



**XXXII. Országos
Tudományos Diákköri
Konferencia**

2015



**Áramlásos dielektromos mérőcella tervezése
és építése elektroreológiai folyadékok
vizsgálatára**

Készítette:

Károly Kolos, Körmendy Gábor

Mechatronikai mérnöki alapszak, 4. évfolyam

Témavezető:

Dr. Szalai István, egyetemi docens

Horváth Barnabás, tudományos segédmunkatárs

Fizika és Mechatronika Intézet
Mérnöki Kar

Pannon Egyetem

Veszprém

2013. november 4.

Tartalomjegyzék

Bevezetés	1
Elektroreológiai folyadékok jellemzése	1
A dolgozat célja	3
A mérés elve	4
Előzetes mérőcella tervezés	5
Áramlásos mérőcella tervezése	9
Mintaadagoló rendszer tervezése	11
Differenciális működtetés	11
Léptetőmotor vezérlő	13
Vezérlés megvalósítása	13
LabVIEW, adatgyűjtő kártyák vezérlése	13
Adatgyűjtő kártyák kezelése	13
Oscillátor építése	17
Képalkotásra alkalmas mérőcella	18
Megvilágítás	21
Képalkotás	22
Videófelvétel, képrögzítés	22
Előzetes képfeldolgozás	23
Teljes mérési összeállítás	24
Mérési eredmények	26
Áramlás nélküli, stacioner vizsgálatok	26
Képalkotás stacioner esetben	29
Áramlás melletti vizsgálatok	34
Képalkotás áramlás esetén	36
Összegzés	41
Jövőbeli tervek, fejlesztések	41
Köszönetnyilvánítás	42
Irodalomjegyzék	42
Függelék	43

Bevezetés

Napjaink egy újszerű kutatási területét képezik az ún. elektorreológiai és magnetorreológiai folyadékok.

A Pannon Egyetem Fizika és Mechatronika Intézetében már jelentős ideje folynak kutatások mind elektorreológiai, mind magnetorreológiai folyadékokat illetően. Az elektorreológiai (ER) folyadékok kutatásának fő irányvonala a vizsgált folyadékok dielektromos állandójának illetve nem lineáris karakterisztikájának vizsgálata. Mérésünk elvégzéséhez egy már korábban megvalósított újszerű dielektromos mérési eljárást alkalmaztunk [1]. Ennek az eljárásnak a lényege, hogy a vizsgált anyag dielektromos permittivitásának változását kapacitásváltozásként mérjük, ami egy LC oszcillátor rezgési frekvenciájának változását eredményezi. Ez a mérési módszer lehetővé teszi a láncosodási folyamat dinamikájának vizsgálatát. Az ER folyadékok megismerése a mai napig feladat, a további kutatásokhoz újabb vizsgálatokra, ehhez pedig újabb mérőberendezésekre van szükség.

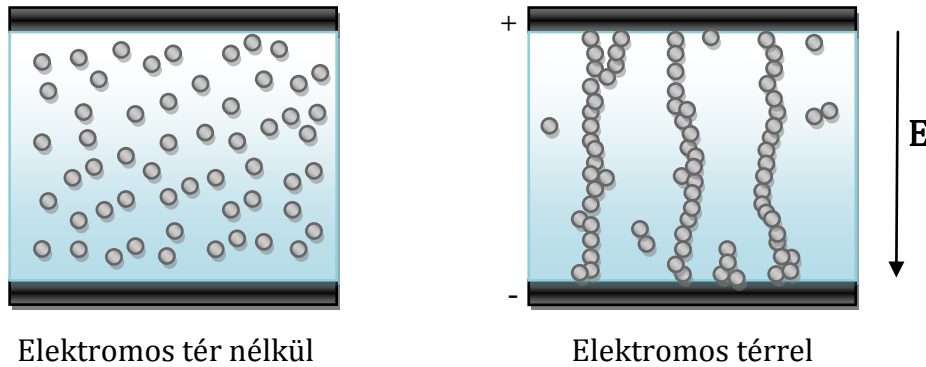
Elektorreológiai folyadékok jellemzése

A reológia, mint tudományterület a különböző folyadékok folyási tulajdonságaival foglalkozik. Az elektorreológiai folyadék elnevezés arra utal, hogy a folyadék folyási tulajdonságai az elektromos tér hatására megváltoznak. Ehhez hasonlóan a magnetorreológiai folyadékok tulajdonságait a mágneses tér befolyásolja. A dolgozat során mi az elektorreológiai folyadékokkal foglalkozunk.

Elektorreológiai fluidumot úgy készíthetünk, hogy adott ϵ_1 dielektromos permittivitású közegben ϵ_2 dielektromos permittivitású részecskéket diszpergálunk - például szilikonolajban üvegrészecskéket. A diszpergált részecskék mérete nagyságrendileg a 10 nm – 100 μ m tartományba eshet. Az elektorreológiai fluidumok különleges tulajdonságai akkor jelentkeznek, ha erős külső elektromos térbe helyezzük (nagyságrendileg 1 MV/m); ekkor a diszpergált részecskéken polarizációs töltés indukálódik, azaz elektromos dipólusmomentum alakul ki. Ezen dipólusmomentum nagysága (m) függ a közeg és a részecske dielektromos permittivitásától, a részecske átmérőjétől (a) és az elektromos térerősségtől (E):

$$\bar{m} \cong \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} \cdot a^3 \bar{E} \quad (1)$$

Miután az elektromos tér hatására a részecskékben kialakultak a dipólusmomentumok, az egyes részecskék között taszító és vonzó erők lépnek fel, majd ennek eredményeképpen *a részecskék láncokba szerveződnek*. Így az anyag tulajdonságai megváltoznak: bebizonyítható [3], hogy a láncokat tartalmazó folyadék dielektromos permittivitása nagyobb, mint a láncosodási folyamatot megelőzően, azaz amikor a részecskék véletlenszerűen helyezkednek el a szuszpenzióban. Ez a tény jó alapot ad az olyan mérési elvekhez, amely az említett cikkben is található [1]. Ezenkívül a kialakult láncokra merőlegesen az anyag viszkozitása jelentős mértékben, több nagyságrenddel megnövekszik, továbbá a viszkozitással együtt nő az anyag nyírással szembeni ellenállóképessége. A láncosodási folyamatok az anyag optikai tulajdonságait is megváltoztatják.



1. ábra Elektoreológiai folyadék láncosodása

Gyakorlati alkalmazás szempontjából a jelenség legfőbb előnye az, hogy az említett folyamat igen gyorsan játszódik le, a teljes beláncosodáshoz szükséges idő nagyságrendileg 1-2 ms. Ennyi idő alatt pedig egy erős, nyírással szemben ellenálló anyagot kapunk. Az elektoreológiai folyadékok ülepedése felületaktív anyagok hozzáadásával csökkenthető, illetve meggátolható, így növelve az anyag alkalmazhatóságát. Alkalmazási lehetőség lehet például ER fluidummal szabályozható fék, rezgéscsillapító és szabályozható erőátviteli rendszerek.

A magnetoreológiai fluidumok hasonló viselkedésbeli tulajdonságokat mutatnak erős mágneses tér esetén. Amiért az elektoreológiai folyadékok előnyösebbek a magnetoreológiai folyadékokkal szemben, az a láncosodásukhoz szükséges befektetendő teljesítmény; bár az elektoreológiai folyadékok esetén nagy feszültségeket kell alkalmaznunk a nagy elektromos tér előállításához, a rendszer áramfelvétele mindössze

mikroamper nagyságrendű. Ezzel szemben a magnetoreológiai folyadékok esetén a mágneses tér előállításához nagyobb teljesítményre van szükség.

A dolgozat célja

A Fizika és Mechatronika Intézetben az elektromos folyadékok dielektromos permittivitás változásának vizsgálata eddig csak álló közeg esetén történt, azonban felmerült az igény, hogy áramlás közben is vizsgáljuk meg ezeket az anyagokat. A gyakorlatban alkalmazott fluidumok általánosságban nem nyugalmi állapotban vannak, hanem folyamatosan külső behatások érik, emiatt az anyag mozgásban van. Várható, hogy azokat áramlás közben lényegesen kevesebb lánc tud kialakulni ugyanolyan erősségű elektromos tér esetén, illetve az áramlási sebesség növekedésével fordítottan arányos a láncok száma. Emellett másik fő célunknak tűztük ki a láncosodási folyamatokról való képalkotást is. Bár a szakirodalomban több tudományos cikk is foglalkozik a témával, a mérésekből származó dielektromos permittivitás által szolgáltatott adatok és a folyamatról készített jó minőségű videófelvevételek egymáshoz való társítása nagyban segítené a folyadékokban lezajló folyamatok jobb megértését.

A dolgozat és munkánk célja új mérőeszközök létrehozása, amelyek újabb lehetőségeket nyújtanak a további kutatásokhoz. A tervezés során feladatunk egy olyan mérőcella tervezése és elkészítése, amellyel képesek vagyunk áramlás közben vizsgálni az elektromos folyadék dielektromos permittivitásának változását, valamint a folyamatról videófelvevételeket, illetve képeket készíteni.

A minták vizsgálata során, a korábbi kutatásokból adódóan, az anyag dielektromos permittivitás változását kívántuk mérni. Ehhez egy LC-oszcillátor kapacitív elemeként új mérőcellát terveztünk. Kritérium volt, hogy a vizsgálandó mintát áramlás közben is tudjuk vizsgálni, valamint az adatokhoz videófelvevételeket tudjunk társítani. A méréshez szükség volt egy oszcillátor építésére, amelyet a tervezett mérőcellához méreteztünk.

Az összeállított rendszerrel különböző áramlási sebességek és elektromos terek esetén méréseket végeztünk, a megfelelő mérési eredményeket kiértékeljük.

A mérés elve

Munkánk során a korábbi mérésekhez hasonlóan a dielektromos állandó változását kívántuk mérni.

Ezt úgy tudtuk megvalósítani, hogy a mérőcellát egy LC oszcillátor kapacitív elemeként valósítottuk meg. A mérés alapját az az effektus adja, hogy az elektroeológiai folyadékok esetén az anyag dielektromos permittivitása nagyobb a láncosodási folyamatokat követően [3]. Ez azt jelenti, hogy a fluidum dielektromos permittivitása megváltozik, amikor a minta elektromos térnek van kitéve, azaz miután a cellára feszültséget kapcsolunk.

Bár a jelenség alapjaiban már többek által vizsgált, az általunk használt dielektromos mérési módszer újszerűségét az adja, hogy képesek vagyunk a dielektromos permittivitást a nagyfeszültségű impulzusok alatt is mérni. Egyéb dielektromos mérési módszer lehet például a cella kapacitásának mérése a láncosodást megelőzően, majd azt követően. A cella geometriájának ismeretében a dielektromos permittivitás a kapacitásból visszaszámolható. Ez, és az ehhez hasonló módszerek azonban csak a kezdeti és a végállapotban mért adatokkal szolgálnak, teljes karakterisztikával, azaz a láncosodás dinamikájára vonatkozó adatokkal nem [2]. Ezen kívül kevés mérés rendelkezik a láncosodási folyamatokról videófelvevételekkel, illetve ezekhez párosítható mérési adatokkal.

Az általunk megvalósított mérési módszer a mérés során folyamatos adatgyűjtést feltételez. A jelenség alapjául szolgáló dielektromos permittivitásváltozás a cella kapacitásváltozását eredményezi, amely az LC oszcillátor rezgési frekvenciájának változását okozza, ez pedig egy frekvencia analízátorral mérhető adatokat jelent számunkra.

A leírt mérési módszer hátránya azonban a cella konstrukciójára vonatkozó korlátok. A korábbi, áramoltatás nélküli mérések során használt LC oszcillátor 2-3 MHz körüli rezonanciafrekvenciája a tapasztalatok szerint igen stabil, és frekvencia analízátorral a frekvenciaváltozások precízen mérhetők. Mivel a mérés igen érzékeny a legapróbb zajokra is, a stabil oszcillátor elengedhetetlen feltétele a pontos méréseknek. Ez okból kifolyólag az általunk tervezett mérőcellát olyan kapacitív paraméterrel kívántuk megtervezni, hogy a mérőcellát az LC oszcillátor kapacitív elemeként kapcsolva az oszcillátor frekvenciája a korábbi mérések során használt stacionárius cella esetén mért rezonanciafrekvenciához közeli érték legyen. Mivel az LC oszcillátor L és C tagja nem

változtatható egyoldalúan, ezért a kapacitív elemet - azaz a mérőcella kapacitását - illetően adott kapacitást kell elérnünk, ami a cella tervezése során korlátozott geometriát jelent. Ennek részletesebb kifejtése az „Előzetes cellatervezése” c. fejezetben olvasható.

A geometriai korlátok miatt azonban hamar egyértelművé vált, hogy az áramlás mellett történő dielektromos állandó mérését és a képalkotást külön kell választani, azaz két különálló mérőcellában megvalósítani. Így a dielektromos állandó mérése az áramlásos cellában kerül megvalósításra, a videófelvételek pedig a képalkotásos cellában kerülnek rögzítésre. Bár így a dielektromos állandó változása és a képalkotás egymástól függetlenül zajlik, megfelelő cella-kialakítással és jól megválasztott mérési paraméterek mellett a kettő között szoros összefüggés állapítható meg.

Előzetes mérőcella tervezés

Ahogy fentebb megállapítottuk, célszerű a mérést a legkritikusabb eszközhöz, azaz az oszcillátorhoz igazodóan tervezni. Ez a mérőcellák esetén azt jelenti, hogy a cellák kapacitásának üres állapotban körülbelül 80 pF-nak kell lennie, hogy mintával feltöltött állapotukban megközelítőleg 240 pF kapacitással rendelkezzenek, és így az oszcillátor a korábbi mérések során használt stacionárius cella esetén mért rezonanciafrekvenciához közeli értéknél rezegjen be.

Ha a tervezés során a legegyszerűbb esettel, azaz egy síkkondenzátorral számolunk, hamar be kell látnunk, hogy ez az út nem járható, mivel ilyen cella-kialakítás 80 pF elérése mellett nem megvalósítható.

Síkkondenzátor kapacitására vonatkozó képlet:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2)$$

- **C** a kondenzátor kapacitása, esetünkben 80 pF.
- **ϵ_r** a relatív permittivitás, ez jó közelítéssel ≈ 1 , mivel üres, azaz levegővel töltött kondenzátorra méretezünk.
- **ϵ_0** = $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$, a vákuum dielektromos állandója.
- **d** a kondenzátor elektródjai közötti távolság. Elegendően nagy elektromos tér előállításához, ami kV/mm nagyságrendű, itt megközelítőleg 0,5 mm-rel számolhatunk.
- **A** a kondenzátor elektródjainak felülete. Mivel $A = l \cdot x$, ahol

- x az elektródok magassága. Ez a megfelelő képalkotás esetén nem lehet túl nagy – korlátozott a mélységélesség -, előzetes méréseink szerint nem haladhatja meg a 0,7 mm-t.
- l a mérőcella, azaz az elektródok hossza.

A fenti paraméterek alapján egyértelműen meghatározható, hogy a cella szükséges hossza közel 6,5 m-t jelentene. Ez nyilvánvalóan nem megvalósítható, illetve könnyedén belátható, hogy az elektródok méreteinek finomhangolásával sem érhetünk el sokkal kedvezőbb méreteket.

Mivel ezen paraméterek mellett a cella nem megvalósítható, ezért másik konstrukciót kell keresni, vagy valamelyik paraméternek engedni kell. Az utóbbi azonban valamilyen funkció kárára hajtható csak végre.

A 80 pF-os kapacitás könnyedén elérhető hengerkondenzátorral. A hengerkondenzátor alakú mérőcella tervezésekor a kapacitást illetően az alábbi képlettel számoltunk.

$$C_h = 2\pi\epsilon_0 \frac{L}{\ln \frac{r_k}{r_b}} \quad (3)$$

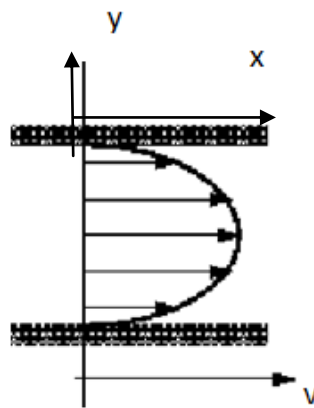
- C_h a hengerkondenzátor kapacitása
- $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$, a vákuum dielektromos állandója.
- L a kondenzátor elektródjainak hossza
- r_k a kondenzátor külső elektródjának sugara
- r_b a kondenzátor belső elektródjának sugara

Hengerkondenzátor esetén azonban a képalkotás megvalósítása nem triviális. Ugyanis a képalkotó eszköznek merőlegesnek kell lennie a cellában kialakuló láncokra, és így az elektródokra. Míg síkkondenzátor alapú mérőcella esetén ez viszonylag könnyen megvalósítható, hengerkondenzátor esetén megvalósítása nehéz feladat. Emellett a képalkotás során, a megfelelő minőségű képek készítésének érdekében, megfelelő háttérvilágításra is szükség van. Ez azonban hengerkondenzátor esetén nem valósítható meg könnyedén.

Ezt a gondolatmenetet követve jutottunk arra a döntésre, hogy a dielektromos állandó változását, valamint a képalkotást szétválasztjuk, és két, egymástól független cellában végezzük a méréseket. Így konstruálunk egy áramlós mérőcellát, amelyben a dielektromos állandó változását tudjuk mérni, és egy másik, az előbbitől független cellát, amelyben a láncosodási folyamatról tudunk képeket illetve videófelveteleket készíteni.

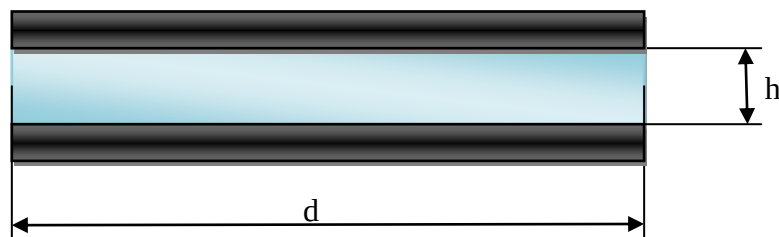
Így, bár a két mérés egymástól függetlenül zajlik, célunk a köztük lévő kapcsolat megteremtése. Ezt úgy tehetjük meg, hogy a két mérést lehetőség szerint azonos körülmények között valósítjuk meg. Ez azt jelenti, hogy ha az áramlás jellege és főbb paraméterei, valamint az alkalmazott elektromos tér azonos a két mérés során, akkor jó közelítéssel a két mérés eredményei között kapcsolatot teremthetünk, és azokat egymásnak megfeleltethetjük.

