



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

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

Lőrinczi Gergő

**NEM SZOKVÁNYOS
SZENNYEZŐDÉSEK
LERAKÓDÁSÁNAK ÉS AZOK
HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA
KOMPOZIT SZIGETELŐKÖN**

KONZULENS

Balogh Dániel,
Dr. Cselkó Richárd

BUDAPEST, 2024

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	4
Abstract.....	5
1 A villamosenergia hálózaton alkalmazott szigetelők	6
1.1 A szigetelők meghibásodásai	6
1.2 Szigetelők felépítése	7
1.2.1 Kísérlet a felület kialakításának hatásának vizsgálatára	10
2 A szigetelők szennyeződése	12
2.1 A szennyezőanyagok hatása a szigetelőkre	12
2.2 A szennyeződések megfigyelésének fontossága.....	12
2.3 Szennyezettség meghatározása	13
2.3.1 Vízben oldható és nem oldható szennyeződések	13
2.3.2 A különböző típusú szennyeződések hatása	14
2.3.3 Az orientáció hatása a szennyezettség mértékére	14
2.3.4 A hidrofobicitás jelentősége	15
2.4 A szennyeződések összetétele.....	16
2.5 A szennyező anyagok forrásai	17
2.5.1 A földrajzi elhelyezkedés hatása.....	18
2.6 Az időjárás hatása	19
3 Mérések.....	21
3.1 A mérési elrendezés	21
3.2 A mérés menete	25
3.2.1 A mérések során alkalmazott szennyezőanyagok.....	26
4 Mérési eredmények.....	28
4.1 Kiindulási állapot.....	28
4.1.1 A kaolinnal végzett mérések.....	30
4.2 A cementtel szennyezett szigetelők	31
4.2.1 A desztillált vízzel kevert cementen végzett mérések	31
4.2.2 A csapvízzel kevert cementtel végzett mérések	33
4.2.3 A felületre szórt cementpor.....	35
4.3 Fémporral végzett mérések	36
4.4 Korommal végzett mérések	37

4.5 Téglaporos szennyeződés.....	38
5 Összegzés.....	40
Irodalomjegyzék.....	41
Függelék.....	43

Összefoglaló

A folyamatosan növekvő villamosenergia igény újabb és újabb kihívások elé állítja a villamosenergia-rendszert mind az üzemeltetés, mind a korszerűsítés terén. A fogyasztók elvárásainak megfelelően egyre kevésbé megengedhetőek a nem várt kimaradások, karbantartási műveletek. Az előre nem tervezett javítási munkálatok elvégzése miatt gyakran akár jelentős gazdasági károk, leállások is keletkezhetnek. A kompozit szigetelők megjelenésével, és a szabadvezeték hálózaton, mint tartó- és feszítőszigetelők, történő alkalmazásával a legtöbb esetben a szolgáltatás megbízhatósága növekedett. Ugyanakkor bizonyos környezetekben, akár rosszabbul is teljesítenek, mint elődeik, az üveg és kerámia szigetelők. Ugyanis a szigetelők szilikon burkolata kevésbé ellenálló a kémiai degradációs hatásoknak, melyek forrása sok esetben a szigetelők felületén megtelepedő szennyeződések.

A dolgozatban különböző terepről gyűjtött és mesterségesen előállított, nem szokványos szennyeződésekkel viszek fel a kompozit szigetelők burkolatára, majd felületi ellenállás mérést végzek. Az elsődleges célom, kapcsolatot találni a szigetelők szennyezettségének mértéke, a szennyeződések típusa, és a rajtuk mérhető felületi ellenállás között, valamint ez alapján a szennyező anyagok szigetelőkön történő lerakódásának kockázatát értékelni. A felületi ellenállás mérés egy egyszerű, olcsó és gyors módszer lehet a szigetelőkön észlelt nem szokványos jellegű vagy mértékű szennyeződések kockázatának meghatározására. További előnye a laboratóriumi technológiákkal szemben, hogy könnyen kivitelezhető helyszínen is, így nincs szükség a szigetelők leszerelésére.

Abstract

The ever growing demand for electricity poses new challenges for the electric grid from both the maintenance and modernization side. In parallel with the expectations of the consumers, unplanned outages and maintenance are less and less acceptable. Due to unplanned outages and maintenance operations severe financial losses may occur. With the rise in the usage rate of composite insulators, in most cases, the reliability of service increased significantly. Although in some circumstances and locations the usage of these types of insulators actually increased the likelihood of failures, in certain cases, they perform subpar to their predecessors, the glass and ceramic insulators. In many cases, the reason for this is that the silicone rubber material of the insulators' sheath is less resistant to chemical degradation, which is often caused by the accumulated pollution on their surface.

In this paper, the silicon cover of the insulators is contaminated with multiple types of polluting materials, which are collected from in field locations or artificially produced in the laboratory. After the contamination process, surface resistivity measurements are carried out on the insulators. My primary goal is to find a connection between the level of pollution, the type of pollutants, and the measured surface resistivity values. Furthermore, I would like to evaluate the risks caused by the deposition of contaminants on the surface of insulators. The surface resistivity measurement could be a simple, fast, and inexpensive method for evaluating the risks of non-conventional types or amounts of pollution accumulation. Another advantage of this method is that, unlike laboratory measurements, it can be carried out in the field without needing to detach insulators from the supporting structure.

1 A villamosenergia hálózaton alkalmazott szigetelők

A villamosenergia-átviteli hálózaton nap, mint nap hatalmas mennyiségű energia továbbítása folyik, gyakorlatilag minden ember életének szerves részévé vált a villamos energia, így elengedhetetlen a megbízható ellátás biztosítása. A nagy teljesítmények átvitele során keletkező veszteségek minimalizálására az átviteli feszültség szintet növelni kell.

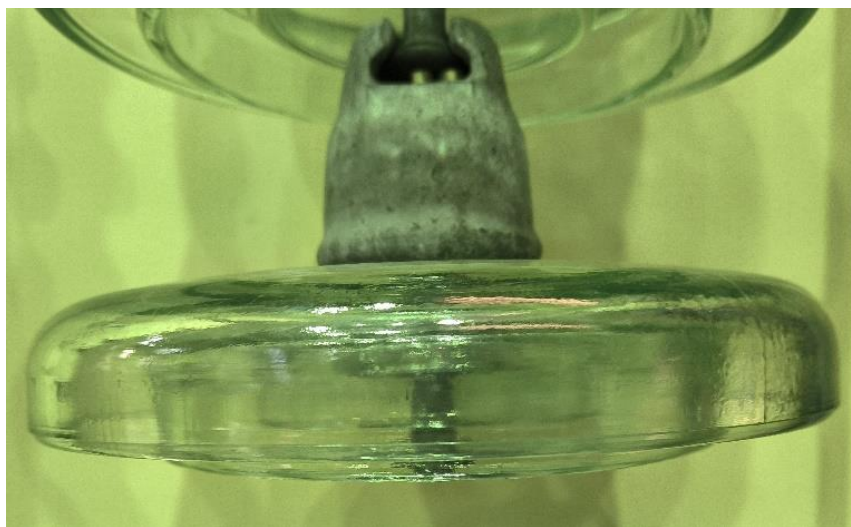
A szigetelők, a szabadvezeték hálózat egyik kulcsfontosságú elemeként vannak jelen a villamosenergia rendszerben. Több szempontból is elengedhetetlen az alkalmazásuk, mivel a hálózatban alkalmazott oszlopok földpotenciálon vannak, így nem lehet egyszerűen fémes anyagokkal csatlakoztatni a villamos energiát szállító, feszültség alatt álló sodronyokhoz. Ez okból szigetelőanyagokból készült rögzítő elemeket, tartó- és feszítő szigetelőket alkalmazunk, melyeknek feladata a földpotenciálú tartószerkezetek és a földhöz képest feszültség alatt álló sodronyok villamos elszigetelése. Másik fontos feladatuk a sodronyok rögzítése, pozicionálása és megfeszítése.

1.1 A szigetelők meghibásodásai

A szigetelők meghibásodási formái leggyakrabban két kategóriába sorolhatók. Az első kategória a mechanikai meghibásodás, ahova a szigetelők törése, repedése tartozik. Ezekben az esetekben, ha a szigetelők hibáját nem észlelik időben, akkor az akár a szigetelők teljes szakadásához vezethet, aminek következtében a nagyfeszültségű sodronyok veszélyes közelségbe kerülhetnek a távvezeték vonalak alatt tartózkodókhoz és jelentős anyagi kárt is okozhatnak. A másik kategória a villamos meghibásodás, ahol szigetelési feladatukat nem képesek többé ellátni és átívelés következtében zárlatok alakulhatnak ki. A szigetelőképeség megszűnése több okból is előfordulhat, ezek közül a szigetelő anyagának természetes degradációját laboratóriumi öregítéssel alapuló mérésekkel becsülhetjük, további ok lehet a szigetelők felületén megjelenő szennyeződések, áramutak létrejötte. Az öregedési folyamatokat, viszont felgyorsíthatják külső hatások, melyek lehetnek biológiai (pl.: madár ürülék), kémiai (pl.: felületet károsító vegyületek létrejötte) vagy fizikai (pl.: szél által szállított por erodáló hatása) eredetű jelenségek.

