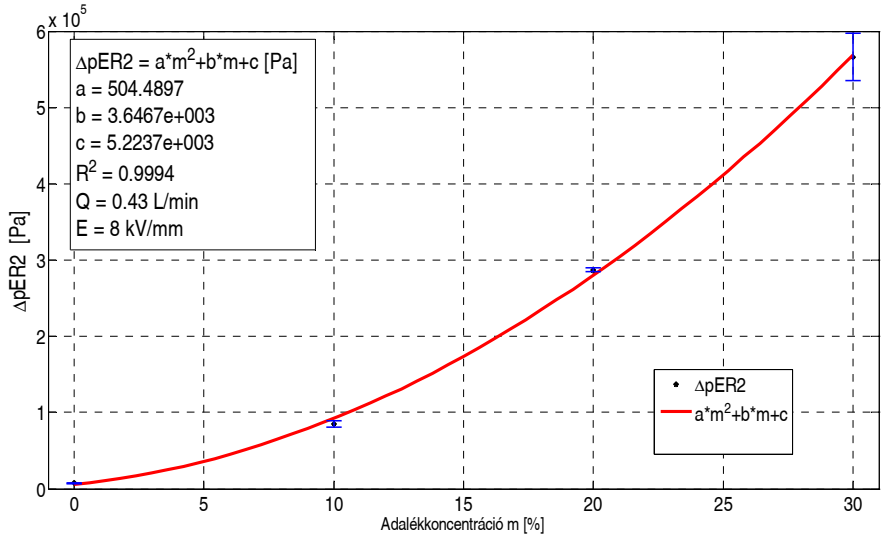
A meghatározott összefüggéssel stacionárius síkáramlási rendszerben (például: lengéscsillapító, hidraulikus alkalmazás) a térfogatáram és villamos térerősség ismeretében meghatározható a másodlagos nyomásnövekedés közelítő értéke.

4.5. Az másodlagos nyomásnövekedés adalékkoncentráció függésének vizsgálata

Ennél a vizsgálatnál állandó 8 kV/mm villamos teret alkalmaztam. Az adalékkoncentráció és másodlagos nyomásesés összefüggését a,

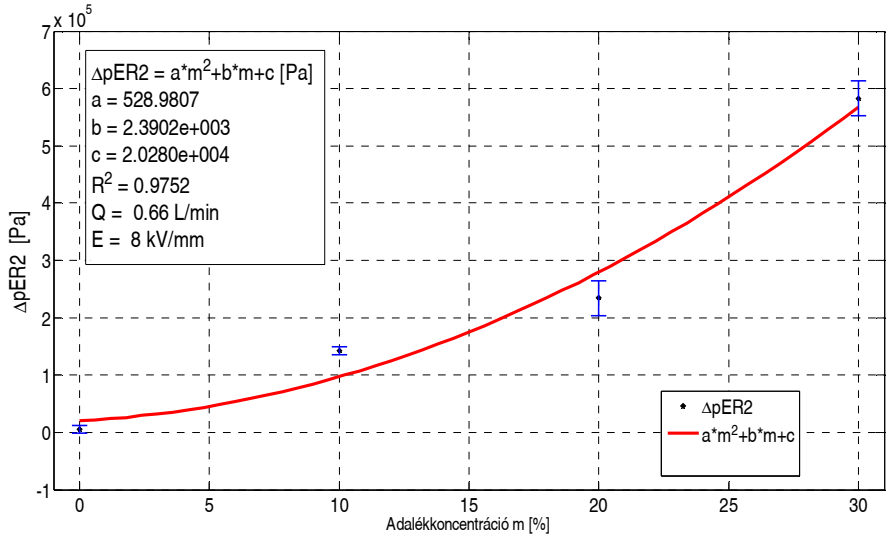
$$\Delta p_{ER2} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c \tag{33}$$

alakú függvénnyel közelítem, ahol m [%] adalékkoncentráció, a [Pa], b [Pa] és c [Pa] paraméterek. A következőkben három különböző térfogatáramnál végzett kísérletet mutatok be. A diagramokon látható a különböző adalékkoncentráció alkalmazásánál mért nyomásesések átlagértéke valamint azok szórása. A piros függvény az ismertetett alakú összefüggés a legkisebb négyzetek módszere alapján az átlagértékekre illesztve.



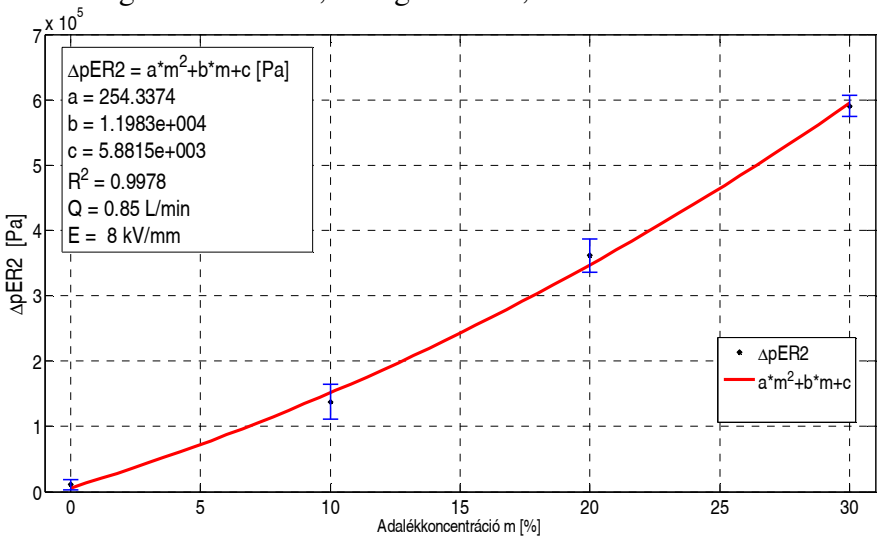
4.37. ábra Másodlagos nyomásnövekedés adalékkoncentráció függvénye E = 8 kV/mm villamos térerősség és Q = 0,43 L/min térfogatáram esetén

A diagram a másodlagos nyomásnövekedés (Δp_{ER2}) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (adalékkoncentráció m = 0, 10, 20, 30 %) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\Delta p_{ER2} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$) ábrázolja, amelynek paramétereit (a, b, c) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: villamos térerősség E = 8 kV/mm, térfogatáram 0,43 L/min.



4.38. ábra Másodlagos nyomásnövekedés adalékkoncentráció függvénye E = 8 kV/mm villamos térerősség és Q = 0,66 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 egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\Delta p_{ER2} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$) ábrázolja, amelynek paramétereit (a, b, c) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: villamos térerősség E = 8 kV/mm, térfogatáram 0,66 L/min.



4.39. 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 egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5

ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\Delta p_{ER2} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$) ábrázolja, amelynek paramétereit (a, b, c) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: villamos térerősség E = 8 kV/mm, térfogatáram 0,85 L/min. Az illesztés eredményeit táblázatban foglaltam össze:

4.6 táblázat Függvényillesztés eredményei (Másodlagos nyomásnövekedés - adalékkoncentráció, $\Delta p_{ER2} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$)

R^2	a [pa]	b [Pa]	c [Pa]	Q [l/min]
0,9978	254,3374	1,20E+04	5,88E+03	0,43
0,9752	528,9807	2,39E+03	2,03E+04	0,66
0,9994	504,4897	3,65E+03	5,22E+03	0,85

A másodlagos nyomásnövekedés átlagértékeire illesztett függvény korrelációs együtthatója minden vizsgáltnál nagyobb, mint 0,95. Így kimondható, hogy a másodlagos nyomásnövekedés

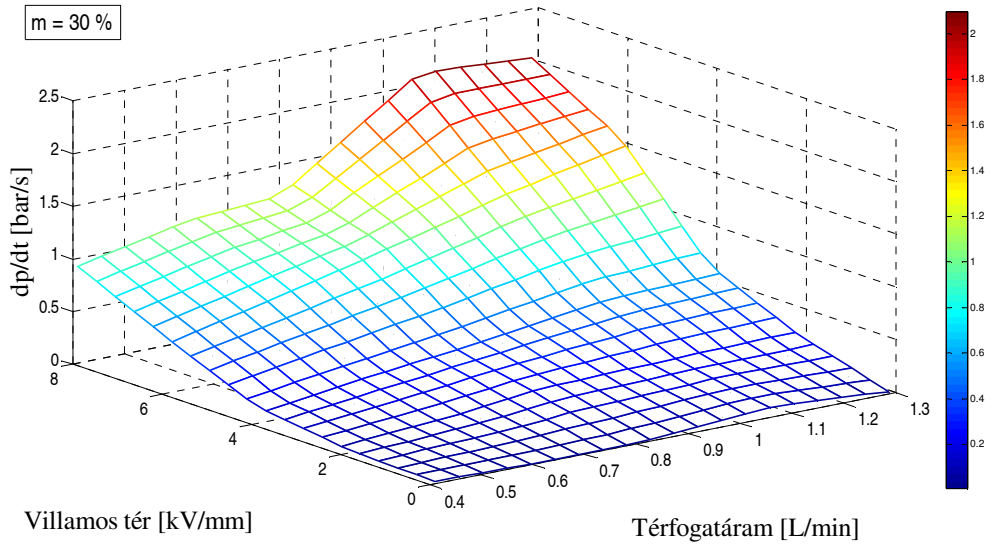
$$\Delta p_{ER2} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$$

alakú függvénnyel közelíthető.

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

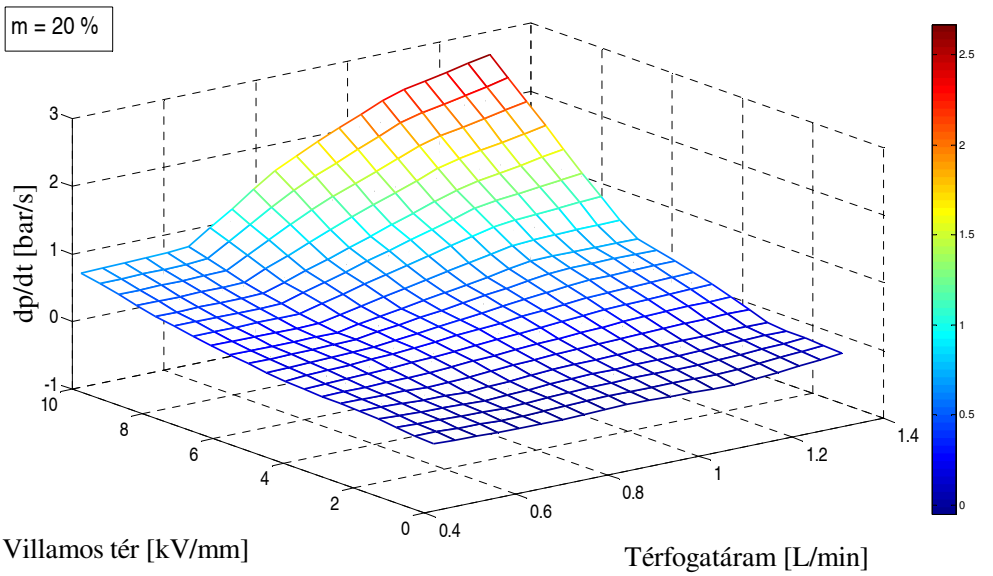
A másodlagos nyomásnövekedés intenzitás mérési eredményeinek áttekintése adott adalékanyag koncentráció mellett.

A következőkben a m = 30 % és m = 20 % adalékkoncentrációjú TiO_2/SN150A keverék másodlagos nyomásnövekedés intenzitásának villamos térerősség és térfogatáram függését ábrázolom. A 4.40. és 4.41. ábrák a másodlagos nyomásnövekedés intenzitását ábrázolják a villamos térerősség és térfogatáram függvényében.



4.40. ábra Másodlagos nyomásnövekedés intenzitása az villamos térerősség és térfogatáram függvényében (m = 30 % adalékkoncentráció TiO_2/SN150A keverék)

Az ábra a másodlagos nyomásnövekedés intenzitás átlagértékeit $(\frac{dp}{dt})$ ábrázolja a villamos térerősség (E) és térfogatáram (Q) függvényében. Rögzített paraméterek: tömegkoncentráció m = 30 %.



4.41. ábra Másodlagos nyomásnövekedés intenzitása az villamos térerősség és térfogatáram függvényében (m = 20 % adalékkoncentráció TiO_2/SN150A keverék)

Az ábra a másodlagos nyomásnövekedés intenzitás átlagértékeit ($\frac{dp}{dt}$) ábrázolja a villamos térerősség (E) és térfogatáram (Q) függvényében. Rögzített paraméterek: tömegkoncentráció m = 20 %.

