

# **MUUNTAJAN ERISTYSRAKENTEIDEN IMPREG- NOITUMINEN ERISTYSNESTEESSÄ**

Matti Kivioja

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2012  
Sähkötekniikka  
Sähkövoimatekniikka

**TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU**  
Tampere University of Applied Sciences

# TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikka  
Sähkövoimatekniikka

MATTI KIVIOJA:

Muuntajan eristysrakenteiden impregnoituminen eristysnesteessä

Opinnäytetyö 80 sivua, josta liitteitä 21 sivua  
Toukokuu 2012

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää muuntajan kuivaus- ja impregnoitumisprosessia kuvaava koejärjestely ja rakentaa mittauskytkentä, millä voidaan tutkia eristysnesteiden impregnointia eristemateriaaleihin. Mittauskytkennällä oli tarkoitus selvittää eri eristysnesteiden impregnointiajat erilaisiin muuntajassa käytettäviin eristemateriaaleihin. Selvittämällä eristemateriaalien impregnoitumisajat, voidaan optimoida muuntajien seisonta-aika, joka siten parantaa laatua sekä tehostaa tuotantoprosessia.

Öljyeristeisien muuntajien eristysrakenne perustuu kiinteään eristemateriaalin ja eristysnesteiden käyttöön. Yleisimmin käytetään selluloosapohjaisia materiaaleja ja muuntajaöljyä niiden hyvien ominaisuuksien ja edullisuuden takia. Puumateriaalin ja muuntajaöljyn käyttö ei sovellu kaikkiin käyttöolosuhteisiin, vaan niiden rinnalle on kehitetty kemiallisesti muokattuja synteettisiä eristemateriaaleja ja -eristysnesteitä. Synteettisten aineiden käytön ongelmana on, että niiden kaikkia ominaisuuksia ja impregnointiaikoja ei tunneta vielä kovin hyvin.

Tutkittavista eristemateriaaleista tehtiin koekappaleita rakentamalla niistä kondensaattoreita. Koekappaleet käsiteltiin muuntajan kuivaus- ja tyhjiöprosessissa, jonka jälkeen ne upotettiin eristysnesteeseen. Eristysnesteiden impregnointi muutti eristemateriaalin permittiivisyyttä, jota tutkittiin mittaamalla koekappaleiden kapasitanssia ja häviökerrointa.

Koejärjestelyn kehittäminen jatkui koko mittausprosessin ja siihen tehdyt muutokset toivat luotettavampia tuloksia. Mittaustuloksissa olevien virheiden takia koekappaleiden arvoja ei voida vertailla toisiinsa, mutta yksittäisen koekappaleen kapasitanssin muutosta pystyttiin tutkimaan, koska virhe ei muuttunut impregnoitumisen aikana. Mittaustulosten käsittelyn yhteydessä selvisi optimiolosuhteet eristysnesteiden impregnoinnille ja niiden impregnointiajat eri eristemateriaaleihin.

---

Asiasanat: eristemateriaali, impregnointi, muuntajan eristysrakenne, synteettinen eristysneste

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Electrical Engineering  
Electric Power Engineering

MATTI KIVIOJA  
Impregnation of Insulation Fluids

Bachelor's thesis 80 pages, appendices 21 pages  
May 2012

---

The purpose of this thesis was to develop a system to measure insulating materials capability of insulation in different insulation fluids. The measuring system matches with real drying and vacuum processes of transformers. The goal was to figure out how long it takes from different insulation fluids to impregnate into different insulating materials. Once the impregnation time is known, the quality and manufacturing process of transformers can be optimized.

The insulation structure of transformer is usually based on common use of oil and cellulose materials because of their good insulation qualities and affordable price. This insulation structure does not work in all circumstances and that is why there are chemically treated synthetic insulation fluids and materials. The problem with these synthetic substances is that some of their qualities and impregnation time are not known.

In order to be measured, insulating materials were made to capacitors. This modification was made with electrodes. These specimens were treated in drying and vacuum processes and embedded in insulation fluid. The impregnation of the insulation fluid into specimen changed the insulating materials permittivity which then changed the measured capacitance and loss factor.

The development of the measuring system continued after every measurement. These changes made improvement to the measuring results. Due to the measuring errors, different specimen cannot be compared with one another; however impregnation can still be inspected because these measuring errors do not change throughout the measurement. From the measuring results become clear optimum circumstances for the impregnation process and impregnation time for different insulation fluids into different insulating materials.

---

Key words: impregnation, insulation material, insulation structure, synthetic insulation fluids

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	ABB YRITYKSENÄ .....	7
2.1	ABB-yhtymä .....	7
2.2	ABB Oy Muuntajat .....	7
3	MUUNTAJA .....	8
4	MUUNTAJAN ERISTYSRAKENNE.....	10
4.1	Eristysnesteet .....	12
4.1.1	Mineraaliöljy .....	12
4.1.2	Synteettiset eristysnesteet .....	13
4.2	Eriste sähkökentässä .....	14
4.2.1	Jännitteenjakautuminen eristysrakenteessa.....	15
4.2.2	Tehohäviöt eristysrakenteessa.....	17
4.3	Eristysnesteiden impregnointi.....	18
4.3.1	Impregnointisyvyys.....	19
4.3.2	Muuntajan impregnoitusprosessi .....	20
5	MITTAUSJÄRJESTELY.....	21
5.1	Tutkittavat eristeet .....	21
5.1.1	Koekappaleet.....	22
5.1.2	Kondensaattorit .....	23
5.2	Mittalaitteet ja kaapelit .....	26
5.2.1	IDAX-300 .....	26
5.2.2	Agilent Switch Unit .....	27
5.2.3	Releohjaus ja kaapelit .....	27
5.2.4	Lämmitysjärjestelmä.....	29
5.3	Koejärjestely .....	30
5.3.1	Säiliö .....	30
5.3.2	Mittauskytkentä.....	31
5.3.3	Mittaus .....	32
6	MITTAUSTULOKSET.....	34
6.1	Koekappaleiden erot .....	34
6.2	Koejärjestelyn kehitys.....	36
6.2.1	Ensimmäinen mittausarja .....	37
6.2.2	Toinen mittausarja .....	37
6.2.3	Kolmas mittausarja .....	38
6.3	Midel 75 °C lämmityksellä.....	39
6.3.1	Käämikoekappaleet.....	40
6.3.2	Tasokoekappaleet.....	48
6.3.3	Päätelmiä.....	54
6.4	Eristysnestevertailu .....	54
6.5	Impregnointiajat.....	56
7	YHTEENVETO .....	57
	LÄHTEET.....	59
	Liite 1. Nytro 10XN datasheet.....	60
	Liite 2. MIDEL 7131 datasheet.....	62
	Liite 3. Ensimmäisen mittauksen tulokset, Midel 75 °C.....	64
	Liite 4. Toisen mittauksen tulokset, Midel 23 °C.....	69
	Liite 5. Kolmannen mittauksen tulokset, Nytro 10 XN 23 °C.....	75



## LYHENTEET JA TERMIT

$A$	pinta-ala, $m^2$
$AC$	vaihtovirta
$C$	kapasitanssi, F
$D$	sähkövuon tiheys, $C/m^2$
$d$	etäisyys, m
$DC$	tasavirta
$E$	sähkökentän voimakkuus, V/m
$f$	taajuus, Hz
$I$	virta, A
$L$	impregnointisyvyys
$l$	pituus, m
$N$	käämikierrösmäärä, lkm
$P$	teho, W
$R$	resistanssi, $\Omega$
$r$	säde, m
$RMS$	tehollisarvo
$T$	pintäjännitysvoima, N/m
$t$	aika, h
$U$	jännite, U
$Z$	impedanssi, $\Omega$
$\cos \varphi$	tehokerroin
$\cos \theta$	kontaktikulma
$\omega$	kulmanopeus, rad/s
$\tan \delta$	häviökerroin
$\varepsilon$	permittiivisyys
$\eta$	viskositeetti, $mm^2/s$

## 1 JOHDANTO

ABB Oy Muuntajilla on vuosikymmenien kokemus muuntajien valmistuksesta. Viime vuosina muuntajatehtaan profiili on muuttunut suur- ja jakelumuuntajien valmistajasta erilaisiin sovelluskohteisiin räätälöityjen erikoismuuntajien valmistajaksi. Käytännössä tämä muutos on tarkoittanut uudenlaisia ja monimutkaisempia ratkaisuja muuntajien rakenteisiin.

Synteettiset eristysnesteet ja eristemateriaalit ovat osa niitä ratkaisuja, joilla muuntajan toimivuus turvataan haastavimmissa käyttöolosuhteissa. Synteettiset eristysnesteet ovat tavallista öljyä ympäristöystävällisempiä ja ne kestävät paremmin kuumuutta. Näiden synteettisten aineiden käyttö on sen verran uutta, ettei niiden kaikkia ominaisuuksia vielä tunneta kovin hyvin. Muuntajan eristysrakenteen jännitekestoisuuden ja laadun takia on tärkeää, että eristysneste impregnoi hyvin muuntajan eristemateriaaleihin. Impregnoitumisprosessin nopeuden selvittämisellä optimoidaan tuotantoprosessia.

Muuntajan aktiiviosalla on kuivaus- ja tyhjiökäsittelyn jälkeen seisona-aika, jonka kuluessa eristysneste tulisi impregnoida muuntajan eriste- ja tukirakenteisiin. Tämän insinööriyön tarkoituksena on selvittää laadun ja tuotantoprosessin kannalta optimaalinen seisona-aika. Työssä kehitetään muuntajan impregnointiprosessia vastaava koejärjestely ja mittausjärjestely, jolla tutkitaan eristysnesteiden impregnointia erilaisiin muuntajassa käytettäviin eristemateriaaleihin.

## 2 ABB YRITYKSENÄ

### 2.1 ABB-yhtymä

ABB on kansainvälinen sähkövoima- ja automaatioteknologiayhtymä, jolla on 135 000 työntekijää noin sadassa maassa. Yhtiön pääkonttori sijaitsee Sveitsin Zürichissä ja toimitusjohtajana toimii Joseph Hogan. ABB-yhtymällä on viisi ydinliiketoiminta-aluetta: sähkövoimatuotteet, sähkövoimajärjestelmät, sähkökäytöt ja kappaletavara-automaatio, pienjännitetuotteet sekä prosessiautomaatio. (ABB Group presentation February 2012.)

Suomessa toimivalla ABB Oy:llä, on 7000 työntekijää yli 30 paikkakunnalla. Tehdas-keskittymät sijaitsevat Helsingissä, Vaasassa ja Porvoossa. ABB Oy:n toimitusjohtaja on Tauno Heinola. (ABB Suomessa avainluvut 2011.)

### 2.2 ABB Oy Muuntajat

ABB Oy Muuntajat on osa Suomen ABB Oy:n ja maailmanlaajuisen ABB-yhtymän sähkövoimatuotteiden divisioonaa. Muuntajatehdas työllistää noin 300 ihmistä ja tehtaanohtajana toimii Mikko Helinko. ABB Oy Muuntajat valmistaa sovelluskohtaisia erikoismuuntajia ja vastaa niiden tuotekehityksestä. Tehdas sijaitsee Vaasassa Strömberg Park –yrityspuistossa. (ABB Transformers Official Presentation 2011.)



KUVA 1. ABB Oy Muuntajat ja Strömberg Park -yrityspuisto

### 3 MUUNTAJA

Muuntaja on sähkölaite, jolla muutetaan vaihtosähkön jännitteen suuruutta mahdollistaen sähkönsiirto voimalaitoksilta kuluttajille. Sähkön tuottopisteellä jännitettä on nostettava jännitehäviöiden takia sitä suuremmaksi, mitä suurempia tehoja siirretään ja mitä pidempi voimansiirtoetäisyys on kyseessä. Kulutuspisteillä jännitteen tasoa on vuorostaan alennettava kuluttajien turvallisuus- sekä sähkölaitteiden kustannussyistä. (Paavola 1970, 151.)

Johdolla syntyvät pätötehohäviöt ( $P_h$ ) ovat riippuvaisia johdon resistanssista ( $R$ ) ja virran ( $I$ ) neliöstä (kaava 1) (ABB Muuntajatekniikan perusteet, 5).

$$P_h = 3RI^2 \quad (1)$$

Kolmivaihejärjestelmässä johdolla siirrettävä teho ( $P$ ) on vaihetehojen summa. Vaiheteho on taas riippuvainen vaihejännitteestä ( $U_v$ ), joka on pääjännite jaettuna kolmen neliöjuurella. Symmetrisessä kolmivaihejärjestelmässä vaihevirratt ovat yhtä suuret. Seuraavassa kaavassa on esitetty verkolla siirrettävän tehon riippuvuus sekä vaihe- että pääjännitteestä (kaava 2). (ABB Muuntajatekniikan perusteet, 5.)