1.2 Szigetelők felépítése

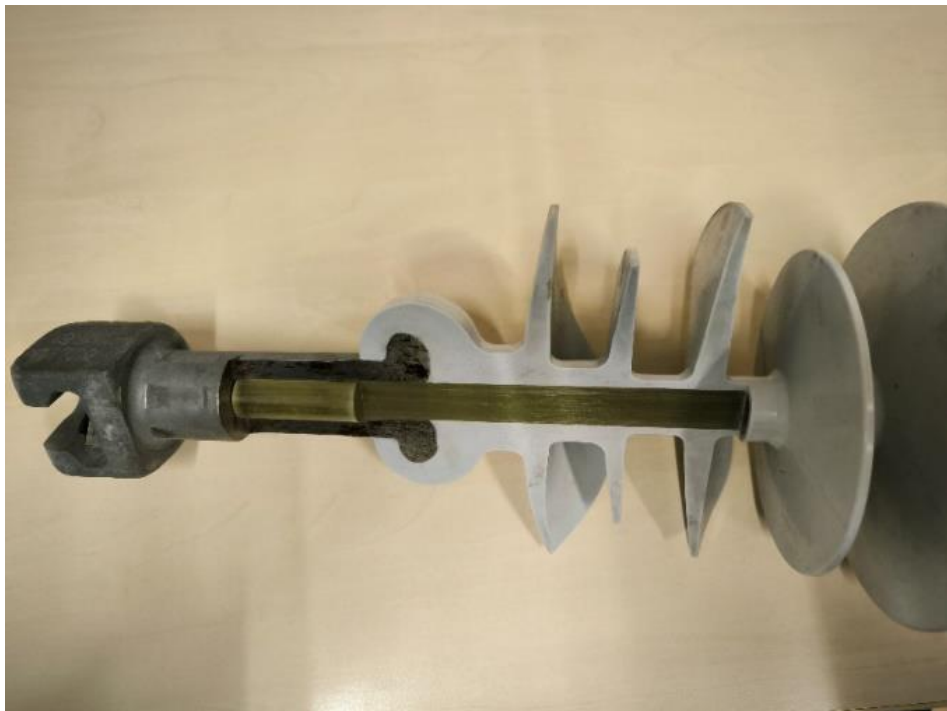
A szigeteléstechikában igen sokféle anyagot alkalmaznak, szabadvezeték hálózaton viszont már csak egy pár anyag bizonyult megbízhatónak. Ezek az anyagok kiváló mechanikai és villamos tulajdonságaiknak köszönhetően kerültek felhasználásra. A régebb óta használatos anyagok az üveg és a kerámia, melyeket egyre több helyen kezdenek felváltani a kompozit szigetelők. A hagyományos keramikai szigetelők hátrányai közé sorolható, azok nagy súlya, mellyel még nagyobb terhelést jelentenek a tartószerkezet számára, valamint a fel- és leszerelésüket is jelentősen megnehezíti. A kompozit szigetelők ezzel szemben sokkal könnyebbek, és teljes terjedelmükben szigetelőanyagból készülnek. A fentebb említett kedvezőbb tulajdonságaik miatt lehetséges rövidebb szigetelők alkalmazása, azonos feszültség szinten. Előnyös tulajdonságaik hozzájárulnak a sikerükhöz, mivel sokkal könnyebben szerelhetők, kezelhetők is. A kompozit szigetelők másik nagyon hasznos tulajdonsága az alkalmazott szilikongumi borítás hidrofobicitása, mely segít ellenállni az időjárás és szennyeződések hatásainak. A hidrofobicitás révén ugyanis nem képes egybefüggő vízréteg kialakulni a szigetelők burkolatán, csökkentve az átívelés veszélyét.



1.1. ábra - Üveg szigetelőláncok elemeként alkalmazott szigetelő

Felépítésüket tekintve a kompozit szigetelők egyszerűbbek, mint a korábban alkalmazott kerámia- vagy üveg szigetelőláncok. Míg a régebben alkalmazott, üveg szigetelők több kisebb elemből állnak, mely az 1.1 ábrán is látható, a kompozit és kerámia szigetelők nem elemekből épülnek fel, hanem egy egységként, az alkalmazásának megfelelően kerülnek gyártásra. A korábban alkalmazott módszer nagy hátránya, hogy a

szigetelőlánc elemei fém végszerelvényekkel csatlakoznak, melyeket egymásba akasztva lehet a szigetelőláncot megalkotni. Ezen fém végszerelvények miatt hosszabb láncokat kell alkalmazni, mivel az elemek hosszának csak egy része az, ami a villamos potenciálok elválasztását végzi. A kerámia szigetelőknél is jobb tulajdonságokat mutatnak a kompozit szigetelők, így azoknál is rövidebb elemek alkothatóak a modernebb technológia felhasználásával. A kompozit szigetelők esetén, a kedvezőbb mechanikai tulajdonságoknak köszönhetően, sokkal könnyebb vékonyabb ernyőket gyártani, melyek nem törékenyek, a szigetelők hirtelen erőhatásoknak, rezgéseknek is ellenállóbbak.



1.2. ábra - Kompozit szigetelő hosszmetsete

Az 1.2 ábrán látható egy kompozit szigetelő felépítése. A szigetelő végén egy fém végszerelvény található, amellyel mechanikai kötés alakítható ki, akár több szigetelő között, akár a szigetelő és a tartószerkezet, vagy a sodrony között. Az ábrán szintén látható, a szigetelő mechanikai szilárdságát adó üvegszál-epoxi mag, mely a szigetelő két végén található végszerelvények között biztosítja a mechanikai tartóerőt. Fontos tulajdonsága, hogy nem vezetőképes, ezért a kiváló mechanikai tulajdonságai mellett ideális választás szigetelők erősítéséhez. A mag egyik nagy hátránya, hogy víz behatolására rendkívül érzékeny, akár annak teljes tönkremenetelét is okozhatja a behatoló nedvesség, mivel részkiülések kialakulása esetén különböző savak képződhetnek, melyek a mag anyagát károsítják. Ennek megakadályozására az üvegszál erősítésű magot teljes terjedelmében szilikon-gumival körbeveszik, mely a metszeten is

látható módon, kis mértékben a végszerelvényekre is rányúlik, így biztosítva a tökéletes vízzárást. A kompozit szigetelők külső, szilikon burkolata a környezeti hatásoknak (UV sugárzás, szennyeződések lerakódása), nem tud tökéletesen ellenállni, ezért gyakran szervesetlen adalékanyagokkal javítható a burkolat ellenállóképessége.



1.3. ábra - Kerámia szigetelő (balra) és kompozit szigetelő (jobbra)

Az 1.3 ábrán látható egy kerámia és egy kompozit szigetelő egymás mellett. Ezek azonos feszültség szinten alkalmazandó szigetelők és az ábrán is jól látható a méretbeli különbség, mely a fentebb részletezett okokból ered. Megfigyelhető, hogy a kerámia szigetelő jóval vastagabb is, ez a rosszabb mechanikai tulajdonságok miatt szükséges. A vastagság növelésével érhető el a szükséges mechanikai szilárdság, míg a kompozit szigetelő esetében sokkal vékonyabb szerkezet alkalmazásával is elérhetőek a kívánt mechanikai tulajdonságok, a vékonyabb kialakítás a rugalmasság szempontjából is kedvező.

1.2.1 Kísérlet a felület kialakításának hatásának vizsgálatára

A szigetelők egyik fontos tulajdonsága, hogy mennyire tudnak ellenállni a különböző szennyeződések lerakódásának. Ugyanis, ha a szigetelő felületén kevesebb szennyezőanyag tud lerakódni, az azokból eredő negatív hatások is csökkennek. A szigetelő felülete, ha kevésbé érzékeny a szennyezőanyagok lerakódását tekintve, azzal a szigetelő élettartama is meghosszabbodhat, valamint a szennyeződésekkel eredő meghibásodások számának csökkenése miatt, a működésük kiszámíthatóbb. Ez nem csak a nem tervezett karbantartások számát tudja csökkenteni, de megbízhatóbb és időtállóbb energia átviteli rendszert eredményez.

A hagyományos kompozit szigetelők szilikon felülete teljesen sima. Voltak azonban kísérletek, hogy a felületet valamilyen textúrával ellátva alakították ki, és ez befolyásolta a szennyeződések hatását. A szigetelők felületén kis púpok kialakításával lehetséges befolyásolni, hogy milyen mértékben rakódnak le szennyezőanyagok a szigetelő felületén. Sima, téglalap alakú sík mintákon a púpok kialakítása hasznosnak bizonyult és hatásukra kevesebb szennyeződés rakódott le a felületen, ez annak köszönhető, hogy a púpok tetején nem tudott megállni a szennyező oldat, csak a púpok között tudott lerakódni. Rendes szigetelőkön alkalmazva, már nem oly számottevő a különbség a texturált és a konvencionális, sima felületű, szigetelők között. Bizonyos esetekben azt is megfigyelték, hogy a felület valamilyen mintával ellátása a szennyező anyagok jelentősebb lerakódását eredményezi.[1]



1.4. ábra - Egy texturált felületű szigetelő nedvesítés közben [1]

A felület mintázatának nincs jelentős szerepe a szennyeződés lerakódás gyorsításában, a kialakítás nem növeli a lerakódó szennyeződés mennyiségét. Kísérletek alapján viszont belátható, hogy a szivárgási vezetés, ezzel a szivárgási áramok a különböző domborzattal ellátott szigetelők esetén egy kisebb meredekségű görbe szerint növekednek, ez mind AC, mind DC villamos igénybevétel hatására hasonlóan alakul. A kisebb meredekség azt jelenti, hogy ugyanannyi idő elteltével a mintázott szigetelőkön kisebb szivárgási áramok mérhetők.[1]

A szigetelő felületén a szivárgási áramok, a felület szivárgási vezetőképessége nem egyenletes a szigetelő teljes terjedelmében. A konvencionális szigetelők esetében az alkalmazott szennyezési és tesztelési módszer esetén a szigetelő ernyőinek a felső felülete mindig nagyobb szivárgási vezetéssel bír. Az alsó felület és a szigetelő törzse pedig kisebb értékeket produkál. Amennyiben mintázat van a felületen a tapasztalat az, hogy ugyanazon tesztelési körülmények között, a mintázat eltorzítja a felületi vezetés értékek arányát. Ilyen esetekben a felső két ernyő alsó oldalának szivárgási vezetése jelentősen magasabb, mint a felső felületének. Valamint ezek a magas értékek, a korábbi legmagasabb értékeknél, melyek az ernyők felső felületén voltak mérhetők, is magasabbak.[1]

2 A szigetelők szennyeződése

2.1 A szennyezőanyagok hatása a szigetelőkre

A szennyezőanyagok lerakódásának hatására a szigetelő felületi ellenállása bizonyos esetekben lecsökken. A felületi ellenállás lecsökkenése a szivárgási áram növekedéséhez, majd a szigetelő felületén, egy vezetőképes vékony réteg kialakulásához vezet, amely végül átíveléshez vezethet.[2][3] A kisülések hatására a szigetelő feladatának ellátására alkalmatlanná válhat. Ez veszélyezteti az üzembiztonságot és végső esetben, amennyiben már mechanikai tartószerepének ellátására is alkalmatlanná válik, a sodrony leszakadásával jár, mely akár emberek épségét is veszélyeztetheti. Ezen okokból a szigetelők megbízható működésének és a hatékony energiaellátás biztosításának az egyik legfőbb feltétele a szivárgási áramok minimalizálása, melyben fontos szerepe van a megfelelő szigetelőanyag kiválasztásának.

A szilikongumit alkalmazó kompozit szigetelők magas hidrofobicitása meggátolja a felületükön egybefüggő vízréteg kialakulását, így lecsökkentve a kialakuló szivárgási áramokat. A kompozit szigetelőkkel szemben a kerámia és üveg alapú szigetelők nem rendelkeznek hidrofób tulajdonsággal, ez az egyik fő ok, amiért a kompozit szigetelők, kültéri alkalmazásokban és szennyezett területeken előnyt élveznek velük szemben.[3]

A szigetelők felületén letelepedő különböző szennyezőanyagok azonban nedvesség hatására, amely származhat esőből, különböző megjelenésű csapadékból, savas vegyületeket alkothatnak, amely a szigetelők felületi minőségének romlásához vezet. [3] A szennyeződések egy másik hatása, hogy a felületen koronakisülések kialakulását idézhetik elő, amelyek hatására a szigetelő felülete tovább degradálódik, ezzel veszélyeztetve a biztonságos üzemelést.