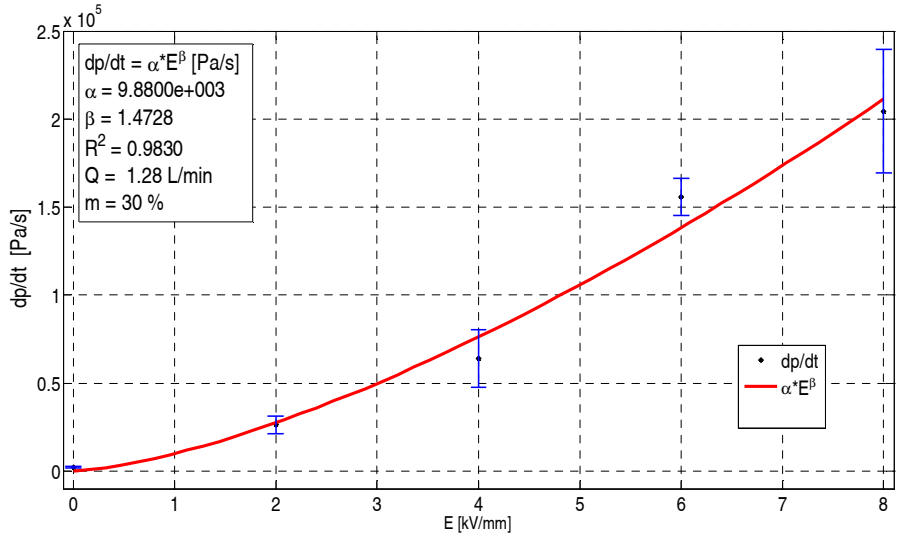
Az ábrákon látható, hogy mind a két paraméter (E, Q) hatással van a másodlagos nyomásnövekedés intenzitására.

A másodlagos nyomásnövekedés intenzitása villamos térerősség függésének vizsgálata állandó adalékkoncentráció és térfogatáram esetén.

A másodlagos nyomásnövekedés intenzitását az elsődleges nyomásnövekedéshez hasonló hatványfüggvény alakkal közelítem:

$$\frac{dp}{dt} = \alpha \cdot E^{\beta} \tag{34}$$

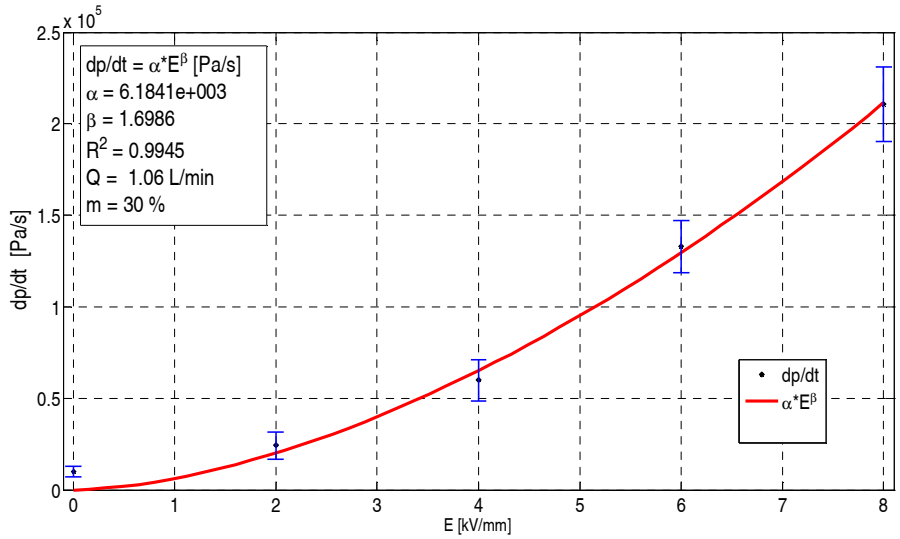
Ahol, E [kV/mm] villamos térerősség, α [Pa*mm/kV*s] és β [-] paraméterek. A következőkben különböző térfogatáramnál végzett kísérletet mutatok be. A diagramokon látható a különböző villamos térerősség alkalmazásánál mért másodlagos nyomásesés intenzitásának átlagértéke valamint azok szórása. A piros függvény az ismertetett alakú összefüggés a legkisebb négyzetek módszere alapján az átlagértékekre illesztve.



4.42. ábra Másodlagos nyomásnövekedés intenzitás villamos térerősség függvénye 1,28 L/min térfogatáram esetén

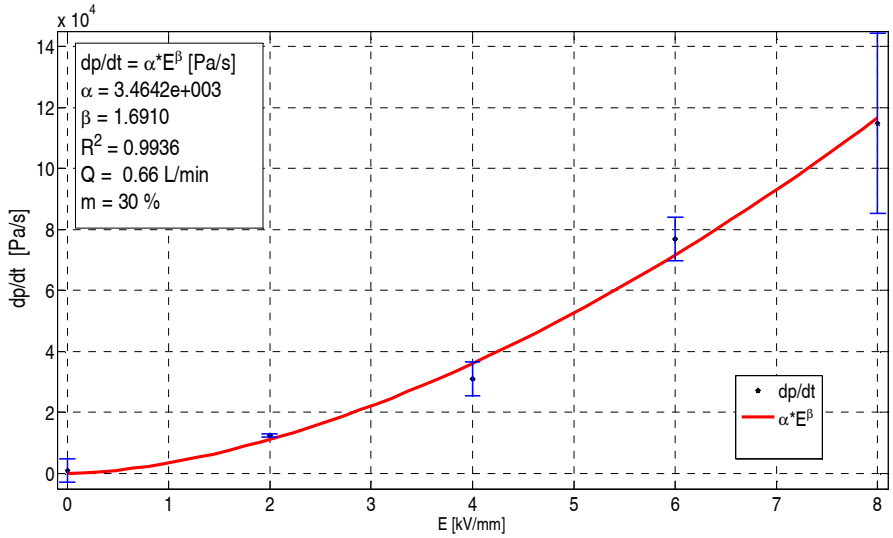
A diagram a másodlagos nyomásnövekedés intenzitás ($\frac{dp}{dt}$) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Villamos térerősség: E = 0, 2, 4, 6, 8 kV/mm) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$).

Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\frac{dp}{dt} = \alpha \cdot E^{\beta}$) ábrázolja, amelynek paramétereit (α, β) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, térfogatáram 1,28 L/min.



4.43. ábra Másodlagos nyomásnövekedés intenzitás villamos térerősség függvénye 1,06 L/min térfogatáram esetén

A diagram a másodlagos nyomásnövekedés intenzitás ($\frac{dp}{dt}$) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Villamos térerősség: E = 0, 2, 4, 6, 8 kV/mm) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\frac{dp}{dt} = \alpha \cdot E^{\beta}$) ábrázolja, amelynek paramétereit (α, β) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, térfogatáram 1,06 L/min.



4.44. ábra Másodlagos nyomásnövekedés intenzitás villamos térerősség függvénye 0,66 L/min térfogatáram esetén

A diagram a másodlagos nyomásnövekedés intenzitás ($\frac{dp}{dt}$) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Villamos térerősség: E = 0, 2, 4, 6, 8 kV/mm) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\frac{dp}{dt} = \alpha \cdot E^{\beta}$) ábrázolja, amelynek paramétereit (α, β) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, térfogatáram 0,66 L/min.

Az eredményeket táblázatban foglaltam össze:

4.7 táblázat Függvényillesztés eredményei (Másodlagos nyomásnövekedés intenzitás – villamos térerősség, $\frac{dp}{dt} = \alpha \cdot E^{\beta}$)

R^2	α [Pa · mm/kV · s]	β [-]	m [%]	Q [l/min]
0,983	9,88E+03	1,4728	30	1,28
0,9945	6,18E+03	1,6986	30	1,06
0,9936	3,46E+03	1,691	30	0,66

A másodlagos nyomásnövekedés intenzitás átlagértékeire illesztett függvény korrelációs együtthatója minden vizsgáltnál nagyobb, mint 0,95. Így kimondható, hogy a másodlagos nyomásnövekedés intenzitása

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

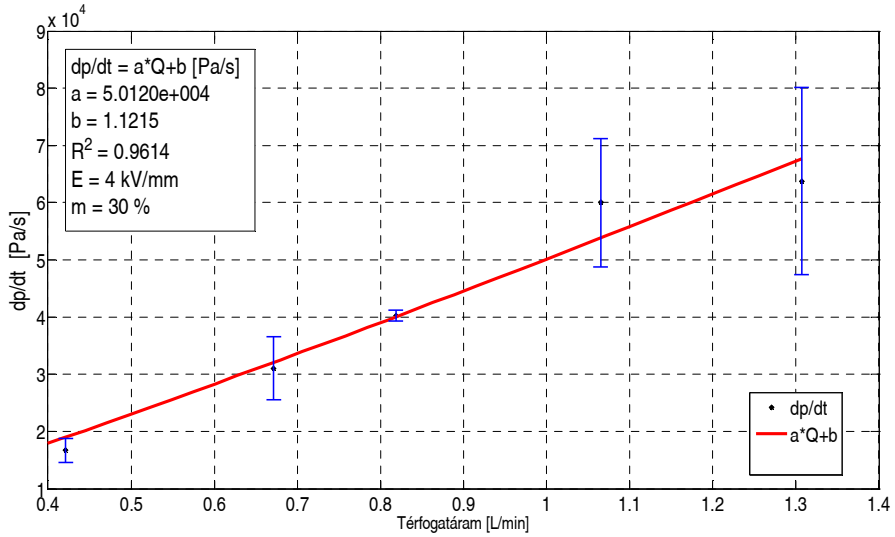
alakú hatványfüggvénnyel közelíthető.

A másodlagos nyomásesés intenzitás térfogatáram függésének vizsgálata.

A másodlagos nyomásnövekedés intenzitásának térfogatáram függését lineáris függvénnyel közelítem:

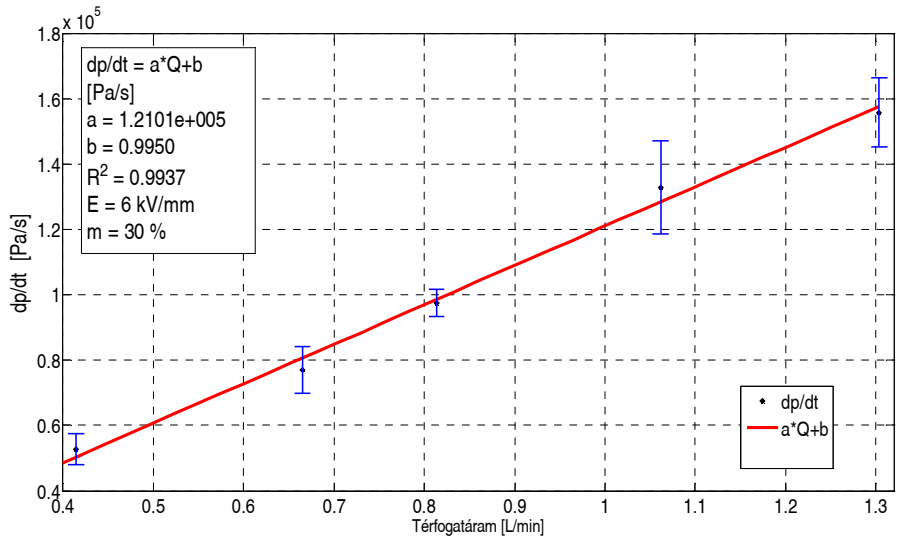
$$\frac{dp}{dt} = a \cdot Q + b \tag{35}$$

Ahol, Q [L/min] térfogatáram, a $[\,\mathrm{Pa \cdot min/s \cdot L}\,]$ és b [Pa/s] paraméterek. A következőkben különböző villamos térerősség alkalmazásánál végzett kísérletet mutatok be. A diagramokon látható a különböző térfogatáram alkalmazásánál mért nyomásesések átlagértéke valamint azok szórása. A piros függvény az ismertetett alakú összefüggés a legkisebb négyzetek módszere alapján az átlagértékekre illesztve.



