



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamos Energetika Tanszék

Vuity Gábor

Nano- és mikrokompozit szigetelőanyagok
dielektromos jellemzőinek vizsgálata

Konzulens:
Dr. Tamus Zoltán Ádám

Budapest, 2018

Összefoglaló

A villamosenergia-rendszerek számos alkalmazásában elengedhetetlen a szigetelések használata. Az elmúlt évtizedek során ezek vizsgálata kulcskérdés volt a megbízható és hibamentes berendezések fejlesztésénél. A nanotechnológia fejlődése számos új lehetőséggel kecsegtetett a szigeteléstechika területén is, amelyek a miniatürizálás lehetősége mellett egyre jobb villamos tulajdonságok elérését tették elérhetővé.

Dolgozatom célja a nanokompozit anyagok bemutatása, főbb szigeteléstechika szempontjából fontos jellemzőinek ismertetése, a minták dielektromos tulajdonságainak mérése és a kapott eredmények kiértékelése. Elsősorban transzformátorokban alkalmazott epoxigyanta mátrixú kompozitok vizsgálatával foglalkozom, melyek szigetelőképeség szempontjából jelentős villamos tulajdonságai közül a permittivitást és a veszteségi tényezőt ($\tan\delta$) veszem górcső alá. A mérések folyamán a feszültség (feszültségválasz) mérésén alapuló módszerek közül elsősorban a RVM (Recovery [vagy Return] Voltage Measurement) módszert alkalmazom, amely a polarizáció intenzitásának időállandó szerinti eloszlását vizsgálja. [1]

Dolgozatomban emellett különböző kompozitok jellemzőit hasonlítom össze, kitérek a visszatérő feszültségmérés fontosabb tulajdonságaira, elméleti hátterére is, valamint - lehetőség szerint - meghatározom az RVM mérési eredményekben kapott paraméterek hőmérsékletfüggését is.

A dolgozat egyes szemelvényei a szerző által részben azonos tartalommal feldolgozásra kerültek a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Kar Villamos Energetika Tanszékén szakdolgozatként 2017-ben *Epoxigyanta mátrixú nanokompozitok dielektromos jellemzőinek vizsgálata* címmel. Ezen dolgozat az előbbi folytatása.

Abstract

The object of my paper: demonstrate the nanocomposite materials, expound, measure and evaluate their dielectric properties. The samples that were evaluated are power transformer insulations. Their most important properties from my point of view are the permittivity and tan delta. During the measurement I use Recovery Voltage Measurement (RVM). The base of this measurement is the time distribution of the intensity of polymerisation.

Besides this I compare some composites with different fillers, and as far as possible I define the temperature dependence of the dielectric properties of the materials.

1 A nanokompozitokról általánosan

1.1 A kompozitok

A kompozit anyagok heterogén rendszerek, melyeket két vagy több makro-, mikro-, vagy akár nano-méretekből elkülönülő anyag összekapcsolásával (társításával) alakítanak ki. A kompozitok bármilyen két anyag (például fém, kerámia, vagy polimer) kombinációjaként előállíthatók, ahol az egyik alkotó folytonos (mátrix), amely körülveszi a különböző lehetséges morfológiájú (szemcsés, szálas, lemezes) diszperz fázist. A köztük levő határfelületnek döntő szerepe van a kialakuló anyag tulajdonságainak kialakításában. A kompozitok segítségével az alkotók legjobb, illetve olyan tulajdonságai hozhatók elő, amelyekkel azok külön-külön nem rendelkeznek, viszont általánosságban elmondható, hogy a mátrix anyaga határozza meg a felhasználási területet (annak maximális hőmérsékletét). [2]

1.2 Történelmi áttekintés

A (polimer) nanokompozitok kifejlesztése az 1980-as évek végére tehető. A 'nanokompozit' elnevezést először Rustum Roy és Sridhar Komarneni használta 1984-ben annak hangsúlyozására, hogy a kapott termék két vagy több alkotó fázisának mérete nanométeres tartományba esik. [3, 4]

Ezen anyagok kereskedelmi forgalomba hozatala is erre az időszakra tehető, ugyanis a Toyota Motor Corp. 1990-ben mutatta be az első autós övfedeleit, melyek gyártása során (nylon-6/anyagásvány) nanokompozitokat alkalmaztak. [5] Nemsokkal ezután a nanokompozitok széleskörben elterjedtek számos más területen is úgy, mint az elektronika, az optika, vagy az élelmiszer csomagolóipar, viszont a polimer nanokompozitok kifejlesztése a nagyfeszültségű szigetelőiparban meglehetősen lassú volt a többi iparághoz képest.

2 A nanokompozitok építőelemei

Alapvető fontosságú a tervezési feladatok során a megfelelő alapanyagok kiválasztása. Az alkotók kémiai összetétele és legtöbbször alakja is különbözik, többféle szempont szerint csoportosíthatjuk őket.

Anyagpárok szerint találkozhatunk:

- fém-fém
- fém-kerámia
- kerámia-kerámia
- polimer-üveg
- stb ...

párokkal, így széles skála áll rendelkezésre alapanyagok szempontjából a célfeladat megvalósításához. [2]

Dolgozatomban elsősorban polimer (nano)kompozitokkal foglalkozom.

2.1 A polimer mátrix

Napjainkban valamennyi kompozit közül a polimer mátrixú kompozitok használata a legelterjedtebb. A szigeteléstechikában a polimer nanokompozitokat nevezhetjük a korábban alkalmazott töltőanyaggal kiegészített gyanták (melyek nagy mennyiségű, általában 50 tömeg% feletti mikroméretű szervesetlen töltőanyaggal töltött polimerek) második generációjának. Napjainkban a polimer nanokompozitok már mikrokompozit elődeik potenciális helyettesítéseinek tekinthetőek. [3, 4]

2.1.1 Hőre keményedő és hőre nem keményedő polimer mátrixok

Polimer mátrixokként egyaránt alkalmazhatunk hőre keményedő (thermoset), vagy hőre lágyuló (thermoplast) típusokat. A két fő csoport élesen elválk a feldolgozási technikák és a felhasználás tekintetében. Míg a hőre lágyulók feldolgozása egyszerű "képlékeny átalakítás" (hő formájában

energiát viszünk be a rendszerbe, így alakítható állapotba hozzuk az anyagot), addig a hőre nem lágyuló feldolgozása "reaktív technológia", ahol a feldolgozás során alakul ki visszafordíthatatlan kémiai reakcióban a térháló. [2, 14]

A manapság gyártott polimerek 85–90 %-a hőre lágyuló, viszont a hőre keményedő műanyagok villamos szigeteléstechnika szempontból előnyösebb tulajdonságokkal rendelkeznek; nagyobb a hőstabilitásuk, hőszigetelési képességük, a merevségük, valamint a kúszással szemben mutatott ellenállóképességük. [14, 15]

Az epoxigyanta

A hőre keményedő polimerek egyik leggyakrabban felhasznált formája az epoxigyanta. Az epoxi anyagokat a műanyagipar számos módon használja. A kiváló mechanikai, kémiai tulajdonságai és hőállósága mellett kompozit formájában az elektromos tulajdonságai is javulnak, így dielektrumokként alkalmazhatóak. [3]

2.1.2 A szálerősítés

Ekőfordulhat, hogy a mátrixot erősítő szálakkal bővítik ki. Az erősítő szálak a töltőanyagtól független anyagok, melyek elsősorban a mechanikai tulajdonságok javítására szolgálnak. Az erősítőszálak közül az üveg- és szénszálak a leginkább használatosak. A leggyakrabban használt kombinációk: üvegszál – polimer, szénszál–polimer, KEVLAR®- epoxy és a KEVLAR® - poliészter. Esetenként két vagy többféle erősítőszálat is használhatnak azonos mátrixban, ezek a hibrid kompozitok. [2, 16]

2.2 A töltőanyagok és azok befolyásoló tényezői

A nanoméretű töltőanyagokat inkább illetné meg az adalékanyag elnevezés, viszont általában az előbbi kifejezést használják. A technológiában alkalmazott nano töltőanyagok mérete jellemzően 1 és 100 nm, koncentrációjuk 1 és 10 tömegszázalék közé tehető.

A megvalósítani kívánt cél többnyire a megfelelő hőtágulási együttható, jobb hővezetőképesség, mechanikai megerősítés, a feljavult kopásállóság és a hosszabb élettartam elérése, amiben a nanodielektrikumok lehetőséget nyújtanak a mikrokompozitok alapvetően kitűnő mechanikai és termikus tulajdonságainak

további fokozására a dielektromos jellemzők javulása mellett, melyet mikroméretű töltőanyaggal bővített elődek nem minden esetben tudtak biztosítani. [8]

Bizonyítást nyert, hogy amikor a töltőanyag részecskéinek mérete nanométeres tartományba kerül (<100 nm), az elektromos tulajdonságok (ideértve a villamos szilárdságot, a permittivitást, a disszipációs tényezőt, valamint a tértöltések képződésével, a részleges kisülésekkel illetve a kúszással szemben tanúsított ellenállóképességet [5]) nemcsak, hogy nem degradálódnak, de a hagyományos adalékanyag nélküli, vagy mikroméretű adalékanyaggal bővített polimereknél tapasztaltakkal szemben javulnak. [6]

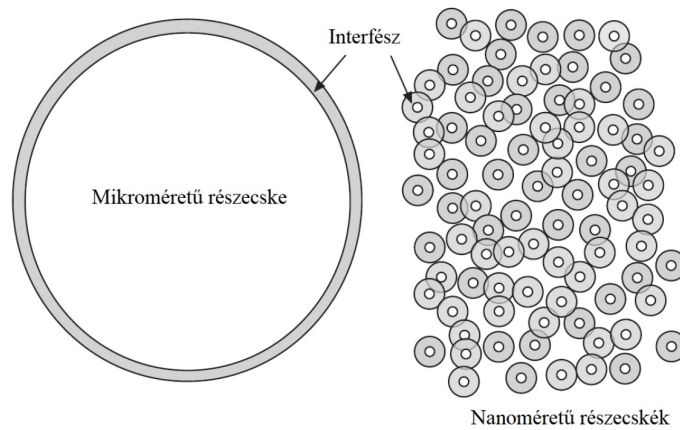
2.2.1 A töltőanyagok alak szerinti osztályozása

Fontos megjegyezni, hogy a nanorészecskék méretén és koncentrációján kívül alakjuk is befolyásolja a létrehozott kompozit tulajdonságait. A komponensek morfológiája szerint megkülönböztethetünk:

- (kvázi-)szferikus (gömb alakú)/szemcsés (particulate composite)
- szálal (fiber reinforced composite)
- lamelláris (lemez alakú) vagy réteges (laminated composite) részecskéket. [2]

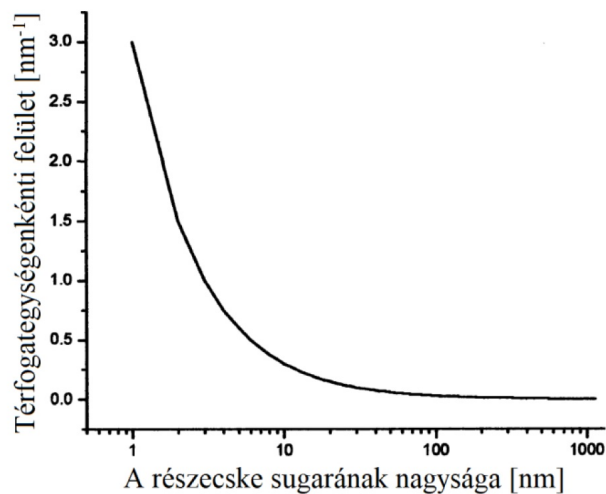
Polimer mátrix és a részecske közötti interfész

A fent leírtak a feltételezések szerint annak köszönhetőek, hogy — még ha csak néhány tömegszázalékban is állnak rendelkezésre — a nanoméretű adalékanyagok sokkal nagyobb kölcsönhatásra alkalmas felületet tudnak biztosítani, mikroméretű társaikhoz képest. Ez alapvetően a felület/térfogat arányt (szálal töltőanyagok esetében például a szál hosszúságának és átmérőjének hányadosát azaz a szál "karcsúságát" - angol terminológiában "aspect ratio") jelenti [2, 7], amit az Ábra 1. szemléletesen bemutat:



Ábra 1: A hagyományos kompozitokban levő mikroméretű részecskéket körülvevő határfelület eltörpül az ugyanolyan térfogatszázalékban jelenlevő nanoméretű részecskék határfelületéhez képest. [6]

Szintén ezen tulajdonságot támasztja alá az Ábra 2.:



Ábra 2: A részecskék sugarának és térfogategységenkénti felületének a viszonya. A sugár csökkenésével a térfogategységenkénti felület nő. [7]

Ismeretes, hogy a nanoméretű részecskék rendkívül nagy fajlagos

felülettel rendelkeznek. Ahogyan a *Ábra 2.* is mutatja, a részecske méretének csökkenése a térfogategységenkénti felület növekedéséhez vezet.

A nagy felület/térfogat hányadosuk miatt a nanoméretű adalékanyagok már nagyon alacsony koncentrációban is jelentős, nagyobb méretű társaikat meghaladó tulajdonságjavító hatást biztosítanak a polimer mátrixok számára.