2.2 A szennyeződések megfigyelésének fontossága

A szigetelők szennyeződésének megfigyelése és tanulmányozása jelentős előrelépés a megbízható energiaellátás, a megfelelő üzemeltetés szempontjából, mivel a szennyezettség függvényében a karbantartás, esetleges tisztítás vagy csere szükségessége meghatározható. Mivel a szigetelők általában szabadtéren kerülnek elhelyezésre, így az

ott jelenlévő hatásoknak, szennyező anyagoknak ki vannak téve. A kitettségük miatt szennyeződésük tehát elkerülhetetlen.

A kutatás célja a különböző nem szokványos szennyező anyagok szigetelőkre gyakorolt hatásának vizsgálata felületi-ellenállásmérésen keresztül. A nem szokványos szennyezőanyagok közé olyan anyagokat sorolunk, melyek nem fordulnak elő nagy mennyiségben, a természetben, csak bizonyos üzemek, infrastruktúra közelében. Ezáltal az emberi tevékenység mellékhatásai. Ezek a szennyező anyagok azért jelentenek veszélyt a villamosenergia-rendszer számára, mivel ritkaságuk miatt a szigetelőkre, azok villamos paramétereire gyakorolt hatásuk nem olyan részletesen ismert, mint a gyakrabban előforduló szennyezőanyagoké.

Ilyen szennyezőanyagok forrásának tekinthetünk cementgyárakat, cserépüzemeket és bármilyen olyan ipari létesítményt melynek jelentős a porszemcse kibocsátása. A vasúti vontatás során szintén előfordulhatnak nem szokványos szennyező anyagok. A villamosított vasútvonalak esetén találhatunk szigetelőket, melyeknek a felületén könnyen lerakódnak a vonatok mindennapi közlekedéséből származó anyagok, melyek a fékezések, gyorsítások és csak az egyszerű gördülés során a kerekek, sínek, fékek kopásából származnak.

2.3 Szennyezettség meghatározása

Nem szokványos szennyező anyagok jelenlétének kimutatása kulcsfontosságú lépés lehet a szigetelők kockázatértékelése során. A szennyezettség meghatározásával, pontosabb képet kaphatunk a szigetelők állapotáról, de a vizsgálatok a meghibásodások előrejelzésében, valamint azok megelőzésében is fontos szerepet játszhatnak.[1] A szennyezettség meghatározására, osztályozására több módszer is adódik, különböző paraméterek alapján már sok klasszifikáció ismert.

2.3.1 Vízben oldható és nem oldható szennyeződések

A nátrium-klorid (NaCl), a leggyakrabban referenciaként alkalmazott anyag vezetőképes, vízben oldható szennyeződések modellezésére. A szennyezettség foka az ESDD (equivalent salt deposit density) értékkel meghatározott, mely a NaCl-nak azt a mennyiségét jelenti, amit desztillált vízben oldva, ugyanolyan térfogati vezetési értékkel rendelkező oldatot ad, mint az a természetes lerakódás, amely a szigetelő egy adott felületéről eltávolítva, vízben oldva adna. A szükséges anyagmennyiséget végül az

eltávolított lerakódás felületének nagyságával elosztva kapjuk, melyet általában mg/cm^2 mértékegységben adnak meg.[1]

A természetben előfordulnak olyan szennyezőanyagok is, melyek nem oldhatóak vízben, ezeket külön mérőszámmal kell figyelembe vennünk. A nem oldható anyagok mennyiségének meghatározására az NSDD (nonsoluble deposit density) mérőszámot alkalmazzák. Ez a mérőszám a szigetelő egy adott felületéről eltávolított, majd a felület nagyságával elosztott, nem vízoldható anyag mennyiségét jelenti, általában szintén mg/cm^2 mértékegységben megadva.[1] Ennek a modellezésére gyakran használnak kaolint [4], aminek a hatása a dolgozatban is vizsgálatra kerül.

2.3.2 A különböző típusú szennyeződések hatása

Számos tanulmány vizsgálja az NSDD, átívelési feszültségre gyakorolt hatását, és az általános megfigyelés az, hogy adott ESDD szint mellett az NSDD mennyiség növelésével az átíveléshez szükséges feszültség csökken. Kompozit szigetelők esetén az NSDD érték növekedésével a hidrofobicitás, valamint az átívelési feszültség értékek is csökkennek. [1]

A hidrofobicitás csökkenése az egyik legfontosabb hatás, melynek jelentős következményei lehetnek. A hidrofobicitás lecsökkenésével ugyanis a szigetelők felületén egybefüggő vízréteg tud kialakulni. Az egybefüggő vízréteg a szigetelő felületén kis ellenállású áramutat eredményez, ezzel mind a szigetelőt érő villamos teret torzítja [5], mind a szivárgási áramok növekedését okozza. Ezek a hatások pedig a szigetelő öregedését fogják felgyorsítani, ami a korai meghibásodáshoz, kiszámíthatatlan élettartamhoz vezet.[3] Ezért nagyon nagy figyelmet igényel a különböző szennyező anyagok, szigetelők hidrofób tulajdonságára gyakorolt hatása.

2.3.3 Az orientáció hatása a szennyezettség mértékére

A [6]-os hivatkozásban a szerzők igazolják, hogy mind az ESDD, mind az NSDD értékek a szigetelők alsó felületén jelentősen magasabbak. Az alsó és felső felületek szennyezettsége között kb. 7-szeres az eltérés. Ez az eltérés, az alsó felületeken nedvesedés hatására vezetőképesebb oldatot eredményez. Az orientáció szintén fontos szerepet játszik az átívelési folyamatok kialakulásában, ugyanis a szigetelők helyzete befolyásolja a felületen megjelenő vízcseppek útvonalát.

A hivatkozott [7]-es publikációban bemutatott mérések alapján látható, hogy a függőleges helyzetű szigetelők esetén az alsó felületek (szigetelő ernyőinek az alja), villamos térerősség hatására jelentősebb mértékben melegednek, először itt jelennek meg a száraz sávok. Ezen mérések azt is bebizonyították, hogy a villamos térerősség hatására létrejövő részkisülések először a száraz sávoknál jelentkeznek.

A hivatkozott [8]-as publikációban végzett kísérletek alapján látható, hogy a szigetelők függőlegessel bezárt szöge befolyásolja a megjelenő átütések számát. A publikáció alapján a legkevesebb átütés 60 és 30 fokos szögnél következik be.

2.3.4 A hidrofobicitás jelentősége

A kompozit szigetelők hidrofobicitása egy fontos paraméter, mellyel meghatározható a szigetelők szennyeződés eredetű átíveléssel szembeni ellenállósága. A szigetelők öregedésével a hidrofobicitásuk csökkenni kezd, így a hidrofobicitás akár az öregedési folyamatok megfigyelésére a szigetelő öregedésének előrehaladottságának becslésére is használható.[9]

Megfigyelhető, hogy ugyanolyan módon szennyezett minták esetén nedvesítés és villamos tér hatására a nagyobb hidrofobicitással rendelkező minták magasabb átívelési feszültség értékeket produkálnak. Szintén megfigyelhető, hogy azonos térerősség hatására a jelentősebben hidrofób minták esetében a szivárgási áramértékek nagysága alacsonyabb. Egy bizonyos hidrofobicitás felett azt figyelhetjük meg, hogy az átíveléshez szükséges feszültség nem növekszik jelentősen.[9]

A hivatkozott [10]-es publikációban végzett mérések alapján bebizonyosodott, hogy a jobb hidrofobicitású szigetelők esetén a szennyeződések oldódása a felületi nedvességben kisebb. A végzett kísérletek alapján meggyőződtek róla, hogy a felületen található vízcseppek illeszkedési szögének függvényében az oldott szennyeződés mennyisége exponenciálisan csökken.

A hidrofobicitás láthatóan kulcsfontosságú szerepet játszik a megbízhatóság szempontjából, mivel azonos szennyezettség mellett egy jobb hidrofobicitással rendelkező szigetelő kisebb valószínűséggel fog meghibásodni. Valamint a hidrofobicitás hatására lecsökkenő szivárgási áramoknak hála kisebb lesz a felületen keletkező hő, így lassabban, kisebb mértékben képesek csak száraz sávok kialakulni a szigetelőn.



2.1. ábra - Egy NaF kompozit szigetelő felülete nedvesség hatására

A 2.1 ábrán látható szigetelő erősen szennyezett és már a hidrofobicitása nagy részét elvesztette, egybefüggő vízréteg képes kialakulni a felületén.

2.4 A szennyeződések összetétele

A természetben előforduló szennyeződések összetétele nagyon bonyolult és sokféle lehet, a különböző anyagok arányai pedig jelentősen helyfüggőek lehetnek. A természetben leggyakrabban előforduló oldható szennyeződések vezetőképesek, mint pl.: NaCl, KCl, CaSO₄, a nem oldható szennyeződések leggyakoribb anyagai pedig a SiO₂, C, Al₂O₃. [11]

A nem szokványos szennyeződések összetétele viszont jelentősen különbözik a természetes forrásból származótól. Ezek gyakran nem a természetben előforduló egyszerű anyagok, hanem bonyolultabb az emberi tevékenységből származó anyagok. Összetételüket a forrásuk határozza meg, így a földrajzi elhelyezkedésnek kulcsfontosságú szerepe van. A [12]-es publikáció egy cementgyár kibocsátását vizsgálta, mely jelentősen megnövelte a levegőben található, és ezáltal később lerakódó por mennyiségét. A cementgyár kibocsátásának főbb alkotó kémiai elemei a vas (Fe), mangán (Mn), alumínium (Al), cink (Zn) és ólom (Pb).

A [13]-as publikációban ipari területeken végzett mérések alapján sűrűn lakott és sok ipari létesítményt tartalmazó területeken a levegőben lévő porként leszállni képes

szennyeződések leggyakoribb összetevői többek között a korom, kén (S), nátrium (Na), Pb, Zn, kálium (K), Fe, szilícium (Si) és kalcium (Ca).

Az előzőkhez hasonlóan a vasúti környezetben szintén jelentősen más a szennyeződések összetétele. Vasúti környezetben a szennyeződések túlnyomó részét a vas teszi ki. [14] A vason kívül még egy pár fém megfigyelhető szennyező anyagként vasúti környezetben, ilyenek például a réz (Cu) és a Mn.