Ehhez legelőször meg kell vizsgálnunk a kialakuló áramlások jellegét. Általános körülmények között ismeretes az áramló közeg sebességprofilja, parabolikus.



2. ábra Parabolikus sebesség profil

Ez azonban csak a legegyszerűbb, ideális esetekben igaz. Ha kiindulási alapként a hengerkondenzátorban kialakuló áramlást vesszük, és a hengerkondenzátor sugara elegendően nagy, akkor az áramlási keresztmetszet közelíthető az alábbi ábrának megfelelően.



3. ábra Áramlási keresztmetszet

Esetünkben az áramlási keresztmetszet méreteit illetően $d \gg h$, azaz speciális áramlási eset alakul ki, mivel szűk áramlási keresztmetszetről van szó. Ekkor a kialakuló áramlási profil nagyrészt a keresztmetszet magasságától fog függeni. Az áramlás jellege feltételezéseink szerint az alkalmazandó áramlási sebesség esetén, ami megközelítőleg $10^{\text{mm}}/\text{s}$, **lamináris**. Ezt későbbi mérési tapasztalataink is alátámasztják.

A mérés szempontjából az alkalmazott tér erőssége a legfontosabb paraméter:

$$E = \frac{U}{d} \left[\frac{V}{m} \right]. \quad (4)$$

Az elektromos tér (E) nagysága az elektródokra kapcsolt feszültségtől (U), és az elektródok távolságától (d) függ. Mivel a tápegység maximális teljesítménye adott, így az elektródok távolságának megválasztása a kritikus paraméter. Egyrészt ahhoz, hogy a láncosodási folyamatok megkezdődjenek, az elektromos tér nagyságának egy bizonyos küszöbértéket meg kell haladni. Ennek értéke a korábbi mérések által meghatározott [4]. Ez alapján azt mondhatjuk, hogy a mérések során kV/mm nagyságrendű elektromos teret kell elérnünk. Mivel a rendelkezésre álló nagyfeszültségű tápegység maximálisan 4 kV leadására képes, a kívánt láncosodás eléréséhez pedig kV/mm-es nagyságrendű elektromos térre van szükség, így az elektród-távolság nem lehet nagyobb 1 mm-nél. Kézenfekvőnek tűnik az elektródok távolságát csökkenteni, azonban a távolságok túlságosan kicsinek való megválasztása sem szerencsés, mivel így a megfelelő képalkotás nem lehetséges, valamint az áramlási profil is eltorzulhat.

Ahhoz, hogy a két cellában azonos áramlást feltételezzünk, azonos paraméterekkel kell terveznünk. Ez azt jelenti, hogy a képalkotásra használt cellában is figyelembe kell venni az elektródtávolságot. A megfelelő képek készítésének ez is bizonyos geometriai korlátokat szab.

A tervezés során a különböző paramétereket úgy választottuk meg, hogy az áramlás jellege és az alkalmazott elektromos tér nagysága is azonos legyen a két mintatartó esetén.

Továbbá az áramlás jellegét jellemezve, bár az áramlás szűk keresztmetszetű, feltételezzük, hogy a kialakuló áramlás jellege lamináris. Esetünkben, szűk téglalap alapú áramlási keresztmetszetről lévén szó, az áramlási profilt a téglalap magassága fogja meghatározni. A cellában kialakuló áramlás sebességét a minta adagolásából határozzuk meg, ennek kifejtése a „LabVIEW, adatgyűjtő kártyák vezérlése” c. fejezetben olvasható.

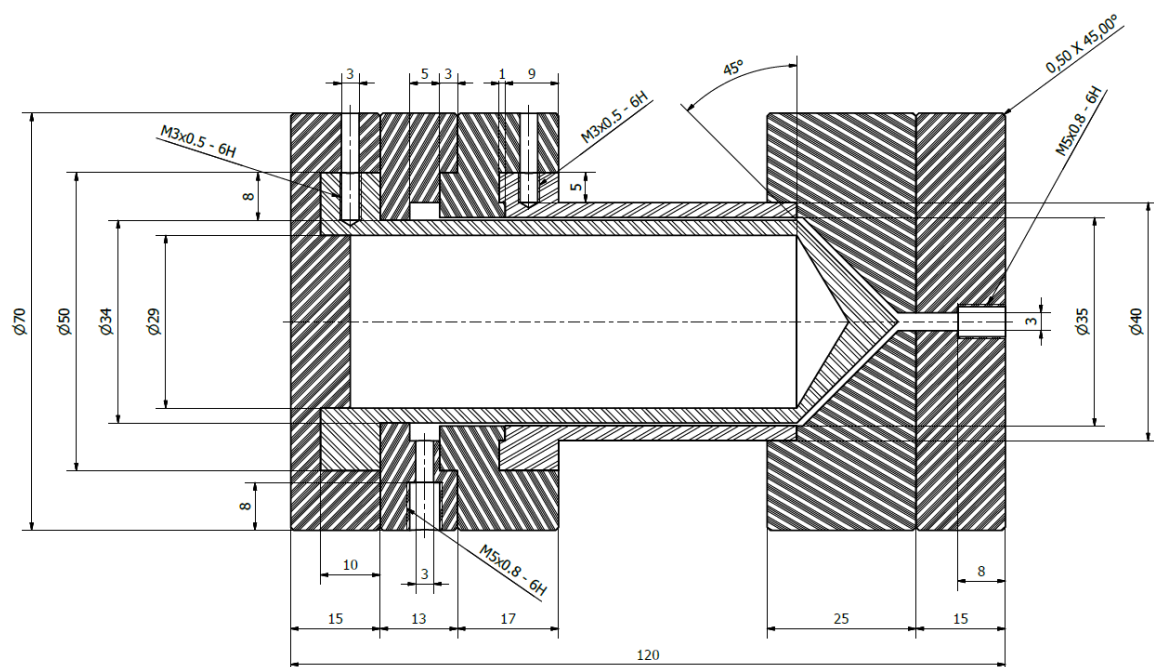
Áramlósos mérőcella tervezése

Az áramlósos mérőcellában valósul meg az áramló elektoreológiai folyadék dielektromos állandójának mérése.

A mérések során több különböző típusú, illetve azon belül különböző koncentrációjú anyaggal szeretnénk a méréseket elvégezni, ezért a mérőcella tervezésekor fontos szempont volt az egyszerű kialakítás és a könnyen szerelhetőség, elsősorban a tisztítás miatt.

A fentebb leírt geometriai és fizikai korlátozások miatt a mérőcella egy hengerkondenzátor kialakítását követi. A hengerkondenzátor helykihasználását tekintve jó hatásfokkal rendelkezik, illetve megfelelően kis elektródtávolsággal és megfelelően nagy középátmérővel tekinthetjük azt egy síkkondenzátornak. Ennek szerepe a láncképződésnél van, mivel célszerű, hogy homogén elektromos teret biztosítsunk a mérés közben.

A cella több, különböző magasságú és belső kialakítású gyűrűből, egy külső csőszerű, illetve egy belső, egyik végén zárt hengeres elektródból áll. A mérések során a cellát álló helyzetben használtuk, azaz alulról egy műanyag csonton keresztül juttattuk a mérendő anyagot a mérőcellába, majd a felső gyűjtőgyűrűn keresztül, oldalirányba távozott az anyag.



4. ábra Áramlósos cella keresztmetszeti rajza

A bemeneti oldalon a csont után közvetlenül egy kúp alakban kiesztorgált gyűrű található, amelybe a belső elektród kúpszerűen benyúlik. Ez a rész felelős azért, hogy a

hengerkondenzátor két fegyverzete közé egyenletesen juttassa a mérendő elektorreológiai folyadékot, illetve az áramlási viszonyok a cella minden pontján hasonlóan alakuljanak.

Ezután következik a „hasznos” rész, maga a kondenzátor. A külső elektród feltámaszkodik a kúpos gyűrű külső peremén, amelybe a tömítések elkerülése miatt beleragasztottuk. Emiatt kicsit csorbult a könnyen szerelhetőség kritériuma, azonban tömítések használatával a mérések megismételhetőségének lehetősége romlik. A két elektród között 60 mm hosszan áramlik a folyadék, itt történik meg az elektromos tér rákapcsolásakor a láncosodás. A két elektród között a távolság 0,5 mm. Az erre vonatkozó kritériumok az „Előzetes mérőcella tervezés” c. fejezetben olvasható.

Így a maximum 4kV-ot szolgáltató tápegységünkkel akár 8 kV/mm-es elektromos térerősséget is létre tudunk hozni.



5. ábra A megvalósított áramlásos mérőcella és az LC oszcillátor

A cellában helyet foglal egy közbenső távtartó gyűrű, ennek szerepe, hogy a külső elektródot felülről megtámassza, illetve ezen a gyűrűn keresztül történik meg a külső elektród csatlakozási pontjának kialakítása egy csavar segítségével.

A következő elem a gyűjtőgyűrű, itt történik meg az ER folyadék összegyűjtése, és itt is távozik oldalirányba egy csonton keresztül az anyag. Ezután már csak egy záró gyűrű következik, amely a belső elektródot felülről zárja le, illetve egy furaton keresztül itt történik meg a belső elektród kivezetése is, szintén egy csavar segítségével. Későbbiekben ennek a gyűrűnek az átalakításával lehetőség nyílik a cella belülről történő termosztálására.

Mivel a mérés igen érzékeny mindennemű zajra, szórt kapacitásra, ezért a mérésekhez használt elektroncsöves LC oszcillátort közvetlenül a mérőcella oldalára lehet felrögzíteni. Ehhez az oszcillátor áramkör kapcsolási rajzán nem, de az oszcillátor áramköri paneljének tervén módosítottunk.

Mivel az oszcillátorhoz való illesztés miatt szükséges volt egy minimális kapacitás elérése, ezt körülbelül 80 pF-ra állapítottuk meg, ezért a tervezés során legalább ekkora kapacitás elérését tartottuk szem előtt. Végül a végleges terv elkészültekor a becsült kapacitás 90 pF, a cella legyártása utáni mérések szerint pedig körülbelül 100 pF.

Mintaadagoló rendszer tervezése

Az előre bekevert elektroeológiai folyadékot a cellákban áramlás közben kívánjuk vizsgálni. Ahhoz, hogy a vizsgálandó mintát megfelelően tudjuk adagolni, az adagolást pedig szabályozni tudjuk, egy mintaadagoló rendszert terveztünk és építettünk.

Az egyenletes áramoltatáshoz egy léptetőmotorral meghajtott lineáris szánt használunk. A vizsgálandó mintát fecskendőből kívánjuk nyomni, és egy szilikon csövön keresztül a cellába juttatni.

Differenciális működtetés

Az első tervek és számítások során arra a következtetésre jutottunk, hogy az egy fecskendővel megvalósított adagoló rendszer nem elég hatékony.

Számításaink szerint egy 50 cm³ fecskendővel, 54,19 mm² keresztmetszetű csatorna esetén, 10 cm/s áramlási sebesség mellett kevesebb, mint 10 másodpercig tarthatna egy mérés - ennyi idő, amíg a fecskendő teljesen kiürül.

$$t = \frac{V}{A_0 \cdot v} = \frac{50 \cdot 10^3 \text{ mm}^3}{54,19 \text{ mm}^2 \cdot 100 \frac{\text{mm}}{\text{s}}} \approx 9 \text{ s}$$

Ezen kívül a vizsgálandó minta bekeverése és a rendszerbe légmentesen való betöltése igencsak körülményes folyamat, nem célszerű a fenti egyfecskendős megoldást alkalmazni. Ekkor ugyanis a cellán átfolyt anyag távozik a rendszerből.

Ennek megoldására két fecskendőt alkalmazó adagoló rendszert terveztünk. Az egyik fecskendővel a fluidumot bejuttatjuk, míg a másikkal a kiömlő oldalon a mintát fogadjuk. Ehhez a fecskendőket ellentétes ütemben mozgatjuk. Így, mikor az egyik fecskendő kiürülne, mindössze az anyag bejuttatásának irányát kell megfordítani, a mérés pedig újabb anyag-bekeverés illetve cella-feltöltés nélkül folytatódhat. Az elrendezés előnye, hogy a leülepedett mintát lehetőségünk van homogenizálni is, az anyag oda-vissza való mozgásával.

A fentebb leírt két fecskendőt magában foglaló mozgató egység az alábbi terv szerint valósult meg. Részletes műszaki rajzok a függelék részben találhatók.



6. ábra Differenciális működtetésű mintaadagoló

A mintaadagoló fecskendőket egy lineáris szán mozgatja. A lineáris egységet VEXTA PK245-01B típusú kétfázisú léptetőmotor segítségével hajtottuk meg. Az elektronikus meghajtás egy kétfázisú léptetőmotor meghajtó segítségével történik,

melynek típusa: RTA PAVIA RDC 04.V. A lineáris egység vezérlése egy NI 6552E típusú, PCI csatlakozós adatgyűjtő kártyán keresztül történik. Az adatgyűjtő kártyával a motorvezérlő ki- és bemeneteit LabVIEW-programból könnyedén tudjuk vezérelni.

Léptetőmotor vezérlő

A léptetőmotort vezérlő elektronikának, ezen keresztül a lineáris egységnek két üzemmódja van. Egy ún. automatikus futási üzemmód (*RUN mode*), ekkor a motor egy DIP kapcsoló segítségével előre definiált sebességgel forog, illetve egy lépés üzemmód (*STEPS mode*), ahol a vezérlő órajeleket vár, a lépések ennek ütemében történnek. Ezt a vezérlést szokták ún. *indexer* interfésznek is nevezni. Mi az utóbbit használtuk.

DIP kapcsoló segítségével hangolható a motor lépésszáma (*Steps for Revolution*). Esetünkben ez a legmagasabb beállítható érték, azaz 4000 *steps for revolution*, mivel a cél a minél egyenletesebb mozgás elérése az anyag pumpálása során. A 4000 *steps for revolution* azt jelenti, hogy a motor egy teljes fordulatot 4000 lépéssel tesz meg, azaz a motor felbontása 0,09°/lépés.

Vezérlés megvalósítása

Lépés üzemmód esetén a vezérlőnek két jelre van szüksége. A forgási irány megadására (*Direction of Rotation*) és impulzussorozatra a léptetőmotor forgásához. Gyakorlatban ez az adatgyűjtő kártya egy I/O portjának kezelését, valamint egy, az adatgyűjtő kártya belső oszcillátora által előállított órajel használatát jelenti, amit impulzus sorozatnak használunk.

LabVIEW, adatgyűjtő kártyák vezérlése

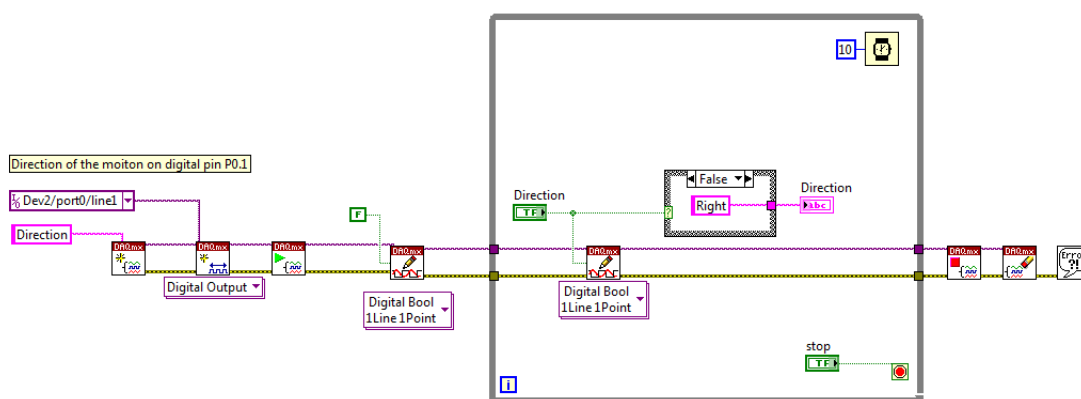
A különböző perifériák vezérlésének, a ki- és bemenetek kezelésének egyik legegyszerűbb és leghatékosabb módja LabVIEW segítségével valósítható meg. A szoftver programozása grafikus módon történik. Az általános I/O portok a szoftverhez illeszthető adatgyűjtő kártyán keresztül valósíthatók meg. Így a teljes PC oldali vezérlő szoftver LabVIEW platformon megvalósítható.

Adatgyűjtő kártyák kezelése

Az adatgyűjtő kártya ki- és bemenetei elérhetők magas nyelvű programozási szinten is, azonban mi az alacsony szintű programozást választottuk a testreszabhatóbb

vezérlés érdekében. Ahhoz, hogy ezek a funkciók elérhetőek legyenek számunkra, szükségünk van a LabVIEW DAQmx (*Data Acquisition*) toolbox-ára.

Minden egyes csatorna esetén inicializálnunk kell egy *taszkt*ot. Az adott port vezérlése ezen *taszkon* keresztül érhető el a továbbiakban. A *taszkh*oz hozzárendelünk egy csatornát (*CREATE task*), majd elindítjuk (*START task*). Ezután a csatornára már egyszerűen írhatunk (vagy olvashatunk) adatokat a Write (*Read*) blokk(ok)al. A program végén fontos, hogy a *taszkt*ot lezárjuk, máskülönben az erőforrás az adatgyűjtő kártyán a továbbiakban is lefoglalt marad.



7. ábra Kódrészlet: motor forgási irányának beállítása

Az órajel előállítás a fenti *taszkh*oz hasonló, különbség a konfigurációban található. A csatorna definiálásakor órajel kimenetet választunk, még hozzá frekvencia vezérelt módban. Ekkor az adatgyűjtő kártya a saját, belső oszcillátorának segítségével állít elő megfelelő órajelet. Az órajel forrását egy *Property Node*-dal tudjuk testreszabni. Az órajel előállítás mindaddig folyamatos, amíg a *taszkt*ot le nem állítjuk.

Így az I/O portok és órajelek segítségével irányítható a léptetőmotor vezérlő.

A fentebb leírt, illetve a képfeldolgozáshoz szükséges programrészletek egy nagyobb, már korábban elkészített főprogramba kerültek beillesztésre. A programrészek szerepét az alábbi blokkdiagram szemlélteti – a teljes program rendkívül összetett, részletes kifejtésétől eltekintünk.