2.2.2 A töltőanyagok anyag szerinti osztályozása

A mátrixokhoz hasonlóan a töltőanyagok vegyületeinek szempontjából is hatalmas paletta áll rendelkezésre, amely segítségével elérhetjük a kívánt tulajdonságokat. A szigeteléstechnika szempontjából a legjelentősebb nanorészecskéket négy fő csoportra oszthatjuk az alábbiak szerint:

- Fém-oxidok és hidroxidok (alumínium-oxid, titán-oxid, magnézium-oxid, hidrotalcit)
- agyagfélék (montmorillonit, hektorit)
- szén nanocsövek
- fémfémek oxidjai (szilícium-dioxid) [11]

Ezek rövid jellemzésére kitérek a szakdolgozatomban. [12]

A magnézium-oxid

A mérések során magnézium-oxid töltőanyaggal rendelkező nanokompozit minták vizsgálatára adódott lehetőségem. A magnézium-oxid (MgO), köznapi nevén magnézia egy magnézium és egy oxigénatom között létrejövő ionos kötés eredménye. Magas higroszkóposága miatt, hogy szerkezetét és tulajdonságait megőrizze, nedvességtől távol tartandó. [13]

A fém-oxidok közé sorolható, melyek általában villamosan szigetelő hatásúak és a fent említett higroszkópos jellegük miatt könnyen diszpergálhatóak polimerekben, mint például epoxigyantában, gumikban, etilén-vinil-acetát kopolimerekben (EVA).

A magnézium-oxidot általában kis sűrűségű polietilén (LDPE) mátrixhoz szokták adagolni, de hőre lágyuló és hőre keményedő szigetelőanyagokban egyaránt alkalmazzák, többnyire 1-30 tömegszázalékban.

Magas olvadás és forráspontja miatt előszeretettel alkalmazzák elektromos kábelekben szigetelőanyagként, olvasztótégelyek bevonataként, néhány infravörös optikában valamint esetenként elektromos fűtőtestekben is. Szigetelőképességének és hőállóságának köszönhetően nem véletlen, hogy az elmúlt évtizedekben felkeltette a kutatók érdeklődését a nanokompozitok lehetséges töltőanyagainak keresése során. [11]

3 A nanokompozitok tulajdonságai

A kompozit anyagok létrehozása alapvetően azok vázmátrixának mechanikai, kémiai és termikus tulajdonságának fokozását szolgálták. A nanokompozitok elterjedése előtt alapvető problémának számított, hogy a mikroméretű töltőanyagok a kompozit villamos tulajdonságának romlását vonták maguk után az előbb felsorolt tulajdonságok javulása mellett. Viszont a nagy felület/térfogat hányadosuk miatt a nanoméretű adalékanyagok már nagyon alacsony koncentrációban is jelentős, nagyobb méretű társaikat meghaladó erősítő hatást biztosítanak a polimer mátrixok számára minden jellemzőt figyelembe véve.

Ahogy az korábban is említést nyert, a kompozitok tulajdonságait nagymértékben befolyásolja a fázisok összetétele, aránya. A mikrokompozitok esetében a koncentráció jellemzően 50% körüli, míg, a nanokompozitok jellemzője, hogy mikro-méretű társaikkal szemben a folytonos mátrix kis tömeg%-ban tartalmaz adalékanyagot. Nagyobb koncentrációban ugyanis a túl nagy kölcsönhatásra képes felület (melyet a nanoméretű részecskék biztosítanak a nagy felület/térfogat hányadosuk miatt) ellenkező, negatív hatással járhat.

Mindemellett fontos feladatot jelent a részecskék polimer mátrixban való megfelelő diszperziója is. Mivel a legtöbb nanorészecske alapvetően agglomerációra hajlamos, így a részecskék homogén eloszlása nélkül mind a mechanikai, mind a villamos tulajdonságok romolhatnak.

Az arányok egyensúlyának, valamint a megfelelő előállítási módszer megtalálásának eredményeként az egyes tulajdonságok szignifikáns növekedését érhetjük el. [8, 17]

3.1 Szigetelés technika szempontjából fontos villamos tulajdonságok

A szigetelési rendszerek tervezésekor figyelembe vett legfőbb tulajdonságoknak a:

- villamos szilárdság
- permittivitás
- dielektromos veszteség ($\tan\delta$; D)
- illetve a vezetés

tekinthető.

3.1.1 A villamos szilárdság

A szigetelőanyagok azon tulajdonságát, hogy a feszültségből (villamos térerősségből) eredő igénybevételt el képesek viselni, villamos szilárdságnak nevezzük. Mivel a töltések mozgását mind a morfológia változásai, mind a hordozók sűrűsége és mobilitása befolyásolja, várható, hogy ezek a tényezők hatással legyenek az átütési szilárdságra is a nanokompozitok esetében is.

Nanoméretű, réteges szilikáttal adalékolt epoxigyanta kompoziton végzett kísérletek során (Montanari et al., Università di Bologna, Bologna, Italy (2005)) megállapították, hogy a rosszul diszpergált töltőanyag esetén a szigetelőnek a tranziens túlfeszültségekkel szemben tanúsított ellenállóképessége csökken, míg megfelelő diszperzió illetve koncentráció esetén ezzel ellentétes, pozitív hatás tapasztalható.

Emiatt jelent kihívást a gyártási folyamat, ugyanis elengedhetetlen, hogy homogén kompozitokat hozzunk létre a kisülések elkerülése végett.

3.1.2 A permittivitás

Az effektív permittivitás egy a nanokompozitra jellemző tulajdonság, amely függ a töltőanyag és a polimer permittivitásától, valamint a töltőanyag koncentrációjától. A nano-töltőanyagok beépítése az epoxi mátrixba csökkenti a specifikus töltőanyag nanokompozitjainak permittivitását az adalékanyag nélküli epoxigyantához képest, így elősegíti annak szigetelő mivoltát, viszont

a mátrix permittivitása a kompozit létrehozása után is jelentős befolyásoló tényezőnek tekinthető, ugyanis a polimer lánc egyes részei (több dipoláris csoportja) nem lépnek kölcsönhatásba a nanoméretű részecskékkel, így továbbra is függhetnek az alkalmazott villamos tértől.

3.1.3 A dielektromos veszteség

Villamos erőterben polarizáció kialakulásakor a szigetelőanyagban levő villamos töltéssel rendelkező részecskékre erő hat, ennek hatására ezek elmozdulnak. Változó feszültség hatására végzett munka a szigetelőanyagban hővé alakul és az anyagot melegíti, ez az anyagban fellépő polarizációs veszteség. A szigetelőanyagokban a polarizáció kialakulása tehát kettős hatással jár, egyrészt megnöveli a szigetelés töltéstároló képességét, másrészt változó irányú erőterben az állandó át-polarizálódás következtében polarizációs veszteség lép fel, ez a szigetelőanyagot melegíti. A polarizációs veszteségen kívül a szigetelésben fellép a vezetési áram melynek következtében még vezetési veszteség is. A két veszteség összege, a szigetelésben keletkező összes veszteség a dielektromos veszteség.[1]

A polimerekben, így azok kompozitjaiban a veszteségi tényezőt jelentősen befolyásolja a töltéshordozók mobilitása (vezetőképesség) és az alkalmazott frekvencia is.

4 A mérés

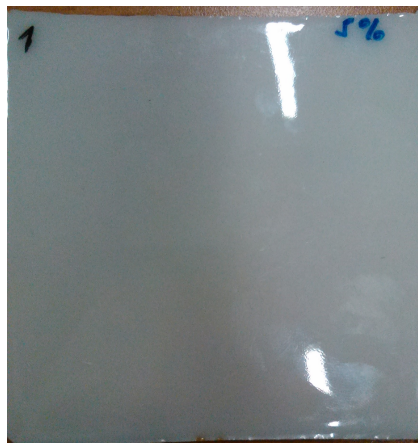
A dolgozatom fő célja különböző nanokompozit minták dielektromos jellemzőinek vizsgálata volt. Ezen nanokompozitok transzformátorok szigetelésének következő generációjának kísérleti darabjai. Valamennyi mintám különböző (0%; 1%; 3%; 5%; 10%; 20%; 30%) tömeg% töltőanyaggal rendelkező PEN szálerezítésű 3750 epoxigyanta volt. A minták jellemzően áttetsző, könnyű, merev, sík lapok (amit természetesen mátrixuknak köszönhetnek). A 3. Ábrán néhány jellegzetesebb vonással rendelkező minta képe látható:



(a) 0% - Tiszta epoxigyanta.



(b) 1% koncentráció.



(c) 5% koncentráció.



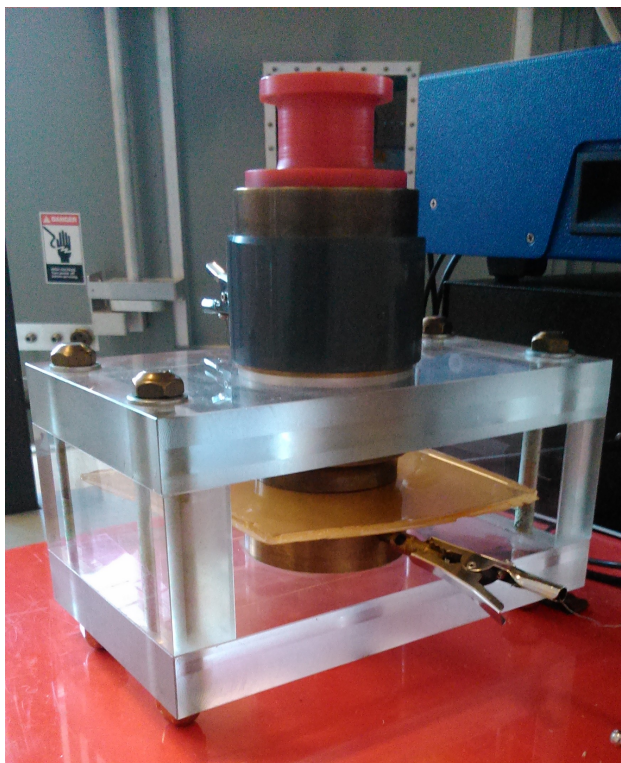
(d) 30% koncentráció.

Ábra 3: Különböző tömeg% koncentrációjú MgO nanokompozit minták.

A képenek jól látható az alapvetően fehér, por halmazállapotú magnézium-oxid eltérő koncentrációjú színező hatása is.

4.1 A mérés menete

A mérés során a korábban ismertetett mintákat egy elektródpár közé helyezve tudtam vizsgálni. A kapott eredményeket egy oszcilloszkóp segítségével értékelhettem ki. A műszert, melyet bemelegedés után kalibráltam, krokodil csipeszek segítségével csatlakoztattam a 4. Ábrán látható elrendezéshez:



Ábra 4: Minták mérésére szolgáló elektródpár

A 4. Ábrán látható elrendezést a környezet külső hatásaitól védendő, attól elhatárolva és leárnyékolva egy erre a célra szolgáló eszközbe (fém dobozba) helyeztem.

A méréseket két sorozatban, a 4. Ábrán látható, illetve egy ahhoz hasonló elektród párral végeztem. A két elektródapár közötti lényeges különbség az eltérő fizikai paramétereikben (eltérő átmérő) valamint abban rejlett, hogy a második egy további árnyékolással rendelkezett a szórt kapacitások kiküszöbölése végett.

A vizsgálatokat egy 20Hz-200kHz közötti skálán végeztem el. A mérések során az oszcilloszkóp segítségével meghatározhattam a minták kapacitását, illetve veszteségi tényezőjét. Ez utóbbiból, valamint a minták, illetve az elektródok fizikai paramétereiből kiszámíthattam a permittivitást minden felvett frekvencia pontra.

Az adott mintára jellemző relatív permittivitást a következő összefüggés segítségével határozhattam meg:

$$\epsilon_r = \frac{C * d}{\epsilon_0 * A} \quad (1)$$

ahol ϵ_r a keresett, anyagra jellemző relatív permittivitás, C a kapacitás, d az elektródák közötti távolság (a dielektrikum vastagsága), ϵ_0 a relatív permittivitás valamint A az elektróda felülete.[10]

Fontos megjegyezni, hogy az anyagok kapacitása függ a környezet hőmérsékletétől. A kísérleteket 21 °C-on végeztem.

4.2 Mérési eredmények kiértékelése

Alapvetően elmondható, hogy a nanorészecskék koncentrációja minden villamos tulajdonságra hatást gyakorol.

4.2.1 Permittivitás

Egy homogén anyag lineáris permittivitását rendszerint a vákuumhoz viszonyított relatív értékben adják meg. Így szigeteléstechika szempontjából a cél a minél kisebb relatív permittivitás elérése a kompozitok létrehozásánál.

A mérési eredmények alapján elmondható, hogy kis koncentráció esetén kisebb relatív dielektromos állandó értékeket érhetünk el. Hozzá kell tenni, hogy a frekvencia növelésével az érték tovább csökkenthető.

Megjegyzést érdemel, hogy a permittivitás jelentősen függ a hőmérséklettől, ugyanakkor kapcsolatuk nem lineáris. [9]

4.2.2 Kapacitás

A minták kapacitásának tekintetében szerteágazó eredményt kaptunk. A frekvencia növelésével nyilvánvalóan csökken a kapacitás is, viszont a töltőanyag koncentrációjával kapcsolatban nem tudunk ilyen egyértelmű következtetést hozni.

Ahogy az a mérési eredményekből kivehető kis töltöttségi szinten nagyobb kapacitás értékeket kaptunk, viszont ha a 30 tömeg%-os minta eredményeit tekintjük, ismét kiemelkedő eredményt láthatunk.

4.2.3 Dielektromos veszteség

Az nanokompozit töltőanyagok felhasználásának egyik célja a veszteségi tényező csökkentése lenne. Ennek ellenére a vizsgálatok során az általam vizsgált frekvenciatartományban a frekvencia növekedésével a veszteségi tényező értéke is nőtt.

Különböző magasabb frekvencián végzett kísérletek azt mutatják, hogy a frekvencia további növelésével (10^6 - 10^9) ez a tényező javítható. [18] Ennek a legvalószínűbb oka az lehet, hogy az általában vékony szigetelőkben a frekvencia növekedésével a töltéshordozók egyre inkább képtelenek lesznek a töltések szállítására.