További nem szokványos szennyezőanyag a korom, mely leggyakrabban az emberi tevékenység mindennapi folyamatainak terméke. Megtalálható például belsőégésű motoros járművek kibocsátásában és fosszilis üzemanyaggal működő erőművek környezetében. A korom hatása vasúti környezetben is megjelenhet, ahol villamosított vasútvonalakon kompozit szigetelők kerülnek alkalmazásra és dízel mozdonyok is közlekednek, melyeknek jelentős korom kibocsátása lehet.

Egy további nem szokványos szennyezőanyag a téglapor, ez az anyag téglagyárak, cserépüzemek környezetében jelenhet meg. Előfordulása téглаépületek bontási munkálatai környezetében sem kizárható, nagyobb mennyiségben is felszabadulhat. A téglapor leggyakoribb összetevői, a szilícium dioxid (SiO_2), alumínium-oxid (Al_2O_3), a vas-oxid (Fe_2O_3) és a magnézium-oxid (MgO). [15]

A fentebb említett nem szokványos szennyezőanyag példák, azért kerültek megemlítésre, mivel később vizsgálatra is kerülnek. Az eddigiek alapján látható, hogy a különböző környezetekben különböző anyagok teszik ki a szennyező anyagok keverékét. Az sem elhanyagolható, hogy az anyagok aránya is drasztikusan változhat. Valamint olyan anyagok, amelyek az egyik környezetben a szennyeződések egyik leggyakoribb alkotó eleme a másik környezetben lehet, hogy meg sem jelennek. A nem szokványos szennyeződések ezért állítják a szigetelésdiagnosztikai módszereket nagy kihívások elé, mivel a környezetek mássága jelentős különbségeket mutat a szennyeződések kémiai összetételében.

2.5 A szennyező anyagok forrásai

A szennyezőanyagok, melyek a szigetelőkre negatív hatással vannak, rengeteg helyen megtalálhatók. Egyik leggyakoribb és legelterjedtebb ilyen szennyező anyag a földkéregből származó por, amely meg tud telepedni a szigetelőkön és akár a hidrofobicitás romlásához is vezethet, így elősegítve áramutak kialakulását. Egy másik

nagyon gyakori szennyezőanyag a só, a vízben oldott só nagyon sok helyen előfordul a természetben, például tengerek, óceánok közelében és igen káros a szigetelőkre tekintve, mivel a szigetelő felületére kerülve és vízben oldva egy vezetőképesebb oldatot hoz létre, amely a szigetelő felületén, akár egy áramutat is eredményezhet. Szintén gyakori forrása lehet, az emberi tevékenység, mégpedig a téli időszakban végrehajtott sószórás. A só egy másik ismert hatása, hogy segíti a fémek korrózióját, így a fém végszerelvényekre is káros hatással van. A só gyakran vízben oldva jelenik meg a szigetelőkön, mely lecsapódva apró vízcseppeket hoz létre, majd a víz elpárolgásával, a só visszamarad. A szigetelőkön megjelenő szennyezőanyagok gyakran légmozgások, szél által kerülnek a felületükre, ez leginkább a szilárd szennyezőanyagok esetén jellemző. Gyakran előfordul még biológiai eredetű szennyeződés is a szigetelők felületén, ez a legtöbb esetben madárürülék, aminek maró hatása szintén egy veszélyforrás a szigetelő megbízhatóságára tekintve.



2.2. ábra - Egy szennyezett kompozit szigetelő

2.5.1 A földrajzi elhelyezkedés hatása

A földrajzi elhelyezkedés nagy hatással van a szennyeződések összetételére és mennyiségére. Só lerakódás sokkal nagyobb mértékben figyelhető meg sós víztömegek közelében, ahol mind párolgás és lecsapódás útján, mind apró vízcseppek légmozgás hatására történő elmozdulásával kerülhet só a szigetelőkre. Szántóföldek közelében a szántóföldi munkálatok hatására jelentős mennyiségű szállópor keletkezhet, amely a

közelben található szigetelők felületén könnyen lerakódhat. Ez a szennyeződésforrás ezáltal jelentősen idő/évszak függő lesz, mivel az évszakok függvényében más és más munkafolyamatokat végeznek a földeken.

A nem szokványos szennyeződések forrása nem természetes, általában valamilyen emberi tevékenység, termelés hatására kerülnek a levegőbe. Ezen okból könnyen belátható, hogy az ide sorolható szennyező anyagok gyárak, ipari területek környékén találhatók meg nagy mennyiségben. A szennyeződést kibocsátó gyárteleptől, ipari területtől távolodva a levegőben található, lerakódni képes szennyeződések mennyisége csökken. [12]

A [12]-es referenciában egy cementgyár környékén figyelték meg, hogy a cementgyár kibocsátásának jelentős része valamilyen fémes anyag, nehézfém. Azt is megállapították, hogy a levegőben lévő teljes pormennyiség is jelentősen magasabb közel a gyárhoz, és a távolság növekedésével meredeken csökkenő tendenciát mutat. Megfigyelhető a mérések alapján, hogy egy kontroll helyszín és a gyártól 5 kilométerre lévő mérési helyszín között már igen kis eltérések mutatkoznak, és csak olyan anyagok jelentkeznek a gyártól 5 km-re lévő helyszínen, amelyek megtalálhatóak a kontrollként vett helyszínen is. Ezek az adatok nem garantálják, hogy 5 km-re a gyártól már nem található szennyeződés, amely a gyárból származna. Az értékeken ugyanis látható, hogy még 5 km távolságra is nagyobb mennyiségben találhatóak azok az anyagok, melyek a gyár kibocsátásában a legnagyobb mennyiségben mérhetőek.

2.6 Az időjárás hatása

A kompozit szigetelők számos, fentebb is tárgyalt előnyük mellett néhány gyengeséggel is rendelkeznek. A polimer anyagok könnyen degradálódnak szennyeződések hatására. Továbbá, az UV sugárzásnak való folyamatos kitettség, savas vegyületek, különböző szennyezőanyagok lerakódása, nedvesség behatolás és korona kisülések, a polimer szigetelőanyag lebomlásához vezethet.[3]

Fontos szempont a környezeti hőmérséklet, mivel ez nagy mértékben tudja befolyásolni a levegő abszolút páratartalmát, a levegő által felvehető vízmennyiséget, ezzel a szigetelő esetleges nedvesedése után a száradás sebességét, valamint a csökkenő hőmérséklet magas páratartalom esetén, a szigetelő felületén lecsapódáshoz vezethet. A felületen található NaCl, 75%-os relatív páratartalom mellett képes vizet felvenni a levegőből. [1] Ámbár, ez a folyamat nagyon lassú, és gyakran a többi csapadékforma

mellett eltörpül, nem elhanyagolható, mivel a szigetelők felületén nagyon gyakori szennyeződés a NaCl.

A légmozgás, mint időjárási tényező sem elhanyagolható, mivel képes a felületen lévő száraz porszerű szennyeződések elmozdítására, viszont akár szállíthat is porszemcséket, melyeknek erős csiszoló hatása jelentkezik a mozgásuk során, így a szigetelők felületét képesek rombolni, koptatni, a felületkezelő anyagokat eltávolítani. A szél másik nem elhanyagolható hatása mechanikai szempontból fontos, mivel képes a sodronyokat elmozdítani, belengetni. A sodronyok mozgása többlet erőhatásokat tud gyakorolni a szigetelőkre, amelyet azoknak el kell viselni. A szél hatására a korábban meggyengült, előregedett szigetelők legszélsőségesebb esetben akár el is törhetnek, aminek katasztrofális következményei lehetnek.

3 Mérések

3.1 A mérési elrendezés

A vizsgálatok során a kompozit szigetelők felületi ellenállása kerül mérésre különböző szennyeződések hatását vizsgálva. A méréseket egy Metrel TeraOhm 5 kV műszer segítségével, valamint egy 3D nyomtatott céleszközzel, mely az elektródok távolságának fix értéken tartásáért felel, végeztem. A műszer szigetelési ellenállás mérésére 0 k Ω és 5 T Ω közötti tartományban képes. A mérőfeszültsége egészen 5 kV-ra is állítható, bizonyos a szigetelők száraz felületén végzett mérések esetén, ezt a feszültséget alkalmazni is kellett. A nedves mérések során viszont problémásnak bizonyult az 5 kV-os feszültség tartása, így kisebb értékeken lettek a mérések kivitelezve.



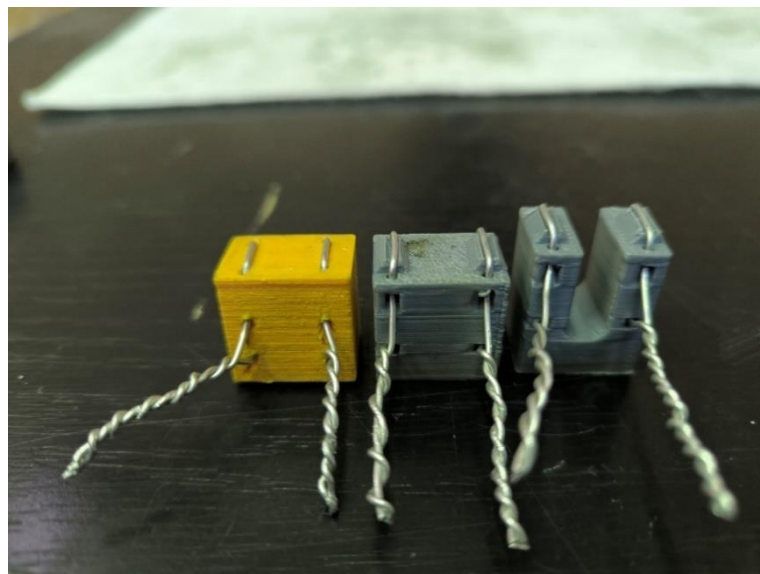
3.1. ábra - A használt műszer

A mérések megismételhetősége érdekében az elektródok egy 3D nyomtatott tartóban kerültek elhelyezésre, ezzel garantálva, hogy az elektródok távolsága minden mérés esetén megegyezik, továbbá az elektródtartóból kidomborodnak az elektródok, így mindig érintkeznek a szigetelő felületével. A 3.2 ábrán a használt eszköz különböző verziói láthatóak. Az első elektródtartó nedvesen végzett mérések során hátrányokat

mutatott, mivel a felületén egy vékony vízhártya ki tudott alakulni, így hibás méréseket eredményezett.

A középső egy újabb verzió, melyen az előző hátrányt kiküszöbölendő kiemelésre kerültek az elektródok. Ezzel a vízhártya kialakulását sikerült megakadályozni, de a 3D nyomtatás módszeréből kifolyólag a kocka belsejébe bejutó víz a rétegek között még képes volt áramutak létrehozására, így pár nedves mérés után ez az elektródtartó is meghibásodott, ennek a meghibásodásnak a jelei láthatóak is a felületén.