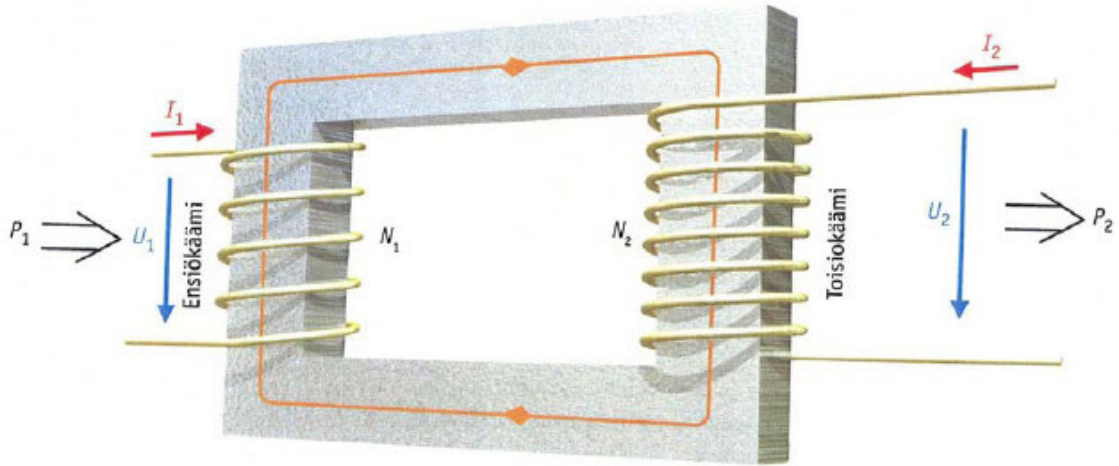
$$P = 3 \cdot U_v I \cos \varphi = \sqrt{3} UI \cos \varphi, \quad (2)$$

missä  $U$  on pääjännite,  $I$  on verkon virta ja  $\cos \varphi$  on tehokerroin.

Jännitteen kasvaessa myös sähköverkon rakentamiskustannukset kasvavat. Tämän takia on syytä porrastaa jännitetasot tarvittavien tehojen ja siirtoetäisyyksien mukaan. (ABB Muuntajatekniikan perusteet, 5.)

Muuntajan rakenne koostuu aktiivisista ja passiivisista komponenteista. Muuntajan aktiiviset osat, eli sydän ja käämitykset muodostavat yhdessä aktiiviosan. Muuntajan sydän valmistetaan raudasta ja sen tehtävä on ohjata magneettivuo kulkemaan käämityksen kautta. Rautasydämen ympärille asennetaan kuparista tai sähköalumiinista valmistetut käämitykset. Käämitykset koostuvat ala- ja yläjännitekäämeistä. Niitä voidaan kut-

sua myös ensiö- ja toisiokäämeiksi tehon kulkusuunnan mukaan. Muuntajan aktiiviosan toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2. (ABB Muuntajatekniikan perusteet, 14, 17.)



KUVA 2. 1-vaihemuuntajan ensiö ja toisio

Muuntajan toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Ensiökäämissä kulkeva vaihtovirta synnyttää muuttuvan magneettikentän rautasydämeen, joka indusoi toisiokäämiin vaihtovirran. Jännitettä voidaan joko pienentää tai suurentaa ensiö- ja toisiokäämien kierroslukujen suhteella, eli muuntosuhteella (kaava 3). (ABB Muuntajatekniikan perusteet, 7.)

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}, \quad (3)$$

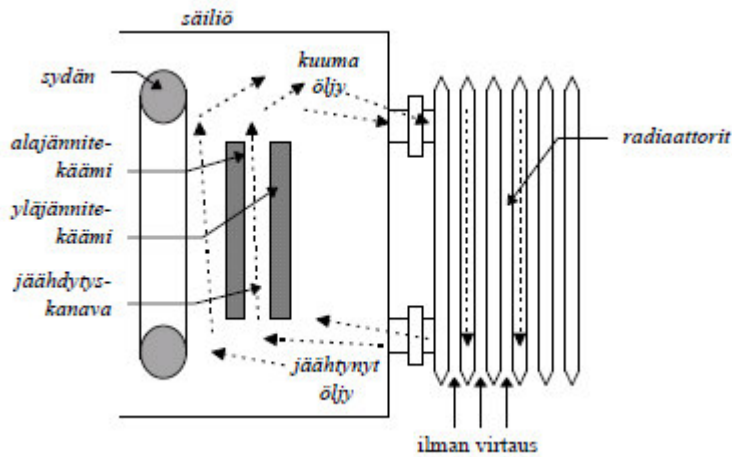
missä  $U$  on jännite,  $N$  on käämin kierrosluku ja  $I$  on virta. Alaindeksi 1 viittaa ensiöön ja alaindeksi 2 viittaa toisioon.

Muuntajan passiiviset osat: tukirakenne, eristysosat ja jäähdytyslaitteisto mahdollistavat muuntajan toimivuuden kaikissa käyttötilanteissa. Jäähdytyslaitteisto toimii yksinkertaisimmillaan siten, että eristysneste siirtää lämpöä aktiiviosalta radiaattoreille, jotka siirtävät lämpöä eteenpäin ympäröivään tilaan. Tämä on ns. luonnollinen öljy- ja ilmajäähdytys. Jäähdytystä voidaan nopeuttaa ja tehostaa esimerkiksi asentamalla ilmanjäähdyttimet radiaattoreihin tai nopeuttaa öljyn kiertoa pumpuilla.

(ABB muuntajatekniikan perusteet, 21–32.)

#### 4 MUUNTAJAN ERISTYSRAKENNE

Muuntajat sisältävät paljon erityyppisiä eristysrakenteita, joihin kohdistuvat jänniterasitukset poikkeavat toisistaan. Yleensä muuntajan eristysrakenne perustuu eristysnesteeseen ja kiinteän eristemateriaalin muodostamaan kanavaeristykseen. (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2003, 139.)



KUVA 3. Muuntajan rakenneperiaate

Kuvassa 3 on esitetty muuntajan yhdistetty eristysrakenne (ABB Muuntajatekniikan perusteet, 9). Öljy kiertää jäähdytysjärjestelmän avulla aktiiviosan kanavissa kiinteiden eristemateriaalien väleissä. Kuvassa 4 on esimerkki kanavaeristyksestä ala- ja yläjännitekäämien välillä.

Yhdistetyillä eristerakenteilla parannetaan sähkönlujuutta yhdistämällä nesteen ja kiinteän eristeen hyvät puolet. Paperin kaltaista materiaalia on helppo muotoilla haluttuun rakenteeseen ja nestemäinen eriste täyttää eristystilan tehokkaasti ja mukautuu lämpötilan aiheuttamiin muodonmuutoksiin. (Aro ym. 2003, 119.)

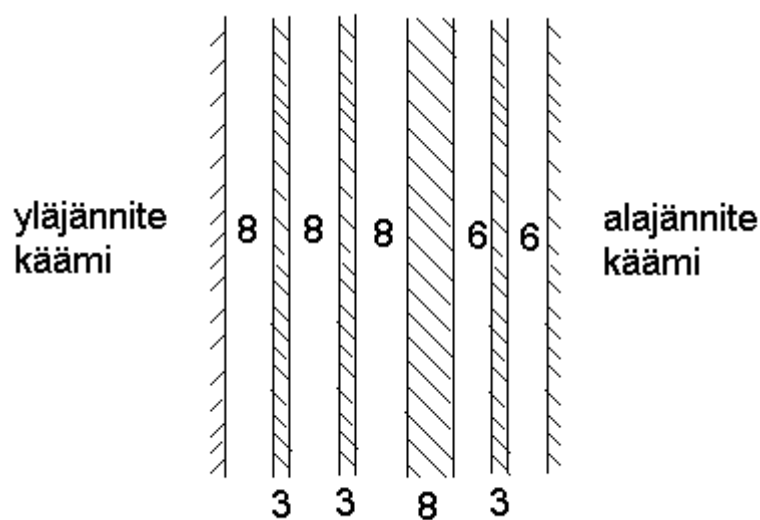
Taulukossa 1 on esitetty eri eristysaineiden sähkönlujuuksia normaalissa ilmanpaineessa, ilmankosteudessa ja huoneenlämmössä. (Aura & Tonteri 2000, 35.)

TAULUKKO 1. Eristysaineiden sähkönlujuudet

Eristysaine	Sähkönlujuus (kV/mm)
Ilma	n. 3
Muuntajaöljy	20–30
Paperi (kuiva)	6
Paperi (öljyimpregnoitu)	40–75

Taulukosta 1 nähdään, että öljyimpregnoitu paperi kestää huomattavasti paremmin jänniterasitusta kuin kuiva paperi. Nesteen lämpötilan kasvu sekä erilaiset epäpuhtaudet (pöly, kuidut, kosteus ja kaasut) heikentävät eristysominaisuuksia. Eristysnesteessä olevat epäpuhtaudet saattavat muodostaa homogeenisen sähkökentän vaikutuksenalaisena ns. kuitusilloja. Epäpuhtauksissa olevien kosteuden ja johtavien hiukkasten takia kuitusillassa syntyy vuotovirtaa, joka kuumentaa sillassa olevia epäpuhtauksia. Kuitusillan kuumeneminen synnyttää eristysnesteeseen kaasukuplia, jotka heikentävät nesteen eristyskykyä. (Aro ym. 2003, 117–118). Eristysaineiden eristyskykyä käsitellään tarkemmin luvussa 4.2.

Muuntajan kanavaeristyksissä pitkä eristysnesteväli on jaettu lyhyempiin osiin esimerkiksi prespaanilieriöin tai – levyin. Kanavaeristyksillä ehkäistään eristysnesteeseen mahdollisesti syntyvät kuitusillat. Seuraavassa kuvassa (kuva 4) on esitetty kanavaeristuksen periaaterakenne. (Aro ym. 2003, 120.)



KUVA 4. Kanavaeristuksen periaatekuva

Kuvan 4 esimerkissä ylä- ja alajännitekäämien väli on jaettu öljy- ja prespaani väleihin. Öljyvälit on jaettu 6-8 mm väleihin sekä prespaanivälit on jaettu 3 ja 8 mm väleihin. Kanavaeristyksillä parannetaan eristysrakenteen jännitekestoisuutta, joka on sitä parempi, mitä pienempiin osiin öljyvälit jaetaan. (Aro ym. 2003, 120.)

#### 4.1 Eristysnesteet

Eristysnesteitä käytetään monissa suurjännitekomponenteissa sekä jäähdytysaineena että eristeenä. Esimerkiksi muuntajassa, eristysnesteiden tarkoituksena on suojella eristysrakenteen kiinteää osaa sähköpurkauksilta, avustaa valokaaren katkaisussa ja siirtää jännitteisistä osista syntyvää lämpöä pois. Hyvien sähköisten ominaisuuksien lisäksi eristysnesteeltä vaaditaan yleensä alhaista viskositeettia, jotta neste olisi juoksevaa ja toimisi siten hyvänä lämmönsiirtäjänä sekä impregnoituisi hyvin kiinteään eristemateriaaliin. Käytettävällä nesteellä tulisi lisäksi olla suuri resistiiviteetti, alhainen häviökerroin ja hyvä osittaispurkausten sietokyky. Tämä tarkoittaa, että eristysnesteiden tulisi olla kuivaa ja puhdasta. Kosteus ja epäpuhtaudet laskevat eristysnesteiden eristysominaisuuksia. Eristysnesteiden on oltava myös kemiallisesti stabiileja, jotta se säilyttäisi ominaisuuksensa eristysrakenteiden pitkän käyttöajan aikana erilaisissa olosuhteissa. Eristysnesteiltä vaadittavat ominaisuudet riippuvat siitä, millaisissa laitteissa ja olosuhteissa niitä käytetään. Esimerkiksi kylmissä lämpötiloissa viskositeetin on oltava tarpeeksi alhainen, että neste ei jähmety. (Aro ym. 2003, 113.)

##### 4.1.1 Mineraaliöljy

Mineraaliöljy on tavallisin käytössä oleva muuntajaöljy sen hyvän saatavuuden ja edullisuuden takia. Mineraaliöljy valmistetaan maaöljystä tislamalla. Perusraaka-aineena käytetyn maaöljyn ominaisuudet vaihtelevat hieman riippuen mistä sitä porataan. Täten myös tislauksen lopputuotteena saatavan muuntajaöljyn ominaisuudet voivat olla vaihtelevia. (Aro ym. 2003, 113–114.)

Mineraaliöljyt koostuvat hiilivetyrakenteista, kuten parafiinit, nafteenit ja aromaattiset öljyt sekä vähäisistä epäpuhtauksista, kuten rikistä, typestä ja hapesta. Mineraaliöljyn sisältämää pääasiallista hiilivetyrakennetta ja epäpuhtauksia muuttamalla voidaan vai-



kuttaa öljyn ominaisuuksiin ja täten saadaan erilaisia käyttökohteita. (Aro ym. 2003, 114.)

#### **4.1.2 Synteettiset eristysnesteet**

Mineraaliöljyn vaihtelevat ominaisuudet eivät sovellu kaikkiin käyttökohteisiin. Tämän takia mineraaliöljyn rinnalle on kehitetty joukko synteettisiä eristysnesteitä, kuten mm. alkyylibentseeniä, estereitä, silikoniöljyjä ja polybutaaneja, joista estereitä sekä silikoniöljyjä käytetään muuntajan eristysnesteinä. Synteettisillä nesteillä saadaan valvotusti aikaan haluttu kemiallinen rakenne ja siten erilaisia ominaisuuksia erilaisiin käyttökohteisiin. Kuitenkin synteettisten eristysnesteiden kemiallisesti tuotetut ominaisuudet tekevät siitä mineraaliöljyä kalliimman vaihtoehdon. (Aro ym. 2003, 114.)