A teljes mérési folyamat indítása a *START* kézi jelzésre indul. Ehhez előzetesen be tudjuk állítani a megfelelő paramétereket, amelyek a mérést definiálják. A program később ezeket kérdezi le. Ilyen paraméterek a mérés időtartama, a forgási irány beállítása és az áramlási sebesség beállítása.

A lineáris egység vezérlése a mérés kezdetével indul. Az adatgyűjtő kártya csatornáinak inicializálása szintén egy *Event Case* struktúrában történik, amit a *START* jelzés vált ki.

Az anyag cellában való sebességének kiszámításához meg kell határoznunk az ún. *Clock Frequency* paramétert, ami egy előre kiszámolt érték az alkalmazott cella paraméterei és a kívánt áramlási sebesség függvényében. A *Clock Frequency* fogja meghatározni az adatgyűjtő kártya által generált órajelet, ami a léptetőmotor forgási sebességét szabályozza. Mivel az ehhez szükséges paraméterek ismertek, a cellában kialakuló áramlási sebesség kiszámítása az alábbi egyenlet szerint történik.

$$v_x = \vartheta \cdot \mu \cdot \frac{I}{T} \cdot \frac{A_{csatorna}}{A_{fecskendő}} \quad (5)$$

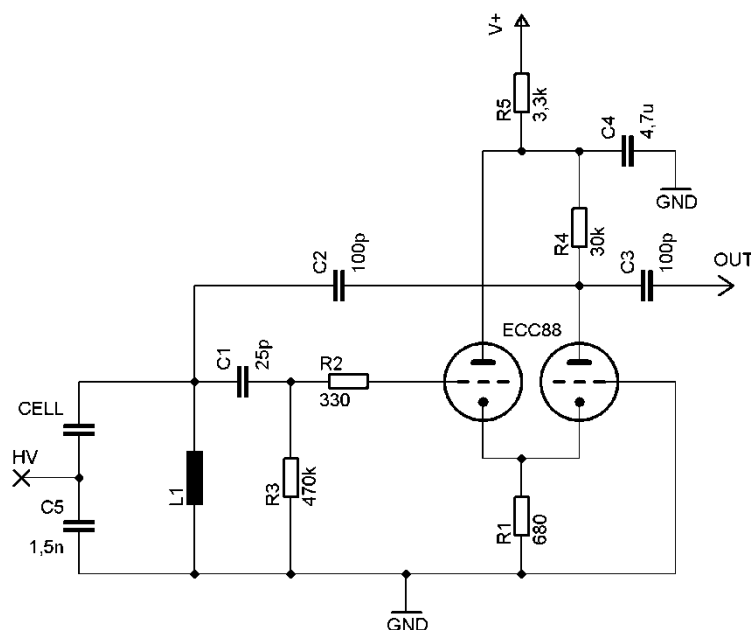
ahol:

- v_x a kívánt sebesség a csatornában
- ϑ a csavarorsó menetemelkedése
- μ a motor által létrehozott szögelfordulás (*rad*) egy impulzus hatására - beállítható a motorvezérlő egységen
- $\frac{I}{T}$ időegység alatt a motornak adott impulzusok száma
- $A_{csatorna}$ a csatorna áramlási keresztmetszete
- $A_{fecskendő}$ a fecskendő keresztmetszete

Mérési tapasztalataink alapján az (5) egyenlet jó becslést ad a cellában kialakuló átlagsebességet illetően.

Oszcillátor építése

A mérések során az elektreológiai folyadék dielektromos permittivitás-változásának mérése egy oszcillátor áramkör kapacitív elemének kapacitásváltozására, így az oszcillátor frekvenciájának változására vezethető vissza. A frekvenciaváltozásból visszaszámolható a kapacitásváltozás, onnan pedig a dielektromos állandó.



10. ábra: Az oszcillátor áramkör kapcsolási rajza

Mivel nekünk az oszcillátor frekvenciájának megváltozását kell mérnünk, ezért maga az oszcillátor rezonanciafrekvenciájának nem szükséges egy előre meghatározott értéknek lennie. Feltétel volt viszont, hogy az oszcillátor stabilan rezegjen, illetve akkor is képes legyen a rezonanciára, ha a mérőcellában található anyag elektromos vezetése nem elhanyagolható.

Manapság az oszcillátor áramkörök többségét félvezető áramköri elemekkel valósítják meg, legtöbbször egy műveleti erősítő vagy egy tervezérlésű tranzisztor segítségével. A méréstechnikában azonban sokszor ezek stabilitása nem kielégítő, ezért volt szükséges egy csöves oszcillátor használata. A korábbi mérések során a statikus, áramlás nélküli mérőcellához egy, a szakirodalomból vett csöves LC oszcillátor került alkalmazásra, így kézenfekvő volt a már bevált oszcillátor konstrukció használata. Az oszcillátor frekvenciájának stabilitása körülbelül 3 ppm, ami azt jelenti, hogy 3 MHz-es alapfrekvencia esetén maximum 3 Hz-et változik a frekvencia az esetleges zaj miatt.

Képalkotásra alkalmas mérőcella

A láncosodási folyamatokat akkor érthetjük meg igazán, ha a folyamatról nem csak indirekt adatok állnak rendelkezésre, hanem a folyamatról képeket illetve videófelvételt is tudunk készíteni, amelyhez rendelkezésünkre állt egy videó mikroszkóp, amelynek CCD kamerája WATEC WAT-250D típusú. A mikroszkópot egy PCI-os tuner kártyán keresztül csatlakoztattuk a számítógéphez, illetve a LabVIEW programunkhoz.

A képalkotásos mérőcella tervezésekor több szempontot is figyelembe kellett vennünk. Egyrészt az elkészült fluidum adagoló rendszerhez illeszthetőnek kellett lennie, ez igazából csak geometriai korlátokat jelentett. Másrészt, mivel a képalkotást és a dielektromos permittivitás változásának mérését szétválasztottuk, így ezen cella esetén dielektromos permittivitás mérése nem szükséges, ezért a kapacitása nem fő tervezési szempont. Ezáltal a geometriai korlátok egy része megszűnik; a cella kapacitásának nem szükséges elérnie az oszcillátor berezgéséhez szükséges minimális 80 pF-ot.

Geometriai korlátokat adnak azonban az alábbi paraméterek.

Fontos a megfelelően jó minőségű képalkotás. Ehhez a képalkotást előzetesen teszteltük egy próbacellán, amelynek során azt vizsgáltuk, hogy milyen nagyítást és cellamélységet kell beállítanunk ahhoz, hogy minél jobb felvételeket tudjunk készíteni. Méréseink alapján a mikroszkóp adott anyag esetén legfeljebb 1 mm mélységig ad éles képet - mélységélesség. A megfelelően jó képek készítéséhez a továbbiakban 0,7 mm-es cellamélységgel számolunk.

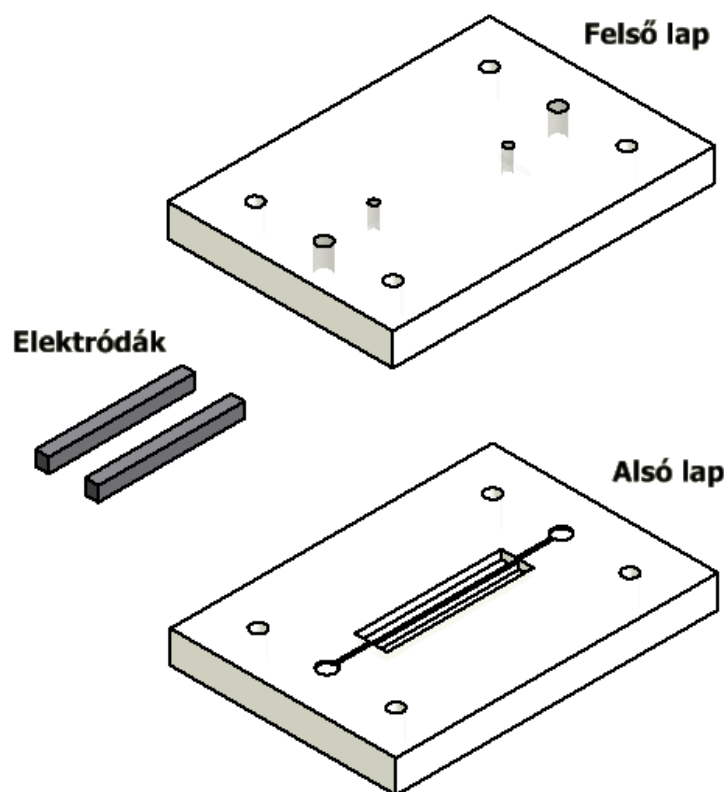
Kritikus az elektródtávolság. Mivel a rendelkezésre álló nagyfeszültségű tápegység maximális 4 kV leadására képes, és bár a láncosodás már nagyságrendileg 0,5 kV/mm esetén is bekövetkezik, a további vizsgálatok során szeretnénk elérni a 4 kV/mm-es elektromos teret, így az elektród távolság maximálisan 1 mm lehet.

A fentiekén kívül az áramlási csatornának (ami megegyezik az elektródtávolsággal) azonban elég szélesnek kell lennie, ahhoz, hogy a viszonylag nagyméretű részecskék be tudjanak láncosodni, illetve a kialakult láncstruktúráról megfelelően jó felvételek készülhessenek.

Emellett, és ami a legfontosabb, az áramlás jellegének és az alkalmazható elektromos tér erősségének azonosnak kell lennie az áramlásos cella esetén alkalmazottal.

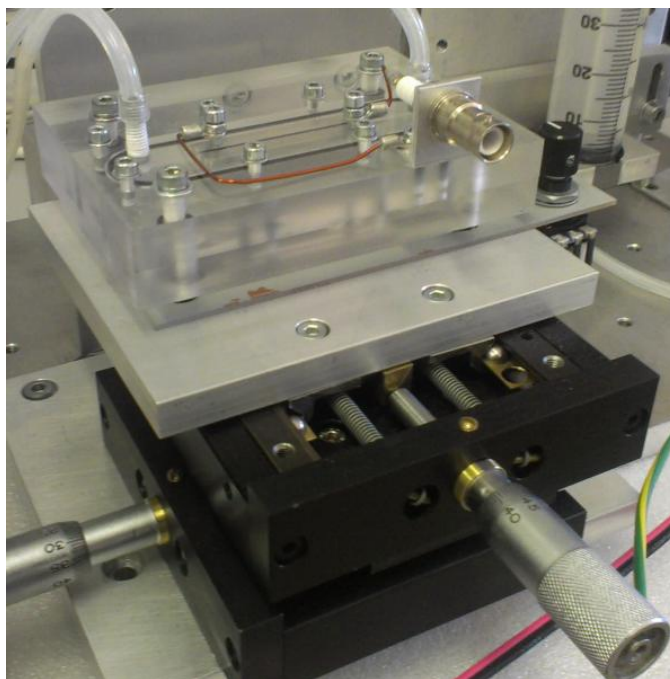
Végül az elektródtávolságot 1 mm-nek, az áramlási keresztmetszet mélységét pedig 0,7 mm-nek választottuk meg. Az elektródokra kapcsolt feszültség és az elektródok közti távolság a két cellában azonos nagyságú elektromos térerősséget eredményez, így jó

közelítéssel egyező láncosodási folyamatokat feltételezhetünk. Az elektródok közti távolság részben meghatározza az áramlási keresztmetszetet is, ami szintén hasonló jellegű áramlást eredményez, mint az áramlásos cella esetében. Így feltételezéseink szerint ebben az esetben is hasonló áramlás jön létre a nagy nyomás és a nagy áramlási sebesség miatt.



11. ábra Képkalkotáshoz készített cella terve

Az elkészített mérőcella két 11 mm vastag plexi lapból áll. A jó minőségű képek készítésének érdekében fontos szempont volt, hogy a mikroszkóp objektívje és a minta között ne legyen megmunkált felület, mert az rendkívüli mértékben torzítaná a felvételeket. Ezért a felső plexi lap nem került megmunkálásra. Az áramlási keresztmetszet az alsó plexi lapból munkáltuk ki, ennek mélysége 0,7 mm. A saválló elektródok mindkét plexi lapba beilleszkednek, ezzel biztosítva a stabil csatornát, mivel az áramlási csatorna lényegében a két elektród között jön létre. Ezek távolsága 1 mm. A ki és beömlő csomók M5-ös menettel csatlakoztathatók. A két plexi lapot négy átmenő csavar rögzíti az alaphoz.



12. ábra Képkalkotáshoz használt cella az X-Y pozicionáló asztallal

A nagyfeszültséget két M3-as csavar segítségével juttatjuk az elektródokhoz, a cellához pedig egy SHV csatlakozó segítségével.

A cella megmunkálása CNC marással történt az Intézetben található eszközzel. A cella befoglaló méretei: 110 mm x 77 mm x 22 mm.

Későbbi átalakítások után a két plexi lemezt további nyolc csavar rögzíti egymáshoz (az alsó plexi lemezbe menetet vágtunk), továbbá a két elem között egy tömítő O-gyűrű ($D_{\text{belső}} = 55 \text{ mm}$, $d_{\text{vastagság}} = 2 \text{ mm}$) is található.

Mivel az áramlási csatorna igen szűk, a kamerát pedig μm pontossággal nem tudtuk rögzíteni, ezért a cellát egy pozicionálható X-Y asztalhoz rögzítettük. Az X-Y asztal mikrométer csavarok segítségével pontosan állítható. Így a képkalkotás során akár az áramlási csatorna különböző pontjairól is tudunk videófelvételeket készíteni.

A képkalkotásra használt mérőcella esetén a kamerát egy erre a célra készült állványhoz rögzítettük. A kialakítás során a két fő szempont az állítható fókusztávolság illetve a robusztusság volt – azaz, hogy az állvány ellenálló legyen a rezgéseknek, és éles képeket ill. videót tudjunk rögzíteni. A kamera egy, a tartóállványhoz rögzített sínpályán mozgatható, így a fókusztávolság durván állítható. A fókusztávolság a kamera állványán található menetes szár állításával finomhangolható.

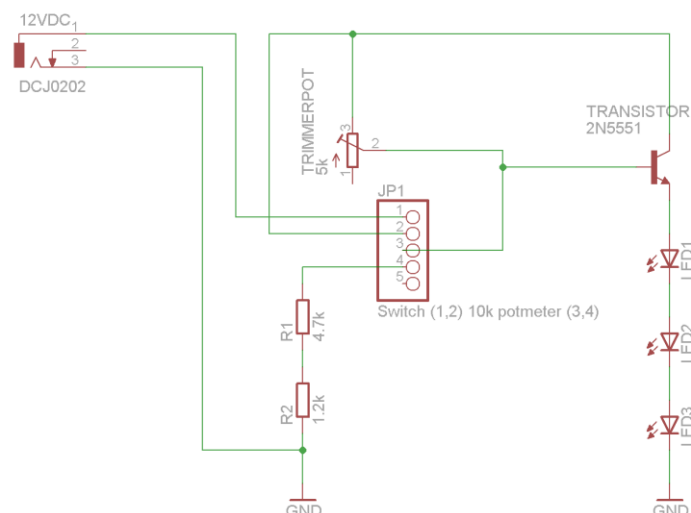


13. ábra Videómikroszkóp és állványa

Megvilágítás

Hamar nyilvánvalóvá vált, hogy bár a képalkotás során vizsgált minta vékony (0,7 mm), és a plexi átlátszó, a minta kamerával átellenes oldaláról beeső fény közel sem elegendő megfelelő minőségű képek készítéséhez. Ezért a képalkotás során alkalmazott mérőcellához az éles, kontrasztos képek készítésének érdekében egy LED-es megvilágítás is készült. A megvilágításért felelős panel a mérőcella alatt helyezkedik el. A fényforrást három LED képezi, ezek fényereje egy potenciométer segítségével szabályozható, illetve ki-és bekapcsolható.

A kapcsolás egy tranzisztoros vezérlést valósít meg. Ez azt jelenti, hogy a megvilágítás erőssége a tranzisztor bázisáramával szabályozható, ami egy 10 k Ω potenciométer segítségével állítható be. A bázisáram alapértéke illetve finomhangolása az 5 k Ω -os trimmer-potencióméterrel lehetséges - optimális értéke 3,9 k Ω .



14. ábra Cella megvilágításának kapcsolási rajza

Az áramkör 12 V egyenfeszültségről üzemeltethető, befoglaló mérete: 69 mm x 138 mm. A hozzá kapcsolódó NYÁK terv a függelék részben található.

Képkalkotás

A képkalkotáshoz az alábbi típusú videó mikroszkópot használtunk. A kamera detektora egy CCD tömb, ennek típusa WATEC WAT-250D, az objektív foglalatába pedig tetszőleges nagyítású mikroszkóobjektív helyezhető.

A kamera kimenő jelét egy PCI csatlakozós tuner kártya segítségével dolgoztuk fel. A további képfeldolgozási és megjelenítési folyamatokat LabVIEW felületen végeztük. Ezen folyamatok lényegében két szakaszra bonthatók: videófelvétel, ami egyben a képrögzítés is, és képfeldolgozás.

Videófelvétel, képrögzítés

Bár a kiértékeléshez részben képekre is szükségünk van, a mérésekről minden esetben videófelvételt készítünk. Ennek legfőbb oka a hardver teljesítménye; jó minőségű képek rögzítése és mentése, a képek nagy méretéből adódóan, túl sok időt vesz igénybe. Ezzel szemben a rögzített .avi kiterjesztésű videó rögzítés közben nem kerül rögtön mentésre, így nem veszik el idő az adatok lemezre való írásával. A mérések befejeztével pedig a tömörítetlen videó könnyedén szétbontható képekké.