A jobb oldalon látható elektródtartó a végső verzió, mely a korábbi problémák kiküszöbölésére a két elektród között, egy jelentős bevágást kapott, így meggátolva az elektródok között megjelenő áramutak létrejöttét. A verziók közötti színváltozás annak az eredménye, hogy míg a sárga színű verzió PETG alapanyagú, a szürke színűek ABS anyagból készültek a váltást az indokolta, hogy az ABS műanyag nehezebben, és kevesebb vizet képes felvenni, valamint villamos paraméterei is előnyösebbek (nagyobb villamos szilárdság, nagyobb térfogati ellenállás).

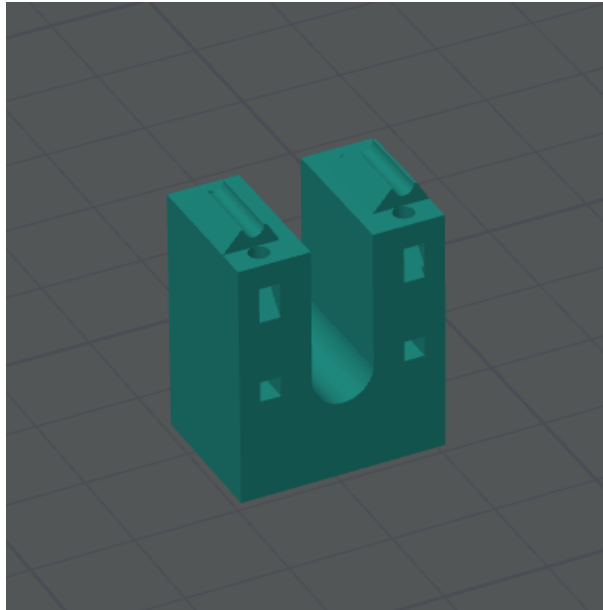


3.2. ábra - A használt elektródtartók generációi

A mérőelektródok az elektródtartókba fűzött 1 mm átmérőjű alumínium huzalból készültek. Az elektródok egymástól 14,5 mm-re kerültek elhelyezésre. Az elektródtartó külső méretei 20*14*26 mm.

A mérések jobb megismételhetősége érdekében a szigetelők felületén történő rögzítés egy racsnis szorítóval történt. A racsnis szorítón tűfilccel jelölve a racsnis használt fogát biztosítható volt az azonos szorító erő a különböző esetekben. A rögzítés után az

elektród kivezetésekre rögzítésre kerültek a mérőszinórok, ezt a mérőszinórok végén található krokodilcsipeszek segítségével lehetett kivitelezni.



3.3. ábra - A végleges verzió 3D-s modellje



3.4. ábra - A szigetelő felületére rögzített mérőeszköz

A mérések során felhasznált szigetelők a laboratóriumból származnak, a 3.5 ábrán láthatóak, 1-es számú szigetelő alapvetően koszosabb, szennyezettebb volt, mint a 2-es, a 3-as számú, egy terepről gyűjtött téglaporról szennyezett szigetelő, csak a téglaporos méréseknél került felhasználásra. Az 1-es és 2-es szigetelők felületét vizes rongy segítségével sikerült megtisztítani. A 3.5 ábrán látható, hogy az 1-es és 2-es szigetelők szennyezettségük ellenére jó hidrofobicitással rendelkeznek.



3.5. ábra - Az alkalmazott szigetelők bal oldalt: 1-es, középen: 2-es, jobb oldalt: 3-as

A szigetelők felületének hidrofobicitásának vizsgálatához, valamint a szigetelők későbbi felületi nedvesítéséhez két spriccelő flakon került felhasználásra. Ezek a 3.6 ábrán láthatóak.



3.6. ábra - A nedvesítéshez használt eszközök, desztillált víz(bal) csapvíz (jobb)



3.7. ábra - Az 1-es és 2-es számú szigetelők hidrofbocitása a tisztítás után (2-es szigetelő képen látható harmadik ernyője már tisztítatlan)

3.2 A mérés menete

A megismételhetőség további javítása érdekében a szigetelőkön jelölésre került a mérések során használt felület rész. Így látható volt, hogy a korábbi mérések hol lettek végezve, és ugyanoda lehetett újból rögzíteni az elektródokat.

A mérés időtartama a mérőműszeren változtatható, melyet próbamérések végzése után 45 másodperces értékre állítottam be, mert ennyi idő szükséges ahhoz, hogy a polarizációs folyamatok végbe menjenek. Ezt úgy állapítottam meg, hogy a mérés utolsó 10-15 másodpercében az aktuálisan mért érték nem ingadozott. Általánosságban elmondható, hogy nedves méréseknél, ennél kevesebb idő elteltével is állandó volt az éppen mért érték. A polarizációs folyamatok tehát kevésbé befolyásolták a mérést, de ennek ellenére ezen mérések esetén is 45 másodperces mérési idő került alkalmazásra.

A mérések további pontosítása érdekében a szennyeződések desztillált vizes ronggyal kerültek eltávolításra, majd a következő szennyezési ciklus előtt legalább 24 órát álltak, a szennyezés előtt felületi ellenállásméréssel meggyőződtem a felület kiindulási állapottal megegyező jellegéről. A mérés a megfelelő felületi minőség kialakításával indul, ez magában foglalja a szennyeződés felvitelét, a felület nedvesítését. A kívánt felületi minőség elérése után felhelyezésre kerül a mérőelektród, a szorítóval pedig rögzítésre kerül.

A rögzítés után a mérőműszer „start” gombjával kezdhető meg a mérés. A mérések időtartamát a műszeren beállított érték határozta meg, ennek lejártával feljegyzésre került a mért érték. A mérések során, kifejezetten a nedves méréseknél, pár mérés után ellenőrzésre került a kocka ellenállása is, ezzel meggyőződve, hogy a mérést nem befolyásolja, torzítja maga az elektródok elszeparálására alkalmazott műanyag tartó. Amennyiben az elektródtartó ellenállás értéke nem megfelelőnek bizonyult (a mért érték pár nagyságrend közelben volt), akkor egy ugyanazon modell alapján, azzal egy időben készült eszközre lett lecserélve, mellyel folytatható volt a mérés. Ilyen esetekben a megghiúsult mérés, mely után az elektródtartó ellenállása kevésnek bizonyult megismétlésre került.

A mérési eredmények helyben, laptop segítségével kerültek nyilvántartásra. Egy mérés végeztével azonos felületi minőséget kialakítva a szigetelő még két pontján megismétlésre került a mérés. Azonos felületi minőség mellett az 1-es és 2-es szigetelőn is elvégzésre kerültek a mérések. A műszer paraméterei azonos felületi minőségű mérések között nem kerültek változtatásra.

3.2.1 A mérések során alkalmazott szennyezőanyagok

A kutatás során öt szennyező anyag hatását vizsgáltuk, az első a szigetelők burkolatának felületi vizsgálatával foglalkozó kutatások során alkalmazott kaolin[1][4][7]. Ez az anyag nem fordul elő ilyen tisztaságban a terepen, viszont kutatásokban a szigetelőkről nyert szennyezőanyag modellezésénél az NSDD érték beállítására alkalmazzák. A fehér agyagként is ismert anyagban a földkéreg leggyakrabban előforduló építőelemei megtalálhatóak, ezáltal a terepen, ehhez hasonló anyagokkal könnyen találkozhatunk a szigetelők felületén. A dolgozatban inkább, mint egy összehasonlítási alap kerül vizsgálatra, mivel ez egy, a szigetelések diagnosztikája során gyakran alkalmazott anyag.

A második vizsgált anyag a cement, ez az anyag viszonylag gyakran előfordulhat a szigetelők környezetében, mivel a modern építészet egyik alappillérenek, a betonnak, alapvető összetevője. A szigetelők felületén könnyen lerakódhat, szállópor formájában, ezért fontos vizsgálata. Nagyobb mennyiségben építkezések, cementgyárak, cementbányák környezetében fordulhat elő, finom por jellegének köszönhetően viszont könnyen elmozdul légmozgások hatására, így távolabbi tárgyakon is könnyen lerakódik.

A harmadik vizsgált anyag a fémpor. Ez a szennyezőanyag csak bizonyos környezetekben fordul elő nagyobb mennyiségben. Erre példa a fémipar vagy a vasúti vontatás, ahol villamosított vasútvonalak esetén szintén alkalmaznak kompozit szigetelőket, és nagyobb mennyiségben megjelenik rajtuk a fémpor, mint szennyeződés. Villamos szempontból a fémek többsége vezetőképes anyag, ami önmagában indokoltá teszi a fémpor lerakódásának hatásának vizsgálatát.

A negyedik megvizsgált anyag a korom. A korom gyakran előforduló anyag, megtalálható az autók kibocsátásában, része különböző fosszilis tüzelőanyaggal üzemelő erőművek kibocsátásának, valamint a fűtésre használt tüzelési módszereknek is terméke. Lakóövezetek közelében, téli, fűtési szezonban a levegőben lévő szállókorom mennyisége jelentősen megnövekedhet, ebben a környezetben pedig gyakran megtalálhatóak a villamosenergia-rendszer elemei, ezáltal a korom is lerakódhat a szigetelők felületén. Valamint villamosított vasútvonalak esetén, ahol bizonyos esetekben dízelmozdonyok is közlekednek, lerakódhat a szigetelők felületén korom.

Az ötödik vizsgált szennyeződés a téglapor. Ez a szennyeződés nem fordul elő olyan gyakran, mint a korábbiak. Viszont előfordulhat téglagyárak, cserépgyárak környezetében, valamint téglá épületek bontási munkálatai során. Szintén előfordulhat építési hulladék feldolgozása során, amikor a téglák összetörésre kerülnek. A cementhez hasonlóan könnyű, finom por és ezáltal a szél segítségével könnyen lerakódhat, akár a forrástól messzebb lévő felületeken is.

4 Mérési eredmények

Az alábbi fejezetekben a különböző szennyeződések esetén mért értékek, a mérések során gyűjtött tapasztalatok kerülnek tárgyalásra. A cellaértékek minden mérés esetén ohm-ban értendők.

4.1 Kiindulási állapot

A szigetelők felületén kiindulási állapotban, még bármilyen szennyezés előtt is végeztem méréseket, így ismert kiindulási állapotból megítélhető a szennyezés hatása. Ezt a szigetelők nedvesítése és a mérés megismétlése követte.