A töltőanyagok koncentrációját figyelembe véve a 10%-os értéknél tapasztalhatjuk a többi mintához viszonyítva a legjobb értékeket.

Mindezek alapján a nanoméretű töltőanyagok epoxigyantába történő bevezetése nem mutat jelentős változásokat a nanokompozitok tan δ értékében (kis frekvenciatartományban több frekvenciaértéken negatív hatást gyakoroltak a nanokompozitokra a töltőanyagok), de természetesen kis pozitív változtatás elérhető a megfelelő koncentráció illetve frekvencia megtalálásával.

Az eredményeket természetesen számos tényező befolyásolhatja, mint a hőmérséklet ingadozása a mérőhelységben, a minták egyenetlensége, vagy esetleges szennyezettsége. Nyilvánvalóan a legpontosabb eredményeket ugyanolyan fizikai paraméterek esetén kapnánk, de ezt nehéz megvalósítani.

Összességében elmondható, hogy a pozitív tulajdonságváltozások egy bizonyos koncentráció, illetve frekvencia meghaladása után már nem tapasztalhatók, sőt egy határérték átlépésével ellentétes hatásokkal kell számolni.

5 Jövőbeni tervek

A legjobb tulajdonságok megtalálásához nélkülözhetetlen a megfelelő arányok meghatározása. Természetesen a célfeladat "választja" a szükséges paramétereket, de alapvetően nagy előnyt jelent egy-egy fázis megfelelő arányának előzetes ismerete. Emiatt szeretném a rendelkezésre álló minták jellemzőinek összehasonlítását további vizsgálatok segítségével folytatni, mind a mátrixok és töltőanyagok típusát, valamint a töltőanyagok eltérő méretét figyelembe véve.

Emellett, mivel a vizsgálatok eredményét, a kompozitok dielektromos tulajdonságait alapvetően befolyásolja a mérések során a környezet hőmérséklete az elkövetkezendő időszakban szeretnék a különböző eredmények hőmérsékletfüggésének vizsgálatával foglalatoskodni.

Irodalomjegyzék

- [1] Luspay Ödön. *Közép- és nagyfeszültségű hálózati berendezések diagnosztikai vizsgálata*. Magyar Áramszolgáltatók Egyesülete, p. 61, 2000.
- [2] Korszerű anyagok - korszerű technológiák: Kompozitok
<https://www.szfki.hu/konczos/tanfolyam/9.pdf>
- [3] Rumiana Kotsilkova. *Thermoset Nanocomposites for Engineering Applications*. Smithers Rapha Technology Limited, 2007.
- [4] Toshikatsu Tanaka. *Dielectric Nanocomposites with Insulating Properties*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 5, pp.914-928, 2005.
- [5] K. Y. Lau, M. A. M. Piah. *Polymer Nanocomposites in High Voltage Electrical Insulation Perspective. A Review*”, Malaysian Polymer Journal, Vol. 6, No. 1, pp. 58-69, 2011.
- [6] R. C. Smith, J. K. Nelson, L. S. Schadler. *Electrical behavior of particle-filled polymer nanocomposites*. Woodhead Publishing, pp. 70-107, 2010.
- [7] J. Keith Nelson. *Overview of Nanodielectrics: Insulating Materials of the Future*. IEEE Electrical Insulation Symposium, pp. 229-235, 2006.
- [8] J. Keith Nelson. *Dielectric Polymer Nanocomposites*. pp. 163-229, 2010.
- [9] Szigetelőanyagok vizsgálata
http://uni-obuda.hu/users/pap.andrea/BSc_anyaglab/szigeteloanyagok.pdf
- [10] Mechanikai és elektromos rétegtulajdonságok mérése
<https://www.kfki.hu/elftvakuum/pub/wplazma/plaz7.htm>
- [11] J. Keith Nelson. *Dielectric Polymer Nanocomposites*. pp. 1-65, 2010.
- [12] Vuity Gábor. *Epoxigyanta mátrixú nanokompozitok dielektromos jellemzőinek vizsgálata*. pp.16-22, 2017.
- [13] Magnesium oxide fume
<https://web.archive.org/web/20060223005425/http://www.npi.gov.au/database/substance-info/profiles/51.html>

- [14] Czvikovszky Tibor, Nagy Péter, Gaál János - A polimertechnika alapjai
[https : //www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tkt/polimertechnika – alapjai/ch03.html](https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tkt/polimertechnika-alapjai/ch03.html)
- [15] Bauernhuber Andor - Műanyagok I. rész: Polimer anyagismeret
[http : //www.gjt.bme.hu/sites/default/files/10_korsz_a_nyagok_m_uanyagok_1.pdf](http://www.gjt.bme.hu/sites/default/files/10_korsz_a_nyagok_m_uanyagok_1.pdf)
- [16] James Njuguna, Krzysztof Pielichowski, Jeffrey R. Alcock. *Epoxy-Based Fibre Reinforced Nanocomposites*. Advanced Engineering Materials, 9, No. 10, pp. 835-847, 2007.
- [17] Yaping Zheng, Ying Zheng, Rongchang Ning. *Effects of nanoparticles SiO₂ on the performance of nanocomposites*. Materials Letters 57, pp. 2940–2944, 2003.
- [18] Santanu Singha, M. Joy Thomas. *Permittivity and Tan Delta Characteristics of Epoxy Nanocomposites in the Frequency Range of 1 MHz–1 GHz*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15, No. 1, pp. 2-11, 2008.

Függelék A Mérési eredmények táblázatba foglalva

0% töltőanyag koncentráció árnyékolás nélkül:

F [Hz]	U [V]	C [pF]	D	ϵ_r
20	9	55.15	3.7200E-3	2.3772
50	10	49.96	5.7800E-3	2.1534
100	10	49.88	7.6E-3	2.1500
200	10	49.7150	7.3600E-3	2.1429
500	10	49.488	8.1600E-3	2.1331
1000	10	49.3160	8.8999E-3	2.1257
2000	10	49.134	9.8399E-3	2.1178
5000	10	48.8650	1.172E-2	2.1062
10000	10	48.6	1.4120E-2	2.0948
20000	10	48.2770	1.6820E-2	2.0809
50000	10	47.75	2.0049E-2	2.0582
100000	10	47.2950	2.23E-2	2.0386
200000	9.89	46.8149	2.5999E-2	2.0179

0% töltőanyag koncentráció árnyékolással:

F [Hz]	U [V]	C [pF]	D	ϵ_r
500	10	26.0420	8.94E-3	2.8122
1000	10	25.9490	9.58E-3	2.8022
2000	10	25.8485	1.0580E-2	2.7913
5000	10	25.6990	1.248E-2	2.7752
10000	10	25.5545	1.4959E-2	2.7596
20000	9.7899	25.3775	1.7780E-2	2.7405
50000	10	25.08899	2.1250E-2	2.7093
100000	10	24.8359	2.3800E-2	2.6820
200000	9.9	24.56	2.8199E-2	2.6522

1% töltőanyag koncentráció árnyékolás nélkül:

F [Hz]	U [V]	C [pF]	D	ϵ_r
20	9	43.65	4.8799E-3	2.0416
50	10	43.54	6.1799E-3	2.0364
100	9.8800	43.38	7.4400E-3	2.0290
200	10	43.2349	7.7200E-3	2.0222
500	10	43.0420	8.4600E-3	2.0132
1000	10	42.866	9.1199E-3	2.0049
2000	10	42.7034	1.022E-2	1.9973
5000	10	42.4570	1.214E-2	1.9858
10000	10	42.2165	1.482E-2	1.9745
20000	9.7899	41.9275	1.7739E-2	1.9610
50000	10	41.4510	2.1149E-2	1.9387
100000	10	41.03	2.35E-2	1.9190
200000	9.89	40.5850	2.7199E-2	1.8982

1% töltőanyag koncentráció árnyékolással:

F [Hz]	U [V]	C [pF]	D	ϵ_r
500	10	21.1119	8.2799E-3	2.4739
1000	10	21.0330	9.0399E-3	2.4646
2000	10	20.9529	1.014E-2	2.4552
5000	10	20.8336	1.2160E-2	2.4412
10000	10	20.7174	1.468E-2	2.4276
20000	9.7899	20.5725	1.754E-2	2.4106
50000	10	20.3385	2.1100E-2	2.3832
100000	10	20.1329	2.3599E-2	2.3591
200000	9.9	19.9050	2.8400E-2	2.3324

3% töltőanyag koncentráció árnyékolás nélkül:

F [Hz]	U [V]	C [pF]	D	ϵ_r
20	9	47.15	3.63E-3	2.2918
50	10	47.08	3.9199E-3	2.2884
100	9.8800	46.95	6.6600E-3	2.2821
200	10	46.8250	6.4599E-3	2.2760
500	10	46.6420	7.28E-3	2.2671
1000	10	46.503	8.0800E-3	2.2603
2000	10	46.3425	9.1199E-3	2.2525
5000	10	46.1030	1.102E-2	2.2409
10000	10	45.869	1.346E-2	2.2295
20000	9.7899	45.5745	1.6080E-2	2.2152
50000	10	45.0930	1.915E-2	2.1918
100000	10	44.698	2.1299E-2	2.1726
200000	9.89	44.25	2.46E-2	2.1508

3% töltőanyag koncentráció árnyékolással:

F [Hz]	U [V]	C [pF]	D	ϵ_r
500	10	24.53	8.2000E-3	2.9871
1000	10	24.442	8.8400E-3	2.9764
2000	10	24.3505	1.0059E-2	2.9652
5000	10	24.2115	1.218E-2	2.9483
10000	10	24.0755	1.4760E-2	2.9318
20000	9.7899	23.0905	1.7659E-2	2.8118
50000	10	23.631	2.1149E-2	2.8776
100000	10	23.39	2.35E-2	2.8483
200000	9.9	23.13	2.7799E-2	2.8166

5% töltőanyag koncentráció árnyékolás nélkül:

F [Hz]	U [V]	C [pF]	D	ϵ_r
20	9	34.65	2.7200E-3	2.4786
50	10	34.58	4.2599E-3	2.4736
100	9.8699	34.4799	6.5599E-3	2.4665
200	10	34.3350	6.3800E-3	2.4561
500	10	34.2340	7.1199E-3	2.4489
1000	10	34.1259	7.7999E-3	2.4412
2000	10	34.0144	8.6599E-3	2.4332
5000	10	33.8470	1.042E-2	2.4212
10000	10	33.6835	1.264E-2	2.4095
20000	9.7799	33.2984	1.498E-2	2.3820
50000	10	32.9759	1.7899E-2	2.3589
100000	10	32.9380	2.01E-2	2.3562
200000	9.89	32.54	2.3199E-2	2.3277

5% töltőanyag koncentráció árnyékolással:

F [Hz]	U [V]	C [pF]	D	ϵ_r
500	10	19.1939	8.5800E-3	3.4398
1000	10	19.1170	9.3200E-3	3.4260
2000	10	19.0435	1.044E-2	3.4129
5000	10	18.9312	1.2659E-2	3.3927
10000	10	18.8207	1.5259E-2	3.3730
20000	9.7899	18.6845	1.8159E-2	3.3485
50000	10	18.4639	2.18E-2	3.3090
100000	10	18.2710	2.4199E-2	3.2744
200000	9.9	18.0599	2.8799E-2	3.2366

10% töltőanyag koncentráció árnyékolás nélkül:

F [Hz]	U [V]	C [pF]	D	ϵ_r
20	9	32.85	3.46E-3	2.1992
50	10	32.7999	4.5999E-3	2.1959
100	9.8699	32.64	6.7600E-3	2.1852
200	10	32.555	5.9800E-3	2.1795
500	10	32.4579	6.28E-3	2.1730
1000	10	32.3609	6.8199E-3	2.1665
2000	10	32.2745	7.4599E-3	2.1607
5000	10	32.1445	8.7200E-3	2.1520
10000	10	32.0195	1.052E-2	2.1436
20000	9.7799	31.8655	1.248E-2	2.1333
50000	10	31.613	1.485E-2	2.1164
100000	10	31.3919	1.66E-2	2.1016
200000	9.89	31.1550	1.9800E-2	2.0858

10% töltőanyag koncentráció árnyékolással:

F [Hz]	U [V]	C [pF]	D	ϵ_r
500	10	17.7659	7.7200E-3	2.9798
1000	10	17.7079	8.1200E-3	2.9701
2000	10	17.6495	8.8999E-3	2.9603
5000	10	17.5638	1.0500E-2	2.9459
10000	10	17.4807	0.1255	2.9320
20000	9.7899	17.3775	1.486E-2	2.9147
50000	10	17.2135	1.7749E-2	2.8872
100000	10	17.0680	1.9800E-2	2.8627
200000	9.9	16.9050	2.4400E-2	2.8354

20% töltőanyag koncentráció árnyékolás nélkül:

F [Hz]	U [V]	C [pF]	D	ϵ_r
20	9	38.4500	4.3E-3	2.3273
50	10	38.36	4.8999E-3	2.3219
100	9.8699	38.28	7.92E-3	2.3170
200	10	38.1749	7.1399E-3	2.3107
500	10	38.0279	7.62E-3	2.3018
1000	10	37.9059	8.1200E-3	2.2944
2000	10	37.7815	8.7799E-3	2.2869
5000	10	37.6004	1.026E-2	2.2759
10000	10	37.4245	1.2279E-2	2.2652
20000	9.7899	37.2105	1.456E-2	2.2523
50000	10	36.8620	1.7250E-2	2.2312
100000	10	36.564	1.9300E-2	2.2132
200000	9.89	36.2449	2.2599E-2	2.1938

20% töltőanyag koncentráció árnyékolással:

F [Hz]	U [V]	C [pF]	D	ϵ_r
20	9	21.75	4.9399E-3	3.2982
50	10	21.62	7.3600E-3	3.2785
100	9.8800	21.51	8.4600E-3	3.2618
200	10	21.465	9.1800E-3	3.2550
500	10	21.3560	9.3600E-3	3.2385
1000	10	21.2710	9.7800E-3	3.2256
2000	10	21.1845	1.064E-2	3.2125
5000	10	21.0592	1.2460E-2	3.1935
10000	10	20.9285	1.482E-2	3.1737
20000	10	20.7905	1.7559E-2	3.1527
50000	10	20.5554	2.085E-2	3.1171
100000	10	20.3500	2.3199E-2	3.0859
200000	9.9	20.125	2.7799E-2	3.0518

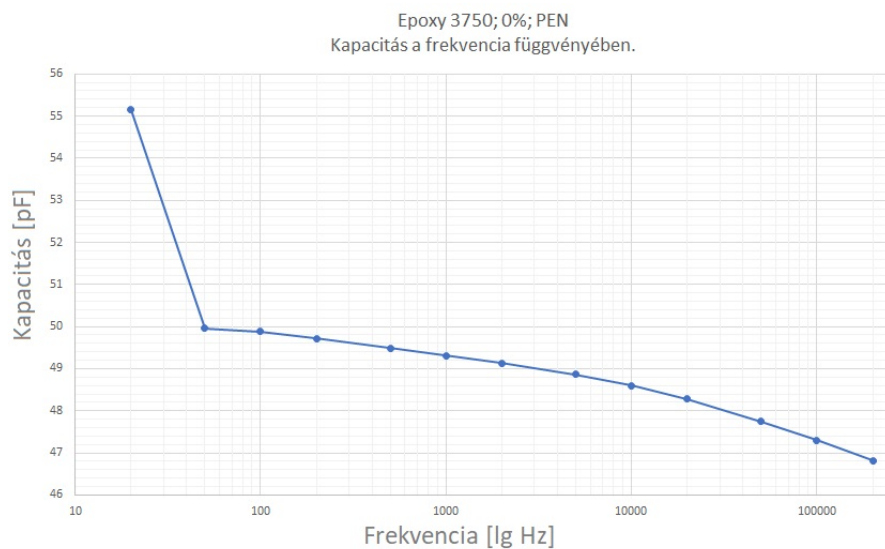
30% töltőanyag koncentráció árnyékolás nélkül:

F [Hz]	U [V]	C [pF]	D	ϵ_r
20	9	46.95	9.2399E-3	2.7988
50	10	46.46	9.6200E-3	2.7695
100	9.8699	46.35	1.136E-2	2.7630
200	10	45.8250	1.065E-2	2.7317
500	10	45.58200	1.034E-2	2.7172
1000	10	45.4050	1.052E-2	2.7067
2000	10	45.2455	1.09E-2	2.6971
5000	10	44.9975	1.21E-2	2.6824
10000	10	44.7819	1.4019E-2	2.6695
20000	10	44.4930	1.626E-2	2.6523
50000	10	44.061	1.915E-2	2.6265
100000	10	43.6679	2.1299E-2	2.6031
200000	9.9	43.26	2.4799E-2	2.5788

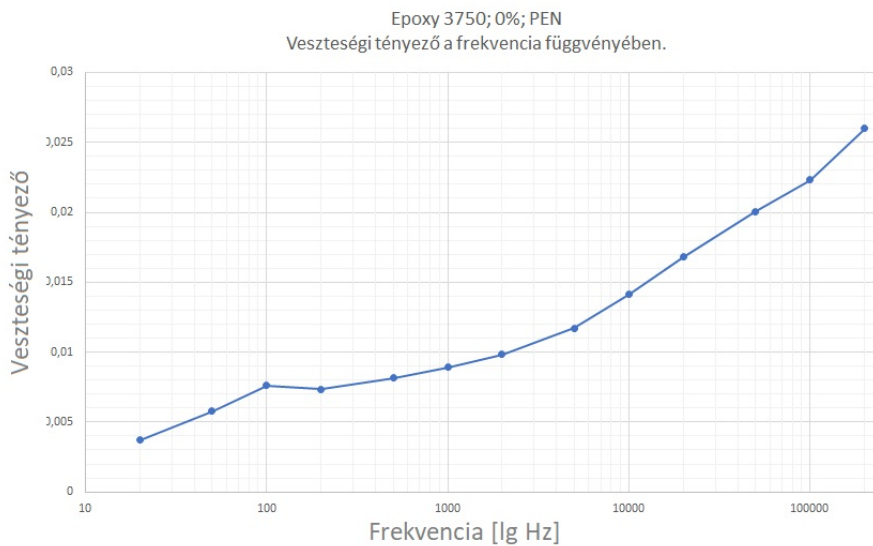
30% töltőanyag koncentráció árnyékolással:

F [Hz]	U [V]	C [pF]	D	ϵ_r
20	9	24.75	1.0500E-2	3.6963
50	10	23.92	-3.6499E-2	3.5723
100	9.8800	24.45	1.214E-2	3.6515
200	10	24.33500	1.2359E-2	3.6343
500	10	24.1640	1.184E-2	3.6088
1000	10	24.0479	1.1780E-2	3.5915
2000	10	23.9364	1.2239E-2	3.5748
5000	10	23.7749	1.3520E-2	3.5507
10000	10	23.779	1.3559E-2	3.5513
20000	10	23.6389	1.823E-2	3.5304
50000	10	23.23	2.1350E-2	3.4693
100000	10	23.0019	2.3800E-2	3.4352
200000	9.9	22.7450	2.8199E-2	3.3969

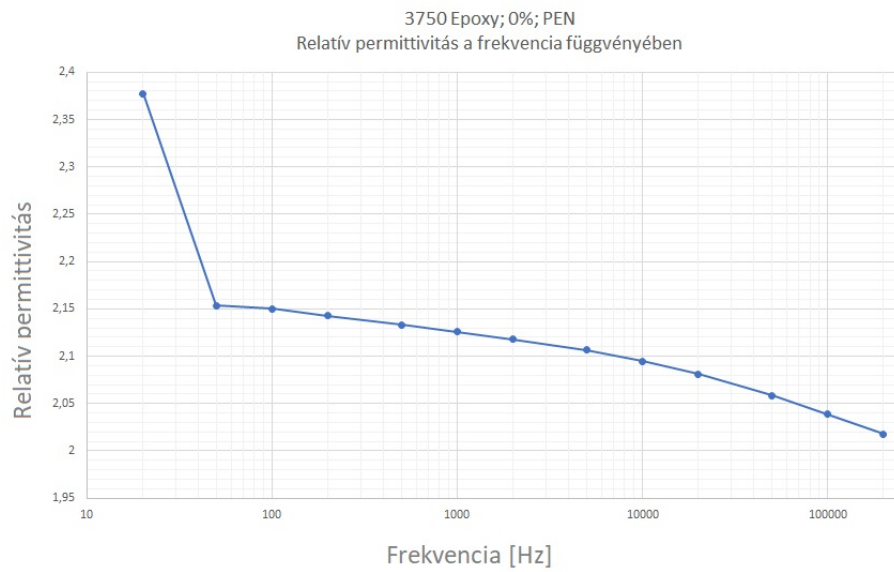
Függelék B Mérési eredmények grafikonon ábrázolva



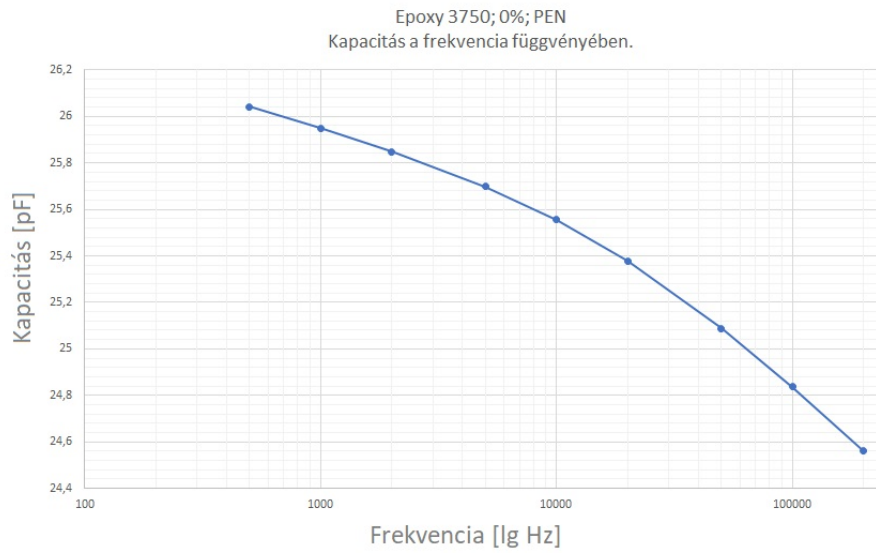
Ábra 5: Kapacitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (0% koncentráció, árnyékolás nélkül)



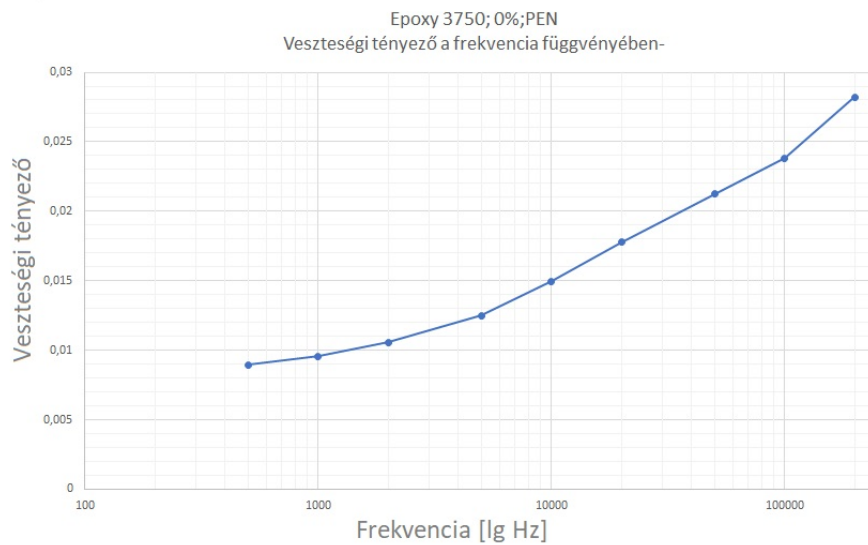
Ábra 6: Veszteségi tényező a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (0% koncentráció; árnyékolás nélkül)



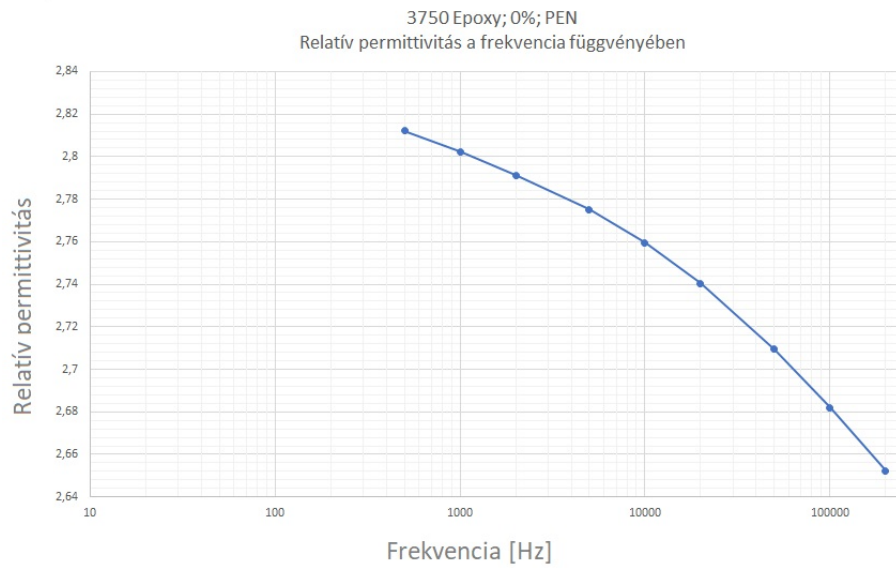
Ábra 7: Relatív permittivitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (0% koncentráció; árnyékolás nélkül)



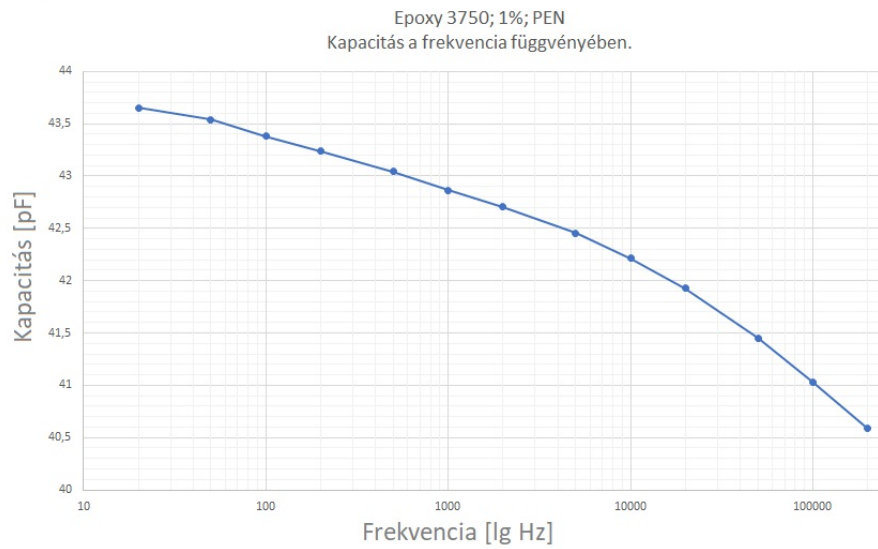
Ábra 8: Kapacitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (0% koncentráció, árnyékolással)