A mérések megkezdése előtt azonban szükség van a National Instruments Measurement & Automation Explorer szoftverére. Itt tudjuk ugyanis ellenőrizni a számítógéphez csatlakoztatott aktív, képrögzítésre alkalmas eszközöket, illetve a hozzájuk

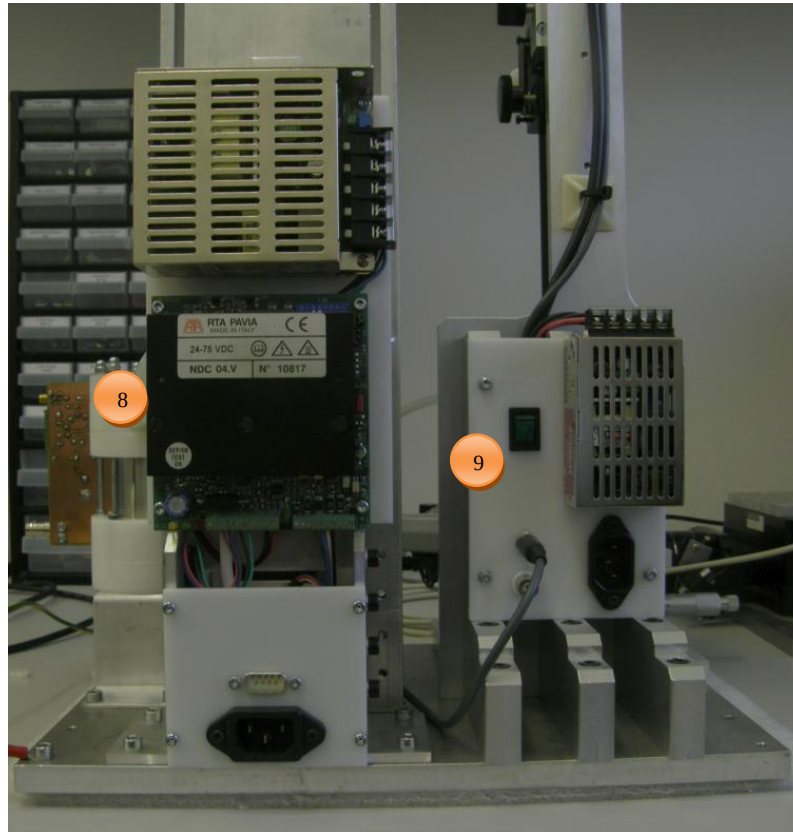
LabVIEW felületen videófelvétel készítéséhez két fő taszkra van szükségünk. Az egyik taszk (*Session*) inicializálja a kamerát, konfigurálja, majd rögzíti a képet (*IMAQdx Grab*), végül a mérés végeztével lezárja azt. Fontos, hogy ezen feladat során nem a szimpla IMAQ blokkokat kell használnunk, hanem az IMAQdx sorozatot. Ehhez a taszkhoz fűződik még hozzá az IMAQ blokk, ami a rögzítendő képeknek egy ideiglenes tárhelye.

[illegible]

Előzetes képfeldolgozás

23

Az ábrán bal oldalt található az állítható fókusz távolságú videómikroszkóp (1). Alatta képalkotós mérőcella (2), a hozzátartozó megvilágítással és az X-Y pozicionáló asztallal (3). Az ábra jobb oldalán foglal helyet a minta adagoló rendszer a két fecskendővel (4), a lineáris egységgel valamint a motorvezérlő elektronikával (8). A jobb alsó sarokban található az áramlásos mérőcella (5) és az LC oszcillátor (6). A teljes mérőrendszer egy közös alaphoz van rögzítve. A mérőrendszertől jobbra található a frekvencia analízátor (7).



18. ábra Teljes mérési elrendezés – hátulról

A kameraállvány és az adagoló hátsó részén foglal helyet a tápegység, a különböző csatlakozók valamint a léptetőmotor-meghajtó elektronika. A rendszer 230 V-os hálózati feszültségről üzemeltethető, nem igényel egyéb külső tápforrást. A kamerás cella háttérvilágítása egy billenőkapcsolóval kapcsolható ki és be (9), a megvilágítás mértéke egy potenciométer segítségével állítható.

Mérési eredmények

A következőkben tárgyaljuk mérési eredményeinket.

A méréseket két különböző modell ER folyadékkal végeztük el. Vizsgáltunk 0,34 Pas viszkozitású szilikonolajban diszpergált szilícium-dioxid részecskéket, ezek átlagos átmérője 10 és 20 nm közötti, koncentrációja 2 térfogat %. A másik esetben szintén szilikonolajban diszpergált üveggömb részecskéket vizsgáltunk, ezek névleges átmérője 9-13 μm közötti tartományba esik, a szilikonolaj viszkozitása 0,34 Pas, a diszpergált részecskék aránya 1,35 térfogat %. Mindkét anyag esetén készültek videófelvevételek is, azonban a nanométeres tartományba eső részecskék a rendelkezésre álló nagyítás mellett nem jól vizsgálhatók. Így a nanométeres részecskéket az általunk készített mérőcella hitelesítésére használtuk. Ehhez méréseket végeztünk stacioner, azaz áramlás nélküli esetben, és az eredményeket összehasonlítottuk a korábban elvégzett stacioner mérések eredményeivel. Az adatok egyezése alapján megállapítottuk, hogy a mérőcella által szolgáltatott adatok hitelesek.

A továbbiakban tárgyalt képfelvevételek és adatsorok a mikrométeres tartományba eső üveggömbök alapú ER folyadékról készültek. Ebből kifolyólag részletes méréseket elsősorban a mikrométeres részecskékkel végeztünk.

A mérések részben áramló közegekre vonatkoznak, azonban stacioner esetben is végeztünk méréseket. Az itt taglalt méréseink során, áramló közeg esetén, az áramlási sebesség rendre $9,8 \text{ mm/s}$. A mérések során az elektródokra kapcsolt feszültséget, illetve a mérés körülményeit úgy választottuk meg, hogy a videófelvevételeket illetve képeket társítani tudjuk a számértékekhez.

Áramlás nélküli, stacioner vizsgálatok

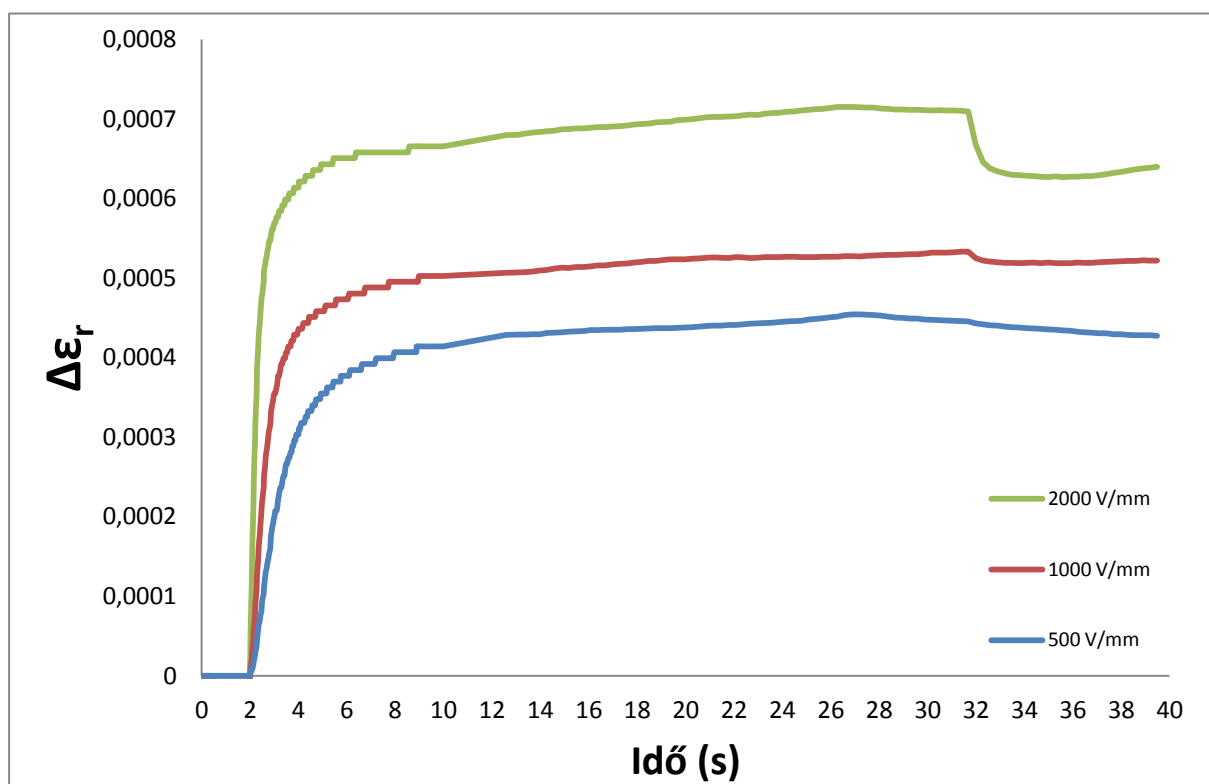
Stacioner vizsgálatok történtek már korábban az Intézetben nanométeres és mikrométeres részecskék esetén is. A dolgozat során a további méréseket mikrométeres üveggömbökkel végeztük.

Egy mérés a következőképpen zajlik: a megfelelő mintával feltöltjük a mérőcellát, majd elindítjuk a mérést. Ennek során az elektródokra egy adott időpillanatban rákapcsoljuk a nagyfeszültséget, esetünkben 30 másodperc hosszan. A nagy elektromos térerősség hatására a mintában diszpergált részecskékben dipólusmomentumok

indukálódnak, majd megindul a párképződés folyamata. Ez már önmagában jelentős dielektromos permittivitás-változással jár, amit az LC oszcillátor kimenetén frekvencia változásként mérni tudunk. A mért adatokat a frekvencia analizátorból olvassuk ki. A párképződést követően a részecskék láncokba szerveződnek, ami további dielektromos permittivitás-változással jár, azonban ez egy lassabb folyamat. A folyamat dinamikáját és az erre vonatkozó időállandók pontos megállapításának módszerét [4] cikkben vizsgálták.

Várakozásaink szerint, az elektromos tér aktiválását követően egy másodpercen belül lejátszódik a párképződés folyamata, ami a dielektromos permittivitás szempontjából gyors változást jelent. Ezt követi egy jóval lassabb, másodpercekben mérhető folyamat, a láncképződés.

Elvégezve a méréseket, az alábbi eredményhez jutottunk.



19. ábra Dielektromos permittivitás változása stationer esetben (9 – 13 μm üveggömbök, 0,34 Pas szilikonolaj, 1,35 térfogat % konc., áramlás nélkül)

A fenti grafikonon jól látszanak az előzetes várakozásainknak megfelelő tendenciák. Jól kivehető az a pillanat, amikor az elektromos teret a 2. másodpercen rákapcsoltuk a cellára, illetve a 32. másodpercnél lekapcsoltuk. Jól látható, hogy az elektromos térerősség növelésével a folyamat időben rövidül, azaz a párképződés és a láncosodás is felgyorsul. Ezek az eredmények megegyeznek a [4] cikkben leírtakkal.

Megállapítható egy jóval lassabb folyamat is, ami a láncképződésből adódik. Dielektromos permittivitás változás szempontjából azonban az előbbi jelenség sokkal dominánsabb. Ez a két folyamat, a [4] publikációban kifejtettek alapján, két exponenciális tagot tartalmazó egyenlettel közelíthető. Eszerint a folyamat dinamikája az alábbi egyenlettel írható le.

$$\Delta\epsilon_r(t) = A \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau_1}}\right) + B \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau_2}}\right) \quad (6)$$

Az egyenlet alapján a gyorsabban lejátszódó párképződési folyamatot τ_1 , a láncképződést pedig a jóval nagyobb τ_2 időállandó jellemzi. Összehasonlítva a mért értékek alapján becsülhető időállandókat a [4] cikkben kapottakkal, viszonylag pontos egyezést tapasztalunk, így az elvégzett mérés hitelesnek mondható.

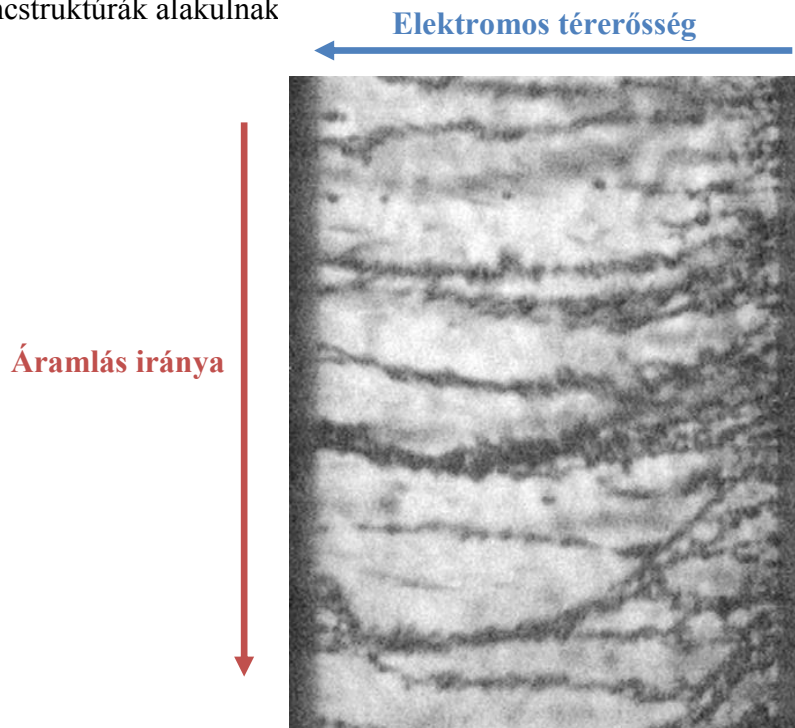
A (6) egyenlet alapján a dielektromos mérési adatokra LabVIEW segítségével görbét illesztve megkaphatjuk a τ_1 értékeket. Eszerint 500 V/mm elektromos tér esetén $\tau_1 = 831 \text{ ms}$, 1000 V/mm esetén $\tau_1 = 348 \text{ ms}$, 2000 V/mm esetén pedig $\tau_1 = 240 \text{ ms}$. Ezek az időtartamok a diagramon jól kivehető, szinte ugrásszerű, exponenciális változások időállandói, amelyek a párképződés dinamikáját jellemzik.

Méréseink alapján kijelenthetjük, hogy a láncképződés kialakulását követően az anyag dielektromos permittivitása megváltozik, előjelét tekintve nő. Ezt támasztják alá a [3] cikkben leírtak, miszerint az anyag dielektromos permittivitása megnő a láncképződési folyamatot követően. Fontos azt is megemlítenünk, hogy az itt tapasztalt dielektromos permittivitás-változások igen kicsik – a vizsgált minta dielektromos állandója tér nélkül $\approx 2,8$, a mért változások pedig nagyságrendileg 0,0001 körüli értékek. Ezek az eredmények is mutatják, hogy az itt végrehajtott mérések rendkívüli precizitást igényelnek, így az elektroncsöves oszcillátor használata megalapozott.

A mérési eredményeket összehasonlítva a korábbi – stacioner esetben történő – mérésekkel megállapíthatjuk, hogy a készített mérőcella illetve a mérési eredmények hitelesek.

Képkotás stacioner esetben

A fenti méréseket követően a másik, képkotásra használt mérőcellában áramlás nélkül és áramlás mellett is vizsgáltuk az üvegrészecskék beláncosodását különböző nagyságú elektromos térerősségek esetén. Ezekről videófelvételek is készültek, amelyekhez valós idejű mérési eredményeket tudtunk társítani. A következőkben pár kiragadott felvételen keresztül szemléltetni tudjuk, hogy az adatsorok mellett milyen láncstruktúrák alakulnak

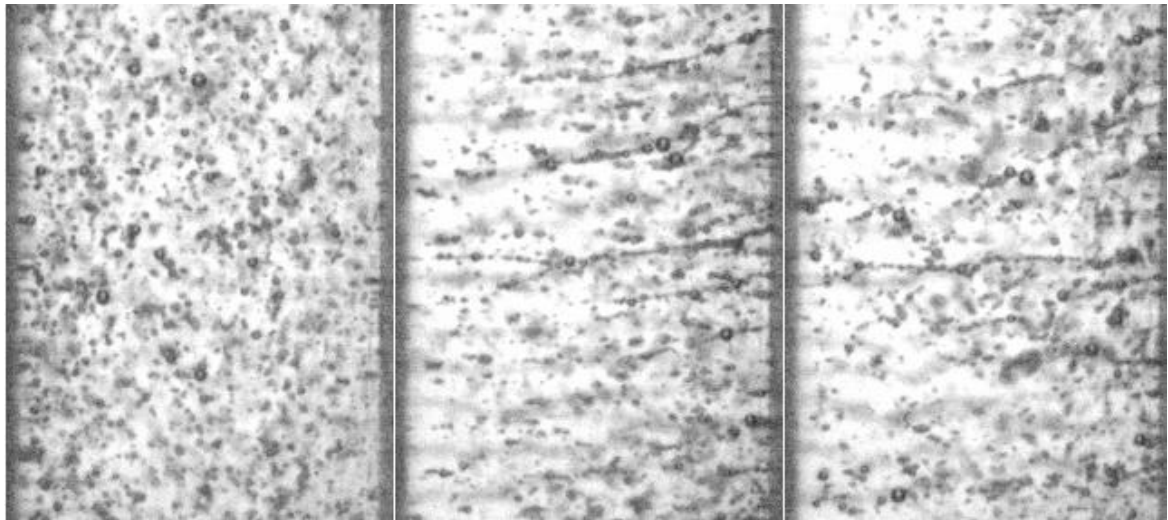


20. ábra Az elektromos térerősség vektor és az áramlás iránya nem stacioner esetben

Az áramlásról készült további felvételeken az elektromos térerősség és az áramlás iránya a fenti ábra szerint alakul.

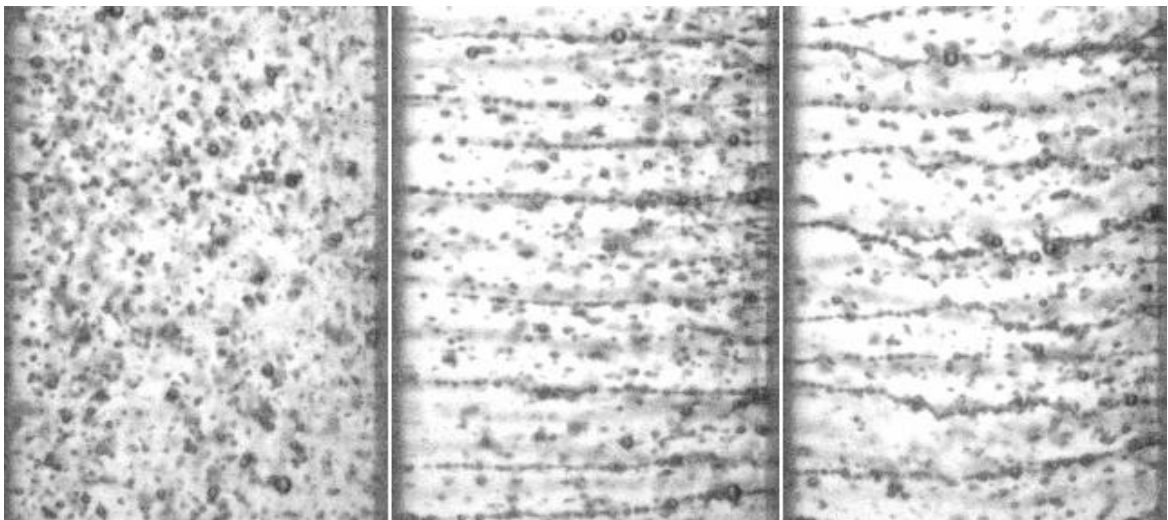
Mivel áramlási csatorna mélysége 0,7 mm, ezért több lánc is kialakult a felvétel síkjával párhuzamosan, ezért néhány helyen nehezebben kivehetők a láncok. A vizsgálatokat 0,5, 1, 2 és 4 kV/mm-es térerősségnél végeztük el, áramlás nélkül, a nagyfeszültséget 30 másodpercig kapcsoltuk a mérőcellára.