A táblázatokban, az adott felületi minőséghez, mely a tisztított vagy koszos részek és a száraz vagy nedves esetek kombinációját jelenti, tartozó mérések közül az **első két oszlop ernyőkön, az utolsó pedig a szigetelő törzsén** végzett mérések eredményét tartalmazza. Az első táblázat esetén (4-1. táblázat) ezt jelöltem is a könnyebb értelmezés érdekében, de a továbbiakban ez elhagyásra kerül.

	Tisztított rész						Eredeti (koszosabb) rész					
	Száraz			Nedves (csapvíz)			Száraz			Nedves (csapvíz)		
1.	>5T	>5T	>5T	>2T	460G	1,06T	>5T	>5T	>5T	775G	454G	13,7G
2.	>5T	>5T	>5T	>2T	>2T	80,9G	>5T	>5T	>5T	>2T	>2T	113G
	Ernyő	Ernyő	Törzs	Ernyő	Ernyő	Törzs	E.	E.	T.	E.	E.	T.

4-1. táblázat - A kiindulási állapot mérései fektetett szigetelő esetén

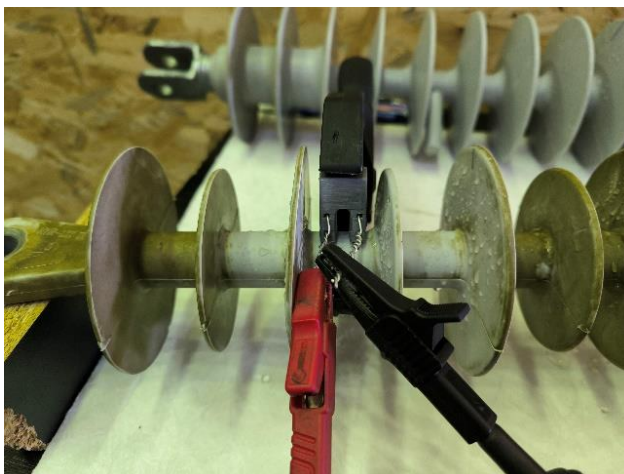
A táblázat nedves méréseit megismételtem a felületek letörlése, száradása után desztillált vízzel is, abból a célból, hogy megállapításra kerüljön, érdemes-e desztillált víz alkalmazása a módszer során, hiszen abban jelentősen kevesebb töltéshordozó van, mint a csapvízben, ezáltal a felvitt szennyeződések hatását kevésbé torzítja.

Nedves mérés (desztillált víz)						
Tisztított rész				Eredeti (koszosabb) rész		
1.	>2T	>2T	244G	1,11T	488G	141G
2.	>2T	>2T	109G	>2T	>2T	>2T

4-2. táblázat - A kiindulási állapot desztillált vízzel végzett mérései fektetett szigetelő esetén

A kiindulási mérések alapján megállapítható, hogy a szigetelők felületi ellenállása megfelelő, ugyanis a legtöbb esetben a műszer méréshatárán felüli értékek mérhetőek. Fontos még megemlíteni, hogy a nedves mérések esetén gyakran csak >2T szerepel, míg száraz esetben >5T a mért eredmény, ezt az magyarázza, hogy nedves esetben a mérőfeszültséget legfeljebb 2 kV-ra állítottam maximum, mivel nagyobb feszültségek esetén az elektródtartók megbízhatósága bizonytalanná vált, esetenként meghibásodtak.

A két táblázat méréseiből két további fontos következtetés vonható le, miszerint az 1-es számú szigetelő koszosan hagyott felülete nedvesítés hatására rosszabbul teljesített, mint a tisztított. A második pedig, hogy a nedves mérések esetén, gyakran a harmadik, törzsön végzett mérések értékei adódtak legalacsonyabbnak, ami annak köszönhető, hogy a szigetelők vízszintes elrendezésben voltak mérve, így könnyebben megállt a törzsön a víz, ez okozta az alacsonyabb ellenállás értékeket.



4.1. ábra - Az 1-es szigetelő törzsén végzett mérés

A kiindulási méréseket elvégeztem függőleges, a szigetelő függesztett elrendezése esetén is. Az itt kapott értékeket a 4-3. táblázat tartalmazza. A szigetelők törzsén ez esetben a mérések, szennyezések kivitelezése jelentősen nehezebb és kevésbé megismételhető volt, ezért ez esetben csak az ernyőkön végeztem méréseket.

		Tisztított rész					Eredeti (koszosabb) rész						
		Száraz		Csapvíz		Deszt. víz		Száraz		Csapvíz		Deszt. víz	
1	>5T	>5T	50G	915G	198G	1,58T	>5T	>5T	22,6G	106G	33,6G	152G	
2	>5T	>5T	18,7G	125G	755G	677G	>5T	>5T	1,02T	>2T	870G	>2T	

4-3. táblázat - A szigetelők felületén végzett kiindulási mérések függőleges esetben

A fektetett esettel szemben függőleges helyzetben a szigetelők felületén könnyebben, nagyobb mennyiségben megállt a víz, így kisebb ellenállás értékek mérhetőek, mint fektetett esetben.

4.1.1 A kaolinnal végzett mérések

A szigetelő felületére szórva, majd a felesleget egy enyhe fújással eltávolítva alakítottam ki a kívánt felületi minőséget. A felhordás során fontos tapasztalat, hogy nem szóródik szét egyenletesen a felületen, kisebb csomókba gyűlik. Ez az alábbi 4.2 ábrán is jól megfigyelhető.



4.2. ábra - Az 1-es számú szigetelő kaolinnal szennyezve

A szennyeződés felvitele előtt a szigetelők felületi ellenállását leellenőriztem, meggyőződve arról, hogy a kiindulási állapottal megegyező értékek mérhetőek. A kaolin felvitelét követően, annak száraz, nedvesítés előtti állapotában a felületi ellenállás mérése során nem tapasztalható romlás egyik szigetelő esetében sem, a felületen megülepedett száraz kaolin por nem okoz csökkenést a felületi ellenállás értékekben.

A nedvesítés során meg tapasztalható, hogy a hidrofobicitásra nagyon rossz hatással van, azt gyakorlatilag nullára csökkenti. Ez a felületi ellenállás mért értékeiben is láthatóak.

	Tisztított rész				Eredeti (koszosabb) rész			
	Csapvíz		Deszt. víz		Csapvíz		Deszt. víz	
1	374k	601k	434k	724k	176k	249k	189k	422k
2	77k	143k	130k	481k	130k	553k	48k	168k

4-4. táblázat - A kaolinnal végzett mérések

A mérések alapján arra lehet következtetni, hogy nem csak a hidrofobicitásra volt hatással a szennyeződés, hanem a víz vezetőképességére is, mivel a nedvesítés során mért értékek jelentősen alacsonyabbak, mint a kiindulási mérések esetén.

A szigetelők hidrofobicitása a kaolin folyóvízzel történő eltávolítása után a kiindulási állapottal megegyezőre áll vissza.

4.2 A cementtel szennyezett szigetelők

A cementtel végzett méréseknek több verzióját is elvégeztem, ezek leginkább a felület szennyezésének módjában, a cement felületre vitelének módjában különböztek.

4.2.1 A desztillált vízzel kevert cementen végzett mérések

Ennél a mérésnél a szigetelők felületére a cementet úgy vittem fel, hogy desztillált vízzel összekeverve a cementet egy elegyet kaptam, melyet a felületre kenve végeztem a mesterséges szennyezést. Ennél a mérésnél a száradásra kb. 1 óra időtartam állt rendelkezésre, az 1 óra végére száraznak mutatkozott a szennyeződés.



4.3. ábra - A cementtel történő szennyezés folyamata

	Tisztított rész						Eredeti (koszosabb) rész					
	Száradás után			Száradás előtt			Száradás után			Száradás előtt		
1.	3,04G	596M	110k	19k	31k	17k	226G	7,25G	23,2G	48k	44k	36k
2.	12,6M	116M	15,1M	24k	21k	15k	319M	5,3M	54,3M	66k	19k	22k

4-5. táblázat - A desztillált vízzel kevert cement kiindulási mérései

A táblázatban látható eredmények, azon mérések eredményei, melyeket a felkent szennyezőréteg száradása előtt, annak még nedves állapotában végeztem, valamint a száradás után mérhető értékek.

A mérések egyértelmű eredménye, hogy a cementes szennyeződés nagyon lerontja a szigetelők felületi ellenállását. Valamint megállapítható volt a mérések során, hogy a kiszáradt cement réteg a szigetelővel ellentétben nem rugalmas, hajlékony, így a felületről, annak hajlásakor könnyen leválik, de marad egy vékony cementporos réteg.

A cementréteg száradása után visszanedvesítés hatására ismét megvizsgáltam a cement réteg felületi ellenállásra gyakorolt hatását. Ezt megvizsgáltam mind desztillált víz, mind csapvíz esetén. Itt azonos szennyezési foltokon nem volt elvégezhető a kétfajta vízzel a mérés, így az eredmények úgy készültek, hogy mind a tisztított mind a koszos felületekből kettő-kettő (két-két ernyő, két-két törzs szakasz) mérési pont állt rendelkezésre. Egy a desztillált vízzel történő, egy a csapvízzel történő vizsgálat számára. Ezen pontok között nem volt átfedés, a 4.3 ábrán is látható módon.

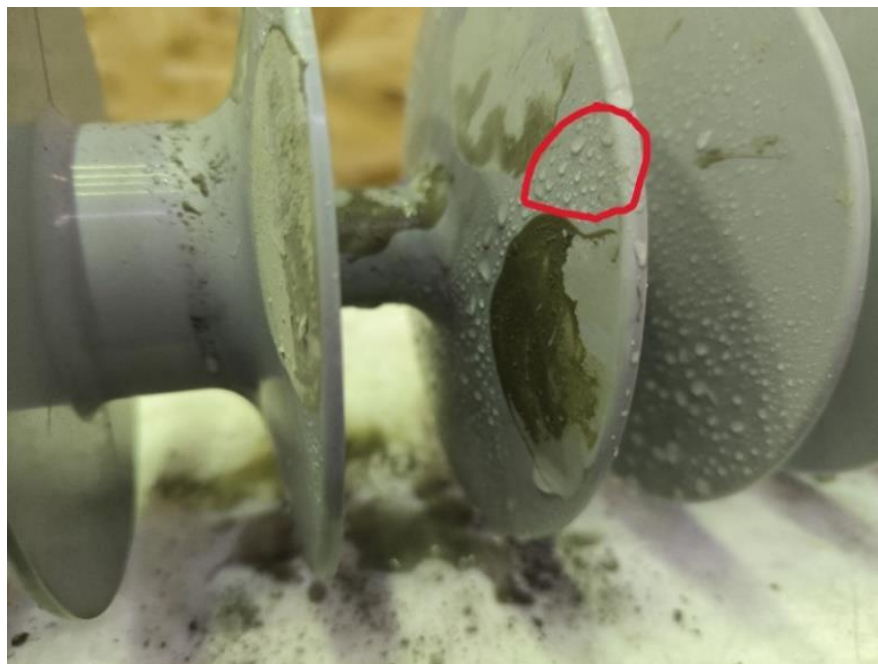
	Tisztított rész						Eredeti (koszosabb) rész					
	Csapvízzel			Deszt. vízzel			Csapvízzel			Deszt. vízzel		
1.	2,52M	286k	72k	245k	132k	73k	6,01M	798k	81k	881k	451k	38k
2.	63k	154k	39k	3,88M	264k	91k	42k	16k	32k	31k	210k	98k

4-6. táblázat - A visszanedvesítés után mért értékek

Az értékeken látható, hogy a száradás után visszanedvesített cement réteg a legtöbb mérés esetén nem rontotta olyan mértékben a felületi ellenállást, mint a nedvesen felvitt réteg. A száradás előtt felvitt réteg ellenállás értékeinek átlaga: 30,17 k Ω , míg a száradás után desztillált víz esetén 541 k Ω , csapvíz esetén 843 k Ω , összesen 692 k Ω . Ezen értékekből látható, hogy kb. 18-20 szoros ellenállás értékekre számíthatunk már egy

óra száradás utáni visszanedvesítés esetén is. Érdekes eredmény, hogy csapvíz esetén jobb, nagyobb értékeket kaptam eredményül.