Esterit ovat myrkyttömiä ympäristöystävällisiä nesteitä, jotka eivät kehitä haitallisia yhdisteitä korkeissakaan lämpötiloissa. Estereitä voidaan käyttää muuntajaöljyn kanssa esimerkiksi uudelleentäytön yhteydessä. Esterit sitovat muuntajaöljyä paremmin vettä. (Aro ym. 2003, 114.)

Silikoniöljyt ovat myös muuntajaöljyä ympäristöystävällisempiä. Niiden etuna on erityisesti palamattomuus. Silikoniöljyn heikkous on huono lämmönjohtokyky ja huono sähköpurkausten sietokyky. Silikoniöljyt sitovat itseensä kosteutta enemmän kuin esteri ja niitä ei voi käyttää tavallisen muuntajaöljyn yhteydessä. (Aro ym. 2003, 114.)

Taulukossa 2 on esitetty esimerkkinä mineraaliöljyn ja synteettisten eristysnesteiden ominaisuuksien eroavaisuuksia. (Aro ym. 2003, 115.)

TAULUKKO 2. Eristysnesteiden ominaisuuksia

Eristysneste	Suhteellinen permittiivisyys (50 Hz, 25 °C)	Kinemaattinen viskositeetti (mm <sup>2</sup> /s)	Jähmettymispiste (°C)	Leimahduspiste (°C)
Mineraaliöljy	2,2	16	-50	150–175
Dibentsyyli-tolueeni	2,7	6,5	-50	144
Silikoniöljy	2,9	50	-53	>335
Esteri	3,3	63	-50	310

Taulukosta huomataan silikoniöljyn ja esterin hyvä lämmönkestokyky. Eristysnesteiden korkea leimahduspiste pienentää muuntajan palokuormaa ja on siten hyvä valinta sisätiloissa käytettävällä muuntajalla.

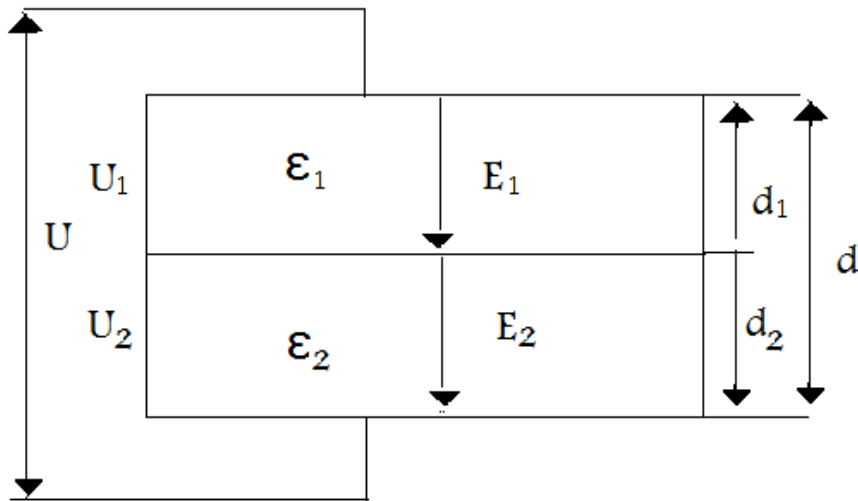
Eristysnesteiden viskositeetti kuvaa aineen virtaamisen sisäistä vastusta, joka on sitä suurempaa, mitä raskaampia aineen molekyylit ovat. Pienen viskositeetin eristysnesteet impregnoituvat hyvin ja toimivat hyvän juoksevuutensa ansiosta hyvänä lämmönsiirtäjänä. (Aro ym. 2003, 113) Kinemaattisen viskositeetin merkitystä impregnointiin käsitellään luvussa 4.3. Suhteellisen permittiivisyyden merkitystä muuntajan eristysrakenteessa käsitellään luvussa 4.2.

## 4.2 Eriste sähkökentässä

Käytännön eristerakenteissa on aina jonkin verran vuotovirtaa aiheuttavia tekijöitä: eristysnesteissä on kosteutta ja epäpuhtauksia ja kiinteissä eristemateriaaleissa on sisäisiä onteloita tai vaurioita. Nämä eristysrakenteiden virheet aiheuttavat homogeeniseen sähkökenttään epätasaisia jänniterasituksia. Sähkökentän voimakkuuden ylittäessä kyseisen eristystason sähkönlujuuden syntyy osittaispurkauksia. Osittaispurkaukset ovat epätäydellisiä sähköpurkauksia, eli ne eivät oikosulje elektrodiväliä. Osittaispurkaukset kuluttavat eristemateriaalia ja niitä voi esiintyä eristeaineen sisällä tai pinnalla. Sähköpurkaus voi kehittyä osittaispurkauksesta täydelliseksi läpilyönniksi. (Aro ym. 2003, 18, 59, 76.)

#### 4.2.1 Jännitteenjakautuminen eristysrakenteessa

Muuntajassa olevassa homogeenisessa sähkökentässä koko eristysrakenteen yli vaikuttava jännite jakautuu peräkkäisille eristyskerroksille kunkin kerroksen sähkökentän voimakkuuden ja paksuuden mukaan. Kuvassa 5 on esitetty jännitteen jakautuminen kahden eristyskerroksen muodostamassa eristysrakenteessa. (Hiironniemi, 9)



KUVA 5. Jännitteen jakautuminen kahden eristeen välillä

Yllä olevan kuvan tilanteessa homogeenisessa sähkökentässä koko eristeen yli vaikuttava jännite noudattaa kaavaa 4. (Aro ym. 2003, 25.)

$$U = E_1 d_1 + E_2 d_2, \quad (4)$$

missä  $U$  on koko eristysrakenteen yli vaikuttava jännite,  $E$  on sähkökentän voimakkuus ja  $d$  on eristeen paksuus.

Kaavan 5 mukaisesti permittiivisyys määrää sähkökentän voimakkuuden aiheuttaman sähkövuon tiheyden. (Aro ym. 2003, 25.)

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E}, \quad (5)$$

missä  $\bar{D}$  on sähkövuon tiheys,  $\epsilon$  on aineen suhteellinen permittiivisyys ja  $\bar{E}$  on sähkökentän voimakkuus.

Eristysrakenteessa vallitsevaa sähkökentän jakaumaa laskettaessa voidaan olettaa eristeen johtavuuden olevan niin pieni, ettei sitä tarvitse ottaa huomioon. Näin ollen eristysrakenteessa eri eristyskerroksissa vallitsee sama sähkövuoto, eli  $D_1 = D_2$ . (Aro ym. 2003, 25.)

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (6)$$

Käyttämällä hyväksi yhtälöitä 4 ja 6, saadaan laskettua jokaiselle eristekerrokselle kentänvoimakkuus. (Aro ym. 2003, 26.)

$$E_1 = \frac{U}{d_1 + d_2 \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)} \quad (7)$$

$$E_2 = \frac{U}{d_2 + d_1 \left( \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)} \quad (8)$$

Kaavoista 7 ja 8 voidaan todeta, että se eriste, jolla on pienempi permittiivisyys, joutuu alttiiksi suuremmalle jänniterasitukselle. (Aro ym. 2003, 26.)

Permittiivisyys esitetään usein seuraavassa muodossa (kaava 9).

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r, \quad (9)$$

missä  $\varepsilon_0$  on tyhjiön permittivisyys ( $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$ ) ja  $\varepsilon_r$  on kullekin aineelle ominainen suhteellinen permittiivisyys.

Taulukossa 3 on esitetty eri eristeiden suhteellisia permittiivisyyksiä.

TAULUKKO 3. Eristeaineiden suhteelliset permittiivisyydet

Eriste	Suhteellinen permittiivisyys
Ilma	1,0006
Muuntajaöljy	2,2–2,5
Paperi (kuiva)	2-3
Paperi (öljyimpregnoitu)	2-4

#### 4.2.2 Tehohäviöt eristysrakenteessa

Vaihtojännitteen vaikutuksessa eristeessä syntyy polarisaation ja eristeen johtamisen vuoksi tehohäviöitä. Polarisaatio tarkoittaa sähkökentän vaikutuksesta johtuvaa eristeen atomien ja molekyylien liikettä, mikä kitkan vaikutuksesta lämmittää eristettä. Häviökertoimella ( $\tan \delta$ ) kuvataan eristeen hyvyttä, eli sitä kuinka paljon eriste poikkeaa ideaalisesta eristeestä (kaava 10). Häviökertoimen mittauksia käytetään eristeiden kuntoa arvioitaessa. (Aro ym. 2003, 49–53.)

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (10)$$

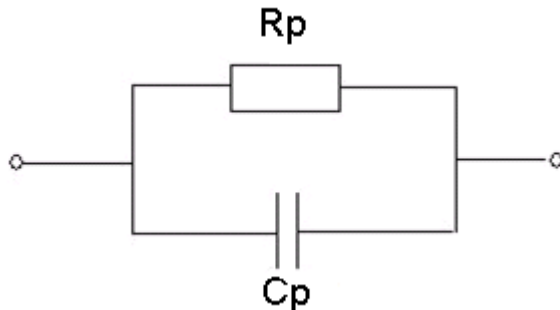
Eristeen permittiivisyys on kompleksinen.

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon \angle -\delta, \quad (11)$$

Kaavoissa 10 ja 11  $\varepsilon'$  määräytyy polarisaatiosta ja  $\varepsilon''$  johtavuudesta. Tavallisesti eristeen johtavuus on hyvin pieni ( $\varepsilon'' \ll \varepsilon'$ ), joten  $\varepsilon \approx \varepsilon'$ . (Aro ym. 2003, 52.)

Permittiivisyys ja dielektriset häviöt ovat riippuvaisia lämpötilasta sekä vaihtojännitteen taajuudesta. Lämpötilan kasvaessa myös tehohäviöt ja eristeen johtavuus kasvaa. Taajuuden kasvaessa permittiivisyys pienenee, koska aineen polarisaatiosta riippuvat molekyylit ovat liian hitaita pysyäksään sähkökentän suunnanmuutoksissa. Häviökerroin on mitattava usealla eri taajuudella, jotta eristykseen kunnosta saadaan kokonaisvaltainen tieto. (Aro ym. 2003, 51–53, 186–192.)

Eristysrakennetta voidaan kuvata kondensaattorilla, jossa polarisaatioon vaikuttaa kapasitanssi ja johtavuuteen resistanssi. Sijaiskytkennässä kapasitanssi ja resistanssi ovat rinnankytkettyjä (kuva 6). (Aro ym. 2003, 51.)



KUVA 6. Eristyksen/kondensaattorin sijaiskytkentä

Sijaiskytkennässä kapasitanssi  $C_p$  määräytyy polarisaatiosta ja resistanssi  $R_p$  johtavuudesta. Kaavalla 12 lasketaan vuotovirtaa vastustava  $R_p$ . (Testing Power Transformers, 12–1.)

$$R_p = \frac{1}{\omega C_p \tan \delta} \quad (12)$$

### 4.3 Eristysnesteiden impregnointi

Eristysnesteiden kunnollinen impregnointi kiinteään eristemateriaaliin on hyvin tärkeää eheän eristysrakenteen kannalta. Selluloosasta valmistetuissa kiinteissä eristemateriaaleissa, kuten paperissa ja kartongissa, on ilmatäytteisiä onteloita, joiden pitäisi täyttyä eristysnesteellä impregnoinnin aikana. Heikosti impregnoituneen, eli heikosti kyllästyneen eristeen ilmatäytteisiin onteloihin kohdistuu suuri jänniterasitus ilman alhaisen permittiivisyyden takia (taulukko 3). Tällöin niihin voi muodostua osittaispurkauksia, jotka johtavat muuntajan eristerakenteen ennenaikaiseen vanhenemiseen ja läpilyönteihin. (Dai, Wang, Dyer, Darwin & James 2007.)

### 4.3.1 Impregnointisyvyys

Kyllästettävän materiaalin rakenne tulisi olla huokoinen, jotta neste pääsee tunkeutumaan siihen parhaiten. Kovaan materiaaliin, kuten esimerkiksi laminoituun prespaaniin, voidaan tehdä reikiä impregnoinnin parantamiseksi. Reikien tekeminen ei saa heikentää materiaalin mekaanista tai sähköistä kestävyyttä. (Dai ym. 2007.)

Eristysnesteiden impregnointi ajan suhteen saadaan laskettua kaavalla 13. Eristysneste tunkeutuu kiinteän eristeen rakoihin ylipaineen, kiinteän eristeen huokosen säteen  $r$  ja nesteen viskositeetin  $\eta$  vaikutuksesta. (Dai ym. 2007.)

$$L = \frac{1}{2} r \cdot \sqrt{\frac{P_E + P_S - P_I}{\eta}} \cdot \sqrt{t}, \quad (13)$$

missä  $L$  on impregnointisyvyys,  $P_E$  on ulkoinen paine,  $P_S$  on kapillaari-ilmion aiheuttama paine,  $P_I$  on sisäinen paine ja  $t$  on aika.