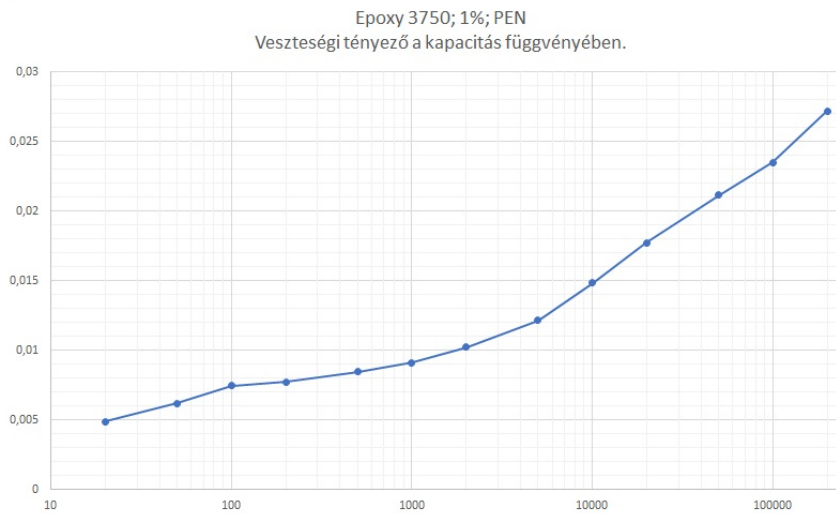
Ábra 9: Veszteségi tényező a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (0% koncentráció; árnyékolással)



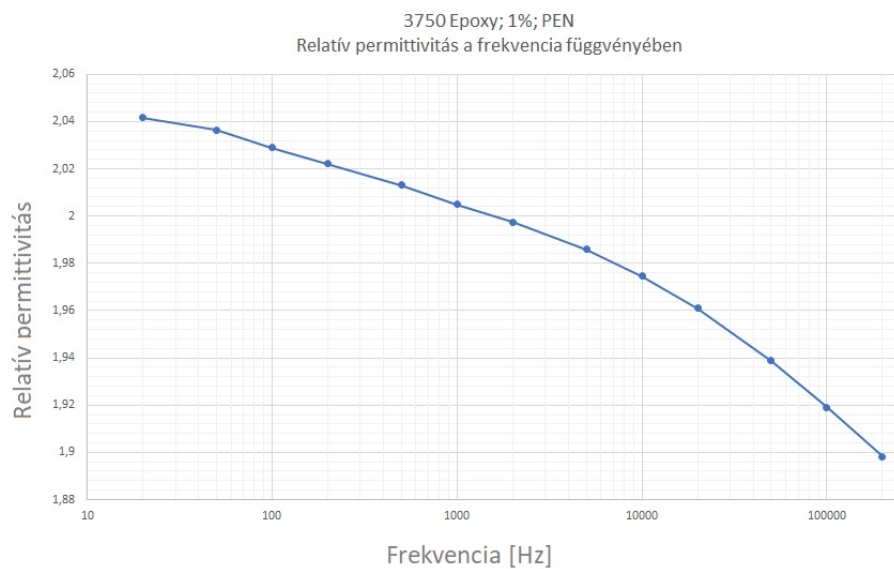
Ábra 10: Relatív permittivitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (0% koncentráció; árnyékolással)



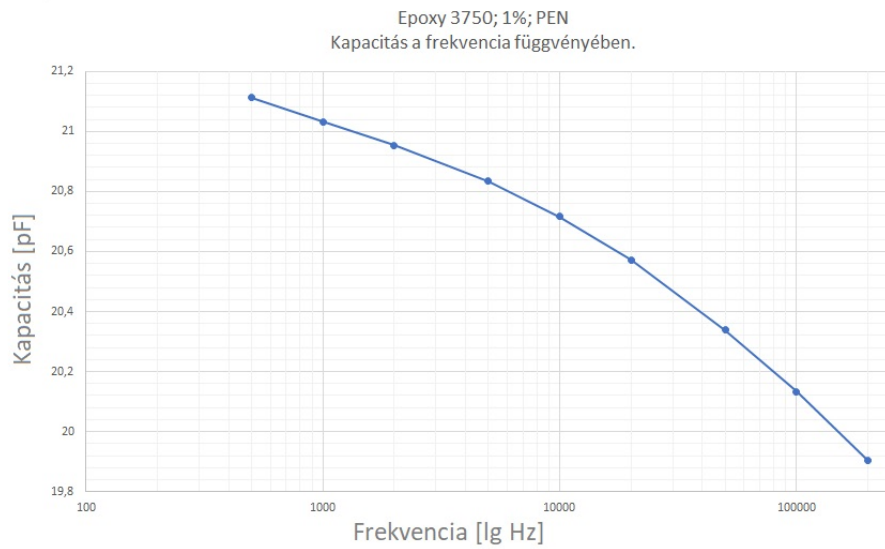
Ábra 11: Kapacitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (1% koncentráció, árnyékolás nélkül)



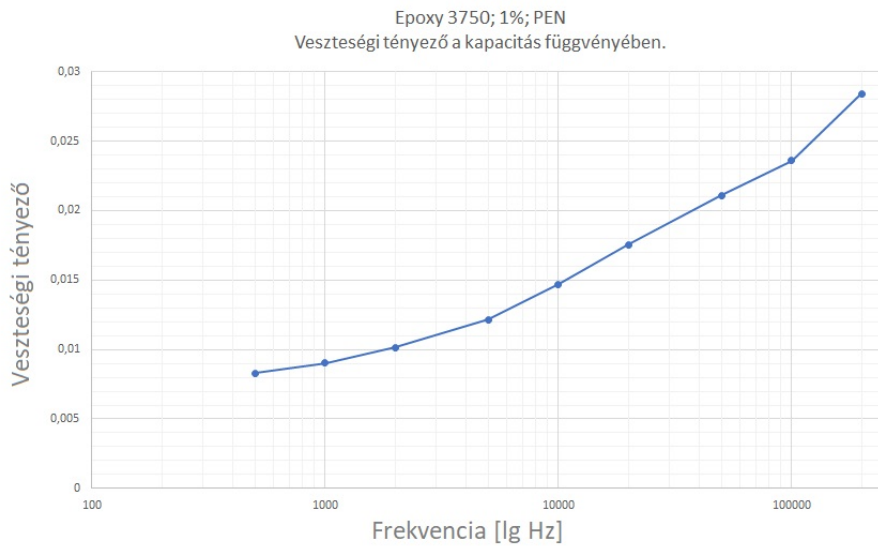
Ábra 12: Veszteségi tényező a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (1% koncentráció; árnyékolás nélkül)



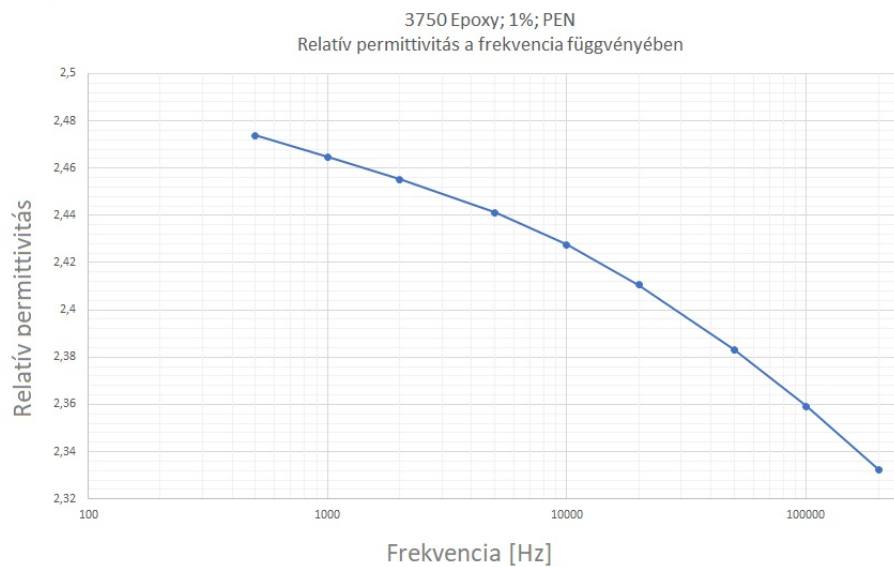
Ábra 13: Relatív permittivitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (1% koncentráció; árnyékolás nélkül)



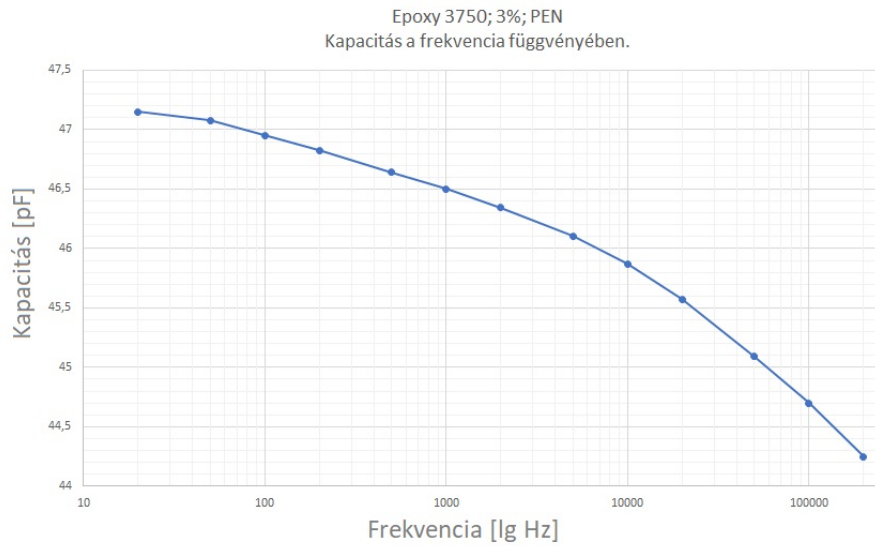
Ábra 14: Kapacitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (1% koncentráció, árnyékolással)



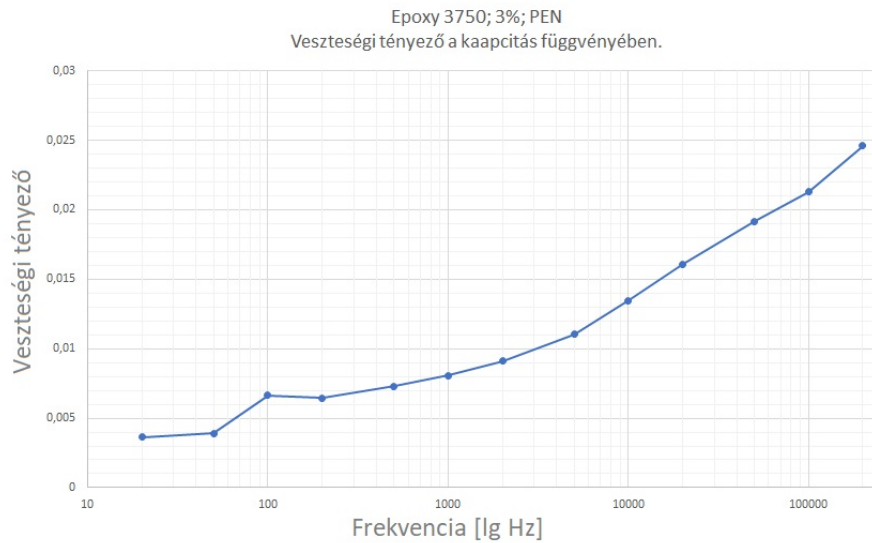
Ábra 15: Veszteségi tényező a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (1% koncentráció; árnyékolással)



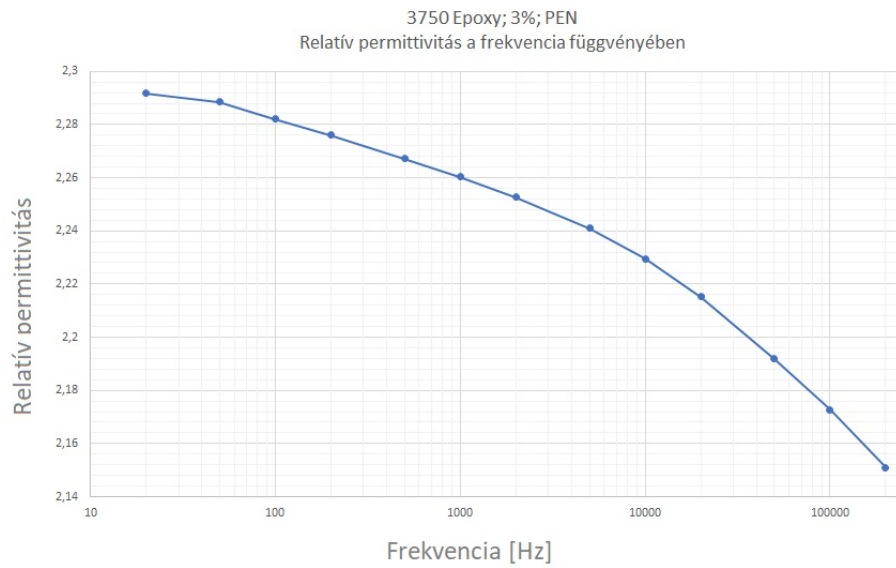
Ábra 16: Relatív permittivitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (1% koncentráció; árnyékolással)