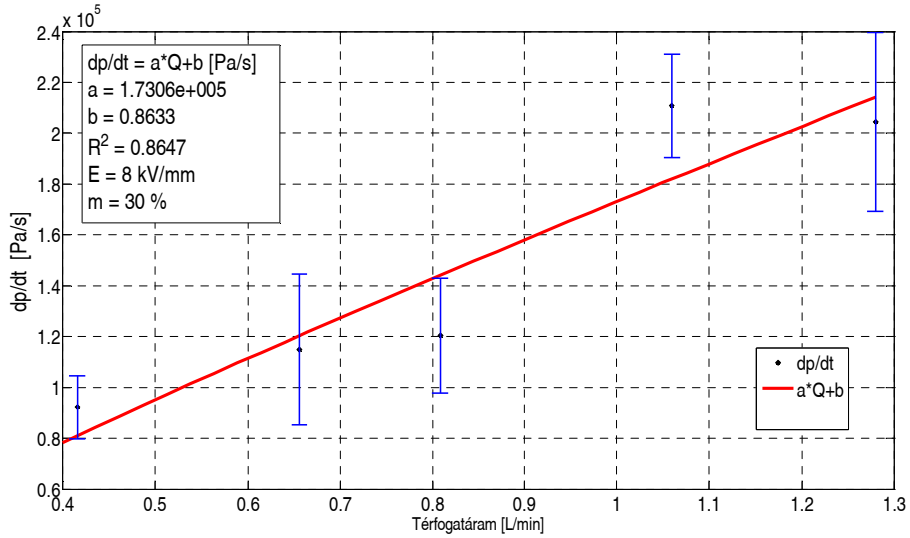
4.45. ábra Másodlagos nyomásnövekedés intenzitás térfogatáram függvénye E = 4 kV/mm villamos térerősség esetén

A diagram a másodlagos nyomásnövekedés intenzitását ($\frac{\mathrm{dp}}{\mathrm{dt}}$) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Térfogatáram: Q = 0,41; 0,66; 0,81; 1,06; 1,30 L/min) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\frac{\mathrm{dp}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{a} \cdot \mathrm{Q} + \mathrm{b}$) ábrázolja, amelynek paramétereit (a, b) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, villamos térerősség 4 kV/mm.



4.46. ábra Másodlagos nyomásnövekedés intenzitás térfogatáram függvénye E = 6 kV/mm villamos térerősség esetén

A diagram a másodlagos nyomásnövekedés intenzitását ($\frac{dp}{dt}$) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Térfogatáram: Q = 0,41; 0,66; 0,81; 1,06; 1,30 L/min) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\frac{dp}{dt} = a \cdot Q + b$) ábrázolja, amelynek paramétereit (a, b) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, villamos térerősség 6 kV/mm.



4.47 ábra Másodlagos nyomásnövekedés intenzitás térfogatáram függvénye E = 8 kV/mm villamos térerősség esetén

A diagram a másodlagos nyomásnövekedés intenzitását ($\frac{dp}{dt}$) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Térfogatáram: Q = 0,41; 0,66; 0,81; 1,06; 1,30 L/min) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\frac{dp}{dt} = a \cdot Q + b$) ábrázolja, amelynek paramétereit (a, b) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %, villamos térerősség 8 kV/mm.

A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a térfogatáram növekedésével a másodlagos nyomásesés intenzitása növekvő tendenciát mutat. Azonban az egyértelmű lineáris kapcsolat nem igazolható. A térfogatáram és másodlagos nyomásnövekedés intenzitásának kapcsolata további vizsgálatot igényel.

Másodlagos nyomásnövekedés intenzitása a villamos térerősség és térfogatáram függvényében adott adalékkoncentráció esetén

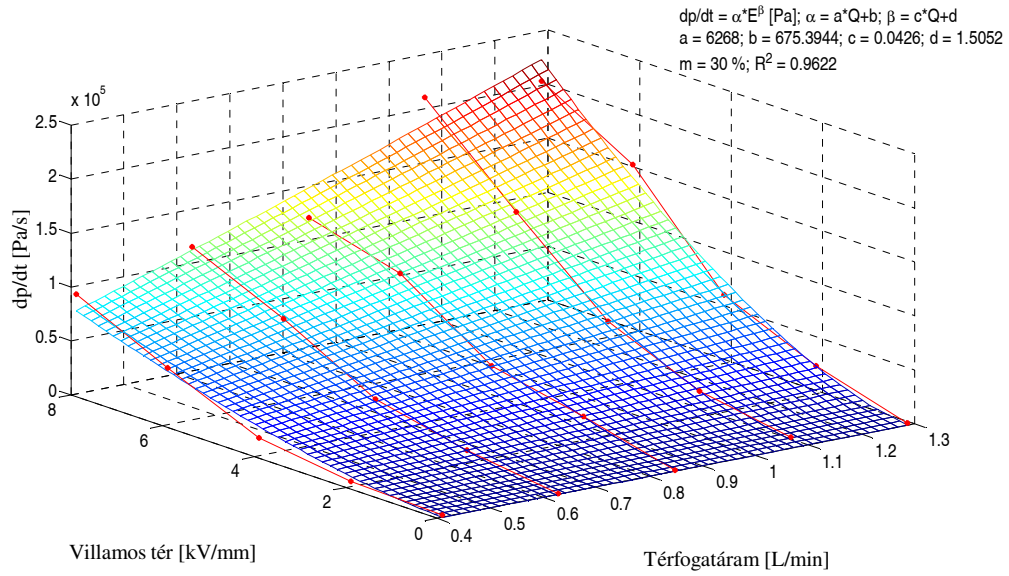
Miután megvizsgáltam a másodlagos nyomásnövekedés intenzitásának függését az egyes változóktól (E, Q) képet kaptam a nyomásnövekedési folyamat matematikai összefüggéseiről. Célom az adott adalékkoncentrációjú (TiO_2/SN150A) ER folyadékok viselkedésének definiálása a villamos térerősség és térfogatáram függvényében. Ennek érdekében minden vizsgált paraméter esetében felállítok egy kétváltozós függvényt. Első lépésként egy alkalmas függvényt kell választani, amely paramétereinek identifikálásával elő tudom állítani a legjobban illeszkedő térbeli függvényt. A mérések eredményeiből látható volt, hogy a másodlagos nyomásnövekedés intenzitása villamos térerősség függése hatványfüggvénnyel jól közelíthető. Azonban a vizsgálatok eredményeként az is látható, hogy az α és β paraméterek értéke a térfogatáram függvényében változnak (4.7. táblázat). Ezek ismeretében a másodlagos nyomásnövekedés intenzitásának villamos térerősség és térfogatáram közelítésére a következő alakú függvényt választottam:

$$\frac{dp}{dt} = (a \cdot Q + b) \cdot E^{c \cdot Q + d} \tag{36}$$

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

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



4.48. ábra Másodlagos nyomásnövekedés intenzitása az villamos térerősség és térfogatáram függvényében (m = 30 % adalékkoncentráció TiO_2/SN150A keverék)

Az ábra a másodlagos nyomásnövekedés intenzitás ($\frac{dp}{dt}$) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (Villamos térerősség: E = 0, 2, 4, 6, 8 kV/mm, Térfogatáram: 0,42; 0,66; 0,81; 1,06; 1,31; L/min) Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. Az ábrán látható továbbá az ismertetett alakú függvényt ($\frac{dp}{dt} = (a \cdot Q + b) \cdot E^{c \cdot Q + d}$), amelynek paramétereit (a, b, c, d) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: adalékkoncentráció 30 %. A korrelációs koefficiens értéke R^2 = 0,9622. Paraméterek: a = 6268; b = 675,3944; c = 0,0426; d = 1,5052. A 30 % adalékkoncentrációjú (TiO_2/SN150A) ER folyadék másodlagos nyomásnövekedés intenzitását közelítő függvény:

$$\frac{dp}{dt} = (6268{,}0 \cdot Q + 675{,}3944) \cdot E^{0{,}0426 \cdot Q + 1{,}5052}$$

Az összefüggés érvényes, ha térfogatáramot (Q) L/min és a villamos térerősséget (E) kV/mm mértékegységbe helyettesítjük be. A paraméterek értéke amennyiben SI mértékegységben helyettesítünk az összefüggésbe a 4.8. táblázatban találhatóak.

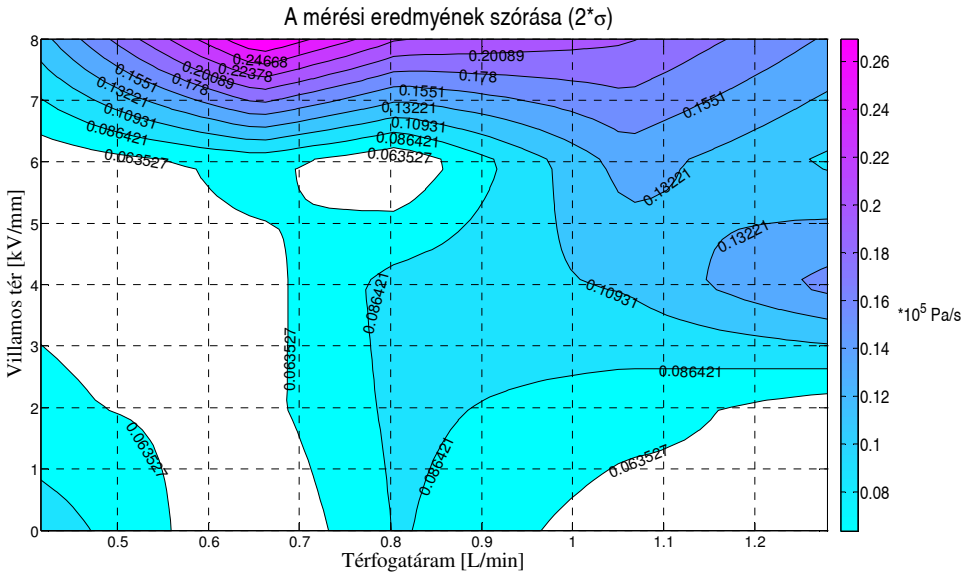
4.8 táblázat Függvényillesztés eredményei (Másodlagos nyomásnövekedés intenzitása – villamos térerősség, térfogatáram függvényében $\frac{dp}{dt} = (a \cdot Q + b) \cdot E^{c \cdot Q + d}$)

Paraméter	érték	mértékegység	érték	mértékegység (SI)
a	6268	$\left[\frac{Pa \cdot min \cdot mm}{L \cdot kV \cdot s}\right]$	0,2121	$\left[\frac{Pa}{V \cdot m^2}\right]$
b	675,3944	$\left[\frac{Pa \cdot mm}{kV \cdot s}\right]$	1,8893e-007	$\left[\frac{Pa \cdot m}{V \cdot s}\right]$
c	0,0426	$\left[\frac{min}{L}\right]$	69,1758	$\left[\frac{s}{m^3}\right]$
d	1,5052	[-]	1,5445	[-]

Ahhoz, hogy képet kapjunk a kapott eredmény alkalmazhatóságának feltételeiről szükséges meghatároznom az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó (Villamos térerősség: E = 0, 2, 4, 6, 8 kV/mm, Térfogatáram: 0,42; 0,66; 0,81; 1,06; 1,31; L/min) mérési eredményhalmaz szórást. Normál eloszlás esetén az átlag $\pm 2\sigma$ tartományba esik a mintaelemek 95 %-a. A teljes vizsgálati tartományon a szórási mátrix:

$$2\sigma = \begin{bmatrix} 0.1006 & 0.0385 & 0.0889 & 0.0483 & 0.0608 \\ 0.0662 & 0.0566 & 0.0919 & 0.0745 & 0.0509 \\ 0.0610 & 0.0550 & 0.0962 & 0.1120 & 0.1635 \\ 0.0466 & 0.0711 & 0.0414 & 0.1427 & 0.1051 \\ 0.1237 & 0.2955 & 0.2252 & 0.2037 & 0.1523 \end{bmatrix} \cdot 10^5 \; Pa/s$$

A jobb áttekinthetőség érdekében síkbeli szintvonalas ábrázolást alkalmaztam, amely a szórás kétszeres (2σ) értékét mutatja a vizsgálati tartományban.