Eristysnesteiden impregnointi on sitä tehokkaampaa, mitä alhaisempi viskositeetti sillä on (taulukko 2). Viskositeettia voidaan alentaa nestettä lämmittämällä. Esimerkiksi esteri täytyy lämmittää 60 °C lämpötilaan, jotta se imeytyy yhtä tehokkaasti kuin mineraaliöljy 20 °C lämpötilassa. (Dai ym. 2007.)

Kapillaari-ilmion aiheuttama paine  $P_S$  syntyy pintajännitysvoiman  $T$  ja kontaktikulman  $\theta$  vaikutuksesta. (Dai ym. 2007.)

$$P_S = \frac{2T \cos \theta}{r}, \quad (14)$$

missä  $r$  on huokosen säde

### 4.3.2 Muuntajan impregnoitumisprosessi

Aktiiviosasta ja impregnoitimesteesta on poistettava kosteus sekä kaasumaiset epäpuhtaudet ennen impregnointia. Eristysneste käsitellään järjestelmässä, jolla voidaan myös nostaa sen lämpötilaa haluttuun arvoon. Muuntajan aktiiviosasta poistetaan kosteus lämmittämällä sitä uunissa. Tyhjiökäsittelyllä poistetaan kaasumaiset epäpuhtaudet sekä madalletaan aktiiviosan sisäinen paine. Tyhjiö poistetaan eristysnesteen täytön jälkeen, jolloin nesteen impregnoitumiseen vaikuttava ulkoinen paine summautuu ilmakehän paineesta ja nesteen oman painovoiman aiheuttamasta hydrostaattisesta paineesta. Hydrostaattisen paineen vaikutuksesta impregnoituminen on parempaa muuntajan rakenteen alaosissa kuin yläosissa, jossa ylipaineen muodostaa vain kapillaari-ilmiön ja ilmakehän paine. (Dai ym. 2007; ABB muuntajatekniikan perusteet, 24.)

Muuntajalla on sen jännitetasosta riippuva seisonta-aika, jonka aikana mahdolliset roskat laskeutuvat säiliön pohjalle, ilmakuplat nousevat pintaan ja eristysnesteen tulisi impregnoitua rakenteisiin sekä eristeisiin. (ABB muuntajatekniikan perusteet, 24.)



## 5 MITTAUSJÄRJESTELY

Luvussa kuvataan työn aikana kehitettyä mittausjärjestelyä eristysnesteessä impregnoituneen materiaalin eristyskyvyn mittaamiseksi jolla tutkitaan erilaisten eristysmateriaalin impregnoitumisaikoja. Koejärjestelyn oli tarkoitus vastata todellista muuntajan kuivaus- ja impregnointiprosessia mahdollisimman hyvin.

### 5.1 Tutkittavat eristeet

Työssä tutkittiin muuntajaöljyn ja synteettisen eristysnesteen impregnoitumista selluloosa sekä Nomex -pohjaisiin eristemateriaaleihin.

Muuntajaöljy oli mineraaliöljyä nimeltään Nytro 10XN (liite 1). Synteettinen eristysneste oli esterä nimeltään MIDEL 7131 (liite 2). Taulukossa 4 on esitetty eristysnesteiden valmistajien esittämät keskeiset ominaisuudet.

TAULUKKO 4. Tutkittavien eristysnesteiden ominaisuudet

Eristysneste	MIDEL 7131	Nytro 10XN
Kinemaattinen viskositeetti 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)	28	7,6
Kinemaattinen viskositeetti (−20 °C Midel) (−30 °C Nytro) (mm <sup>2</sup> /s)	1400	730
Leimahduspiste (°C)	260	144

Eristysnesteiden suhteelliset permittiivisyydet vastaavat taulukon 2 arvoja.

Tutkittavia eristemateriaaleja oli yhteensä seitsemän kappaletta: Permawood, prespaani, paperi, täpläpaperi, Nomex-paperi, Nomex-prespaani ja Nomex-täpläpaperi. Nomex on tuotemerkki, joka on synteettisestä aramidikuidusta tehtyä eristemateriaalia. Nomexilla on erittäin hyvä lämmönkestävyys. (DuPont Product 2012) (Matweb 2012)

### 5.1.1 Koekappaleet

Koekappaleiden paksuudet valittiin vastaamaan muuntajassa käytettyjä eristysrakenteita.

Prespaanista, Nomex-prespaanista ja erikoisvanerista valmistetusta Permawoodista valmistettiin muuntajan eristysrakenteessa olevia tasoeristyskiä kuvaavia koekappaleita. Mittauksessa käytettyjen tasokoekappaleiden tiedot on esitetty taulukossa 5.

TAULUKKO 5. Tasoeristysrakenteita kuvaavat koekappaleet

Koekappale	Paksuus (mm)	Pinta-ala (mm <sup>2</sup> )	Lukumäärä (kpl)
Prespaani	10	160x220	4
Prespaani	50	160x220	4
Nomex-prespaani	2	160x220	4
Nomex-prespaani	10	160x220	4
Permawood	10	160x220	4
Permawood	50	160x220	4
Yhteensä.	24		

Tutkittavista eristemateriaaleista paperia, täpläpaperia sekä näiden synteettisiä versioita Nomex-paperia ja Nomex-täpläpaperia käytetään pääsääntöisesti käämilankojen eristeinä. Näistä materiaaleista valmistettiin käämien rakennetta kuvaavat koekappaleet. Koekappaleiden tiedot on esitetty taulukossa 6.

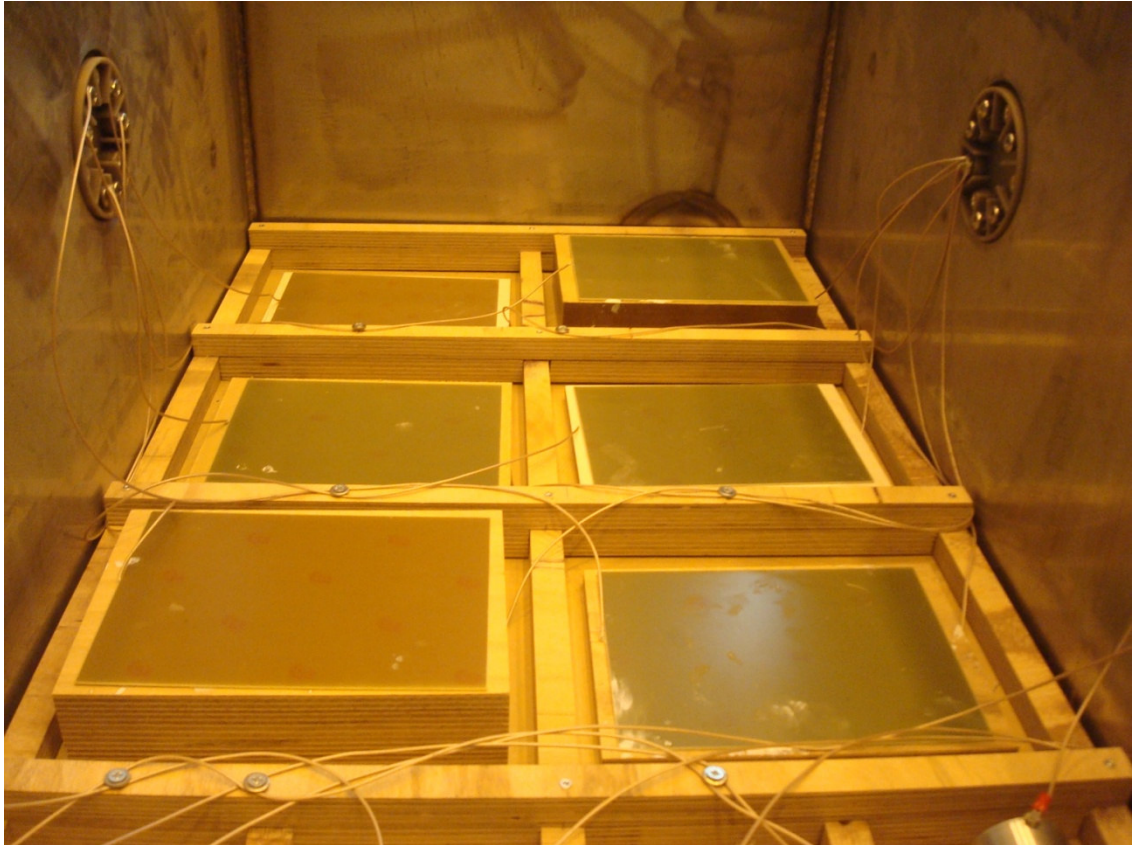
TAULUKKO 6. Käämejä kuvaavat koekappaleet

Koekappale	Paksuus (mm)	Pituus (mm)	Lukumäärä (kpl)
Täpläpaperi	0,15	220	4
Täpläpaperi	0,45	220	4
Täpläpaperi	0,90	220	4
Nomex-täpläpaperi	0,16	220	4
Nomex-täpläpaperi	0,48	220	4
Nomex-täpläpaperi	0,96	220	4
Paperi	0,90	220	4
Nomex-paperi	0,91	220	4
Yhteensä.	32		

Erilaisia koekappaleita oli 14. Jokainen tutkittava koekappale impregnoitiin huoneenlämpöisissä Nytro 10XN mineraaliöljyssä ja MIDEL 7131 esterissä. Lisäksi MIDEL 7131 impregnoitiin 75 °C lämpötilassa kaksi kertaa, joista toisella kerralla lämpötilaa ylläpidettiin vakiona. Mittauskertoja oli neljä ja mittaustuloksia yhteensä 56 kappaletta.

### 5.1.2 Kondensaattorit

Tasoeristysrakenteita kuvaavat koekappaleet tehtiin vastaamaan kondensaattoria asettamalla 150x200 mm<sup>2</sup>:n kokoiset kupariset laminaattilevyt tutkittavan eristeen molemmiin puolin. Kuvassa 7 on esitetty tasokoekappaleet kytkettynä säiliössä.



KUVA 7. Tasokoekappaleista tehdyt tasokondensaattorit

Kuparilaminaatit toimivat elektrodeina. Ne liimattiin koekappaleisiin kiinni kaksikomponentti Loctite 9492 A&B Hysol -liimalla. Liimauksen tarkoituksena oli pitää elektrodilevyt paikoillaan eristysnesteen täytön yhteydessä sekä estää sen pääseminen tutkittavan materiaalin ja elektrodin väliin. Tasokondensaattorin kapasitanssi ( $C$ ) noudattaa seuraavaa kaavaa (kaava 15). (Aro ym. 2003, 34.)

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}, \quad (15)$$

missä  $\varepsilon$  on eristeen permittiivisyys,  $A$  on elektrodilevyn pinta-ala ja  $d$  on levyjen välinen etäisyys.

Käämin rakennetta vastaavissa koekappaleissa tutkittava eristemateriaali käärittiin alumiiniputken ympärille. Alumiiniputken halkaisija on 50 mm ja pituus 502 mm. Jokaisen putken ympärille oli kääritty kaksi tutkittavaa materiaalia siten, että niiden väliin jäi vähintään 20 mm:n väli. Eristemateriaalin päälle käärittiin alumiinikreppiä ja tutkittavan materiaalin toiseen päähän käärittiin kutisteteippiä. Kutisteteipin tarkoituksena oli sitoa koekappaleen toinen pää tiiviiksi, jotta eristysneste imeytyisi vain yhdestä päädyistä,

kuten käytännön käämirakenteissa. Seuraavassa kuvassa on esitetty käämikoekappaleet kytkettynä säiliössä (kuva 8).



KUVA 8. Käämikoekappaleista tehdyt lieriökondensaattorit

Alumiiniputki ja -kreppi toimivat elektrodeina. Tutkittava rakenne vastaa lieriökondensaattoria, jonka kapasitanssi ( $C$ ) noudattaa kaavaa 16.

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_u}{r_s}}, \quad (16)$$

missä  $\epsilon$  on eristeen permittiivisyys,  $l$  on lieriön pituus,  $r_u$  on lieriön ulkosäde ja  $r_s$  on lieriön sisäsäde. (Aro ym. 2003, 36.)

## 5.2 Mittalaitteet ja kaapelit

Mittalaitteilla tutkittiin eristeiden kapasitanssia ja häviökerrointa eri jännitteen taajuuksilla. Mittapisteitä otettiin useita, jotta tuloksia voitiin tutkia ajan funktiona. Usean tutkittavan koekappaleen takia kytkentään rakennettiin releohjaus, jolla voitiin päättää mitä koekappaletta mitataan.