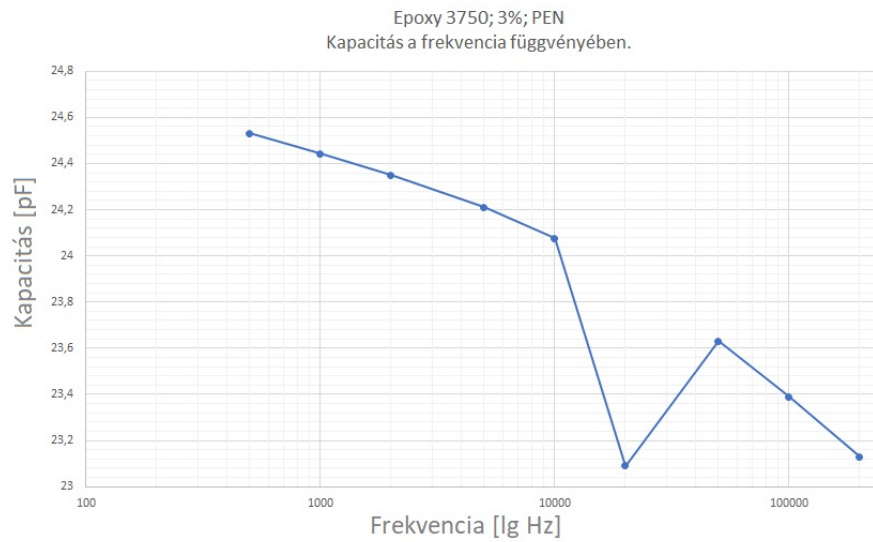
Ábra 17: Kapacitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (3% koncentráció, árnyékolás nélkül)



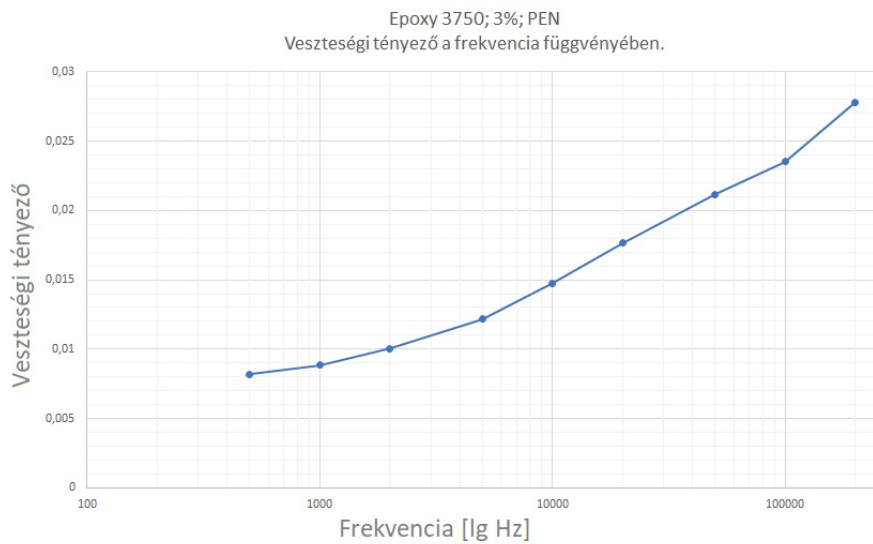
Ábra 18: Veszteségi tényező a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (3% koncentráció; árnyékolás nélkül)



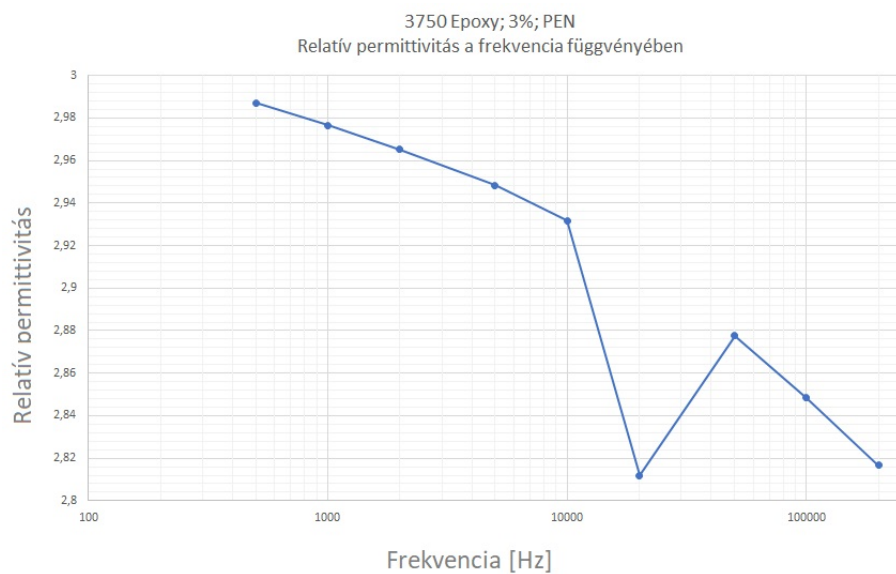
Ábra 19: Relatív permittivitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (3% koncentráció; árnyékolás nélkül)



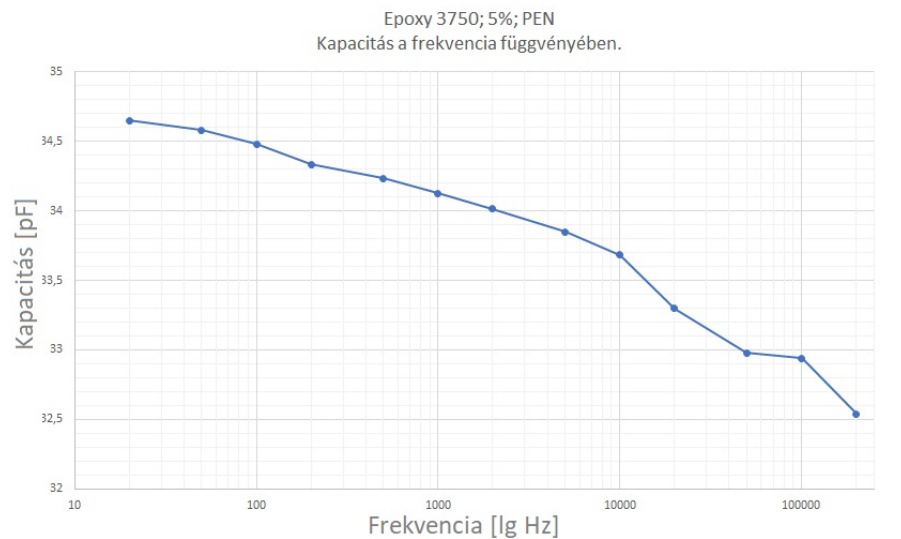
Ábra 20: Kapacitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (3% koncentráció, árnyékolással)



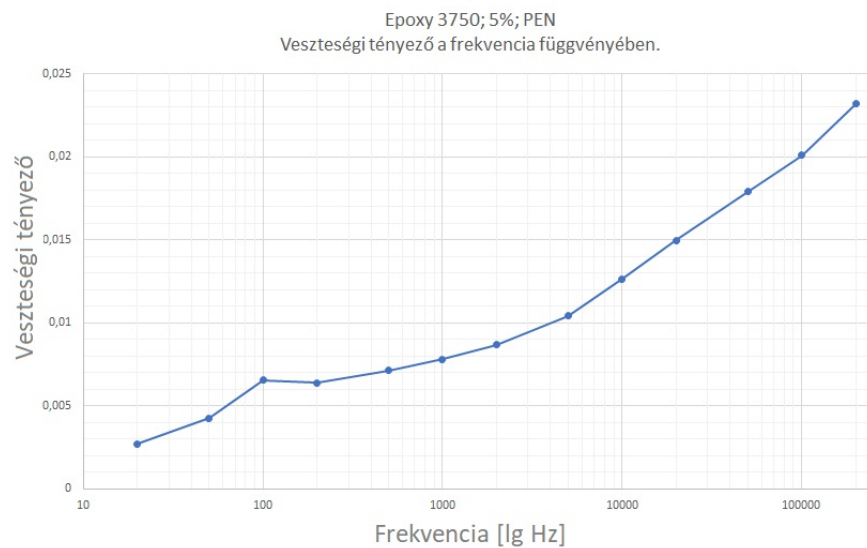
Ábra 21: Veszteségi tényező a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (3% koncentráció; árnyékolással)



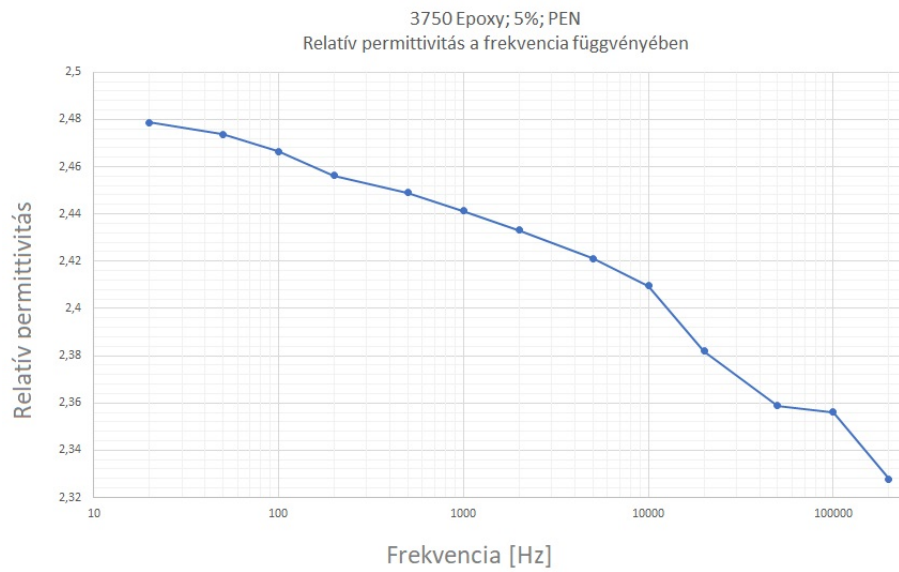
Ábra 22: Relatív permittivitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (3% koncentráció; árnyékolással)



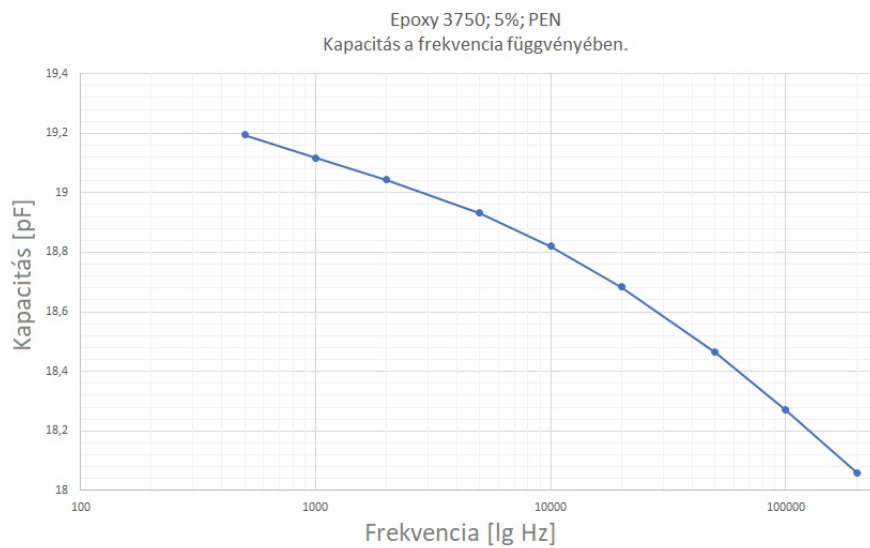
Ábra 23: Kapacitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (5% koncentráció, árnyékolás nélkül)



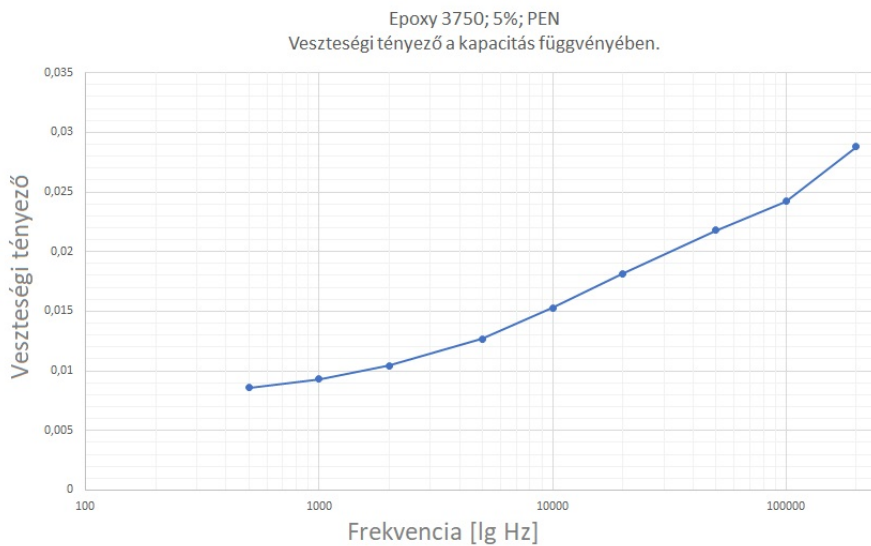
Ábra 24: Veszteségi tényező a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (5% koncentráció; árnyékolás nélkül)