4.49. ábra Másodlagos nyomásnövekedés intenzitás szórása (2σ). (m = 30 % adalékkoncentráció TiO_2/SN150A keverék)

A függvény hibahatárának meghatározásához ellenőrizni kell, hogy az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásnégyzetek azonos elméleti szórásnégyzethez tartoznak-e (Fisher próba). A Fisher próba alapján a különböző kísérleti beállításokhoz tartozó szórásnégyzetek azonos elméleti szórásnégyzethez tartoznak ha:

$$F_{kis} = \frac{s_{max}^{2}}{s_{min}^{2}} \leq F_{tábl}$$

Egyenlőtlenség fennáll. Ehhez meg kell határozni a F táblázati értékét, amit a maximális és minimális szórásokhoz tarozó szabadságfokok alapján táblázatból határoztam meg. $\alpha = 0{,}001$ szignifikancia szinten $F_{tábl} = 999$.

$$F_{kis} = \frac{s_{max}^{2}}{s_{min}^{2}} = \frac{0{,}1477^2}{0{,}0192^2} = 59{,}0047 \leq F_{tábl} \Rightarrow megfelel!$$

A függvény hibahatárának meghatározásához ki kell számolni a függvény szórását valamint az illeszkedési szórást.

$$S_{fv} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} s^{2}}{N}} = 0{,}0603$$

Ahol N a kísérleti beállítások száma

Ezek után az illeszkedési szórást kell meghatározni, és Fisher próbával ellenőrizni kell, hogy azonos elméleti szórásnégyzethez tartozik e a függvény szórása illetve az illeszkedési szórás.

$$S_{ill} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{dp_{atl_i}}{dt} - (a \cdot Q + b) \cdot E_{_i}^{\,c \cdot Q + d} \right)^2}{N - 4}} = 0{,}11499$$

Szórásnégyzetek egyezőségének vizsgálata $\alpha = 0{,}001$ szignifikanciaszinten, $F_{kisill} = 3.7353$

$$F_{kisill} = \frac{s_{ill}^{\,2}}{s_{fv}^{\,2}} \le F_{tábl}$$

$$F_{kisill} = \frac{s_{ill}^{\,2}}{s_{fv}^{\,2}} = \frac{0{,}1149^2}{0{,}0603^2} = 3{,}6310 \le 3{,}7353 \Rightarrow megfelel!$$

Tehát a szórások azonos elméleti szórásnégyzethez tartoznak. Azaz a választott függvény megfelelő! A közelítő függvény hibahatára meghatározható az illeszkedési szórásból. Itt t értéke a Student táblázatból ($\alpha = 0{,}001$) t = 3,7453.

$$\Delta = t \cdot S_{ill}$$, Hibahatár = $0{,}4302 \cdot 10^5 \ \ Pa / s$

A közelítő függvény, amellyel meghatározható a másodlagos nyomásnövekedés intenzitásának értéke a villamos térerősség és térfogatáram függvényében (p = 99 % valószínűségi szinten) m = 30 % adalékkoncentrációjú TiO_2/SN150A keverék esetén, Q = 0,41 – 1,31 L/min és E = 0 – 8 kV/mm érvényességi tartományban:

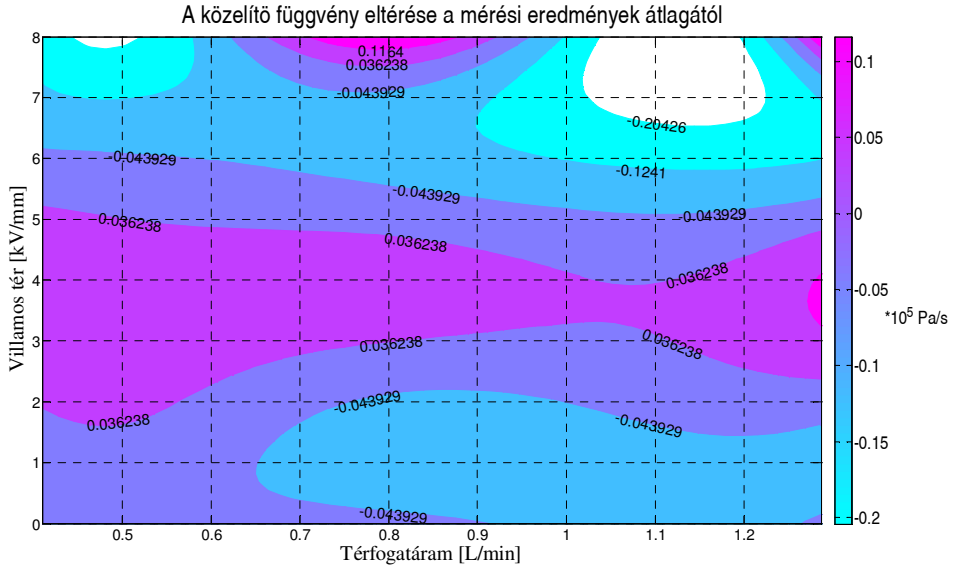
$$\frac{dp}{dt} = (6268{,}0 \cdot Q + 675{,}3944) \cdot E^{0{,}0426 \cdot Q + 1{,}5052} \pm 43020 \, [Pa / s]$$

A függvény ellenőrzése érdekében kiszámítottam az illesztett közelítő függvény eltérését a mérési eredmények átlagától. Az eltérésmátrix:

$$\frac{dp_{SZ}}{dt} - \frac{dp_M}{dt} = \begin{bmatrix} -0.0238 & -0.0089 & -0.0070 & -0.1000 & -0.0215 \\ 0.0438 & 0.0113 & -0.0446 & -0.0231 & -0.0018 \\ 0.1026 & 0.0779 & 0.1082 & 0.0357 & 0.1268 \\ -0.0294 & -0.0490 & -0.0248 & -0.1409 & -0.1238 \\ -0.1516 & -0.0312 & 0.2749 & -0.2546 & 0.1966 \end{bmatrix} \cdot 10^5 \ Pa/s$$

A legnagyobb eltérés = 0,2749 bar/s

Az értékeket szintvonalas megjelenítéssel ábrázolom a könnyebb átláthatóság érdekében a teljes vizsgálati tartományban.



4.50. ábra Másodlagos nyomásnövekedés intenzitásának átlagértékeire illesztett közelítő függvény eltérése a mérési eredmények átlagértékeitől. (m = 30 % adalékkoncentráció TiO_2/SN150A keverék)

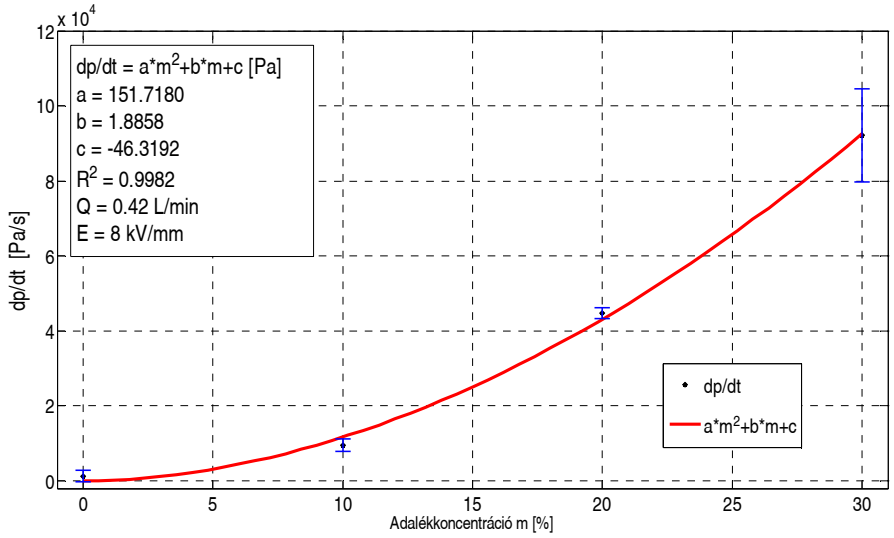
A meghatározott összefüggéssel stacionárius síkáramlási rendszerben a térfogatáram és villamos térerősség ismeretében meghatározható a másodlagos nyomásnövekedés intenzitásának értéke.

4.7. A másodlagos nyomásnövekedés intenzitás adalékkoncentráció függésének vizsgálata

Ennél a vizsgálatnál állandó 8 kV/mm villamos teret alkalmaztam. Az adalékkoncentráció és másodlagos nyomásesés intenzitás összefüggését

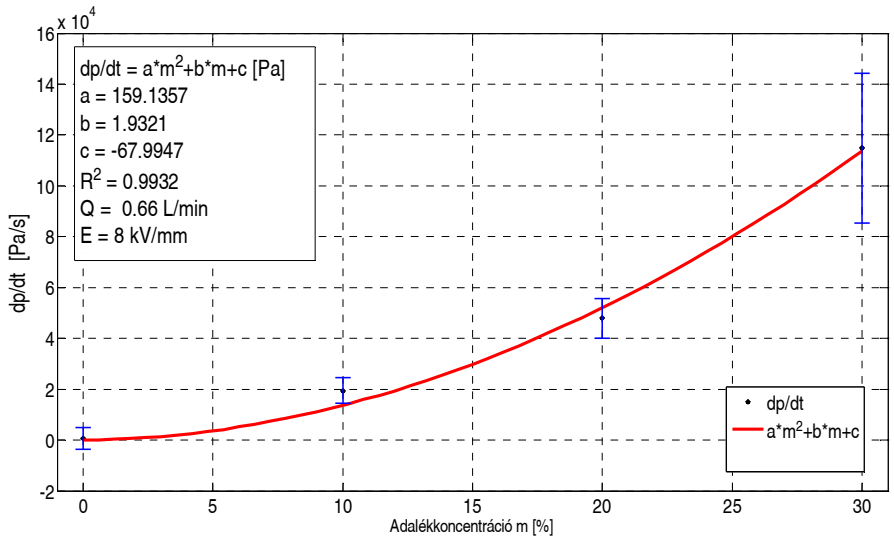
$$\frac{dp}{dt} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c \qquad (37)$$

alakú függvénnyel közelítem, ahol m [%] adalékkoncentráció, a [Pa/s], b [Pa/s] és c [Pa/s] paraméterek. A következőkben különböző térfogatáramnál végzett kísérletet mutatok be. A diagramokon látható a különböző adalékkoncentráció alkalmazásánál mért nyomásesések átlagértéke valamint azok szórása. A piros függvény az ismertetett alakú összefüggés a legkisebb négyzetek módszere alapján az átlagértékekre illesztve.



4.51. 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 ($\frac{dp}{dt}$) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (adalékkoncentráció m = 0, 10, 20, 30 %) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\frac{dp}{dt} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$) ábrázolja, amelynek paramétereit (a, b, c) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: villamos térerősség E = 8 kV/mm, térfogatáram 0,42 L/min.



4.52. ábra Másodlagos nyomásnövekedés intenzitása és adalékkoncentráció függvénye E = 8 kV/mm villamos térerősség és Q = 0.66 L/min térfogatáram esetén

A diagram a másodlagos nyomásnövekedés intenzitás ($\frac{dp}{dt}$) átlagértékeit ábrázolja az egyes kísérleti beállításoknál (adalékkoncentráció m = 0, 10, 20, 30 %) valamint az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásokat ($\pm 2\sigma$). Minden beállításhoz 5 ismétlés tartozik. A piros folytonos vonal az ismertetett alakú függvényt ($\frac{dp}{dt} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$) ábrázolja, amelynek paramétereit (a, b, c) a legkisebb négyzetek módszerével határoztam meg. A mérésnél rögzített paraméterek: villamos térerősség E = 8 kV/mm, térfogatáram 0,66 L/min.
Az illesztés eredményeit táblázatban foglaltam össze:

4.9. táblázat Függvényillesztés eredményei (Másodlagos nyomásnövekedés intenzitás – adalékkoncentráció, $\frac{dp}{dt} = a \cdot m^2 + b \cdot m + c$)

R^2	a [Pa/s]	b [Pa/s]	c [Pa/s]	Q [l/min]
0,9982	151,7180	1,8858	-46,3192	0,42
0,9932	159,1357	1,9321	-67,9947	0,66

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

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

alakú függvénnyel közelíthető.

4.8. 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 [Pas]; 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 egységugrás 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:

$$\Delta p_{ER2} = \alpha \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{\beta + \gamma \cdot E}} \right)$$

(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 folyadékra 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,

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

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

5/c. A **másodlagos nyomásnövekedés intenzitása** villamos térerősség és térfogatáram $\frac{\mathrm{dp}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{f}(\mathrm{E}, \mathrm{Q})$ 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 vonatkozási vannak.

A törvényszerűségek és az alapösszefüggések feltárásához egy fajta 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 folyadékhőmérséklet hatása az ER jelenségre a jelen kutatásban alkalmazott anyagkombináció esetében. További kutatási feladatként ennek feltárását is elkerülhetetlennek tartom.

A műszaki életben gyakran előforduló szűréstechnikai 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 alkalmassá 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 elektroviszkoziméterrel 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 150A + TiO_2) 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 150A + TiO_2) 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. SUMMARY

ELECTRO-RHEOLOGICAL FLUIDS IN FLOW MODE

In the course of my work as the first step I reviewed the domestic and international vocational literature. After processing the literature I have established that the methods of the examinations of the ER fluids – from the respect of fluid mechanics - can be divided into two main groups: the one which is based on flow mode and the one based on share mode. The majority of the researchers carry on their examination of ER fluids with rotational electro-viscosimeters, thus a significant part of the material tests apply the share method, however, in hydraulic systems it is the flow mode that evolves. Seeing that I mainly devote the application areas of the ER valve to circles fulfilling hydraulic energy transport, I analyze flow mode relations which evolve in such circumstances. The literature of the examination methods based on this principle is, however, rather poorish.

In view of this I carried on my work elaborating an examination method resting on the flow mode, by the result of which I worked out a so called test concept based on ER valves.

I developed the test method based on the ER valve and I also built up the test equipment. Within this, I complied the hydraulic and electronic systems of the test equipment. I created its measure data collecting and measure controlling algorithms.

On the basis of mixing experiments I generated an ER fluid (SN 150A + TiO_2) and I did the test of the base liquid considering the átütési stress and zero-field viscosity at 0, 10, 20, 30 mass percent additive material concentration as well.