A következő képsorok a mérés 3 állapotát kívánják szemléltetni. A baloldali képen a kiindulási állapot látható, majd mellette közepén a láncképződés folyamata, illetve a jobboldali kép az elektromos tér lekapcsolása utáni állapottal társítható. A kép szélessége megegyezik az elektródtávolsággal. Az elektromos tér iránya vízszintes, a méréseket rendre üveggömbökkel végeztük.



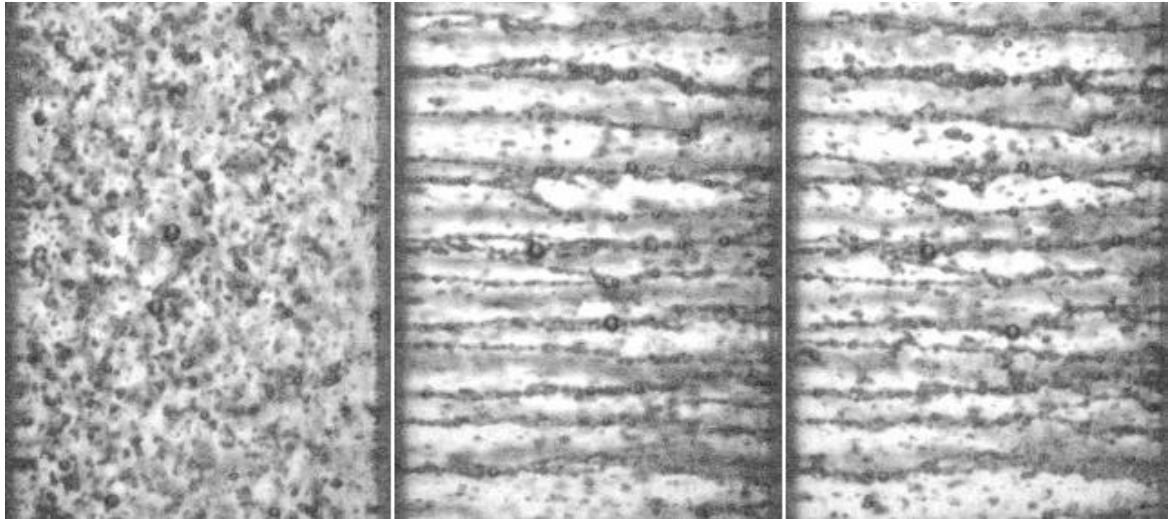
21. ábra: 500 V/mm-es térerősség esetén

500 V/mm-es elektromos térerősségnél a részecskék igen lassan kezdenek el láncokba szerveződni, így igen kevés lánc tud kialakulni ugyanannyi idő alatt. Ez érthető, hiszen az alkalmazott térerősség alig haladja meg a láncosodáshoz szükséges küszöbértéket. A (6) egyenlet alapján a dielektromos mérési adatokra görbét illesztve megkaphatjuk a τ_1 értékeket. Eszerint $\tau_1 = 831 \text{ ms}$ 500 V/mm elektromos tér esetén. A láncok nagyon kevés esetben érik át a teljes áramlási csatornát. A kialakuló láncok ráadásul nem is lesznek stabilak, az elektromos tér lekapcsolása után nagyon rövid idő alatt szétesnek.



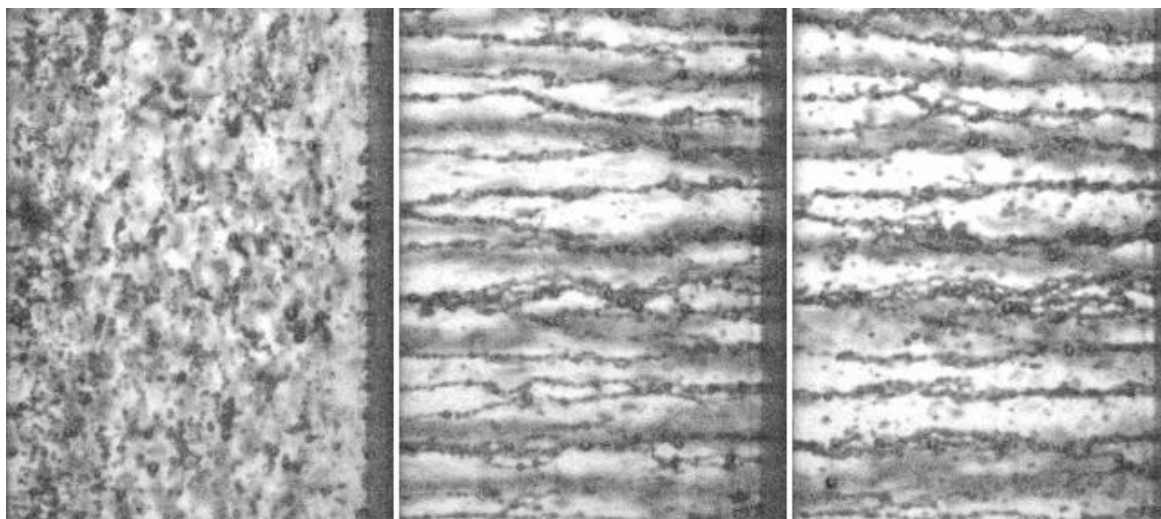
22. ábra: 1000 V/mm-es térerősség esetén

1000 V/mm-es térerősség esetén a láncok kialakulásának ideje csökken, a (6) képlet alapján $\tau_1 = 348 \text{ ms}$, kissé erősebb és határozottabb láncok tudnak kialakulni az elektródok között, közülük sok eléri az 1 mm-es hosszúságot is. Az elektromos tér lekapcsolása után viszont ezek is elég hamar darabokra esnek.



23. ábra: 2000 V/mm-es térerősség esetén

Tovább növelve a térerősséget, 2000 V/mm-es térerősségnél már szinte pillanatszerűen alakulnak ki a láncok, $\tau_1 = 240 \text{ ms}$, amelyeknek a száma is nagyságrenddel több, mint az előzőekben. A videófelvételek megmutatják azt is, hogy az egymáshoz közel kialakuló láncok össze is kapcsolódhatnak, így sokkal erősebb struktúrát tudnak létrehozni, amelyek a nagyfeszültség lekapcsolása után is megmaradnak, és csak külső erőhatásra tudjuk szétszakítani őket. Ezek az összekapcsolódott láncstruktúrák azonban nem jelentenek további dielektromos permittivitásbeli változást, azaz a mérési adatokban ez a jelenség nem figyelhető meg [4].



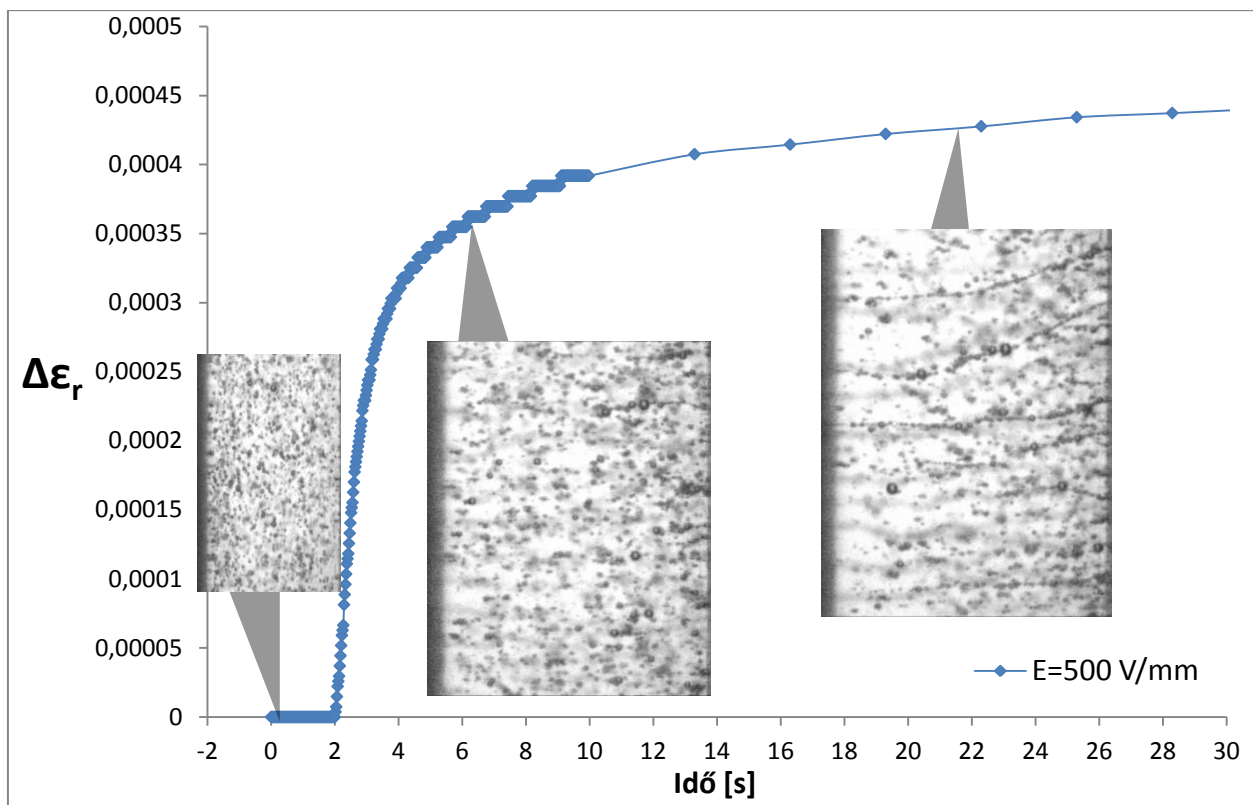
24. ábra: 4000 V/mm-es térerősség esetén

Még nagyobb, 4000 V/mm-es teret alkalmazva a megfigyelt tendencia tovább folytatódik és egyre erősebb struktúrák alakulnak ki. Megfigyelhető az a folyamat is, hogy egyre nagyobb térerősséget alkalmazva a láncok egyre jobban egymáshoz kapcsolódnak, tömbök alakulnak ki. Mind a fentebbi ábrák, mind pedig a most elvégzett méréseink ezt igazolják. A láncok összekapcsolódása a térerősség növelésével fokozódik, ez azonban dielektromos permittivitás-változást nem okoz.

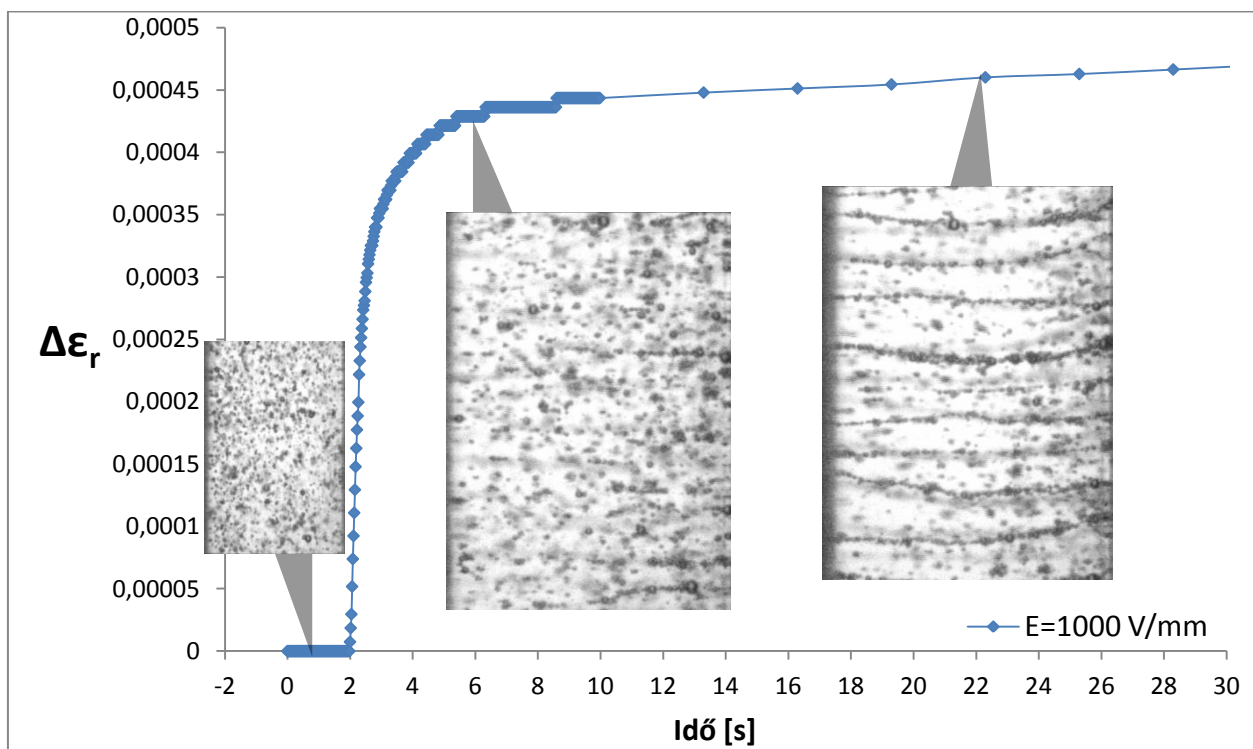
A videófelvételeket vizsgálva azt tapasztaljuk, hogy a térerősséget növelve a láncok kialakulásához szükséges idő, azaz a τ_1 csökken. Ezt támasztják alá a 19. ábrán látható grafikonon ábrázolt adatok is, ahol szintén látszik, hogy a dielektromos permittivitás változása egyre kisebb idő alatt megy végbe.

Társítva a mérési adatsorokat és a videófelvételeket az alábbi eredményt kapjuk. Ehhez hasonló mérési eredmények az [5] cikk tartalmaz, azaz mérési adatpontokat és hozzájuk társítható képfelvételeket. Az eredményeket összehasonlítva sok hasonlóság tapasztalható.

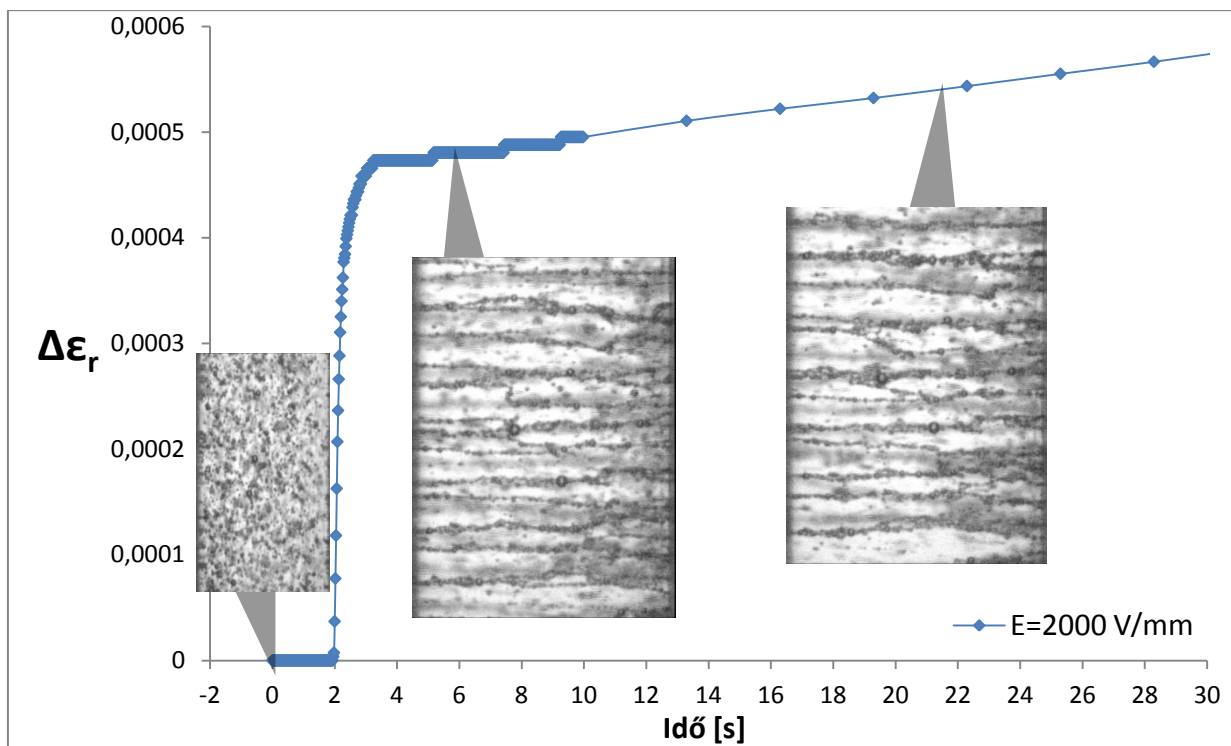
A grafikonokon egy-egy, az egyes szakaszokra jellemző képeket emeltünk ki. A teljes láncosodási folyamatról teljes videófelvételek is készültek.