### 5.2.1 IDAX-300

IDAX-300:lla mitataan muuntajien, läpivientien, generaattoreiden ja kaapelien eristeiden kuntoa. Mittalaite on suunniteltu kenttäkäyttöön sähkökoneiden kunnossapitotarkastuksiin. IDAX-300 mittaa eristeiden kapasitanssia ja häviökerrointa eri taajuuksilla käyttäen DFR (Dielectric Frequency Response) eli eristystason taajuusvaste -mittausta. Mittausjännite voi olla maksimissaan 140 V<sub>RMS</sub> ja mittaustaajuus 0,0001 Hz - 1000 Hz. IDAX-300 mittalaite on esitetty kuvassa 9. (Pax diagnostics.)



KUVA 9. IDAX 300 – mittalaite

DFR mittauksessa mittalaite mittaa jännitettä sekä virtaa eri taajuuksilla. Jännitteen ( $U$ ) ja virran ( $I$ ) arvosta saadaan laskettua ohmin lain perusteella impedanssi ( $Z$ ). (Transformerscommittee 2009.)

$$\frac{U(\omega)}{I(\omega)} = Z(\omega) \quad (17)$$



### 5.2.2 Agilent Switch Unit

Agilentin 34970A Data Acquisition / Data Logger Switch Unit pystyy tutkimaan useita eri signaaleja. Mittalaite arkistoi tietoa ja sillä pystyy tekemään täysin automaattisen mittauksen ohjelmoimalla mittalaitteen signaalien vaihtoajat sekä mittaukseen käytettävän ajan. Mittalaitteen ominaisuuksia voi muokata asentamalla siihen erilaisia moduuleja. Tässä mittauksessa 34970A vaihtoyksikköön asennettiin yksi Agilentin 34903A 20 Channel Actuator/GP Switch Module – moduuli. Kuvassa 10 on esitetty mittauksessa käytetty vaihtoyksikkö. (Cp literature)

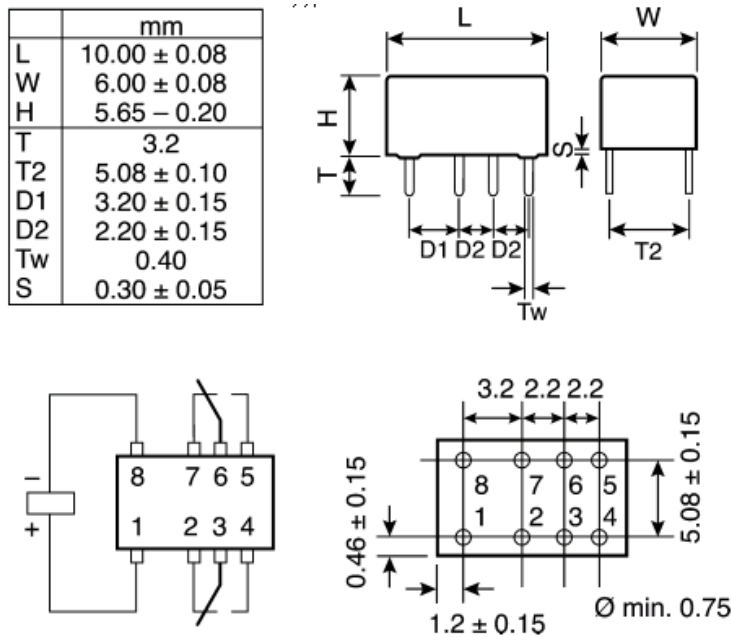


KUVA 10. Agilent Switch Unit ja moduulit

Vaihtoyksikkö 34970A sekä moduuli 34903A mahdollistavat releiden ohjauksen ja siten usean koekappaleen mittaamisen.

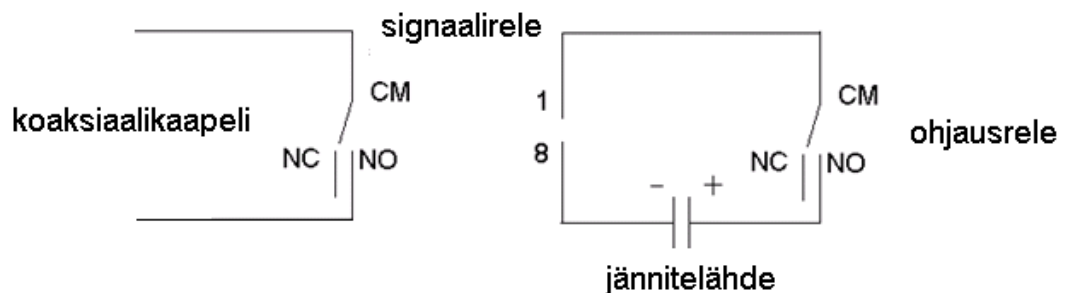
### 5.2.3 Releohjaus ja kaapelit

Tyco Electronics:n valmistamat DPDT relay ultra high sensitive -releet ovat hermeettisiä signaalireleitä. Releet kestävät maksimissaan 60 W tehon, 250 V<sub>AC</sub> jännitteen ja 2 A virran. Releiden ohjausjännite on 12 V<sub>DC</sub>. Kuvassa 11 on esitetty mittauksessa käytetty rele. (Tyco Electronics.)



KUVA 11. DPDT relay ultra high sensitive

Signaalirelettä ohjataan lähdöillä 1 ja 8. Releessä on kaksi käämiä: lähdöt 7 (NC), 6 (CM) ja 5 (NO) muodostavat yhden käämin sekä lähdöt 2 (NC), 3 (CM) ja 4 (NO) muodostavat toisen käämi. Tässä mittauksessa releet ovat normaalisti auki, eli NC-lähtö jätettiin kytkemättä. Releohjaus toteutettiin kytkemällä vaihtoyksikön moduulin ohjaus-releet, ulkopuolinen jännitelähde ja signaalireleet sarjaan kuvan 12 mukaisesti.



KUVA 12. Releohjauksen piirikaavio.

Signaalireleen lähtö 1 kytkettiin vaihtoyksikön sisällä olevan moduulin ohjausreleen CM:n (Common), joka on releen tilaa vaihtava lähtö. Ohjausreleen NO (Normally Open) -lähtö kytketään jännitelähteen plus-napaan. Miinus-napa kytketään signaalireleen 8 lähtöön. Ohjausreleen ja signaalireleen NC (Normally Closed) -lähtö jätettiin tyhjäksi. Tämä kytkentä tehtiin jokaiselle signaalireleelle. Vaihtoyksikön mukana tul-



leella tietokoneohjelmalla ohjattiin moduulin ohjausreleitä, jotka tilaa vaihtamalla vaihtoivat myös signaalireleen tilaa.

Säiliön ulkopuolella käytettiin koaksiaalikaapeleita BNC liittimillä. Kaapelit ovat 2 metriä pitkiä ja niiden impedanssi on  $50 \Omega$ . Kaapeleiden kuminen suojavaippa kuorittiin kaapelin keskeltä pois. Kaapelin häiriösuojina toimivat kuparisäikeet sekä alumiinivaippa jätettiin ehjäksi ja teipattiin kupariteipillä ehjäksi jätetyn kumieristeen päälle. Kaapelin kuparilanka katkaistiin ja eristettä poistettiin siten, että kuparilankoja pystyi käsittelemään. Kuparilangat juotettiin signaalireleiden lähtöihin 6 ja 5 tai 3 ja 4 eli CM ja NO -lähtöihin. BNC liittimillä yhdistettiin koekappaleilta tulevat koaksiaalikaapelit yhdeksi mittalaitteelle meneväksi koaksiaalikaapeliksi.

#### 5.2.4 Lämmitysjärjestelmä

Meyer-vastus Oy:n valmistamalla 16S lämpötilasäätäjällä ja J-tyypin termoelementillä voidaan ylläpitää lämmitettävässä kappaleessa haluttua lämpötilaa. Säätyyksikön koteloon on asennettu lämpötilansäädin, kontaktorit, sulakkeet ja katkaisijat. Säätyyksikkö on yksivaiheinen, sen syöttöjännite on 230 V, virta 15 A ja maksimiteho 3300 W. Kuvassa 13 on esitetty lämmitusyksikkö. (Meyer-vastus.)



KUVA 13. Meyer vastus Oy:n lämmitusyksikkö

Lämmitusyksikkö ohjasi säiliöön kiinnitettyjä tynnyrilämmittimiä. Lämmittimet ovat Meyer-vastus Oy:n TV HSSD silikonivanteita. Niiden käyttöjännite on 230 V, teho 1500 W ja koko  $1665 \times 180 \text{ mm}^2$ . Tynnyrilämmittimien maksimipintalämpötila on  $200^\circ\text{C}$ . (Meyer-vastus.)

Lämmityksen aikana säiliön päälle asetettiin kaksi foliopeittoa, joilla hidastettiin lämpötilan siirtymistä ympäröivään tilaan.

### 5.3 Koejärjestely

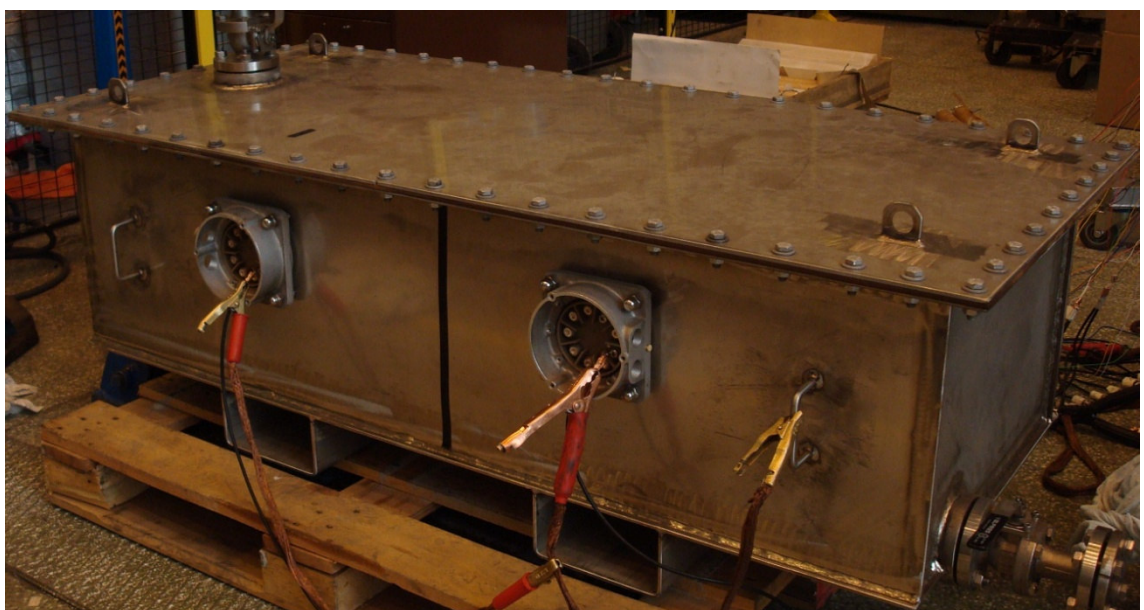
Koejärjestelyn kytkentä vastaa RLC-piiriä, jossa resistanssi ( $R$ ), induktanssi ( $L$ ) ja kapasitanssi ( $C$ ) on kytketty sarjaan. Tämän sarjakytken impedanssi ( $Z$ ) lasketaan seuraavasti (kaava 16). (Aura & Tonteri 2000, 181.)

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (18)$$

Kaavojen 15, 16, 17 ja 18 avulla voimme tutkia eristemateriaalin permittiivisyyden muutosta mittaamalla kytkennän virtaa ja jännitettä.

#### 5.3.1 Säiliö

Koekappaleita varten suunniteltiin kaksi ruostumattomasta teräksestä valmistettua säiliötä (kuva 14).



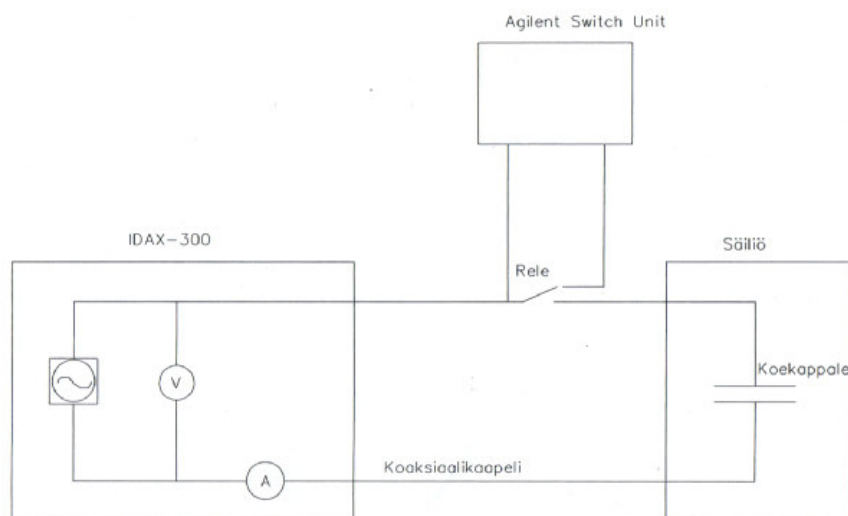
KUVA 14. Koejärjestelyä varten tehty säiliö

Säiliön ulkoiset mitat ovat  $1850 \times 720 \times 400 \text{ mm}^3$ . Säiliön kannella on venttiili paisuntasäiliötä varten. Oikean puolen alakulmassa on venttiili öljyn täyttöä ja tyhjennystä varten. Säiliön kyljissä on molemmiin puolin kaksi virtamuuntajan läpivientiä kaapeleita varten. Säiliön sisämitat ovat  $1420 \times 560 \text{ mm}^2$ . Säiliön sisälle rakennettiin puinen kehikko, jonka tarkoituksena on eristää koekappaleet sekä toisistaan että säiliöstä. Säiliön pohja päällystettiin prespaanilevyllä eristystason parantamiseksi.