In the course of my experiments I defined the typical press process of the ER fluid generated by myself under step response-shape electric field in flow mode systems. As a result of this I defined the primary and secondary pressure increase and its intensity.

I defined the relation between the primary pressure increase and the electric field, flowrate and additive material concentration. Also, I defined the secondary pressure increase and its electric field, flowrate and additive material concentration dependence.

On the grounds of my examinations I formulated my new scientific results, in addition I made proposals for the practical applications of the results attained and for fulfilling further research objects.

MELLÉKLETEK

M1. Irodalomjegyzék

1. Adriani P.M. - Gast A.P. (1988): A microscopic model of electrorheology, *Physics of Fluid,* 31 (10) pp. 2757-2769.

2. Anderson R.A. (1994): Electrostatic Forces in an Ideal Spherical-Particle Electrorheological Fluid, *Langmuir,* 10 (9) pp. 2917-2928.

3. Andrade E.N. - Dodd C. (1939): Effect of an Electric Field on the Viscosity of Liquids, *Nature,* 143 (3610) pp. 26-27.

4. Atten P. - Foulc J-N. - Felici N. (1994): A Conduction Model Of The Electrorheological Effect, *International Journal of Modern Physics B.,* 8 (20-21) pp. 2731-2745.

5. Block H. - Kelley J.P. - Qin A. - Watson T.(1990): Materials and mechanisms in electrorheology, *Langmuir,* 6 (1) pp. 6-14.

6. Block H. - Kelley J.P.(1988): Electro-rheology, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 21 (12) pp.1661-1671.

7. Bossis G. - Lemaire E. - Volkova O. - Clercx H. (1997): Yield stress in magnetorheological and electrorheological fluids: A comparison between microscopic and macroscopic structural models, *Journal of Rheology*, 41 (3) pp. 687-705.

8. Chen Y. - Sprecher A.F. - Conrad H. (1991): Electrostatic particle-particle interactions in electrorheological fluids, *Journal of Applied Physics*, 70 (11) pp. 6796-6804.

9. Choi S. B. - Choi Y. T. - Chang E. G. - Han S. J. - Kim C. S. (1998): Control characteristics of a continuously variable ER damper, *Mechatronics*, 8 (2) pp. 143-161.

10. Choi S-B. - Park D-W. - Cho M-S. (2001): Position control of a parallel link manipulator using electro-rheological valve actuators, *Mechatronics*, 11 (2) pp. 157-181.

11. Conrad H. - Li Y. - Chen Y.(1995): The temperature dependence of the electrorheology and related electrical properties of corn starch/corn oil suspensions, *Journal of Rheology,* 39 (5) pp. 1041-1058.

12. Conrad H. - Sprecher A.F. - Choi Y. - Chen Y. (1991): The temperature dependence of the electrical properties and strength of electrorheological fluids, *Journal of Rheology*, 35 (7) pp.1393-1411.

13. Csizmadia B. – Nándori E. (szerk.) (2003): Modellalkotás, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 78-79 o.

14. Davis L.C. (1992):2. Polarization forces and conductivity effects in electrorheological fluids, *Journal of Applied Physics,* 72 (4) pp. 1334-1341.

15. Davis L.C. (1992): Finite-element analysis of particle- particle forces in electrorheological fluids, *Applied Physics Letters,* 60 (3) pp. 319-322.

16. Davis L.C. (1993): The metal-particle/insulating oil system: An ideal electrorheological fluid, *Journal of Applied Physics,* 73 (2) pp. 680-684.

17. Deinega Y.F. - Vinogradov G.V. (1984): Electric fields in the rheology of disperse systems, *Rheologica Acta,* 23 (6) pp. 636-651.

18. Duff A.W. (1896): The Viscosity of Polarized Dielectrics, *Physical Review*, 4 (1) pp. 23-38.

19. Élelmiszerfizika, http://physics2.kee.hu/_Elfizika/ (2010)

20. Farkas I. (1999): Számítógépes szimuláció, Gödöllő egyetemi jegyzet

21. Foulc J-N. - Atten P. - Felici, N. J. (1994): Macroscopic model of interaction between particles in an electrorheological fluid, *Journal of Electrostatics,* 33 (1) pp. 103-112.

22. Garrido L. (1993): „Complex Fluids” Springer Verlag, London

23. Gow C.J. - Zukoski C.F. (1990): The electrorheological properties of polyaniline suspensions, *Journal of Colloid And Interface Science,* 136 (1) pp. 175-188.

24. Ha J. - Yang S. (2000):Rheological responses of oil-in-oil emulsions in an electric field, *Journal of Rheology,* 44 (2) pp. 235-257.

25. Hao T. - Chen Y. - Xu Z. - Xu Y. - Huang Y.(1994): Percolation transition in electrorheological fluids, *Chinese Journal of Polymer Science (English Edition),* 12 (2) pp. 97-105.

26. Hao T. - Yu H. - Xu Y. (1996): The conductivity confined temperature dependence of water-free electrorheological fluids, *Journal of Colloid and Interface Science,* 184 (2) pp. 542-549.

27. Hao T. - Xu Z. - Xu Y.(1997): Correlations of the dielectric properties of dispersed particles with the electrorheological effect, *Journal of Colloid and Interface Science*, 190 (2) pp. 334-340.

28. Hao T. (1997): The role of the dielectric loss of dispersed material in the electrorheological effect, *Appied Physics Letters,* 70 (15) pp. 1956-1959.

29. Hao T. (1998): Dynamic-Field-Induced Oscillatory dc Current in Colloidal Crystallite, *Journal of Physical Chemistry,* 102 (1) pp.1-3.

30. Hao T. (1998): The Interfacial Polarization-Induced Electrorheological Effect, *Journal of Colloid and Interface Science,* 206 (1) pp. 240-246.

31. Hao T. - Kawai A. - Ikazaki F. (1998): Mechanism of the Electrorheological Effect: Evidence from the Conductive, Dielectric, and Surface Characteristics of Water-Free Electrorheological Fluids, *Langmuir,* 14 (5) pp. 1256-1262.

32. Hao T. - Kawai A. - Ikazaki F. (1999): Dielectric criteria for the electrorheological effect , *Langmuir,* 15 (4) pp. 918-921.

33. Hao T. - Kawai A. - Ikazaki F. (2000): The Yield Stress Equation for the Electrorheological Fluids , *Langmuir,* 16 (7) pp. 3058-3066.

34. Hao T. (2002): Electrorheological suspensions, *Advances in Colloid and Interface Science*, 97 (1) pp. 1-35.

35. Hartsock D.L. - Novak R.F. - Chaundy G.J. (1991): ER fluid requirements for automotive devices, *Journal of Rheology,* 35 pp. 1305-1327.

36. Honda T. - Sasada T. - Kurokawa K. (1978): The Electroviscous Effect in the MBBA Liquid Crystal, *Japanese Journal of Applied Physics (English Edition),* 17 pp. 1525-1530.

37. Hong S.R. - Choi S.B. - Choi Y.T. - Wereley N.M. (2005): A hydro-mechanical model for hysteretic damping force prediction of ER damper: experimental verification, *Journal of Sound and Vibration*, 285 pp.1180–1188.

38. http://www.kfki.hu/chemonet/hun/olvaso/kemia/intell.html (2011)

39. Ikazaki F. - Kawai A. - Kawakami T. - Edamura K. - Sakuri K. - Anzai H. et al. (1998): Mechanisms of electrorheology: the effect of the dielectric property, *Journal of Physics D: Applied Physics,* 31 pp. 336-345.

40. Kawai A. - Uchida K. - Kamiya K. - Gotoh A. - Yoda S. - Urabe K. (1996): Effect Of Dielectric Property Of Hydrous Dispersoid On Electrorheology, *International Journal of Modern Physics B,* 10 pp. 2849-2860.

41. Kesy Z. - Kesy A. - Płocharski J. - Jackson M. - Parkin R. (2006): An example of design Embodiment for electrorheological fluid based mechatronic transmission components, *Mechatronics*, 16 (1) pp. 33-39

42. Khusid B. - Acrivos A. (1995): Effects of conductivity in electric-field-induced aggregation in electrorheological fluids, *Physical Review* E, 52 (2) pp. 1669-1693.

43. Kim Y.D. - Klingenberg D.J. (1996): Two roles of nonionic surfactants on the elctrorheological response, *Journal of Colloid and Interface Science,* 183 (2) pp. 568-578.

44. Kim J-W. – Yoshida K. –Kouda K. – Yokota S. (2009): A flexible electro-rheological microvalve (FERV) based on SU-8 cantilever structures and its application to microactuators, *Sensors and Actuators A: Physical*, 156 (2) pp. 366-372

45. Kimura H. - Aikawa A. - Masubuchi Y. - Takimoto J. - Koyama K. - Uemura T. (1998): Positive and negative elecrto-rheological effect of liquid blends, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics,* 76 (1-3) pp. 199-211.

46. Klass D.L. - Martinek T.W. (1967): Electroviscous fluids i. rheological properties, *Journal of Applied Physics*, 38 (1) pp. 67-74.

47. Klass D.L. - Martinek T.W. (1967): Electroviscous fluids ii. electrical properties, *Journal of Applied Physics,* 38 (1) pp. 75-80.

48. Klingenberg D.J. - Zukoski C.F. (1990): Studies on the steady-shear behavior of electrorheological suspensions, *Langmuir,* 6 (1) pp. 15-24.

49. Klingenberg D.J. - Frank S. - Zukoski C.F. (1991):The small shear rate response of electrorheological suspensions. I. Simulation in the point–dipole limit, *Journal of Chemical Physics,* 94 (9) pp. 6160-6170.

50. Kuo W.-H. - Wu T.-N. - Guo J. - Chiang M.-H. - Chen Y.-N. (2006): Design and performance evaluation of a serial multi-electrode electrorheological damper, *Journal of Sound and Vibration*, 292 (3-5) pp. 694-709.

51. Lajos T. (2004): Az áramlástan alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 334-343. o.

52. Lan Y. - Xu X. - Men S. - Lu K. (1999): Orientation of particles in an electrorheological fluid under an electric field, *Physical Review* E, 60 (4) pp. 4336-4339.

53. Lee H.-G. – Choi S.-B. (2002): Dynamic properties of an ER fluid shear and flow modes, *Materials and Design*, 23 pp. 69-76.

54. Lim S. - Park S-M. - Kim K. (2005): AI vibration control of high-speed rotor systems using electrorheological fluid, *Journal of Sound and Vibration*, 284 (3-5) pp. 685-703.

55. Ma H. - Wen W. - Tam W.Y. - Sheng P. (1996): Frequency Dependent Electrorheological Properties: Origin and Bounds, *Physical Review Letters,* 77 (12) pp. 2499-2502.

56. Macsihin J.A. - Macsihin Sz. A. (1987): Élelmiszeripari termékek reológiája. Budapest: Mezőgazdasági Kiadó. ISBN 963-232-404-8

57. Marshall L. - Zukoski C.F. - Goodwin J.W. (1989): Effects of electric fields on the rheology of non-aqueous concentrated suspensions, *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions,* 85 pp. 2785-2793.

58. Morgan S.O. (1934): Two Types of Dielectric Polarization, *Transactions of the Electrochemical Society,* 65 (1) pp. 109-113.

59. Negita K. (1996): Electrorheological effect in the nematic phase of 4-n-pentyl-4′-cyanobiphenyl, *Journal of Chemical Physics,* 105 pp. 7837-7842.

60. Noresson V. - Ohlson N. G. - Nilsson M. (2002): Design of electrorheological dampers by means of finite element analysis: theory and applications, *Materials & Design*, 23 (4) pp. 361-369.

61. Onsager L. - Fuoss R.M. (1932): Irreversible Processes in Electrolytes. Diffusion, Conductance and Viscous Flow in Arbitrary Mixtures of Strong Electrolytes, *Journal of Physical Chemistry,* 36 (11) pp. 2689-2778.

62. Pan X. - McKinley G.H. (1997): Characteristics of electrorheological respons in an emulsion system, *Journal of Colloid and Interface Science,* 195 (1) pp. 101-113.

63. Papadopoulos C.A. (1998): Brakes and clutches using ER fluids, *Mechatronics*, 8 (7) pp. 719-726.

64. Pavlinek V. - Saha P. - Quadrat O. - Stejskal J. (2000): Rheological Behavior of Poly(methyl methacrylate) Dispersions Stabilized by a Diblock Copolymer. 2. Positive and Negative Electrorheological Effect, *Langmuir,* 16 (3) pp. 1447-1449.

65. Peng J.-Zhu K-Q. (2006): Effects of electric field on hydrodynamic characteristicsof finite-length ER journal bearings, *Tribology International*, 39 (6) pp. 533-540.