25. ábra 9 – 13 μm üveggömbök, 0,34 Pas szilikonolaj, 1,35 térfogat % konc., áramlás nélkül, 500 V/mm térerősség



26. ábra 9 – 13 μm üveggömbök, 0,34 Pas szilikonolaj, 1,35 térfogat % konc., áramlás nélkül, 1000 V/mm térerősség



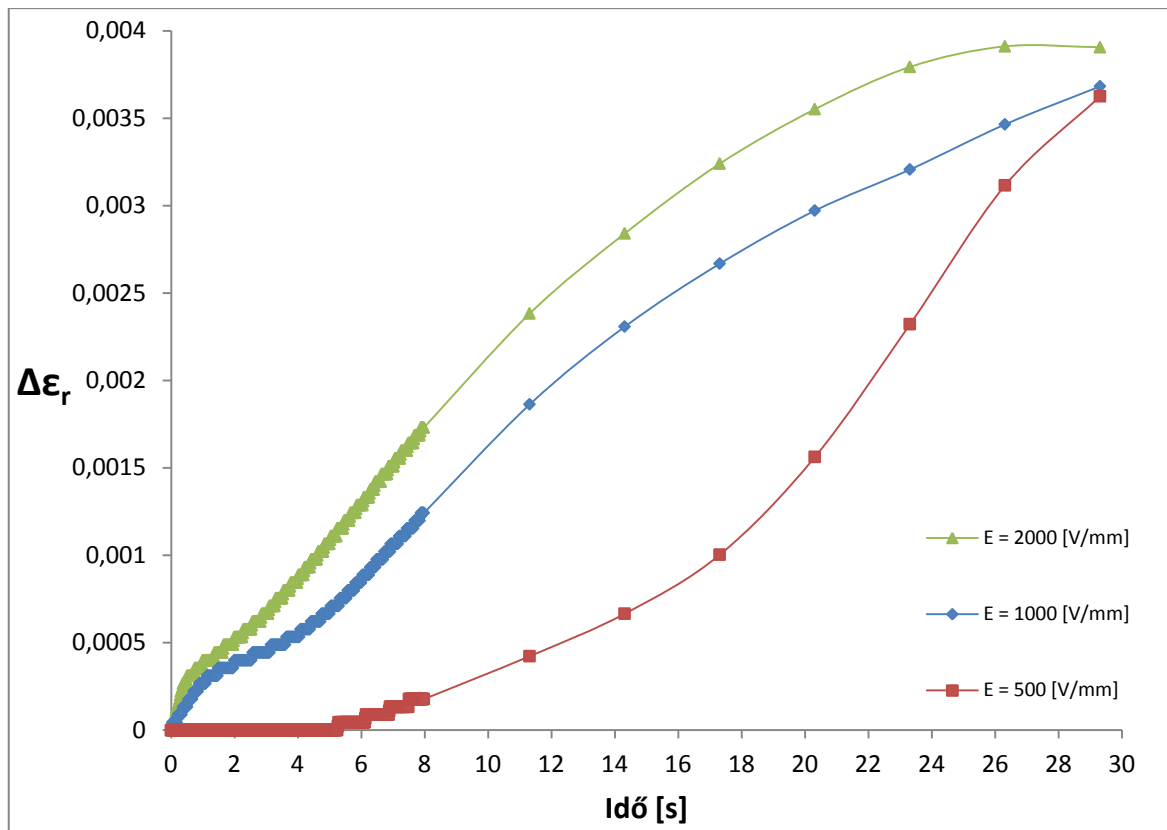
27. ábra 9 – 13 μm üveggömbök, 0,34 Pas szilikonolaj, 1,35 térfogat % konc., áramlás nélkül, 2000 V/mm térerősség

A videófelvételeken az is tisztán látható, hogy a τ_1 a térerősség növelésével csökken, azaz a párképződés és a láncstruktúrák kialakulása rövidebb idő alatt megy végbe.

Áramlás melletti vizsgálatok

A következőkben tárgyaljuk az üveggömbökkel végzett mérési eredményeinket áramlás közben. Áramlási sebességnek egy viszonylag gyors, 9,8 mm/s sebességet választottunk. Ilyen áramlási ütemben az elektromos tér megszüntetése után a láncok hamar szétesnek és ismét egy homogén anyagáram keletkezik. Az elektromos tér a mérések során mindkét mérőcellában 500, 1000 és 2000 V/mm volt. Mivel ugyanolyan körülményeket tudtunk biztosítani, ezért a képi információt a dielektromos permittivitás-változás értékekhez tudjuk társítani.

Az alábbi grafikonon láthatjuk a dielektromos permittivitás változását az idő függvényében, különböző nagyságú térerősségek esetén. Fontos megjegyezni, hogy a pontokat összekötő vonal nem illesztés, hanem a jobb áttekinthetőséget szolgálja.



28. ábra: A dielektromos állandó változása áramlás esetén különböző térerősségeknél (9 – 13 μm üveggömbök, 0,34 Pas szilikonolaj, 1,35 térfogat % konc., áramlási sebesség 9,8 mm/s)

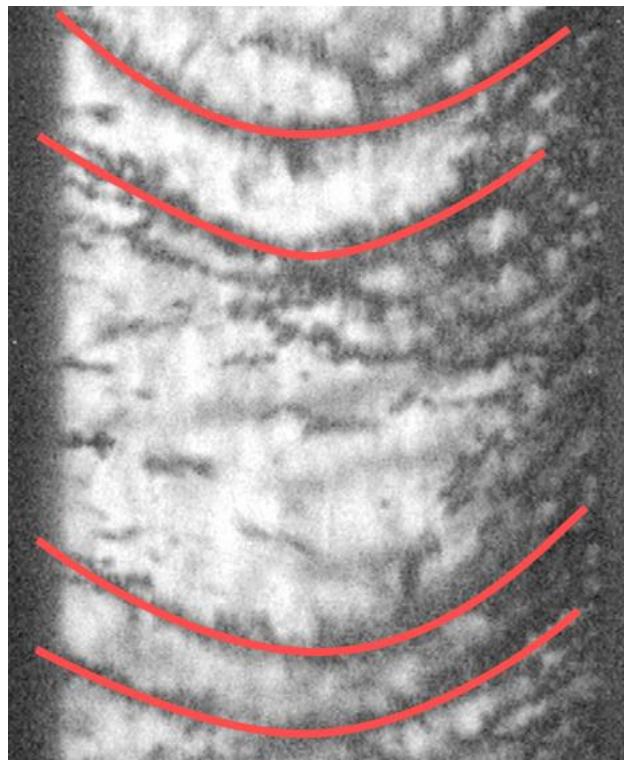
Az elektromos teret a grafikon 0 időpillanatában kapcsoltuk a mérőcellára. A dielektromos permittivitás-változás áramlás mellett is egyértelműen látható. Feltételezéseink szerint az áramló közeg gátolja a láncépződés folyamatát, ezért a dielektromos permittivitás-változás kisebb lesz. Ha a grafikonon ábrázolt adatsor első felét tekintjük, akkor állításunk megalapozottnak tekinthető. Az is megfigyelhető, hogy nagyobb térerősség esetén az áramlás kevésbé gátolja a láncépződés folyamatát.

Azonban látható az is, hogy kis elektromos térerősség esetén, azaz 500 V/mm-nél a párképződési és láncosodási folyamatok kevésbé meghatározók, a változás másodpercekig nagyon kicsi – áramlás nélküli esetekből szerzett tapasztalataink azt mutatják, hogy a dielektromos permittivitás változása főként ekkor zajlik le. Ezt követően azonban egy másfajta jelenség figyelhető meg, ennek sebessége jóval lassabb, a változás mértéke azonban az áramlás nélküli esethez képest egy nagyságrenddel nagyobb. Bár nagyobb térerősségek esetén nagyobb mértékű láncosodás figyelhető meg és az általa okozott dielektromos permittivitásbeli változás, a változás jelentős részét ezekben az esetekben is egy másik jelenség okozza. Ennek megértése a képalkotás során készített videófelvevételek vizsgálatával lehetséges.

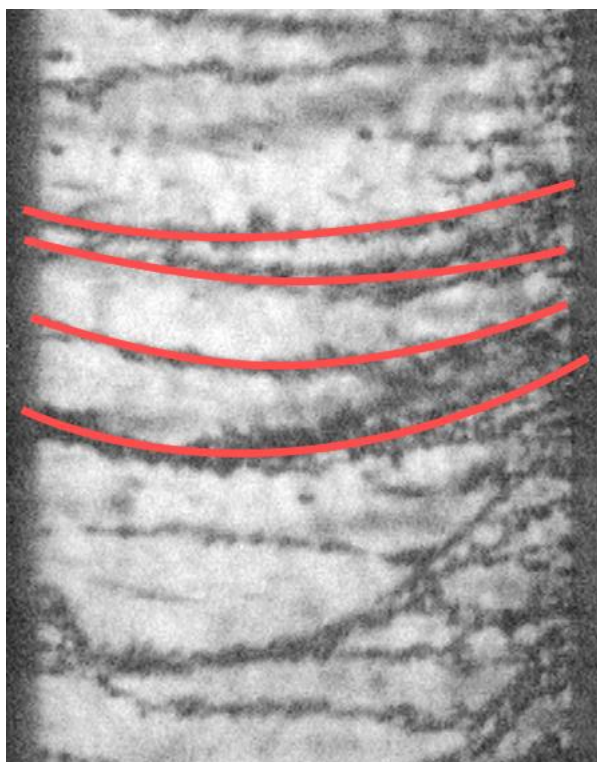
Képzőképzés áramlás esetén

A következőkben megvizsgáltuk a mintánkat az előző mérésekhez hasonló feltételek mellett. A láncosodási folyamatról teljes videófelvételek készültek, az alábbiakban egy-egy kiragadott pillanatot mutatunk be, ami jellemezi az adott paraméterekkel rendelkező láncosodást. A méréseket szintén mikrométeres üveggömbökkel végeztük.

Az alábbi ábrán látható $9,8 \text{ mm/s}$ -os áramlási sebesség mellett a minta, 2000 V/mm elektromos térerősség mellett, az elektromos tér bekapcsolását követően. A kialakult láncstruktúrák jól láthatók, ezek közül néhányat piros színnel bejelöltünk, amelyek az adott áramlás és térerősség mellett jellemzőek. Látható, hogy a láncstruktúrák, bár a két elektród között teljes szélességben kialakulnak, jelentős mértékben görbült alakot vesznek fel – ennek oka egyértelműen az áramló közeg. A görbületek durván egy parabolával közelíthetők, azaz megalapozottnak tekinthető az a feltevésünk, miszerint az áramlás lamináris.



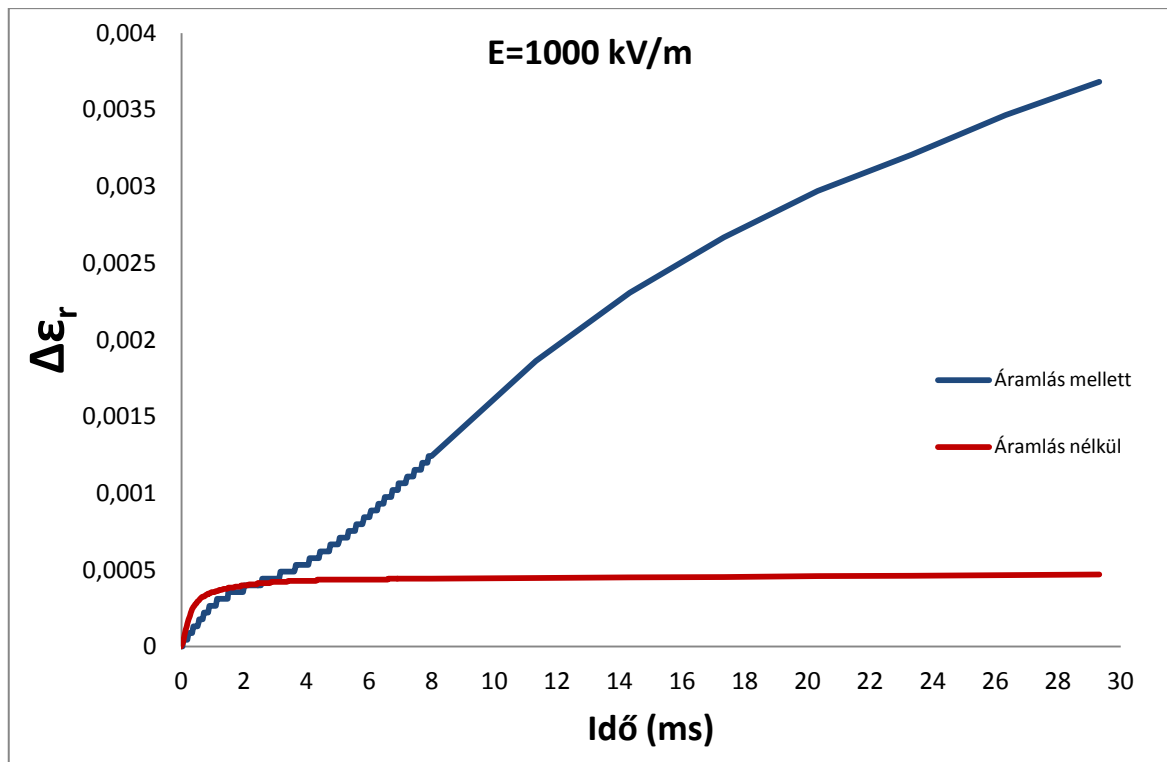
29. ábra: 2000 V/mm -es térerősségnél, $9,8 \text{ mm/s}$ -os áramlási sebességnél



30. ábra: 4000 V/mm-es térerősségnél, $9,8 \text{ mm/s}$ -os áramlási sebességnél

Az elektromos térerősséget növelve, 4000 V/mm esetén látható, hogy a láncok sokkal határozottabbak, jóval kevésbé görbültek, ugyanakkora áramlási sebesség mellett. Ezt jól mutatja a fenti ábra is. A videófelvételeken az is jól látszik, hogy a láncok kialakulása sokkal gyorsabban megy végbe – a láncok kialakulását az áramló közeg gátolja, lassítja.

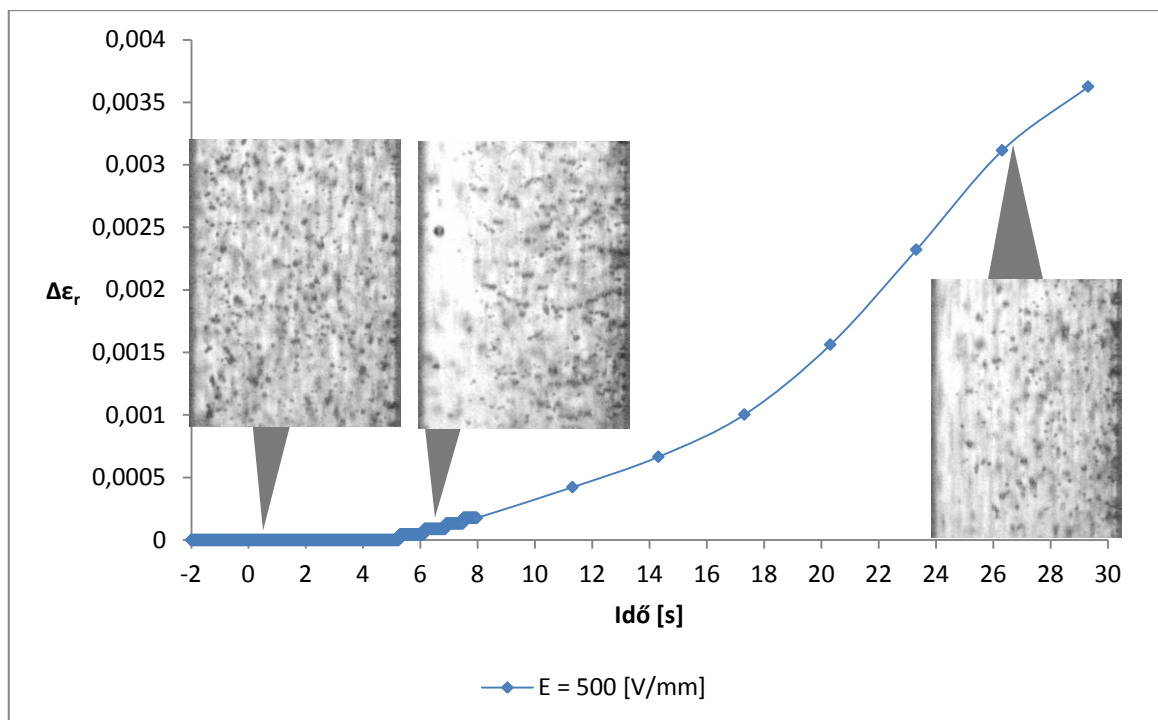
Ezt a tényt megállapítva bizonyítottnak látszik az a feltevés, hogy a megdőlt láncok dielektromos permittivitása kisebb, mint a két elektród között keletkezett, az elektródokra merőleges egyenes láncoké. A görbült struktúrák megdőlt láncoknak tekinthetők, a dielektromos permittivitás változása pedig kisebb, mint áramlás nélküli esetben. A dielektromos permittivitásnak ezen jellegű változását a következő grafikon is szemlélteti. A képeket elemezve az is jól látható, hogy kisebb elektromos térerősség esetén a láncok jobban megdőlnék, illetve görbülnek, így csökken a dielektromos permittivitás változása.