A mérések során fontos megállapítás, hogy a száradás utáni visszanedvesítés során a cementréteg lemosódása jelentős volt, így hevesebb esőzések esetén jelentős tisztító hatás léphet fel ennél a szennyeződésnél. Fontos azonban megjegyezni, hogy minél tovább száradt a felületen található szennyeződés annál kisebb volt a lemosóhatás.



4.4. ábra - A 2-es számú szigetelő visszanedvesítés közben

Egy másik fontos, és üzembiztonság szempontjából is jelentős fontosságú tapasztalat, hogy a szennyezés helyén a felületen, a 4.4 ábrán is jól látható módon, a hidrofobicitás gyakorlatilag megszűnt. Ezzel szemben a cementfolt körül (piros színnel jelölve) látható, hogy a szigetelő hidrofobicitása nem károsodott.

További tapasztalat, hogy a szigetelők a cementes mérés után nem nyerték vissza teljesen hidrofobicitásukat. Meglepő módon, ahol már korábban is szennyezettek voltak, ott nagyobb mértékben, rövidebb idő alatt visszanyerték előnyös tulajdonságaikat.

4.2.2 A csapvízzel kevert cementtel végzett mérések

Az előbbi méréseket elvégeztem, abban a variációban is, ha a cementet a felületre vitel előtt nem desztillált, hanem csapvízzel kevertem.

	Tisztított rész						Eredeti (koszosabb) rész					
	Száradás után			Száradás előtt			Száradás után			Száradás előtt		
1.	3,75T	>5T	>5T	78k	84k	100k	>5T	>5T	>5T	76k	65k	85k
2.	>5T	>5T	520G	81k	68k	75k	>5T	2,92T	1,51T	43k	64k	36k

4-7. táblázat - A csapvízzel kevert cement kiindulási mérései

A táblázatban található eredmények hiteles értékeléséhez szükséges két alapvető információ. Az egyik, hogy a csapvízzel kevert cement esetén az oldatot hígabbra készítettem, mert ez a terepi szennyezettségi mértékhez közelebb áll. A másik fontos információ, hogy ennél a mérésnél a száradási időt megnőveltem 48 órára, ez szintén közelebb áll a terepen tapasztalható hatásokhoz. Ez rombolja az objektív összehasonlítást, viszont a terepi körülményeket pontosabban tükrözi ez a mérés.

Ez esetben látható, hogy a 48 órás száradási idő hozzájárult a réteg felületi ellenállásának növeléséhez. 48 óra száradási idő után az értékek nem kisebbek, mint például a kiindulási állapot nedves mérései, ebből az következik, hogy elegendő száradási idő után a szennyező réteg nem jelent nagyobb veszélyt, mint egy sima esőzés.

	Tisztított rész						Eredeti (koszosabb) rész					
	Csapvízzel			Deszt. vízzel			Csapvízzel			Deszt. vízzel		
1	60,3M	350M	171k	8,15M	10,1M	1,77M	3,07M	17,9M	103k	5,77M	7,64M	375k
2	8,61M	315k	2,36M	330M	8,29M	525k	147k	1,53M	299k	7,99M	1,77M	4M

4-8. táblázat - A visszanedvesítés utáni értékek

A 48 óra száradás után fontos tapasztalatok vonhatóak le, az első, hogy a szigetelők visszanyerték hidrofobicitásukat, tehát a cementes réteg felülete hidrofób lett, hasonlóan a tiszta felületekhez. A másik fontos tapasztalat, amely az elsőből könnyen belátható, hogy a lemosó hatás sokkal csekélyebb lett a hidrofobicitásnak köszönhetően. Ez azt jelenti, hogy sokkal hevesebb esőzés szükséges a szennyező réteg eltávolításához.

A törzseken mért alacsonyabb értékekért ismételt az orientáció a felelős. Látható, a korábbi visszanedvesítési táblázattal (4-6. táblázat) összevetve, hogy a 48 óra száradás után mérhető értékek nagyobbak az 1 óra száradás után mérhetőknél, feltehetően ez a nehezebb lemosódás, ezáltal kisebb oldódásnak köszönhető. Viszont egyértelműen

látszik, hogy egy szennyezetlen állapothoz képest még mindig jelentősen rosszabb értékeket kapunk.

4.2.3 A felületre szórt cementpor

A méréseket elvégeztem, úgy is, hogy a felületre szárazon szórtam a cementport, majd azt utólag nedvesítettem. Ezen méréseknél adott nedvesítéshez csak 2-2 érték tartozik. Ennek magyarázata, hogy ennél a mérésnél a szigetelők függőlegesen voltak rögzítve, így a törzsükön nem végeztem el a mérést. A szórt cementporos mérés pontosabb modellezése a valóságos folyamatoknak, mivel a cement szállópor formájában tud lerakódni a szigetelők felületén. A szigetelők felületének hidrofobicitása a szennyezés előtt a kiindulási állapottal megegyező volt. A vizsgálat előtt a szigetelők felületi ellenállása a kiindulási értékkel megegyező volt.



4.5. ábra - A szigetelő felületére szórt cementpor

A cementpor szigetelőre történő szórását követően a felesleg a szigetelő megdöntésével és finoman megkocogtatásával lett eltávolítva. A 4.5 ábrán még a felesleg eltávolítása előtti állapot látható. A felesleg eltávolítását követően a felületen egy nagyon vékony cementporból álló jól összefüggő réteg maradt.

	Tisztított rész				Eredeti (koszosabb) rész			
	Csapvíz		Deszt. víz		Csapvíz		Deszt. víz	
1	108k	190k	62k	47k	139k	124k	57k	46k
2	12k	14k	9k	9k	10k	25k	7k	11k

4-9. táblázat - A cementpor nedvesítése utáni értékek

Látható, hogy a 2-es szigetelő értékei konzisztensen alacsonyabbak, mint az 1-es szigetelőnél. Ennek magyarázatául az szolgál, hogy a 2-es szigetelőn jobban megtapadt a cement, így nagyobb mennyiségben volt jelen az oldatban, amely már korábbi mérések alapján is láthatóan alacsonyabb értékekhez vezet. A mérés során megfigyelhető volt, hogy a víz nem lemosta a cementet, inkább keveredett azzal és egy összefüggő vékony vízhatárt alakított ki. Látható, hogy ez az eset is veszélyes, mivel jelentősen lecsökkentek a felületi ellenállás értékek.

4.3 Fémporral végzett mérések

A következőkben a felületre szórt, majd nedvesített fémporral végzett mérések eredményeinek bemutatása történik. A fémpor egy köszörű környékéről került begyűjtésre és túlnyomó részben vasat tartalmazott. Ez annak köszönhető, hogy begyűjtése mágnessel történt, ezáltal a nem kívánatos köszörűkő szemcsék és hasonló anyagok nem kerültek begyűjtésre. A mérések a cementporhoz hasonló módon kerültek elvégzésre.



4.6. ábra - A felületre szórt fémpor a felesleg eltávolítása előtt

A szigetelők felületét a szennyezés előtt mérve a kiindulási értékekkel megegyező értékeket kaptam. A mérések során azt tapasztaltuk, hogy a fémpor felvitele előtt és után ugyanazok az értékek mérhetőek, mint a kiindulási, szennyezetlen állapotban. Ez azzal magyarázható, hogy a fémpor nem alakított ki egybefüggő réteget a felületen, inkább kupacokban rakódott le.

	Tisztított rész				Eredeti (koszosabb) rész			
	Csapvíz		Deszt. víz		Csapvíz		Deszt. víz	
1	210k	280k	695k	441k	141k	123k	77k	143k
2	83k	91k	264k	278k	198k	145k	170k	378k

4-10. táblázat - A nedvesített fémporral végzett mérések

Megállapítható, hogy a tisztított részekben a desztillált víz esetében kisebb volt a romlás, mint a tisztítatlan felületek esetén. A felületen tapasztalható volt a cementporhoz hasonlóan a hidrofobicitás romlása is, viszont a fémpor szemcséi leginkább a vízréteg szélein halmozódtak fel, így könnyebben le is mosódnak. Az 1-es szigetelő tisztított részein a fémpor sokkal kisebb mértékben tapadt meg, ez az értékekben is megfigyelhető. A koszos részekben közel hasonló mértékben tapadt meg.

4.4 Korommal végzett mérések

A fémporhoz és cementporhoz hasonló módon korommal is elvégeztem a vizsgálatot. A kormot egy kandallóból gyűjtöttem, figyelve arra, hogy hamu ne kerüljön a mintába. Ezt úgy értem el, hogy először egy hamuporszívóval a fahamut eltávolítottam a korom felületéről. A korom felvitele a szigetelőkre az előbbiekkal megegyező módon történt. A korom a cementhez hasonlóan egy vékony, egybefüggő réteget képzett a felületen. A szigetelőket szárazon vizsgálva a szennyezést követően, a kiindulási állapottal megegyező értékek voltak mérhetőek. Az értékek alapján tehát megállapítható, hogy száraz állapotban a korom sem jelent problémát a szigetelő felületén.