66. Qi M. - Shaw M.T.(1997): Sedimentation-resistant electrorheological fluids based on PVAL-coated microballoons, *Journal of Applied Polymer Science,* 65 (3) pp. 539-547.

67. Rankin P.J. - Klingenberg D.K. (1998): The electrorheology of barium titanate suspensions, *Journal of Rheology,* 42 (3) pp. 639-656.

68. See H. - Tamura H. - Doi M. (1993):The role of water capillary forces in electro-rheological fluids, *Journal of Physics D: Applied Physics,* 26 (5) pp. 746-752.

69. See H. - Saito T. (1996): Layered model of electrorheological fluid under flow, *Rheologica Acta,* 35 (3) pp. 233-241.

70. Stangroom J.E. (1983): Electrorheological fluids, *Physics in Technology,* 14 (6) pp. 290- 311.

71. Sung K-G. - Han Y-M. - Cho J-W. - Choi S-B. (2008): Vibration control of vehicle ER suspension system using fuzzy moving sliding mode controller, *Journal of Sound and Vibration*, 311 (3-5) pp. 1004–1019.

72. Tajiri K. - Ohta K. - Nagaya T. - Orihara H. (1997): Electrorheological effect in immiscible polymer blends, *Journal of Rheology,* 41 (2) pp. 335-341.

73. Tan K.P. - Stanway R.- Bullough W.A. (2006) : Validation of dynamic torque response of an electrorheological (ER) clutch, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20 (2) pp. 463-492.

74. Tan K.P. - Stanway R. - Bullough W.A. (2007):Braking responses of inertia load by using an electro-rheological (ER) brake, *Mechatronics*, 17 (6) pp. 277-289.

75. Tanaka Y. - Gofuku A.(1997): Development and analysis of an ERF pressure control valve, *Mechatronics*, 7 (4) pp. 317-335.

76. Tang X. - Wu C. - Conrad H. (1995): On the conductivity model for the electrorheological effect , *Journal of Rheology,* 39 (5) pp. 1059-1073.

77. Tao R. - Jiang Q. (1994): Simulation of solid structure formation in an electrorheological fluid, *International Journal of Modern Physics B,* 8 (20-21) pp. 2721-2730.

78. Trlica J. - Quadrat Q. - Bradna P.- Pavlinek V. - Saha P. (1996): An anomalous electrorheological behavior of magnesium hydroxide suspensions in silicone oil, *Journal of Rheology,* 40 (5) pp. 943-946.

79. Uejima H. (1972): Dielectric Mechanism and Rheological Properties of Electro-Fluids, *Japanese Journal of Applied Physics,* 11 pp. 319-326.

80. Valasek I. – Auer J. (2003): Kenőanyagok és vizsgálataik. Budapest: Tribotechnik Kft.

81. Vance J.M. - Ying D.(2000): Experimental Measurements of Actively Controlled Bearing Damping With an Electrorheological Fluid, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,* 122 (2) pp. 337-344.

82. Verhás J. (1985): Termodinamika és reológia. Budapest: Műszaki Könyvkiadó.

83. Wagner K.W.(1914): Erklärung der dielektrischen Nachwirkungsvorgänge auf Grund Maxwellscher Vorstellungen, *Archiv für Elektrotechnik,* 2 (9) pp. 371-387.

84. Wei K. - Meng G. - Zhou S. - Liu J.(2006): Vibration control of variable speed/acceleration rotating beams using smart materials, *Journal of Sound and Vibration*, 298 (4-5) pp. 1150-1158.

85. Wen W. - Lu K. (1996): A primary x-ray investigation of the turning of ferroelectric microspheres contained in electrorheological fluids under a direct current electric field, *Applied Physics Letters*, 68 (8) pp.1046-1047.

86. Winslow W.M. (1949): Induced fibration of suspensions, *Journal of Applied Physics*, 20 (12) pp. 1137-1140.

87. Wu C. - Conrad H. (1996): A modified conduction model for the electrorheological effect, *Journal of Physics D: Applied Physics,* 29 (12) pp. 3147-3153.

88. Wysocki J.J. - Adama J. - Hass W. (1969): Electroviscosity of a cholesteric liquid-crystal mixture, *Journal of Applied Physics,* 40 (9) pp. 3865-3866.

89. Xie H. - Guan J. - Guo J. (1997): Three ways to improve electroheological properties of polyaniline-based suspensions, *Journal of Applied Polymer Science,* 64 (8) pp. 1641-1647.

90. Xu Y. - Liang R. (1991): Electrorheological properties of semiconducting polymer based suspensions, *Journal of Rheology,* 35 (7) pp. 1355-1374.

91. Xu Y.L. - Qu W.L. - Ko J.M. (2000): Seismic response control of frame structures using magnetorheological/electrorheological dampers, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* 29 (5) pp. 557-575.

92. Yang I.K. - Shine A.D. (1992): Electrorheology of a nematic poly(n-hexyl isocyanate) solution, *Journal of Rheology,* 36 (6) pp. 1079-1105.

93. Yao N. - Jamieson A.M. (1997): Electrorheological Behavior of Side-Chain Liquid-Crystalline Polysiloxanes in Nematic Solvents, *Macromolecules,* 30 (19) pp. 5822 – 5831.

94. Yavuz M. - Tilki T.- Karabacak C. - Erol O. - Unal H. I. - Uluturk M. - Cabuk M. (2010): Electrorheological behavior of biodegradable modified corn starch/corn oil suspensions, *Carbohydrate Polymers*, Volume 79 (2) pp. 318-324

95. Yeh J. Y. (2011): Free vibration analysis of rotating polar orthotropic annular plate with ER damping treatment, *Composites Part B: Engineering,* 42 (4) pp. 781-788

96. Yoshida K. - Kikuchi M. - Park J. -H. - Yokota S.(2002): Fabrication of micro electro-rheological valves (ER valves) by micromachining and experiments, *Sensors and Actuators A: Physical*, 95, (2-3) pp. 227-233.

97. Zrínyi M. (2004): A 21. század anyagai: az intelligens anyagok, *Olaj, szappan, kozmetika* 53. évfolyam 1. szám 1-7 o.

98. Zrínyi M. (1999): Intelligens anyagok, *Magyar Tudomány*, 6 682-692 o.

99. Zukoski C.F. (1993): Material Properties and the Electrorheological Response, *Annual Review of Materials Science,* 23 (1) pp. 45-78.

M2. 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

Foldi 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 I**.**: 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.:** Electrorheologial properties of TiO_2/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. Gyulladási késedelem 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)

Nemzetközi konferencia abstract

Földi L., Jánosi L.: Modeling for electro-rheological liquid in hydraulic system. Synergy & Technical Development, International Conferences in Agricultural Engineering. Gödöllő, Hungary, 30. August - 03. September 2009. p. 107. ISBN 978-963-269-111-4

Földi L., Jánosi L.: Design of electro-rheological flow control valve. 7th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics. Wojcieszyce, Poland, 20-23 May 2008. p. 24. ISBN 978-83-7493-386-5

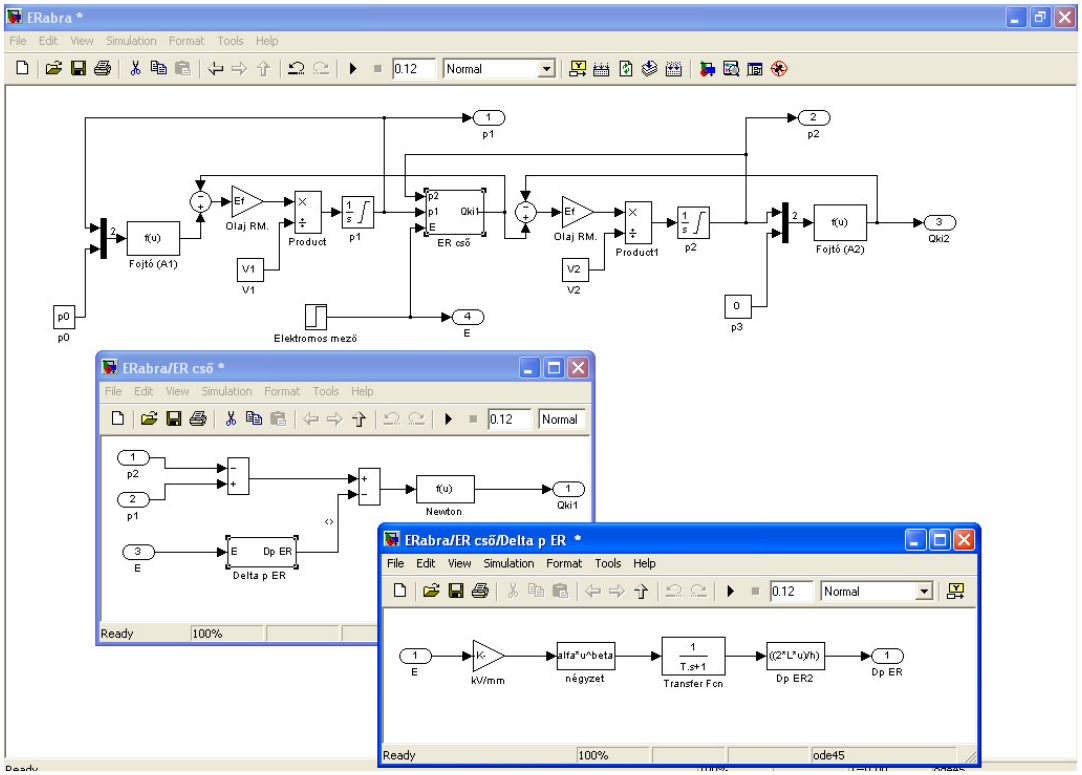
Magyar nyelvű abstract

Jánosi L, **Földi L.** Összehasonlító fékpadi motorvizsgálatok dízelolaj RME keverékekkel. Gödöllő, Magyarország, 2004.01.20-2004.01.21. SZIE Gépészmérnöki Kar - FVM Mezőgazdasági Gépesítési Intézet, 2004. 7. o. (XXVIII. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozáson elhangzott előadások gyűjteménye; 2.)

Földi L, Jánosi L, Sárközi E. Pneumatikus munkahengerekben lezajló dinamikus folyamatok modellezése Matlab Simulink környezetben. Gödöllő, Magyarország, 2005.01.18-2005.01.19. SZIE Gépészmérnöki Kar - FVM Mezőgazdasági Gépesítési Intézet, 2005. 6. o. (XXIX. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozáson elhangzott előadások gyűjteménye; 2.)

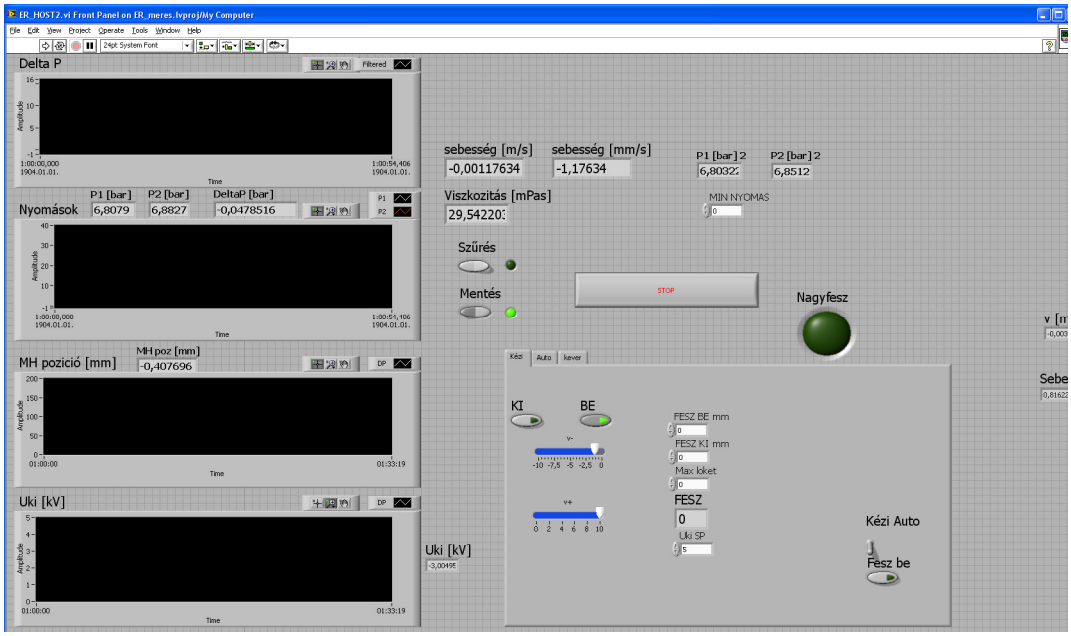
Földi L. Madarász I., Elektro-reológiai folyadékok vizsgálata. Tavaszi szél, DOSZ. Kaposvár 2006. 278. o. ISBN 963229773 3