Säiliön kansi kiinnitetään ruuveilla säiliöön. Kansi ja virtamuuntajien läpiviennit tiivistettiin kumikorkkipuulla. Venttiilit tiivistettiin o-renkailla.

### 5.3.2 Mittauskytkentä

Koekappaleista ja elektrodeista tehdyt kondensaattorit kytkettiin säiliön sisäpuolella virtamuuntajien läpivienteihin teflonpäällysteisillä koaksiaalikaapeleilla. Elektrodit, joita mitattiin sekä elektrodit, joihin syötettiin jännitettä, kytkettiin säiliön eri puolille. Säiliön ulkopuolella kytkentää jatkettiin koaksiaalikaapeleilla. Mitattavat elektrodit kytkettiin releohjattuihin koaksiaalikaapeleihin. Koaksiaalikaapelit yhdistettiin BNC T-liittimillä sekä jatkopaloilla yhdeksi koaksiaalikaapeliksi joka kytkettiin IDAX-300 mittalaitteen tuloliitântään 1. Elektrodit, joihin syötettiin jännitettä, kytkettiin koaksiaalikaapeleilla suoraan IDAX-300 mittalaitteeseen. Kuvassa 15 on esitetty rakennetun mittauskytkennän periaatekuva.



KUVA 15. Mittauskytkennän periaatekuva

### 5.3.3 Mittaus

Koekappaleet mitataan 20 V:n (RMS) jännitteellä mittaustaajuusvälillä 1000 Hz – 1 Hz. Mittaustaajuuksia on valitulla välillä yhteensä 11 kpl, jolloin yhden koekappaleen mitaus kestää noin 2 min. Matalin mittaustaajuus on kompromissi, koska matalilla mittaustaajuuksilla saadaan tarkempia arvoja, mutta mitaus kestää kauemmin.

Kaikki koekappaleet mitataan kerran normaalissa ilmanpaineessa ja -kosteudessa. Tämän mittauksen tarkoituksena on vertailla samanlaisten, mutta eri mittauksissa käytettyjen koekappaleiden rakenteista ja liimauksesta johtuvia eroja. Ensimmäisen mittauksen jälkeen säiliö viedään kiertoilmauuniin 130 °C lämpötilaan. Uunissa säiliön kansi on auki, jotta kosteus pääsee haihtumaan koekappaleista pois. Koekappaleita on pidettävä kiertoilmauunissa vähintään 12 tunnin ajan. Lämmityksen jälkeen säiliö otetaan uunista pois ja siihen kiinnitetään kansi. Kannen kiinnitys on tehtävä nopeasti, jotta ilmankosteus ei pääse imeytymään koekappaleisiin.

Toinen mitaus tehdään kuiville koekappaleille. Tämän mittauksen tarkoituksena on antaa kuvaajiin lähtötaso imeytyneille koekappaleille ja verrata edelleen eri koekappaleiden eroja. Toisen mittauksen jälkeen säiliö viedään tyhjiökäsittelyyn ja eristysnesteeseen täyttöön. Tyhjiökäsittelyjärjestelmä pääsee noin 3 Pascaliin, jonka jälkeen eristysnestettä voidaan laskea säiliön sisään. Eristysneste alkaa täytön aloittamisen jälkeen välittömästi imeytyä koekappaleisiin, jonka takia on tärkeää, että neste saadaan täytettyä nopeasti ja säiliö saadaan tyhjiöstä mittaustaikalle. Kuvassa 16 säiliö on mittaustaikalla kytkettynä.



KUVA 16. Mittauspaikka

Kuva 16 on otettu neljännessä mittauksesta, jossa säiliön lämpötilaa ylläpidettiin lämmitysjärjestelmällä. Kuvassa etummaisella pöydällä on vasemmalla lämmitysyksikkö, keskellä kannettava tietokone, jolla mittaus ja releitä ohjattiin sekä oikealla IDAX-300 mittalaite. Takimmaisena pöydän päällä on jännitelähde, jonka päällä on vaihtoyksikkö ja yleismittari. Yleismittarilla varmistettiin releiden ohjausjännitteen oikea suuruus.

## 6 MITTAUSTULOKSET

Mittaustuloksissa käsitellään häviökertoimen ja kapasitanssin arvoja, jotka on mitattu 1 Hz:n taajuudella. Korkeilla jännitteen mittaustaajuuksilla mittalaite ei havainnut suuria eroja häviökertoimessa ja kapasitanssissa eri materiaalien välillä. Verkkotaajuuden läheisillä mittaustaajuuksilla 22 - 222 Hz mittaustuloksissa oli paljon häiriöitä (kuvio 2). Häiriöt voivat johtua ympäröivistä sähkölaitteista tai mitattavan kondensaattorin viereisistä kondensaattoreista.

Koekappaleiden kyllästyminen näkyy mittaustuloksissa häviökertoimen ja kapasitanssin muutosnopeutena. Eristysnesteellä kyllästyvän koekappaleen häviökertoimen pitäisi pienentyä ja kapasitanssin kasvaa. Kapasitanssin arvon muuttuminen tarkoittaa käytännössä permittiivisyyden muutosta olettaen, että eristemateriaalin paksuus ei muutu sen kyllästyessä eristysnesteellä. Koekappaleiden poikkeavien alkuarvojen takia tutkitaan arvojen suhteellista muutosta.

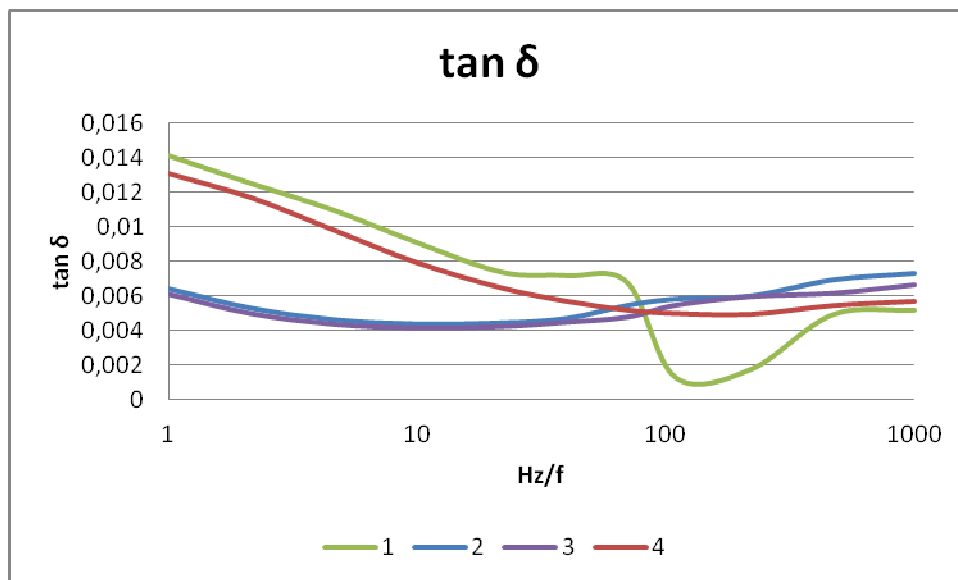
Mittauksien arvoihin sisältyy virheitä, jotka muodostuvat pitkistä koaksiaalikaapeleista, releiden juottamisen takia poistetuista eristeistä ja suojusta sekä tasoeristyksistä käytestä liimoista. Nämä tekijät aiheuttivat saman virheen koko mittauksen ajan, mutta niillä ole merkitystä, koska mittauksessa tutkitaan yksittäisessä koekappaleessa tapahtuvaa muutosta.

### 6.1 Koekappaleiden erot

Saman materiaalin kyllästymisen tutkimista eri mittauksissa on huomioitava niiden poikkeavat alkuarvot. Samasta materiaalista tehdyissä koekappaleissa on rakenteesta, liimauksesta ja kuivauksen kestosta johtuvia eroja. Seuraavissa kuvioissa (kuviot 1 ja 2) on esitetty esimerkkinä eri mittauksissa käytettyjen 0,96 mm paksujen Nomex-täpläpaperien häviökerroin- ja kapasitanssikuvaajat. Koekappaleet on mitattu kuivauksen jälkeen.

Kuvioissa 1 ja 2 koekappaleiden käyrät on numeroitu mittauksien mukaan. Käyrä 1 on ensimmäisen mittauksen koekappale, jossa impregnointinesteenä oli jäähtyvä 75 °C

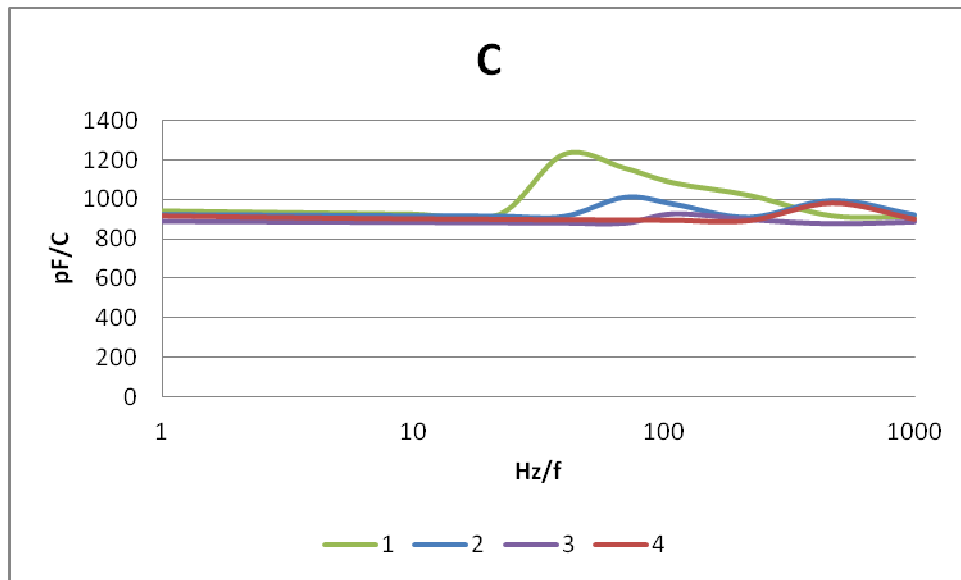
Midel. Käyrä 2 on toisen mittauksen koekappale, jossa impregnointinesteenä oli huoneenlämpöinen Midel. Käyrä 3 on kolmannen mittauksen koekappale, jossa impregnointinesteenä oli huoneenlämpöinen Nytro 10 XN. Käyrä 4 on neljännen mittauksen koekappale, jossa impregnointinesteenä oli lämmitettävä 75 °C Midel.



KUVIO 1. 0,96 mm paksujen Nomex-täpläpaperi -koekappaleiden häviökertoimet taajuuden funktiona

Kuivauksen pituus ei näyttäisi vaikuttavan Nomex-materiaalien häviökertoimeen. Ensimmäisen koekappaleen kuivaus oli kestoiltaan pisin, kun taas neljännen oli lyhin. Häviökertoimien erot johtuvat todennäköisesti koekappaleiden rakenteellisista eroista.





KUVIO 2. 0,96 mm paksujen Nomex-täpläpaperi -koekappaleiden kapasitanssit taajuuden funktiona

Koekappaleiden kapasitansseissa on pieniä eroja. Kuvaajasta nähdään, että verkkotaajuuden läheisillä taajuuksilla on paljon häiriöitä.

Nomex-täpläpaperi -koekappaleiden arvot olivat lähinnä toisiaan, joten niitä pystytään vertailemaan eri impregnointitilanteissa. Muiden koekappaleiden häviökertoimet käyttäytyivät kuvion 1 mukaisesti, mutta kapasitansseissa oli suuria eroja.

## 6.2 Koejärjestelyn kehitys

Mittauskertoja oli yhteensä neljä. Mittauksien toistojen tarkoituksena oli kehittää mittausjärjestelyä sekä tutkia eri eristysnesteiden ja niiden lämpötilojen aiheuttamia eroja impregnointiin. Kolmen ensimmäisen mittaussarjan tulokset on esitetty liitteissä ja neljännen mittaussarjan tuloksia käsitellään luvussa 6.3. Tässä luvussa esitellään kolme ensimmäistä mittaussarjaa ja käsitellään niiden tuloksista tehtyjä havaintoja, jotka johtivat koejärjestelyn muuttamiseen.