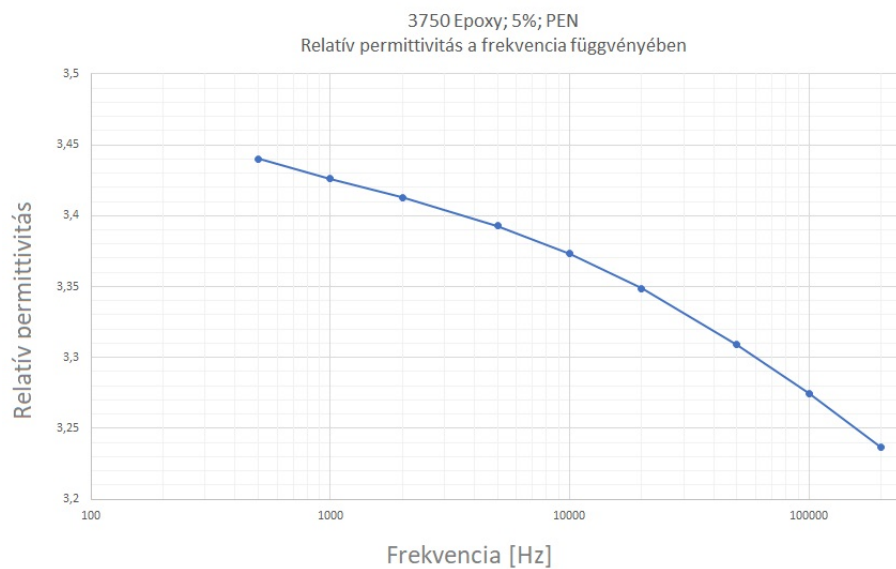
Ábra 25: Relatív permittivitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (5% koncentráció; árnyékolás nélkül)



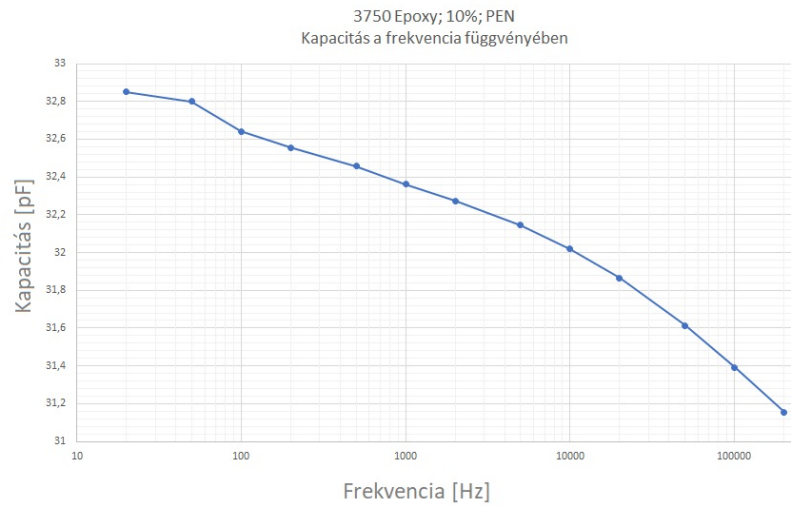
Ábra 26: Kapacitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (5% koncentráció, árnyékolással)



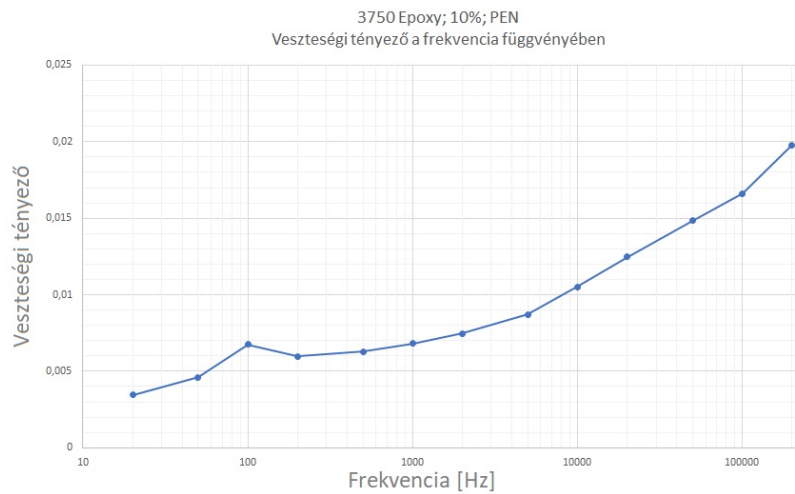
Ábra 27: Veszteségi tényező a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (5% koncentráció; árnyékolással)



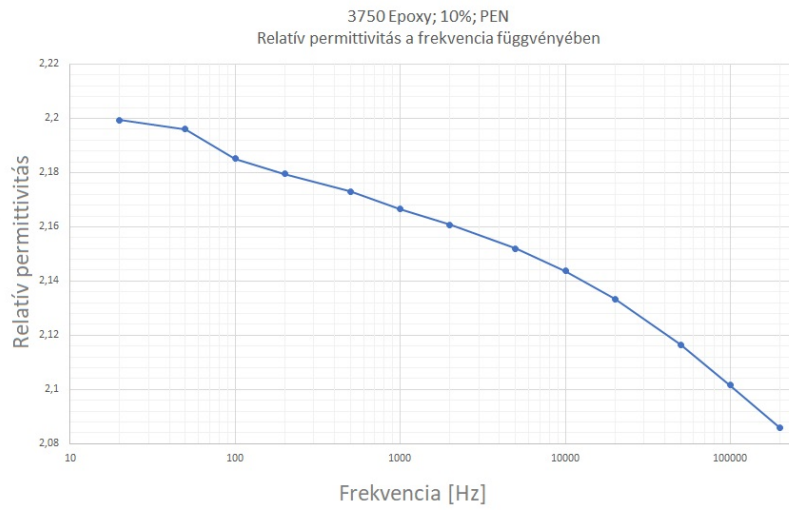
Ábra 28: Relatív permittivitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (5% koncentráció; árnyékolással)



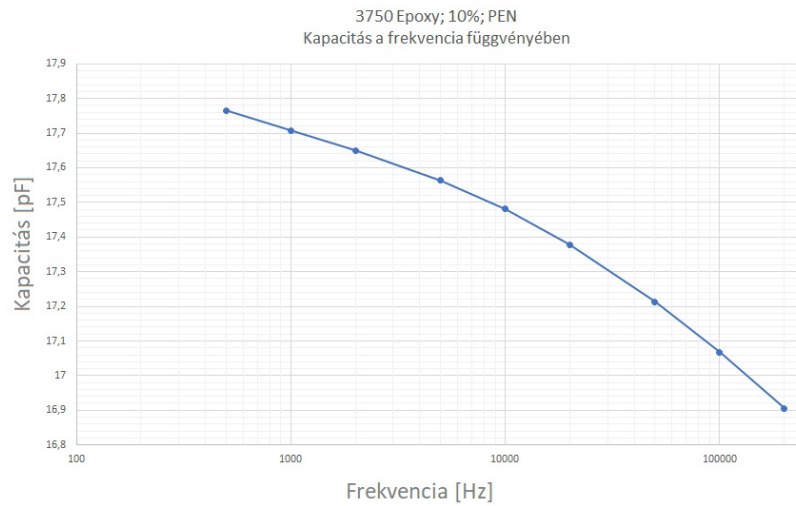
Ábra 29: Kapacitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (10% koncentráció, árnyékolás nélkül)



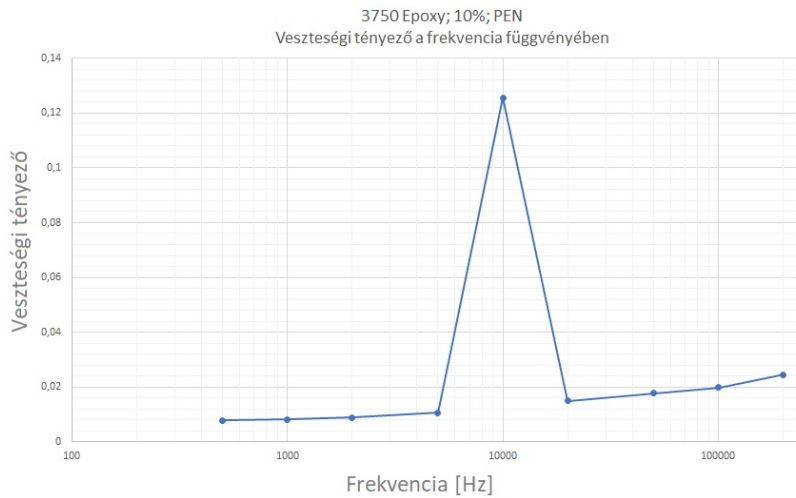
Ábra 30: Veszteségi tényező a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (10% koncentráció; árnyékolás nélkül)



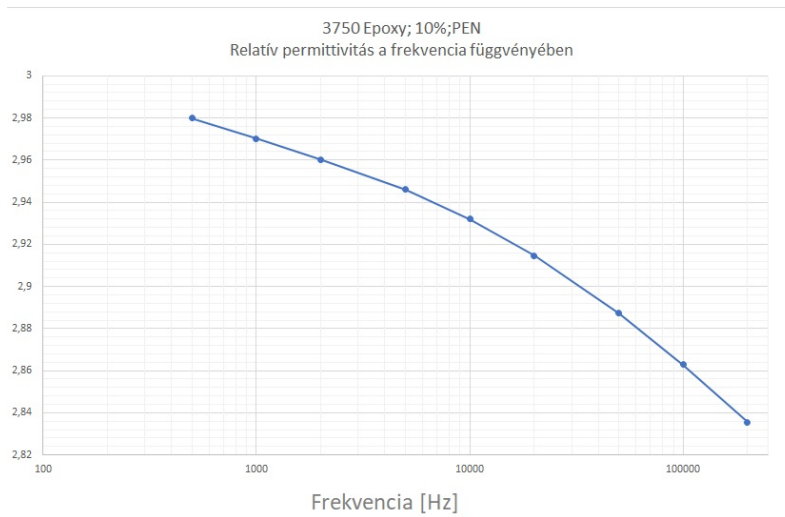
Ábra 31: Relatív permittivitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (10% koncentráció; árnyékolás nélkül)



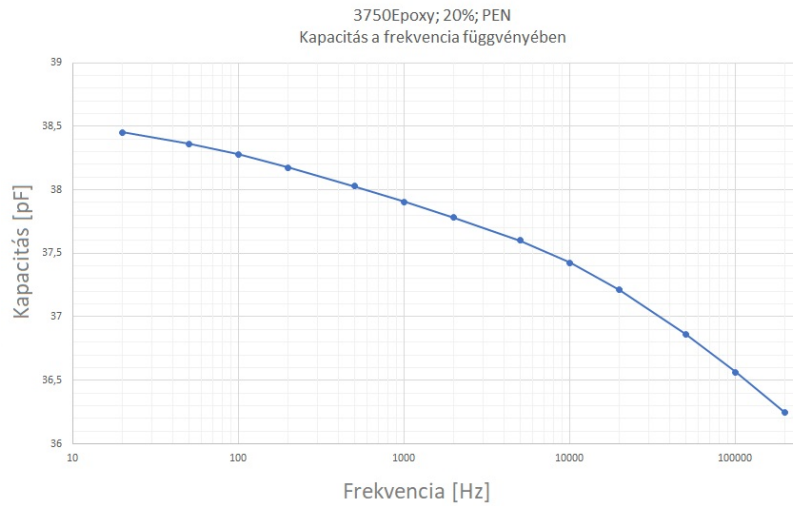
Ábra 32: Kapacitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (10% koncentráció, árnyékolással)



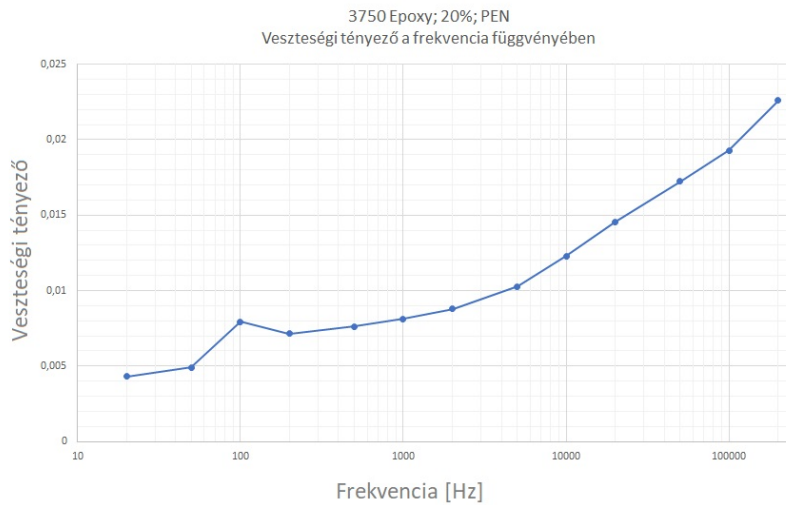
Ábra 33: Veszteségi tényező a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (10% koncentráció; árnyékolással)



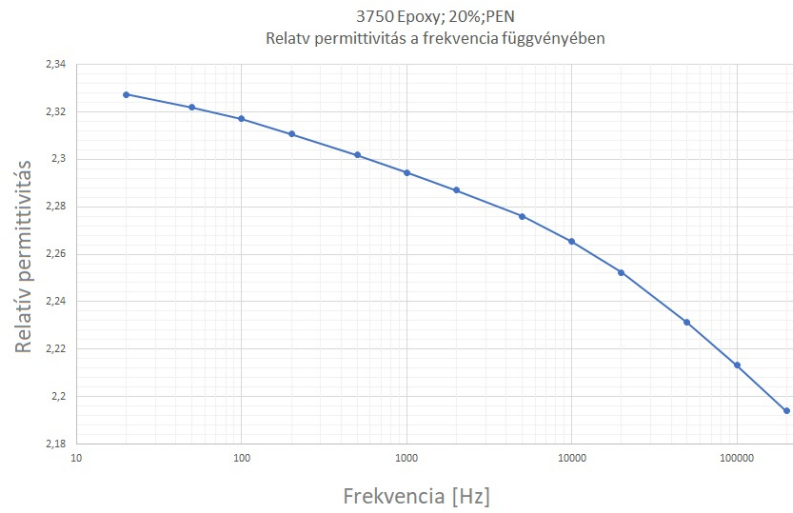
Ábra 34: Relatív permittivitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (10% koncentráció; árnyékolással)