M3. „Az ER vizsgáló rendszer működési elve” című fejezet ábra melléklete

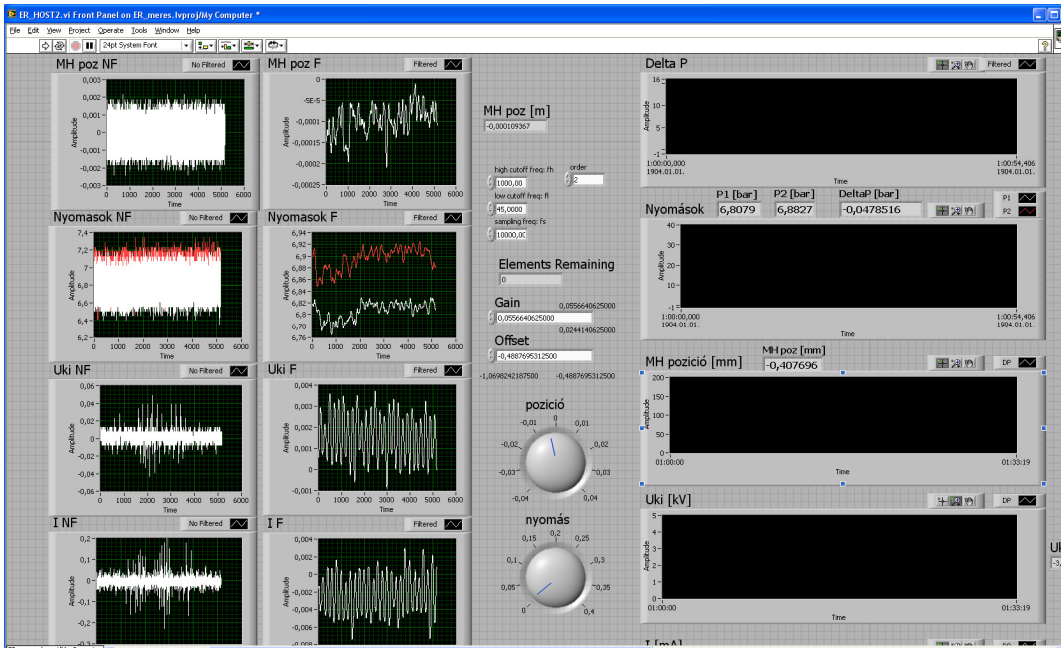


M3./1. ábra Az ER szelep matematikai modelljének blokkorientált megoldása (MATLAB SIMULIKN)

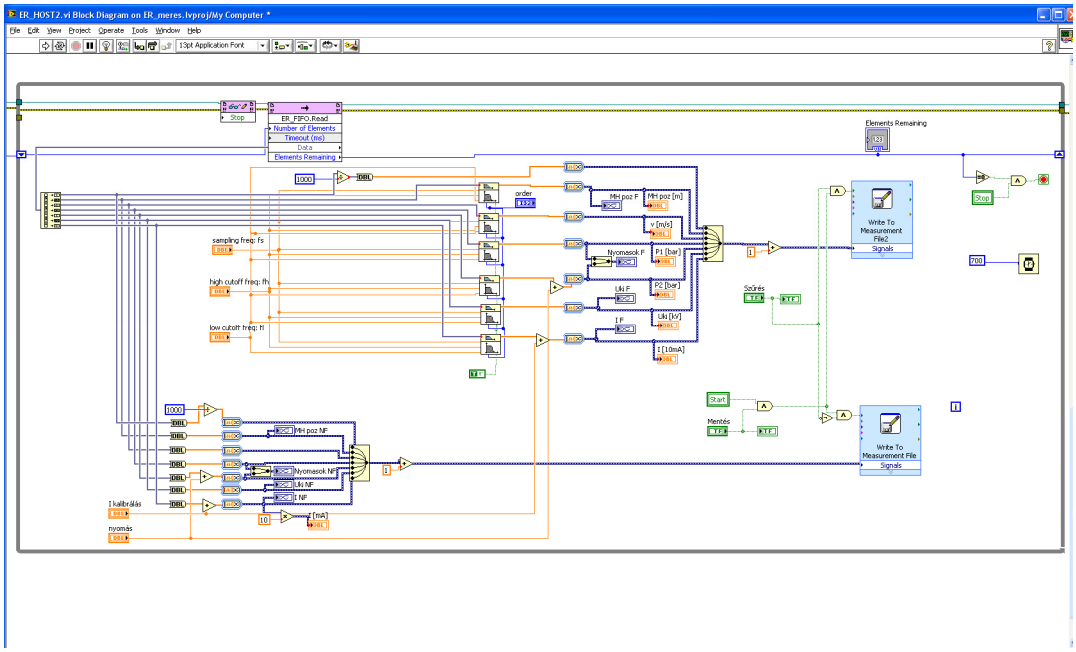
M4. „A vizsgálat irányítása és mérési adatok gyűjtése” című fejezet ábra melléklete



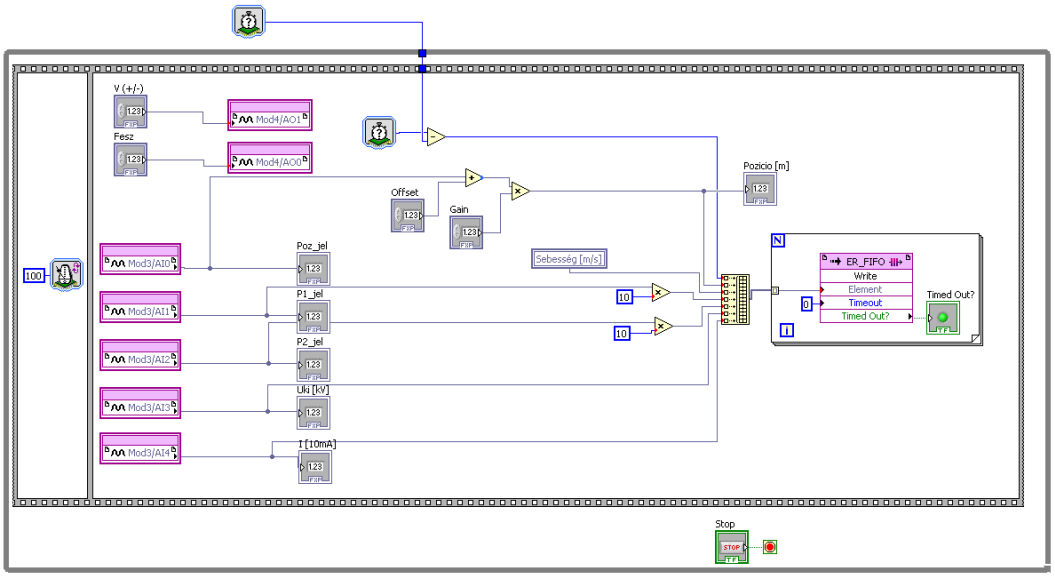
M4./1. ábra a mérésirányító program kezelőfelülete (LabVIEW) részlet I.



M4./2. ábra a mérésirányító program kezelőfelülete (LabVIEW) részlet II.



M4./3. ábra mérésadatgyűjtő program blokk diagramja (LabVIEW) részlet

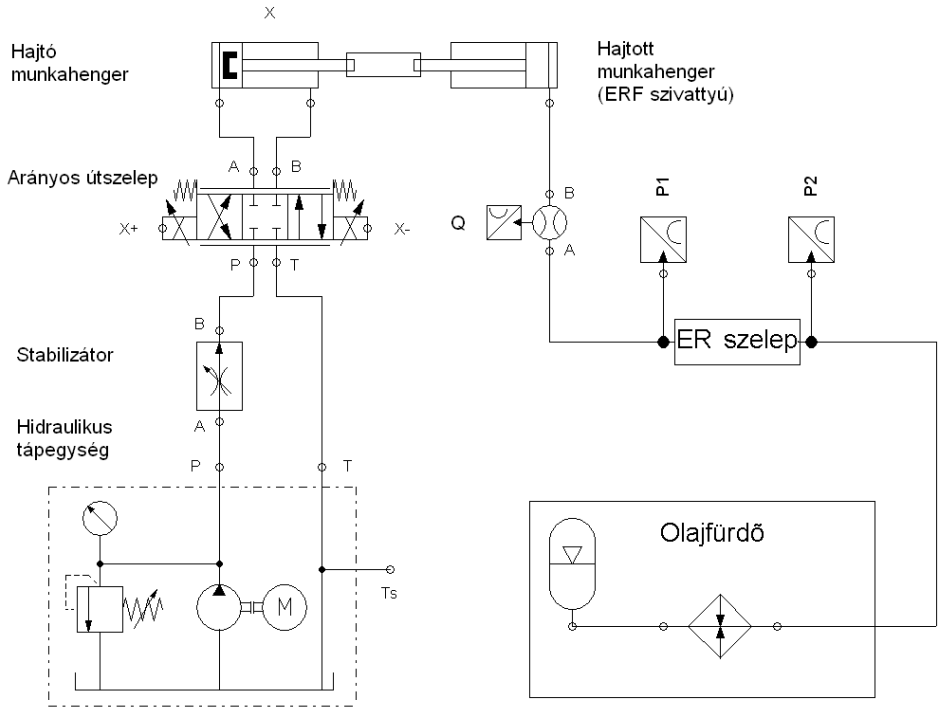


M4./4. ábra mérésirányító és adatgyűjtő program (FPGA) blokk diagramja (LabVIEW) részlet

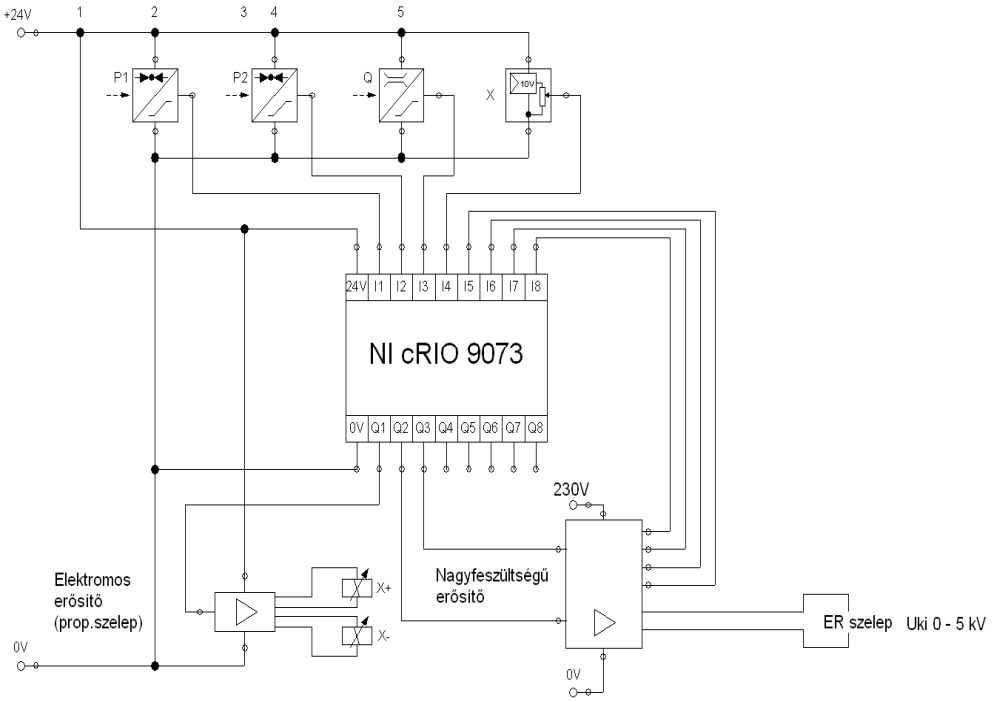
M5. „Az ER vizsgáló berendezés hidraulikus és elektromos rendszere” című fejezet melléklete