### 6.2.1 Ensimmäinen mittaussarja

Ensimmäisessä mittaussarjassa eristysnesteinä käytettiin 75 °C lämpöistä Mideliä. Koekappaleet olivat kiertoilmauunissa 15 h 45 min. Säiliön kansi kiinnitettiin ja saatiin tiiviiksi 15 min kuluttua siitä, kun säiliö otettiin uunista. Tyhjiökäsittelyssä Midelin täyttö aloitettiin 6 Pascalin paineessa. Säiliöön mahtui 75 °C lämpöistä Mideliä 297,4 litraa. Käämikoekappaleet olivat kyllästyneet 45 – 60 minuuttia ennen ensimmäistä mittausta. Tasokoekappaleet olivat kyllästyneet 1 h 10 min – 1 h 20 min ennen ensimmäistä mittausta. Säiliön päälle asetettiin foliopeitot, joilla simuloitiin todellista muuntajan impregnoitumisprosessia, jossa kuuma aktiiviosa hidastaa eristysnesteiden jäähtymistä. Eristysneste oli jäähtynyt huoneenlämpöiseksi noin vuorokauden kuluttua eristysnesteiden täytöstä. Ensimmäisen mittaussarjan tulokset on esitetty liitteessä 3.

Ensimmäinen mittaussarja todisti sen, että kyseisellä mittausjärjestelyllä voidaan mitata eristysnesteiden impregnoitumista eristemateriaaleihin. Liitteessä olevista kuvaajista on kuitenkin nähtävissä lämpötilan jäähtymisen mukaan muuttuvat häviökertoimen ja kapasitanssin käyrät. Ensimmäisen mittaussarjan tuloksista ei pystytä arvioimaan johtuuko muutos impregnoitumisesta vai lämpötilan muutoksesta. Tasokoekappaleiden kuparielektrodit eivät pysyneet kunnolla kiinni kaikissa koekappaleissa: 2 mm paksun Nomex-prespaanin levyt olivat lähteneet irti sekä Permawood -koekappaleissa Midel oli päässyt imeytymään levyn ja materiaalin välistä.

### 6.2.2 Toinen mittaussarja

Toisessa mittaussarjassa impregnoitinnesteinä käytettiin huoneenlämpöistä Mideliä. Mittaussarjan tarkoituksena oli poistaa lämpötilan muutoksesta aiheutuva muuttuva tekijä häviökertoimen ja kapasitanssin arvoista sekä verrata viskositeetin vaikutusta impregnoitumisnopeuteen. Koekappaleiden liimaukseen kiinnitettiin erityistä huomiota käyttämällä enemmän liimaa ja painoja, jotta elektrodit kiinnittyisivät kunnolla materiaaleihin. Lisäksi materiaalien pintaa karhennettiin hiomapaperilla, jotta kaksikomponenttiliima tarttuisi paremmin.

Koekappaleita pidettiin kiertoilmauunissa 15 h ajan. Tyhjiökäsittelyssä Midelin täyttö aloitettiin 5 Pascalista ja se kesti 15 minuuttia. Midelin alkulämpötilaa ei saatu pysy-

mään huoneenlämpöisenä, vaan se nousi säiliössä noin 30 °C, koska öljynkäsittelyputkistossa oleva Midel lämpeni. Säiliön sisällä oleva neste kuitenkin kerrostui nopeasti lämpötilan mukaisesti; lämmin neste kohosi ylös ja kylmä jäi alas. Käämikoekappaleet olivat kyllästyneet 45 – 60 minuuttia ennen ensimmäistä mittausta. Tasokoekappaleet olivat kyllästyneet 1 h – 1 h 20 min ennen ensimmäistä mittausta. Säiliön päälle ei laitettu tässä mittausarjassa foliopeittoja, koska tarkoitus oli saada säiliö nopeasti ympäristön lämpötilaan.

Toisen mittausarjan tulokset todistivat sen, että kapasitanssi kasvaa impregnoitumisen vaikutuksesta. Tasokoekappaleiden sekä käämikoekappaleista täpläpaperin ja paperin häviökerroin pieneni kun taas Nomex-täpläpaperin ja -paperin häviökerroin kasvoi impregnoinnin vaikutuksesta. Häviökertoimen pienemmät ja hitaammat muutokset tässä mittauksessa vahvistavat päätelmät siitä, että ensimmäisessä mittauksessa häviökertoimien arvoissa näkyy lämpötilasta aiheutuva muutos. Toisen mittausarjan tulokset on esitetty liitteessä 4.

### **6.2.3 Kolmas mittausarja**

Tässä mittausarjassa eristysnesteinä käytettiin tavallisimmin muuntajassa käytettävää mineraaliöljyä nimeltä Nytro 10XN. Eristysnesteiden lämpötila pysyi koko mittausarjan ajan huoneenlämpöisenä. Tämän mittausarjan tarkoituksena oli tuoda vertailupohjaa Midelillä kyllästyneille koekappaleille.

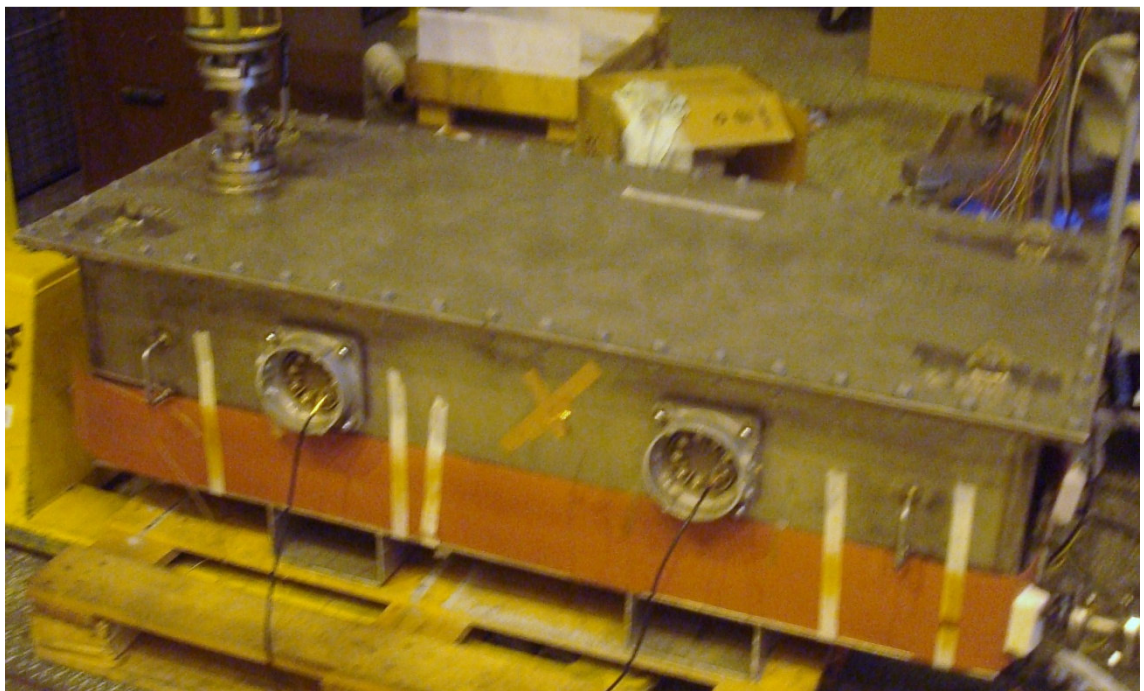
Koekappaleita pidettiin kiertoilmauunissa 15 h ajan. Öljyntäyttö aloitettiin 5 Pascalin paineessa ja se kesti 15 minuuttia. Käämikoekappaleet olivat ehtineet impregnoitua 45 – 60 min ja tasokoekappaleet 1 h – 1h 10 min ennen ensimmäistä mittausta. Säiliön virtamuuntajien läpiviennit olivat jääneet löysälle, joten öljyä pääsi valumaan säiliöstä muutamia litroja täytön yhteydessä. Tyhjiön purkamisen jälkeen säiliöön pääsi hieman ilmaa ennen läpivientien kiristämistä. Ilma tuli yläventtiilin kautta ulos ja se heikensi impregnoitumiseen vaikuttavaa painetta. Teoriassa tämän pitäisi hidastaa impregnointia ja huonontaa häviökerrointa, mutta todellista vaikutusta mittaustuloksiin on vaikea arvioida.

Liitteessä 5 esitetyistä mittaustuloksista nähdään, että koekappaleiden kapasitanssi kasvoi suhteessa vähemmän kuin ensimmäisessä ja toisessa mittaussarjassa. Tämä johtuu Nytron pienemmästä permittiivisyydestä (taulukko 2).

### 6.3 Midel 75 °C lämmityksellä

Tämän mittaussarjan tarkoituksena oli tutkia Midelin imeytymistä pienellä viskositeetilla ja poistaa lämpötilan muutostekijä. Tässä mittaussarjassa säiliön ympärille asetettiin tynnyrilämmittimet ja foliopeitto. Lämmittimiä ohjaava lämmitysyksikkö asetettiin jäämään 60 °C:n lämpötilaan. Kuvassa 17 on esitetty säiliö johon on kiinnitetty tynnyrilämmittimet.

Koekappaleet olivat kiertoilmauunissa 12 h 30 min. Eristysnesteen täyttö aloitettiin 5 Pascalin paineessa. Käämikoekappaleet olivat ehtineet impregnoitua 1 h – 1 h 15 min ja tasokoekappaleet 1 h 20 min – 1 h 30 min ajan ennen ensimmäistä mittausta. Eristysnesteen lämpötila ehti jäähtyä 45 °C lämpötilaan ennen ensimmäistä mittausta. Lämmityksen aloittamisen jälkeen 60 °C lämpötila saavutettiin noin 8 h impregnoitumisen kuluttua. Lämmitys sammutettiin ja foliopeitto poistettiin 51 h 30 min impregnoitumisen jälkeen. Mittaustulokset on esitetty kappaleissa 6.3.1 ja 6.3.2.



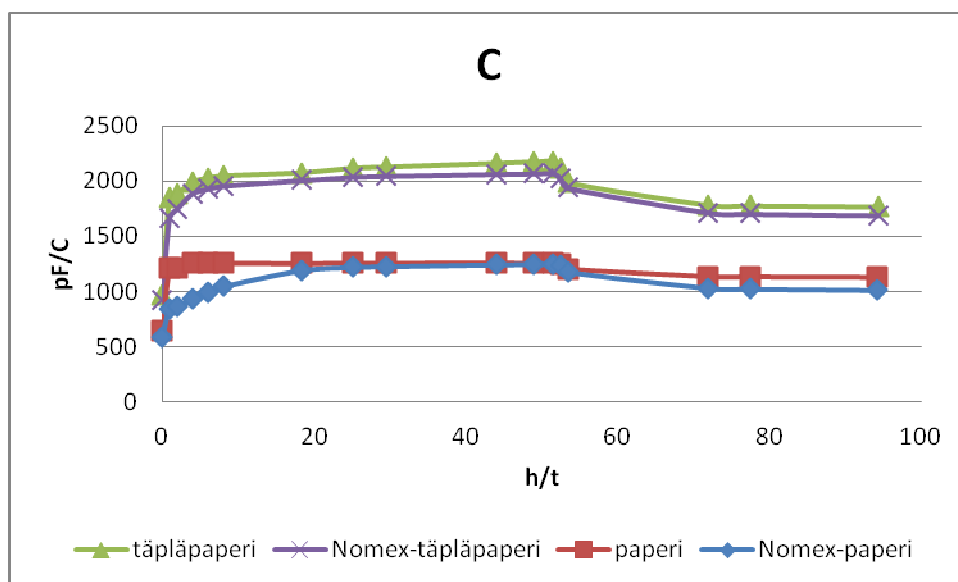
KUVA 17. Säiliö ja tynnyrilämmittimet

### 6.3.1 Käämikoekappaleet

Tässä luvussa vertaillaan käämikoekappaleiden materiaalien sekä paksuuksien vaikutusta impregnointiin.

#### 6.3.1.1 Materiaalivertailu

Kuvioissa 3, 4 ja 5 vertaillaan täpläpaperin, Nomex-täpläpaperin, paperin ja Nomex-paperin eroja. Kuvioihin on valittu lähes yhtä paksut koekappaleet, jotta materiaalien vertailu olisi helpompaa. Kuviossa 3 on esitetty koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona.