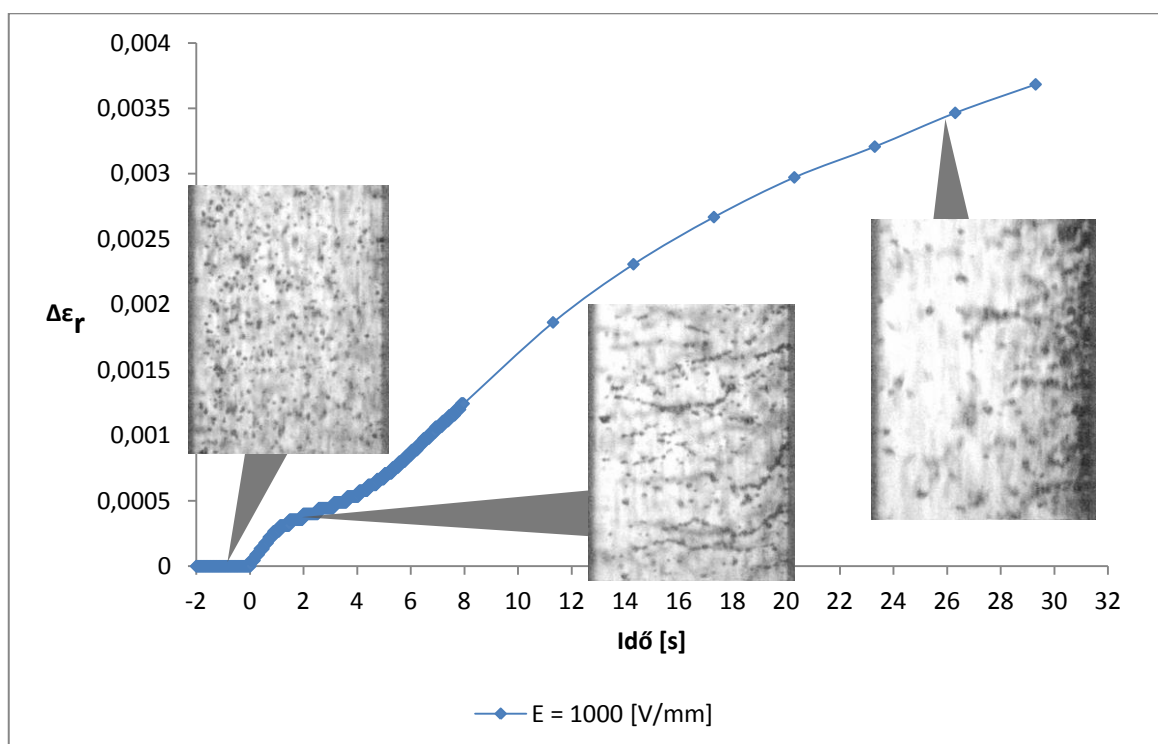
31. ábra Áramlás nélküli és áramlás melletti dielektromos permittivitás változások (9 – 13 μm üveggömbök, 0,34 Pas szilikonolaj, 1,35 térfogat % konc., áramlási sebesség 9,8 mm/s)

A fenti grafikonon ugyanazon minta dielektromos permittivitásának változását láthatjuk áramlás nélküli és áramlás melletti esetben, azonos térerősség esetén. Az ábra kezdeti szakasza alapján jól látható, hogy áramlás nélküli esetben az áramlás nem gátolja a láncok kialakulását, és a láncképződés gyorsabban megy végbe. Ezen kívül a változás mértéke is kisebb, ennek az oka a megdőlt láncok okozta kisebb dielektromos permittivitás-változás. Azonban áramlás nélküli esetben a közeg elér egy kvázi állandósult állapotot, és a dielektromos permittivitás nem növekszik tovább jelentős mértékben. Erre az állapotra utaló nyomok az áramlás mellett vizsgált adatsorban is fellelhetőek, körülbelül 2500 – 3000 ms környékén. Ekkor a kezdeti, gyors növekedés megtorpan, feltételezhetően a kezdeti láncképződés eddig tart. Ezután pedig egy olyan folyamat veszi kezdetét, ami áramlás nélküli esetben nem lép fel, és ami jóval nagyobb dielektromos permittivásbeli változást okoz.

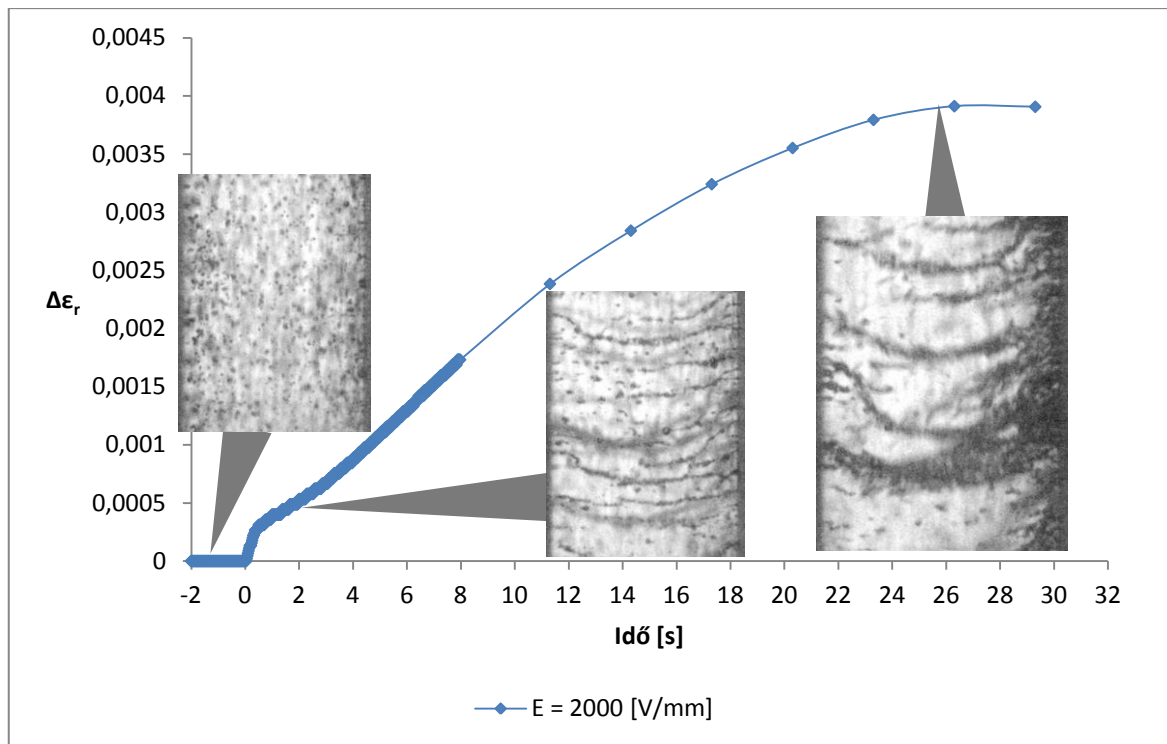
Ezen jelenség megértéséhez a videófelvevételeket kell megvizsgálunk, és a számértékeket a megfelelő képekkel társítanunk. A kettő adatgyűjtési folyamat időbeli szinkronizációja után a folyamat megérthető. Ehhez az egyes grafikonok mellé a folyamat kiindulási, kezdeti láncosodási majd további folyamatokat jellemző ábrákat helyeztünk el.



32. ábra 9 – 13 μm üveggömbök, 0,34 Pas szilikonolaj, 1,35 térfogat % konc., áramlási sebesség 9,8 mm/s, 500 V/mm térerősség



33. ábra 9 – 13 μm üveggömbök, 0,34 Pas szilikonolaj, 1,35 térfogat % konc., áramlási sebesség 9,8 mm/s, 1000 V/mm térerősség



34. ábra 9 – 13 μm üveggömbök, 0,34 Pas szilikonolaj, 1,35 térfogat % konc., áramlási sebesség 9,8 mm/s, 2000 V/mm térerősség

A 32.-34. képeket vizsgálva láthatjuk, hogy az idő előrehaladtával az elektródok közelében a vizsgált anyag felsűrűsödik. Ez a jelenség a térerősség növelésével egyre erőteljesebb. A jelenséget kvalitatív módon már mások is megfigyelték [5], angolul *densification*-ként, azaz sűrűsödésként, vagy torlódásként hivatkoztak rá. Esetünkben a sűrűsödés elsősorban az elektródokhoz közel jelentkezik, illetve nagyobb terek esetén a teljes áramlási keresztmetszetben.

Így a mérési adatsorokat és a képalkotást egymáshoz társítva az áramlás esetén tapasztalható nagymértékű változásra logikus magyarázat adható; a hosszú lefutási idejű sűrűsödési/torlódási folyamat miatt egyre több részecske jut az elektródok közé, több részecske pedig nagyobb dielektromos permittivitást jelent, és ez okozza a lassú, ám viszonylag nagy mértékű változást áramlás mellett.

A torlódás mellett egy másik érdekes jelenség is megfigyelhető a videófelvételeken, méghozzá a *lépegetés* jelensége. Ez a jelenség nagy – 2000 - 4000 V/mm – elektromos tér esetén figyelhető meg jól. Ekkor a részecskék erős láncstruktúrákat hoznak létre, melyeket az áramlás sokszor nem képes teljesen szétszakítani. A láncokteg viszont elszakad az elektród közelében, az áramlat pedig tovább sodorja a láncdarabot. Ez a láncdarab azonban a következő, elektród mellett található lánckezdeménybe belekapaszkodik, egészen addig, míg az áramlás újból el nem szakítja. Ekkor a láncdarab ismét tovább lép a következő lánckezdeményig.

Összegzés

Saját építésű készülékekkel elektorreológiai folyadékok dinamikai tulajdonságait vizsgáltuk különböző elektromos térerősségek mellett, stacioner, azaz áramlás nélküli, és áramlás melletti esetben is. A mérések során szilikonolajban diszpergált üveggömb részecskéket vizsgáltunk, ezek névleges átmérője 9-13 μm közötti tartományba esik, a szilikonolaj viszkozitása 0,34 Pas, a diszpergált részecskék aránya 1,35 térfogat %.

A mérések megvalósításához két mérőcellát terveztünk és készítettünk el. Az egyikben az elektorreológiai folyadék dielektromos permittivitás-változásának áramlás melletti vizsgálatát végeztük el, míg a másik cellát képkalkotásra használtuk. A megfelelő tervezéssel és mérési paraméterek megválasztásával a két cella által szolgáltatott mérési eredmények társíthatók egymáshoz. A mérőrendszerhez egy mintaadagoló rendszert is terveztünk, valamint egy oszcillátor is készült. A rendszer vezérlése LabVIEW platformon történik, adatgyűjtő kártyán keresztül.

A mérési eredményeket kiértékeljük, és összehasonlítottuk a szakirodalomban található eredményekkel. A képkalkotás és az ER folyadék láncosodási dinamikáját leíró adatsorok társításával a láncosodási folyamatok jobban megérthetők.

Jövőbeli tervek, fejlesztések

A mérések során tapasztaltakat felhasználva szeretnénk a méréseket továbbfejleszteni, új szintre emelni. Ez alatt értjük egy kombinált cella megépítését, amelyben ötvözzük a két mérőcella, a kamerás és az áramlásos mérőcella tulajdonságait. Így a dielektromos permittivitás-változáshoz azonnal, egyidejűleg képesek lennénk videofelvételeket is társítani. Jelenleg ez csak két különböző mérés elvégzésével tehető meg. A kombinált cellához azonban mindenképpen szükséges egy új oszcillátor áramkör tervezése is.

Ezen kívül szeretnénk monodiszperz anyagokkal is elvégezni a méréseket, ezt természetesen csak a kombinált cellában. Ezeknek az anyagoknak a beszerzése igen költséges, ezért minimalizálnunk kell a cella méreteit, hogy a lehető legkevesebb anyag felhasználásával tudjuk a méréseket lefolytatni.

A jövőben dielektromos permittivitás változásokat a Clausius-Mossotti egyenlet alapján kívánjuk kiértékelni.

Köszönetnyilvánítás

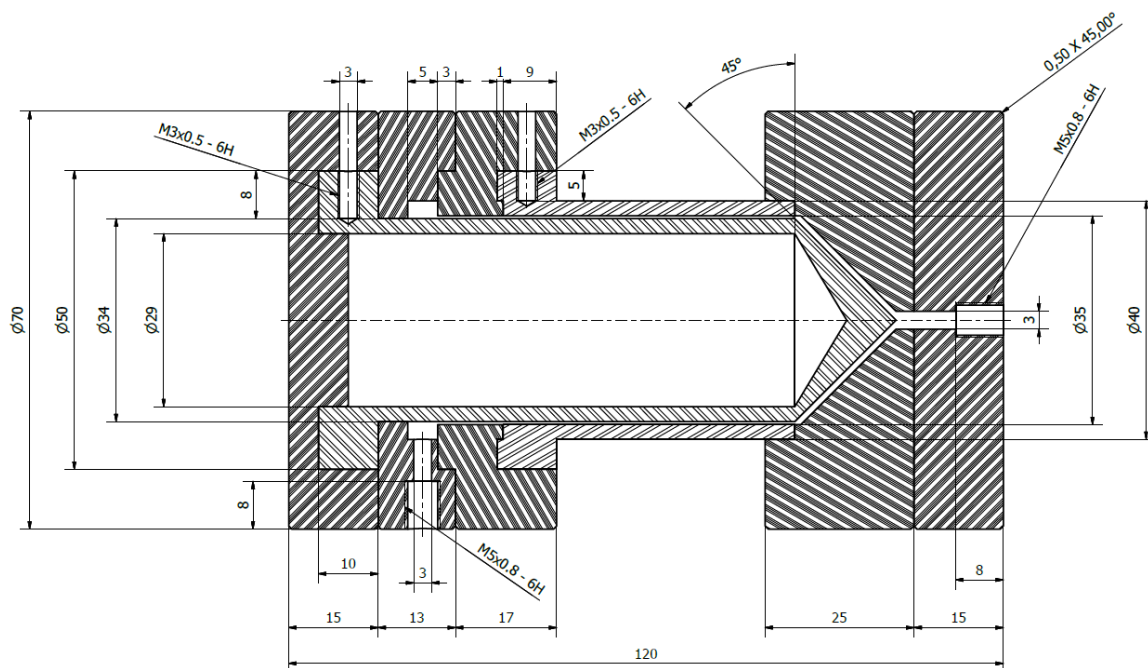
Köszönettel tartozunk Horváth Barnabásnak a rengeteg segítségért és Molnár Gergelynek a mechanikai megmunkálásokban való segítségnyújtásért.

A kutató munka a TAMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0071 és a TAMOP-4.2.2.-B-10/1-2010-0025 jelű projektek részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

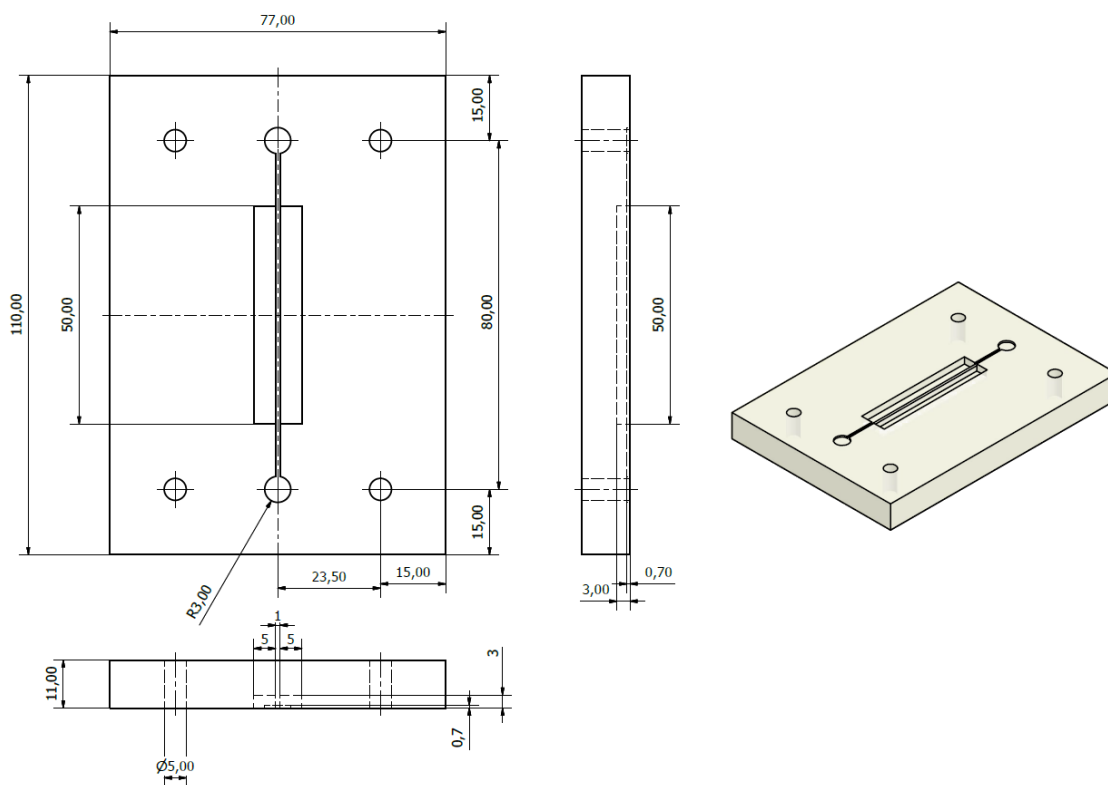
Irodalomjegyzék

- [1.] B. Horváth, I. Szalai, Hung. J. Ind. Chem. 38 35 (2010)
Nonlinear Dielectric Phenomena in Complex Liquids, edited by S. J. Rzoska and V. P. Zhelezny, NATO Science Series II Vol. 157 (Springer, Berlin, 2004)
- [2.] K. M. Blackwood, H. Block, and P. Pattray, Proceedings of the 4th International Conference on Electrorheological Fluids, edited by R. Tao and G. D. Roy (World Scientific, Singapore, 1994), p. 3.
- [3.] W. Wen, S. Men, and K. Lu, Phys. Rev. E 55, 3015 (1997)
- [4.] B. Horváth, I. Szalai Phys. Rev. E 86, 061403 (2012)
W. Wen, H. Ma, and W. Y. Tam, Appl. Phys. Lett. 73, 3070 (1998)
- [5.] Y. J. Nam, M. K. Park, R. Yamane, Exp Fluids 44, 915 (2008)
- [6.] X. P. Zhao, X. M. Gao, D. J. Gao, C. R. Luo, Physica B 367 229 (2005)