M5./1. táblázat A mérőrendszer elemi

Megnevezés	Típus	Jellemzők	Darabszám
Hidraulikus tápegység	Hidr. Aggregát MIDI	p=50bar, P=0,75kW Q=4875 l/min	1
24V Tápegység	Festo TN 162 416	U=24V, Imax=4,5A	1
Hidro akkumulátor	HYDAC SB0210-032	pmax=210bar, ps=6 bar	1
Nyomásérzékelő	HYDAC HDA4440-B-100	pmax = 100bar, Uki = 0…10V DC	2
Térfogatáram-mérő	TURBOQUANT HB6/03	pmax = 250 bar	1
Útjeladó	TAR665	xmax = 200mm, Uki = 0...10V DC	1
Programozható automatizálási vezérlő	NI cRIO 9073	Integrated 266 MHz Real-Time Controller 2M Gate FPGA	1
Mérőkártya (Digital Output)	NI 9472	8 channel 24V 100 US	1
Mérőkártya (Digital Input)	NI 9471	8 channel 24V 100 US	1
Mérőkártya (Analóg Output)	NI 9263	4 channel +- 10V 100 KS/s 16BIT	1
Mérőkártya (Analóg Input)	NI 9201	8 channel +- 10V 500 KS/s 12 BIT	1
Arányos elektromor erősítő kártya	FESTO	2 channel Inp: +-10V Out: 0 – 1000 mA	1
Nyomó munkahenger		D=32mm, L=180mm	1
Nyomott munkahenger	Rexroth	D=30 mm, d=22 mm, L=240 mm, pmax=210 bar	1
Nagyfesz. erősítő	RheCon 2	Utáp=230 V AC, Ube=0…6V DC, Uki=0…6kV DC, P=150W	1
Térfogatáram-állandósító (stabilizátor)	SMR M230 4507	pmax=120 bar	1
4/3-as arányos útváltó	ARON N18020013A	pmax=120 bar, Uvez=24 V DC	1

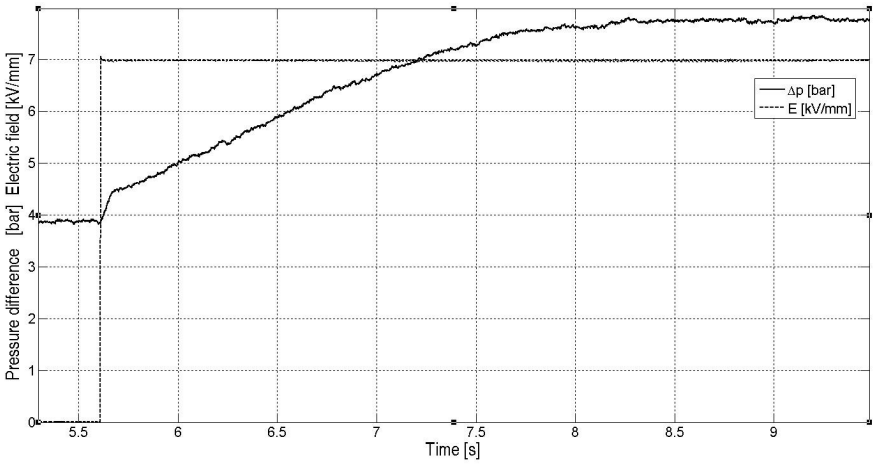


M5./1. ábra A mérőrendszer hidraulikus kapcsolása

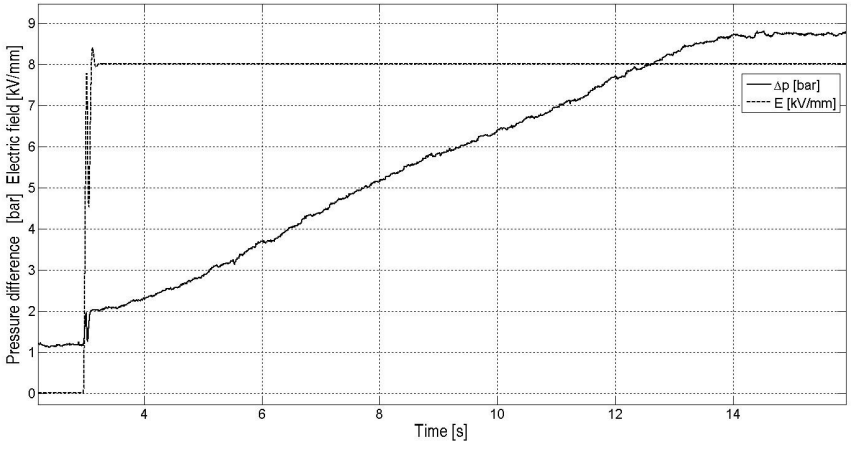


M5./2. ábra A mérőrendszer elektromos kapcsolása

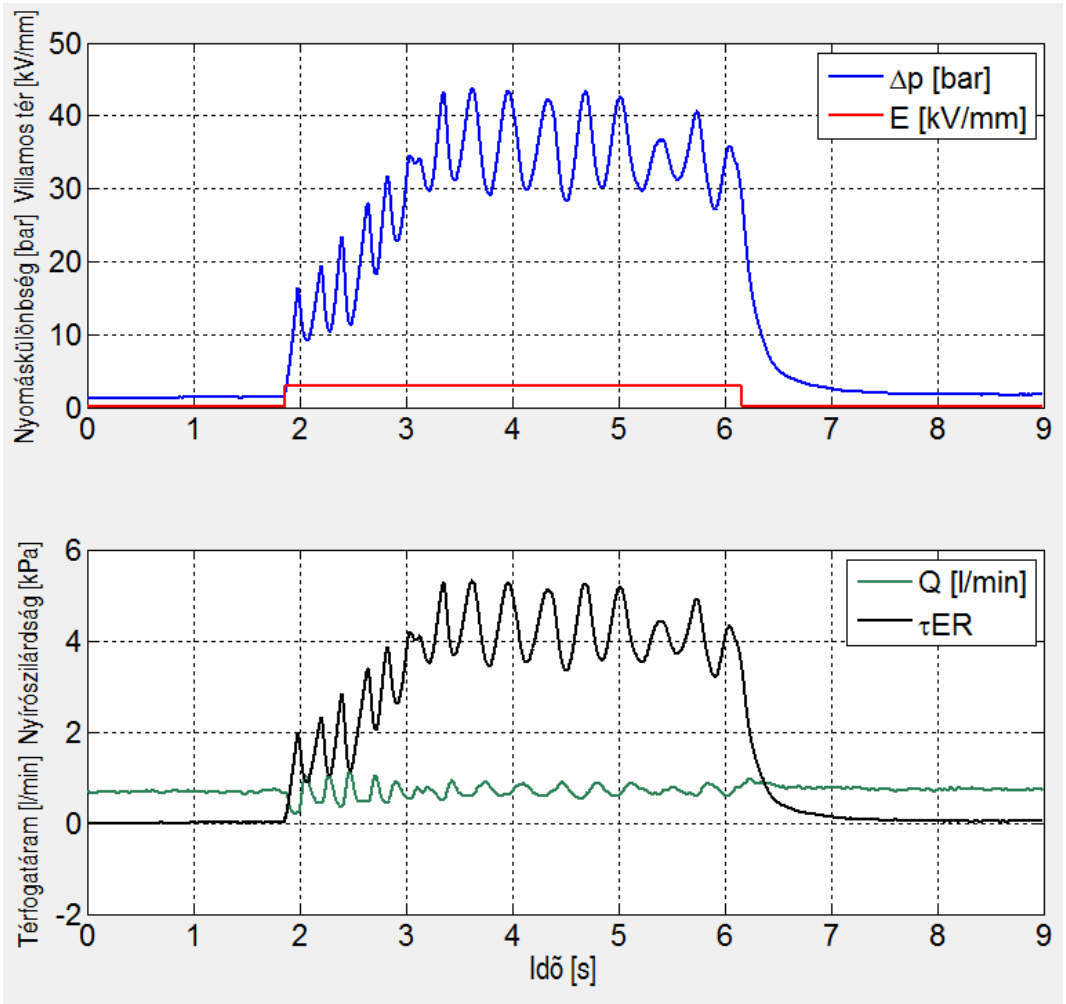
M6. „A nyomásnövekedés folyamatának elemzése” című fejezet ábra melléklete



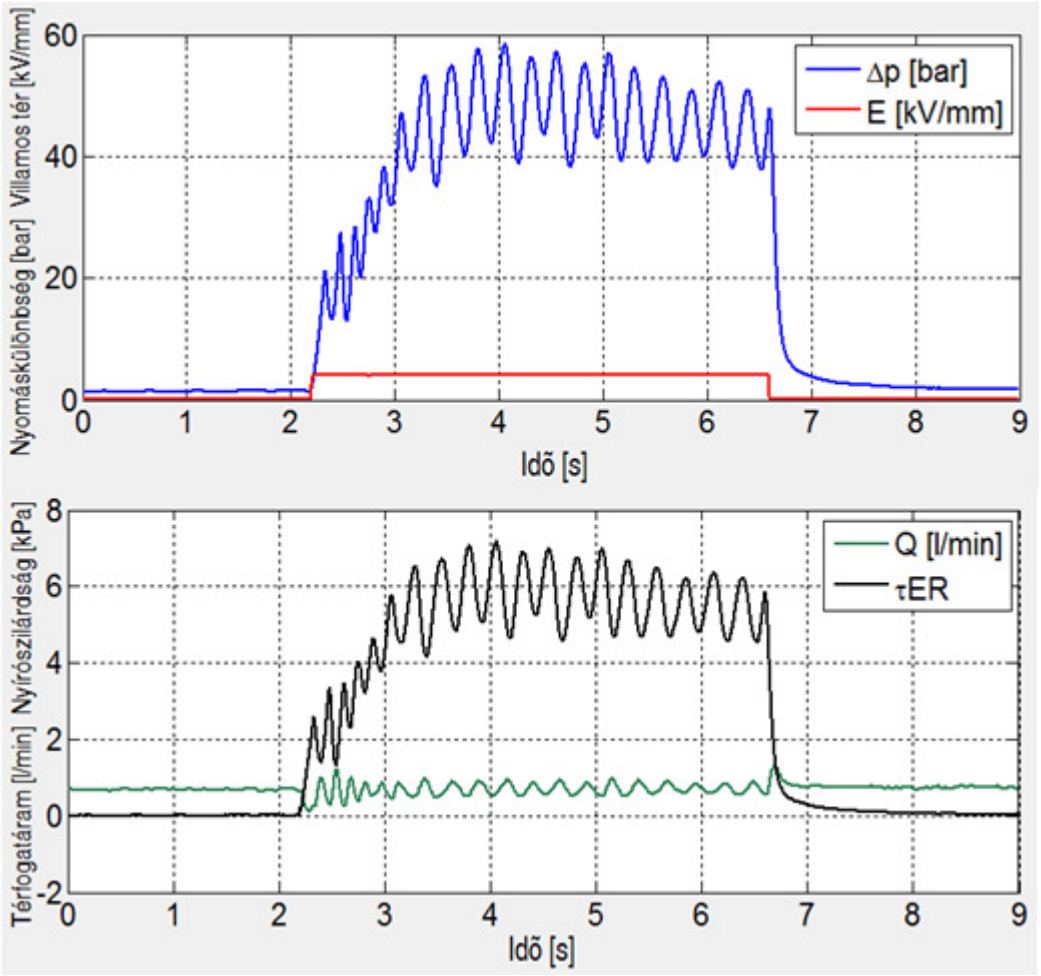
M6./1. ábra adalékolatlan szilikon olajjal végzett vizsgálat. Villamos térerősség E = 7 kV/mm, térfogatáram Q = 1,5 L/min.



M6./2. ábra adalékolatlan szilikon olajjal végzett vizsgálat. Villamos térerősség E = 8 kV/mm, térfogatáram Q = 0,4 L/min.



M6./3. ábra (RHEOIL) ER folyadékkal végzett vizsgálat (összetétel: szilikon olaj/poliuretán adalék). A diagramon látható nyomáslengések a mérőrendszer hibájából adódnak, ekkor még nem volt megoldott az állandó térfogatáram biztosítása. Villamos térerősség E = 3 kV/mm



M6./4. ábra (RHEOIL) ER folyadékkal végzett vizsgálat (összetétel: szilikon olaj/poliuretán adalék). A diagramon látható nyomáslengések a mérőrendszer hibájából adódnak, ekkor még nem volt megoldott az állandó térfogatáram biztosítása. Villamos térerősség E = 4 kV/mm

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek Dr. Jánosi Lászlónak, a sokéves szakmai támogatásért és a dolgozatom elkészítéséhez nyújtott segítségéért.

Köszönet Dr. Kalácska Gábornak, a munkámhoz szükséges feltételek megteremtéséért és szakmai segítségéért.

Köszönöm a Korszerű Technológiákért Alapítványnak és Dr. Pálinkás Istvánnak, hogy segítségével hozzájárult a mérési munkáim lebonyolításhoz.

Köszönet illeti a Gépipari Technológiai Intézet munkatársait és az Intézet Tanműhelyi dolgozóit, akik tudásukkal, tanácsaikkal, észrevételeikkel, segítségükkel elősegítették munkámat. Külön köszönetet szeretnék mondani Dr. Andó Mátyásnak, aki hasznos kritikai észrevételeivel segített a dolgozat megírásában.

Köszönettel tartozom Peev Iliának a mérőrendszer kialakításában nyújtott segítségéért és hasznos kritikai észrevételeiért.

Végül, de nem utolsó sorban szeretném megköszönni Dr. Valasek Istvánnak a kezdeti lépésekben nyújtott segítségét.