	Tisztított rész				Eredeti (koszosabb) rész			
	Csapvíz		Deszt. víz		Csapvíz		Deszt. víz	
1	115k	168k	102k	137k	36k	45k	71k	155k
2	44k	36k	28k	33k	17k	526k	54k	36k

4-11. táblázat - Korom szennyezéssel végzett mérések

A táblázatból leolvasható, hogy az 1-es szigetelő esetén nagyobb értékeket mértem, melyhez ismét hozzájárult, hogy a szigetelő felületén a korom is nehezebben tapadt meg. A 2-es szigetelő koszosabb részén egy esetben a mért ellenállás értéke kiugróan magas, 526 k Ω . Ez a mérés valószínűleg olyan felületen történt, ahova kevesebb korom jutott, de itt is látható, hogy ez az érték egy tiszta, de nedves felületről sok nagyságrenddel elmarad. A kormos rész nedvesítése során a nagyobb szemcsék könnyen lemosódtak, a kisebb szemcsék, viszont inkább oldódtak a vízben és egy fekete színű oldatot hoztak létre. A szigetelő hidrofobicitása a cementporral szennyezett esetekhez hasonló módon viselkedett.

A mérési tapasztalatok azt mutatják, hogy kormos és fémporos mérések után a szigetelők felületének hidrofobicitása gyorsabban regenerálódott, ezen szennyeződések esetén kb. fél-egy óra alatt már a kiindulás állapottal szinte megegyező hidrofobicitás volt tapasztalható. A cement tesztelése során a hidrofobicitás hasonló mértékű regenerációjához volt, hogy 24 órára is szükség volt.

4.5 Téglaporos szennyeződés

A mérések részét képezi egy téglaporral szennyezett szigetelő mérése is, ez a szigetelő nem egyezik meg egyik korábbi szigetelővel sem, ezért az eredmények sem összehasonlíthatóak közvetlenül. De ez a szigetelő valós terepi körülmények között került szennyezésre, ezért kiemelt fontossággal bír. A szigetelőt itt előbb szennyezett állapotában vizsgáltam, de ezt követően megtisztítottam és megismételtem a méréseket. Ez lehetővé tette a téglapor hatásának megállapítását.



4.7. ábra - A téglaporos szigetelő

Az ábrán látható a szigetelő felületén egy sárgás elszíneződés, ez maga a lerakódott téglapor. Ennek a szigetelőnek a hidrofobicitása nagyon gyenge volt, gyakorlatilag minden pontján a szigetelőnek egybefüggő vízréteg tudott kialakulni. A szigetelőn 6 mérési pont került felvételre, a 2,3,4-es mérési pontok ernyőkön a másik három pedig a szigetelő törzsén.

Mérési p.	Tisztítás előtt			Tisztítás után		
	Száraz	Csapvíz	Deszt. víz	Száraz	Csapvíz	Deszt. víz
1	1,94T	2,26M	7,71M	>5T	2,98M	9,45M
2	>5T	2,91M	5,83M	>5T	9,58M	19,6M
3	>5T	5,4M	6,96M	>5T	7,29M	11,9M
4	>5T	14,1M	52M	>5T	4,4M	12,8M
5	1,68T	1,34M	1,56M	>5T	15,8M	14,6M
6	3,63T	2,71M	2,47M	>5T	2,87M	15,7M

4-12. táblázat - A téglaporos szigetelőn végzett mérések eredményei

A táblázatban az összetartozó oszlopok azonos színezéssel szerepelnek, ezek azok az értékek, melyek azonos körülmények között azonos pontokon kerültek mérésre. A tisztítás desztillált vizes ronggyal történt. Látható, hogy a tisztítást követően az azonos körülmények között mért értékek javultak, kivéve a 4-es mérési pontnál. Az eredmények többsége alapján megállapítható, hogy a tisztításnak volt hatása a szigetelő felületére és ez egy javulást eredményezett. A szigetelő felülete 24 óra elteltével még a tisztításnak köszönhetően sem nyerte vissza hidrofobicitását, felülete ugyanúgy viselkedett, mint a tisztítás előtt.

A téglaporos szennyezés esetén a desztillált- és csapvíz között meg lehet figyelni különbséget. Ezt az magyarázhatja, hogy a téglapor nagyon kis mennyiségben volt a szigetelő felületén, így a vízben található töltéshordozók nagyobb szerepet játszottak a mért ellenállás értékben, mint a többi esetben.

5 Összegzés

Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a vizsgált szennyeződéseknek jelentős hatása lehet a szigetelők felületi ellenállására, különösen nedves körülmények között. A mérések alapján egyértelműen elkülöníthetők a szigetelők szennyezett és tiszta állapotai. A szigetelők felületi ellenállás mérésével különbséget lehet tenni szennyezett és nem szennyezett szigetelők között akár azok száraz állapotában is. Ez látható a cementes, illetve a téglaporos szigetelők vizsgálati eredményeinek esetében is. Ezek alapján ipari környezetben érdemes lehet a használata, mivel rendkívül gyors, egyszerű és olcsó módszer, melynek segítségével extrém, figyelmet igénylő esetek kimutathatóak. A terepi alkalmazhatóság megítéléséhez még szükséges volna megvizsgálni a páratartalom hatását a mérési eredményekre.

A végzett mérések alapján az is belátható, hogy a nedvesítés során nem sok szerepe van a víz minőségének a folyamatok szempontjából. Ez azt jelenti, hogy a terepen, a szigetelők felületét nedvesítő víz tisztasága, legyen az köd, eső, kisebb mértékben befolyásolja a felületi ellenállást, mint maga a szennyeződés.

A kísérletek alapján az is látható, hogy az itt felsorolt nem szokványos szennyezőanyagok mindegyike káros hatással van a szigetelők felületi ellenállására, hidrofobicitására. A mérések alapján a hidrofobicitás és a mért felületi ellenállás között is egyértelmű kapcsolat fedezhető fel, miszerint a rosszabb hidrofobicitású felületek még szennyezőanyagok nélkül is sokkal gyengébb értékeket produkálnak a kialakulni képes összefüggő vízrétegnek köszönhetően.

Mivel a szennyező anyagok jelentősen befolyásolták az ellenállás értékeket, így azokon a területeken, ahol ezek a szennyeződések jelen vannak ott a szigetelők lecsökkent ellenállása miatt feltételezhetően nagyobb szivárgási áramok is jelen vannak, ami hozzájárul a szigetelők gyorsabb öregedéséhez. A jelen dolgozatban végzett vizsgálatok alapján érdemes további kutatást végezni a felületi ellenállás és a szennyezettség közötti kapcsolat feltárására, különböző terepről gyűjtött minták elemzésével, valamint további nem szokványos szennyeződések azonosításával.

Irodalomjegyzék

- [1] M. Albano, Ronald Thomas Waters, Adnan Krzma, H. Griffiths – Artificial pollution layer characterization on conventional and textured silicone-rubber insulators
Conference paper, August 2015, ISH2015
- [2] Arshad, A. Nekahi, S.G. McMeekin, M.Farzaneh: Investigating Flashover Behaviour of Silicone Rubber Insulators under Contaminated Conditions
2015 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Pages 856-859
- [3] Nazir, Tariq & Khalid, Arslan & Akram, Shakeel & Mishra, Palash & Kabir, Imrana & Yeoh, Guan & Phung, Toan. (2023). Electrical tracking, erosion and flammability resistance of high voltage outdoor composite insulation: Research, innovation and future outlook.
Materials Science and Engineering R Reports. 156. 100757.
- [4] Gerardo Montoya, Isaias Ramirez, J. I. Montoya; Correlation among ESDD, NSDD and leakage current in distribution insulators
IEE Proceedings - Generation Transmission and Distribution, May 2004
151(3):334 – 340
- [5] Arshad, A. Nekahi, S.G. McMeekin, M.Farzaneh: Effect of Pollution Severity on Electric Field Distribution along a Polymeric Insulator,
2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), ISBN: 978-1-4799-8903-4, Pages 612-615
- [6] Ren, A.; Liu, H.; Wei, J.; Li, Q. Natural Contamination and Surface Flashover on Silicone Rubber Surface under Haze–Fog Environment.
Energies 2017, 10, 1580. <https://doi.org/10.3390/en10101580>
- [7] Slama, M.E.A.; Krzma, A.; Albano, M.; Haddad, A.M. Experimental Study and Modeling of the Effect of ESDD/NSDD on AC Flashover of SiR Outdoor Insulators. *Energies* **2022**, *15*, 3782. <https://doi.org/10.3390/en15103782>
- [8] Chibuike Ilomuanya, Shahab Farokhi, Azam Nekahi: Performance Evaluation of Outdoor High Voltage Glass Insulators in High Pollution Industrial Areas Using Simulated Acid Rain Contamination
December 2021, IEEE Access Volume 10.2022, Pages 80600-80608
DOI: [10.1109/ACCESS.2022.3193237](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3193237)
- [9] Wei Wang, Hailiang Lu, Chun Li, Yeqiang Deng, Lei Lan, Xishan Wen, Bing Luo, Wei Xiao: Study on the relationship between the characteristics of water droplets on the shed of composite insulators and the pollution flashover voltage,
Energy Reports, Volume 8, Supplement 5, 2022, Pages 1071-1077,
ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.265>

- [10] Bin Cao, Hongwei Mei, Liming Wang, Xiangyun Fu, Zhifu Zhang, He Gao, Xiangjun Lin: The Equivalent Dissolved Salt Deposit Density of Contamination on Surface of Silicone Rubber, 2015 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Pages 676-679
- [11] Wang X, Lu S, Wang T, Qin X, Wang X, Jia Z. Analysis of Pollution in High Voltage Insulators via Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Molecules*. 2020;25(4):822. Published 2020 Feb 13. doi:10.3390/molecules25040822
- [12] Jamshid Eslamdoust, Seyed Mohsen Hosseini, Fatemeh Kardel, Ashutosh Kumar Pandey - Environmental pollution biomonitoring around a cement factory based on the Air Pollution Tolerance Index of some tree species
Springer Nature, 2023, Vol.195:1425, Issue 12
- [13] M Santoso, D D Lestiani, S Kurniawati, E Damastuti, I Kusmartini, D Prakoso, Dimas, Triyambodo and Rita: Elemental Composition of Particulate Matter Air Pollution Collected Around Industrial Area in East Java
2019 *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 303 012036 doi: 10.1088/1755-1315/303/1/012036
- [14] Loxham, Matthew & Nieuwenhuijsen, Mark. (2019). Health effects of particulate matter air pollution in underground railway systems – A critical review of the evidence. *Particle and Fibre Toxicology*. 16. doi: 10.1186/s12989-019-0296-2.
- [15] Civiltoday, Tahsina Alam: Composition of Bricks - Function of Ingredients
<https://mail.civiltoday.com/civil-engineering-materials/brick/132-brick>
Elérés dátuma: 2024.11.01

Függelék