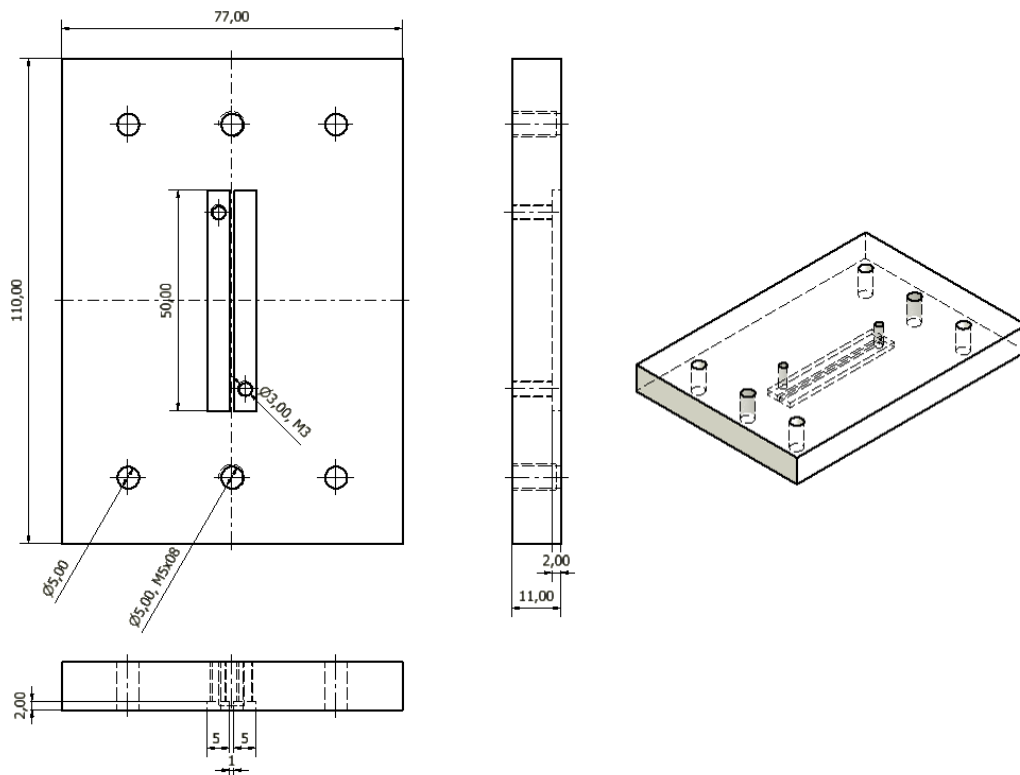
Függelék



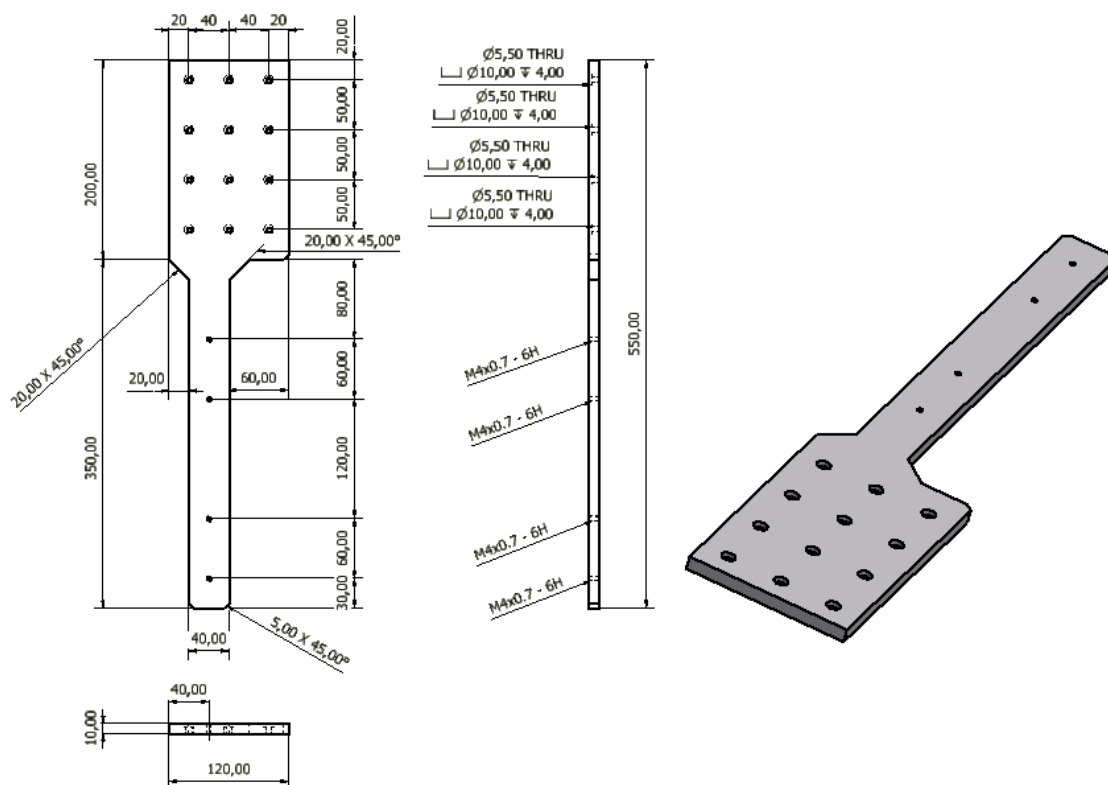
35. ábra Áramlásos mérőcella terve



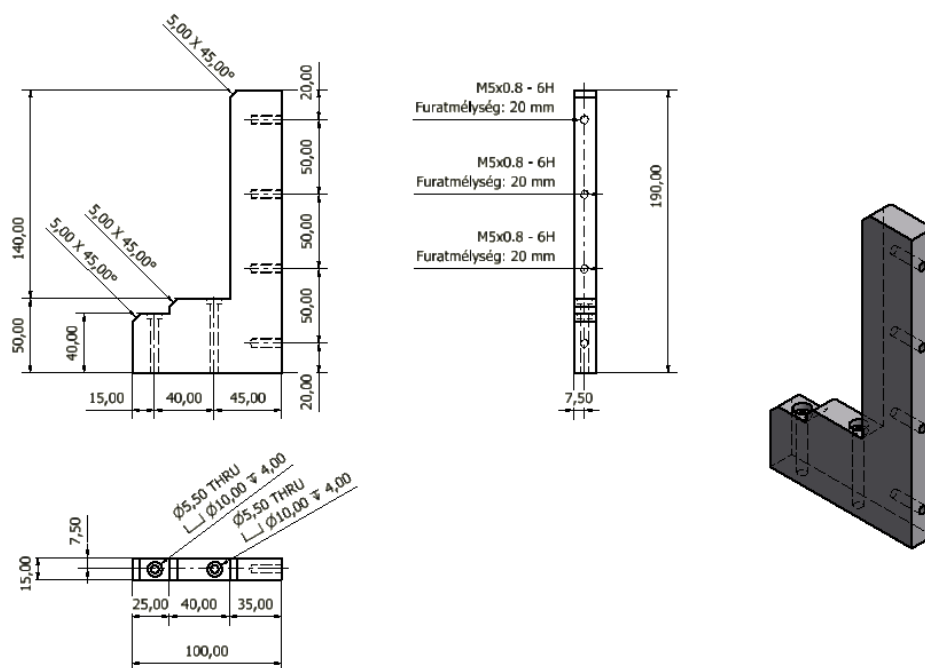
36. ábra Képkalkotásra használt mérőcella - alsó lemez



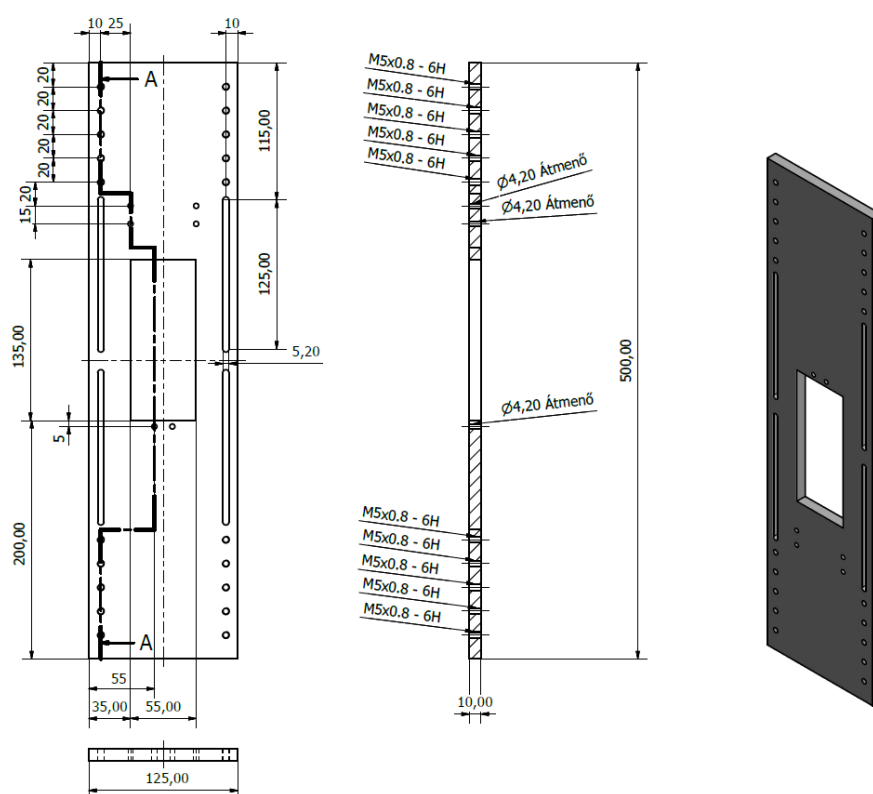
37. ábra Képkalkotásra használt mérőcella - felső lemez



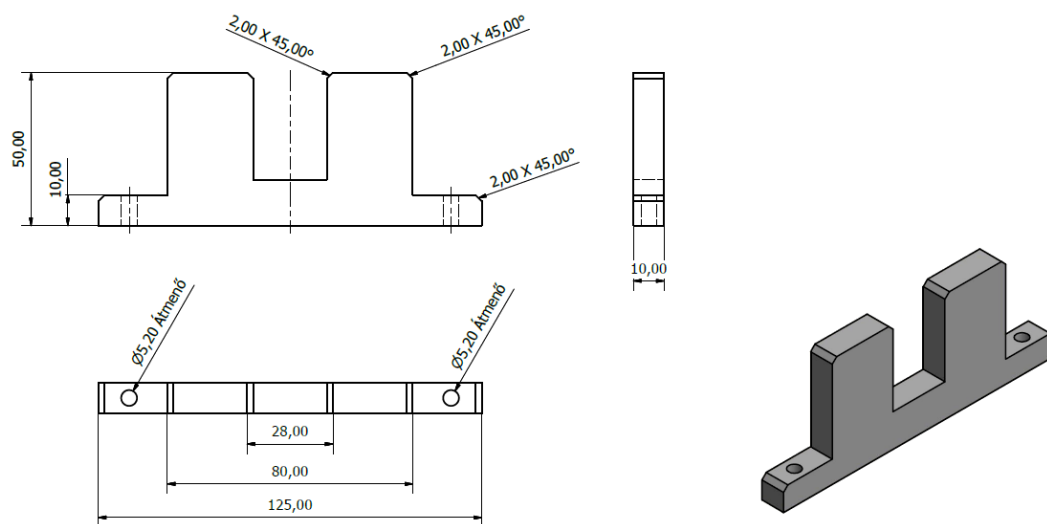
38. ábra Videó mikroszkóp tartóállvány - alaplap



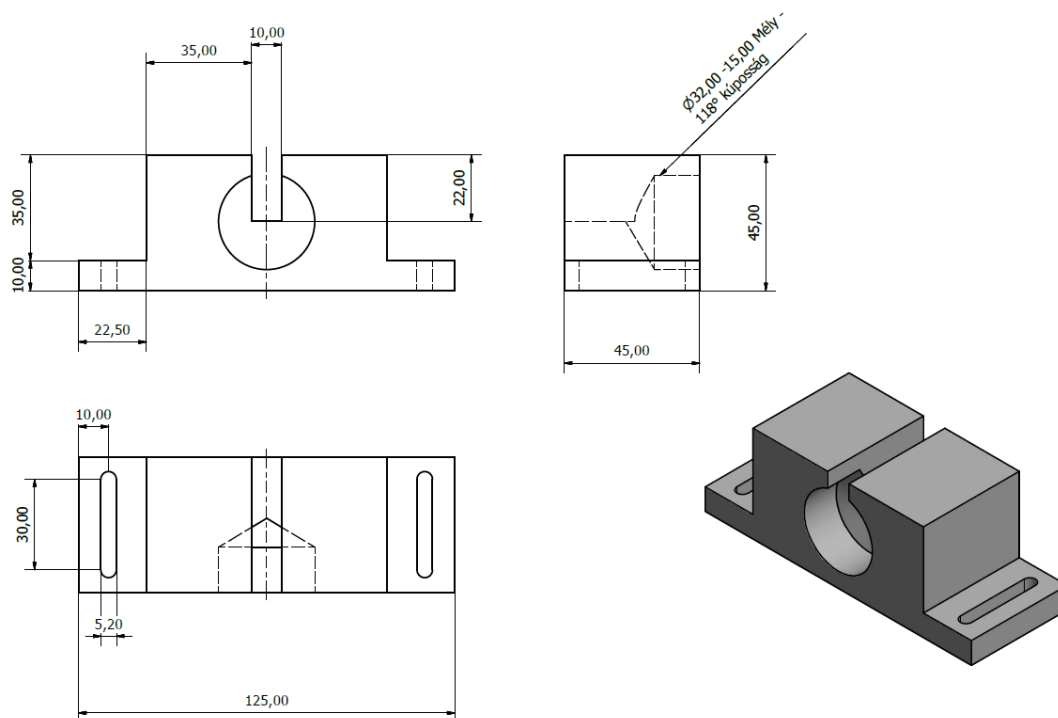
39. ábra Videó mikroszkóp tartóállvány - támasztóelem



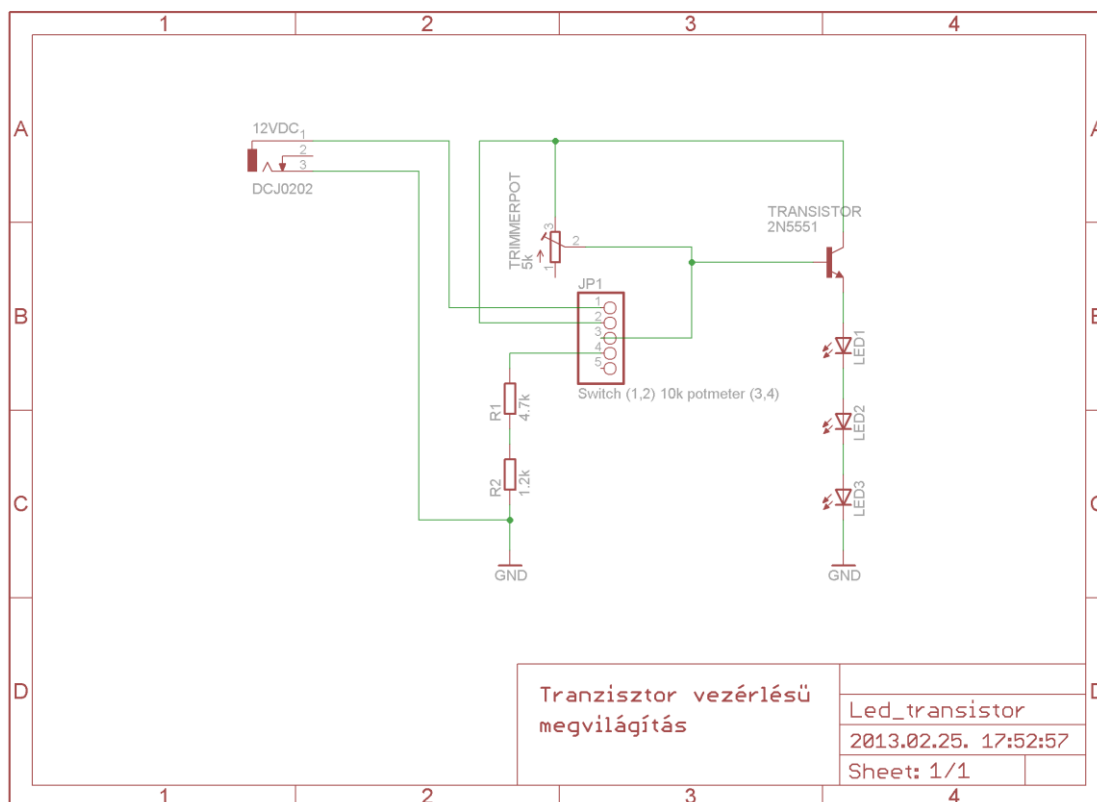
40. ábra Adagolórendszer - alaplemez



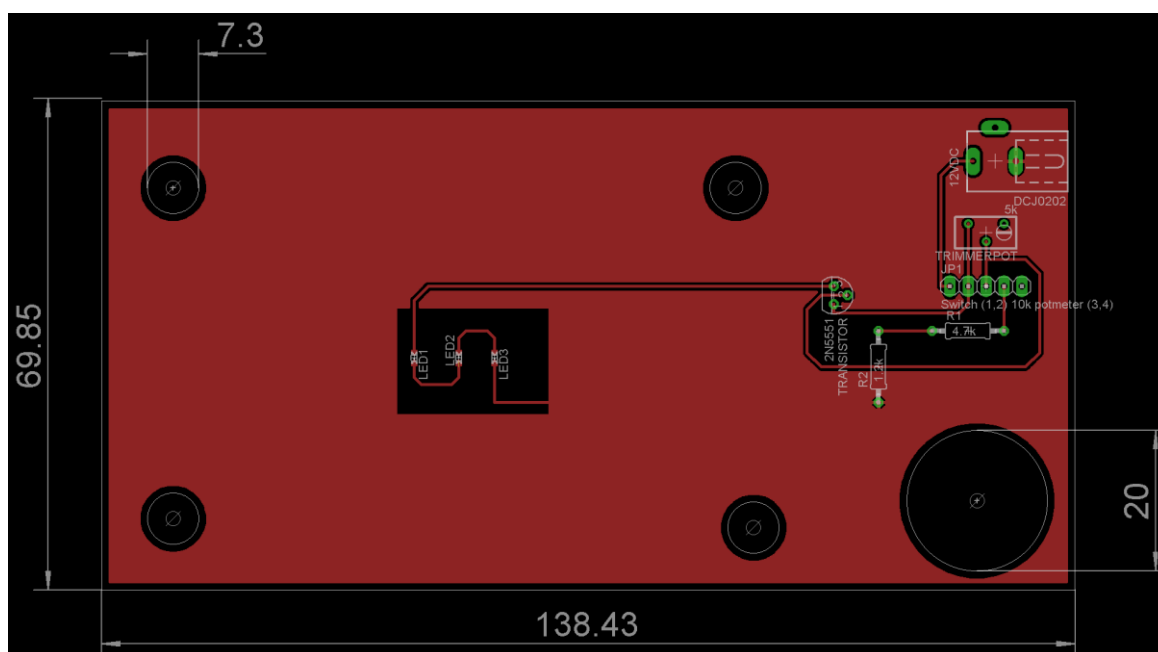
41. ábra Adagolórendszer - középső fecskendőtartó elem



42. ábra Adagolórendszer - fecskendő végtartó elem



43. ábra Kamerás cella megvilágítás - kapcsolási rajz



44. ábra Kamerás cella megvilágítás - NYÁK terv