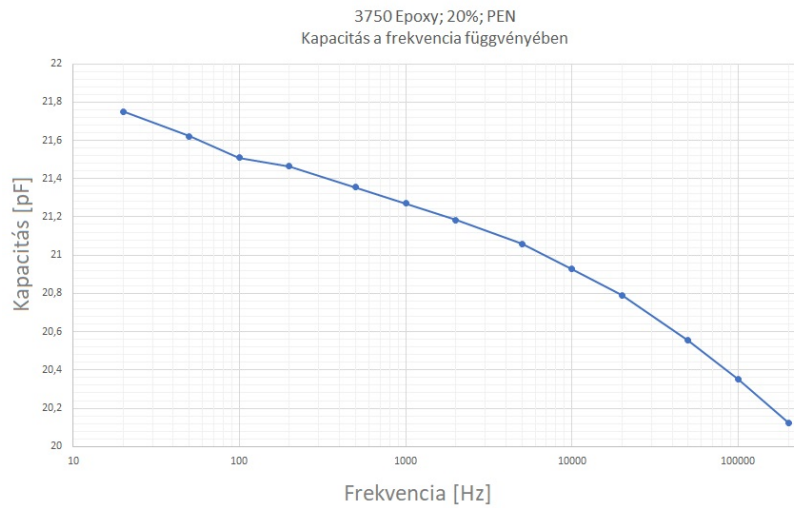
Ábra 35: Kapacitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (20% koncentráció, árnyékolás nélkül)



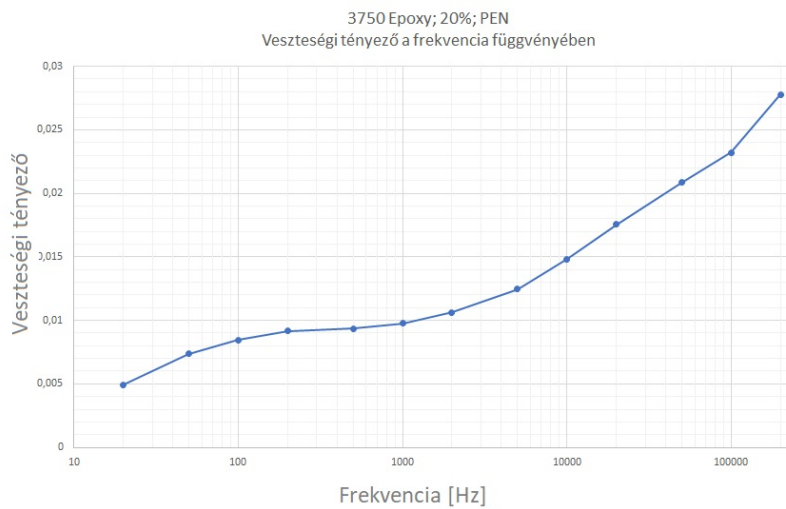
Ábra 36: Veszteségi tényező a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (20% koncentráció; árnyékolás nélkül)



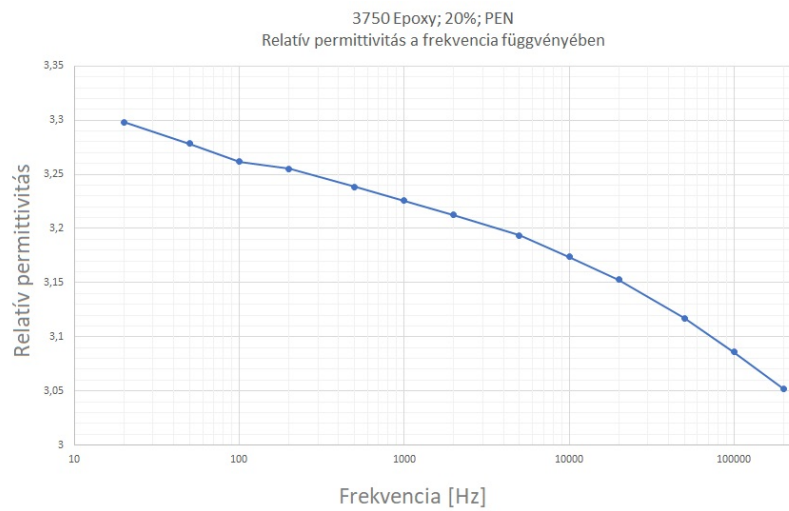
Ábra 37: Relatív permittivitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (20% koncentráció; árnyékolás nélkül)



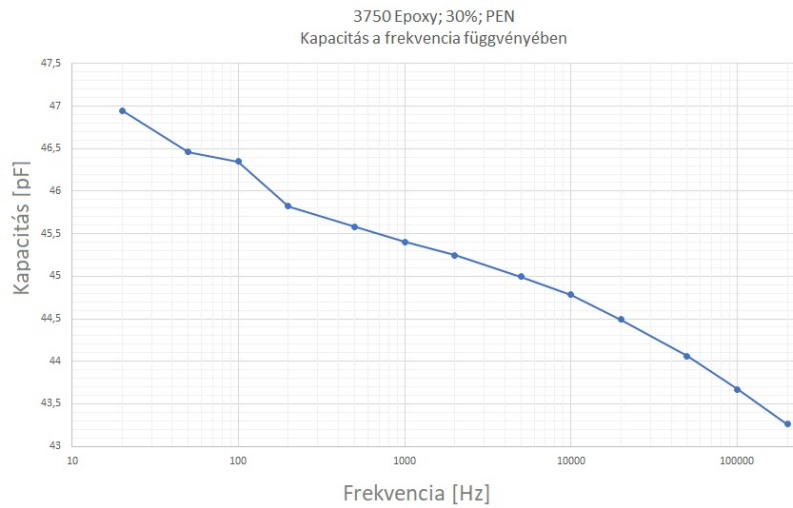
Ábra 38: Kapacitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (20% koncentráció, árnyékolással)



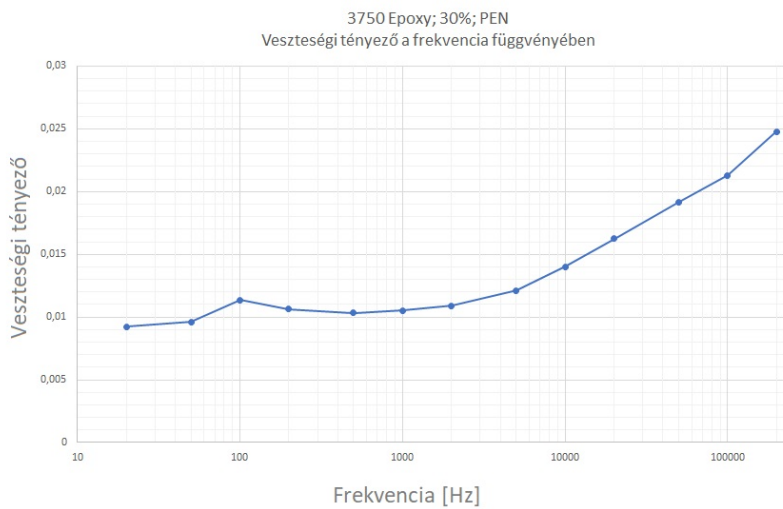
Ábra 39: Veszteségi tényező a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (20% koncentráció; árnyékolással)



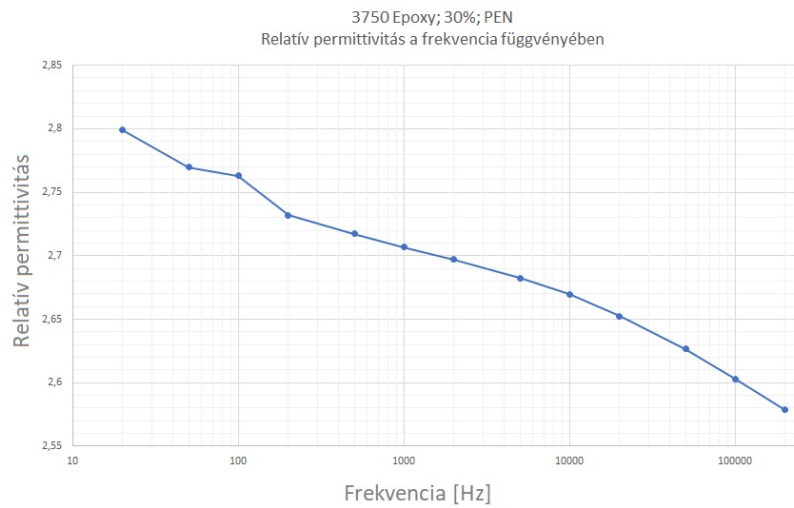
Ábra 40: Relatív permittivitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (20% koncentráció; árnyékolással)



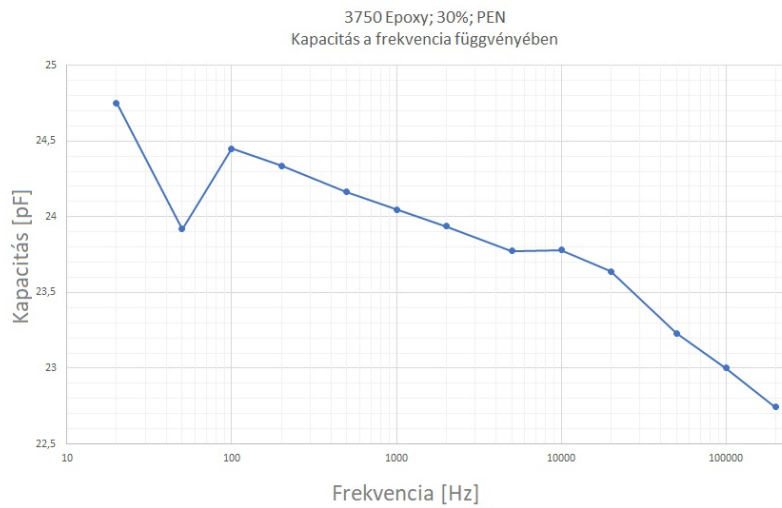
Ábra 41: Kapacitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (30% koncentráció, árnyékolás nélkül)



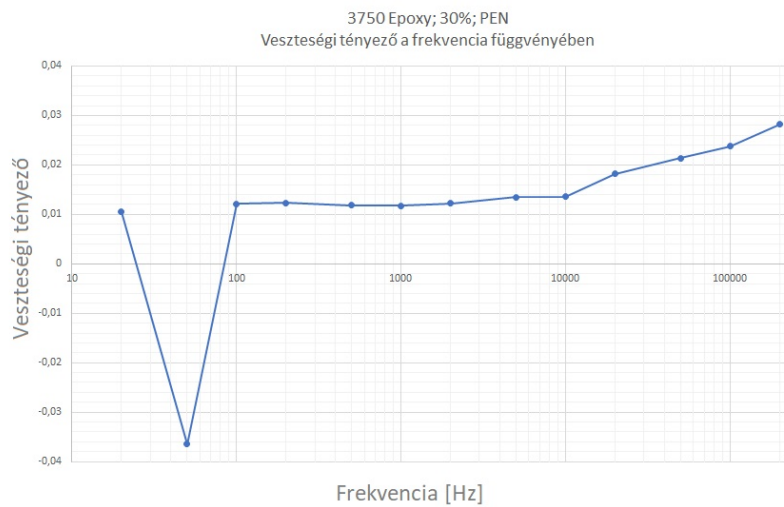
Ábra 42: Veszteségi tényező a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (30% koncentráció; árnyékolás nélkül)



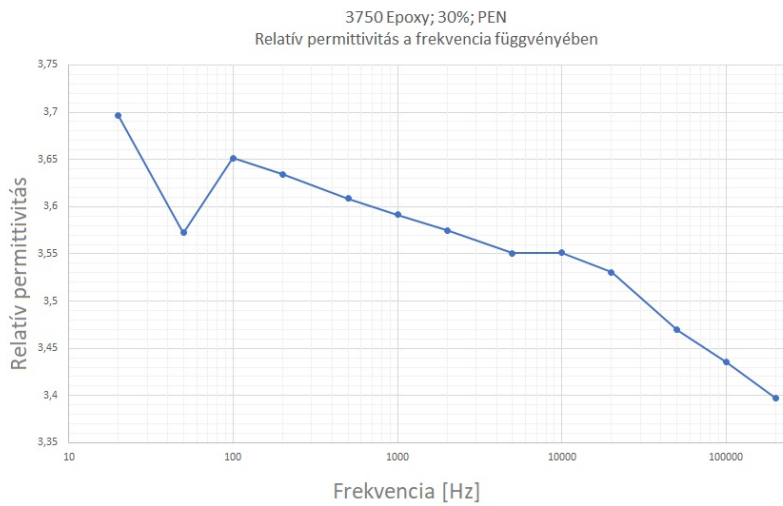
Ábra 43: Relatív permittivitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (30% koncentráció; árnyékolás nélkül)



Ábra 44: Kapacitás a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (30% koncentráció, árnyékolással)



Ábra 45: Veszteségi tényező a (logaritmikus skálán) frekvencia függvényében. (30% koncentráció; árnyékolással)



Ábra 46: Relatív permittivitás a (logaritmus skálán) frekvencia függvényében. (30% koncentráció; árnyékolással)