KUVIO 3. Käämikoekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona

Verrataan koekappaleiden kapasitanssien alkuarvoja huoneenlämmössä olevaan loppuarvoon:

Täpläpaperi 0,9 mm: kasvua 801 pF, suhteellinen kasvu 83 %

Nomex-täpläpaperi 0,96 mm: kasvua 771 pF, suhteellinen kasvu 84 %

Paperi 0,9 mm: kasvua 491 pF, suhteellinen kasvu 77 %

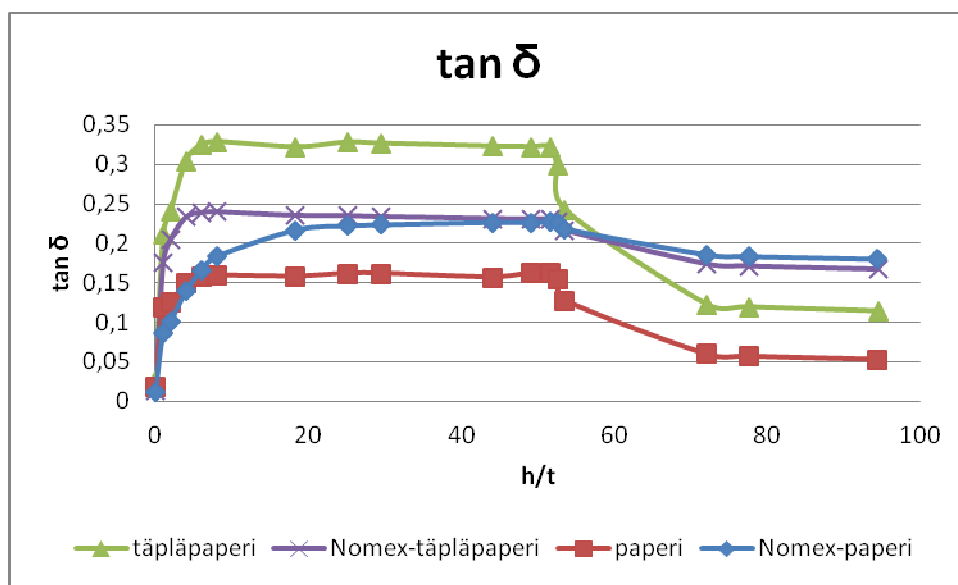
Nomex-paperi 0,91 mm: kasvua 431 pF, suhteellinen kasvu 74,4 %

Kuviosta 3 nähdään lämpötilan vaikutus kapasitanssin arvoihin. Kapasitanssin kasvu on suurta väillä 0-8 h, kun eristysnestein lämpötilaa nostetaan kohti 60 °C. Lämpötilan

pysyessä vakiona väillä 8-51,5 h kapasitanssi kasvaa pelkän impregnoitumisen ansiosta. Kapasitanssi pienenee eristysnesteen jäähtymisen myötä. Viimeisen mittauspisteen kohdalla säiliön lämpötila oli laskenut ympäristön lämpötilan tasalle.

Mittaustuloksien mukaan 60 °C lämpöinen Midel impregnoituu paperiin viidessä tunnissa, Nomex-paperiin 20 h aikana, täpläpaperiin ja Nomex-täpläpaperiin 50 h aikana.

Kuviossa 4 on esitetty käämikoekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona.



KUVIO 4 Käämikoekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona

Verrataan häviökertoimien alkuarvoja huoneenlämpöiseen loppuarvoon:

Täpläpaperi 0,9 mm: suhteellista kasvua 316 %

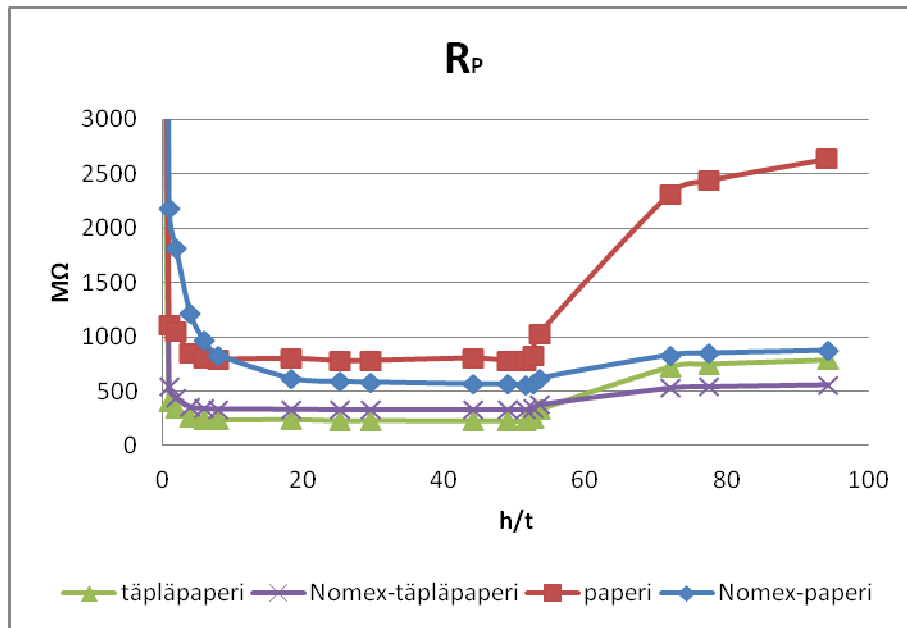
Nomex-täpläpaperi 0,96 mm: suhteellista kasvua 1177 %

Paperi 0,9 mm: suhteellista kasvua 186 %

Nomex-paperi 0,91 mm: suhteellista kasvua 1295 %

Häviökerroin käyttäytyy, kuten aikaisempien mittauksien perusteella oletettiin. Midelin impregnointi heikentää Nomex-materiaalien häviökerrointa suhteessa paljon enemmän kuin selluloosapohjaisia materiaaleja. Selluloosamateriaalit muuttuvat lämpötilan muutoksen seurauksena eniten, kun Nomex-materiaalien muutos on pienempää.

Kaavalla 12 saadaan laskettua eri materiaalien vuotovirtaa vastustava  $R_p$ , kun tunnetaan koekappaleen ajan suhteen muuttuvat kapasitanssit ja häviökertoimet. Kuviossa 5 on esitetty mittaustuloksista lasketut  $R_p$ :n arvot. Laskuissa käytetty taajuus on 1 Hz.



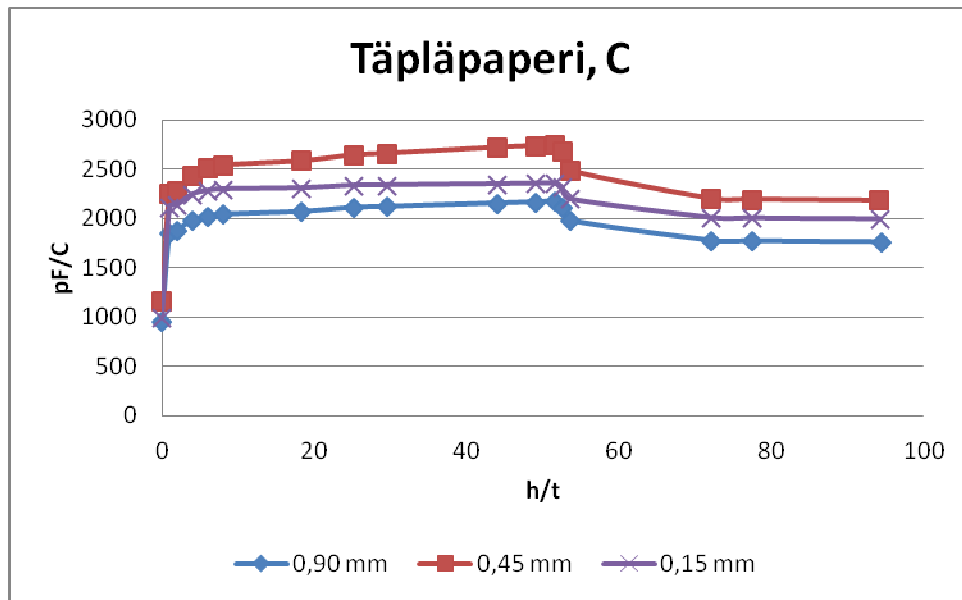
KUVIO 5. Vuotovirtaa vastustava  $R_p$  ajan funktiona

Kuviosta 5 nähdään, että kuivalla koekappaleella on käytännössä ääretön vuotovirran vastus. Kuuma eristysneste heikentää eristysominaisuuksia, ja tämä näkyy vuotovirtaa rajoittavan vastuksen pienentymisenä.

Tuloksien mukaan impregnoituminen heikentää eristyksen vuotovirtaa vastustavia ominaisuuksia. Teoriassa tämän olisi voinut todeta jo kuvioista 3 ja 4, joista huomataan, että materiaalien kapasitanssi kasvaa ja häviökerroin pienenee.

### 6.3.1.2 Täpläpaperi

Kuvioissa 6-9 käsitellään täpläpaperin paksuuden vaikutusta impregnointiin. Kuviossa 6 on esitetty koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona.



KUVIO 6. Täpläpaperikoekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona

Kuviosta 6 nähdään, että koekappaleiden kapasitanssit eivät muutu täysin kaavan 16 mukaisesti. Liitteistä 3, 4 ja 5 olevista täpläpaperien mittaustuloksista huomataan, että muiden täpläpaperi -koekappaleiden kapasitanssit muuttuvat kaavan 16 mukaisesti.

Koekappaleiden kapasitanssit kasvoivat impregnoitumisen aikana seuraavasti:

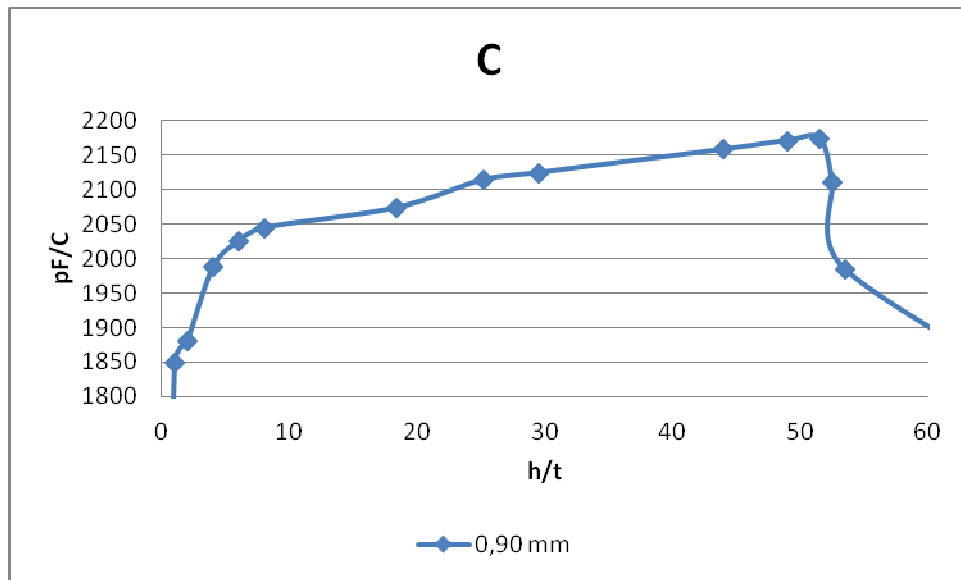
0,90 mm: 83 %

0,45 mm: 87 %

0,15 mm: 99,3 %

Tuloksien mukaan ohuemmat materiaalit impregnoituvat nopeammin.

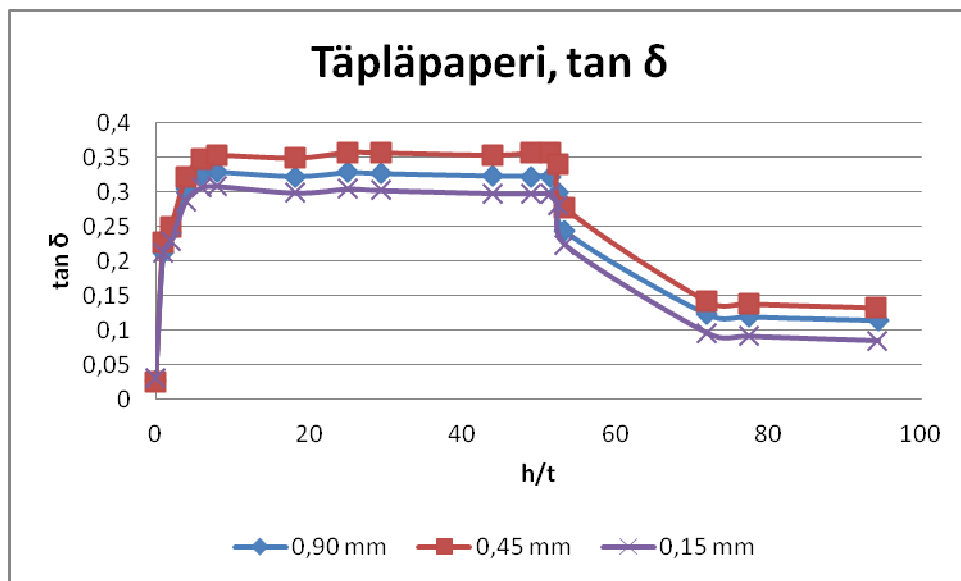
Seuraavassa kuviossa on esitetty 0,90 mm paksun koekappaleen kapasitanssin muutos 60 °C vakio lämpötilassa.



KUVIO 7. 0,90 mm paksun täpläpaperi -koekappaleen kapasitanssi ajan funktiona

Kuviosta nähdään, että täpläpaperin kapasitanssi kasvaa Midelin impregnoitumisen vaikutuksesta 126 pF. Suhteellinen kasvu on 6,1 %. Kapasitanssin muutosnopeus 44 – 51,5 h kohdalla on enää 1,28 pF/h, kun se on 8 – 51,5 h impregnoitumisen aikana ollut 2,97 pF/h.

Seuraavassa kuviossa on esitetty täpläpaperi -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona.



KUVIO 8. Täpläpaperi -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona

Koekappaleiden häviökertoimet kasvoivat impregnoitumisen aikana seuraavasti:



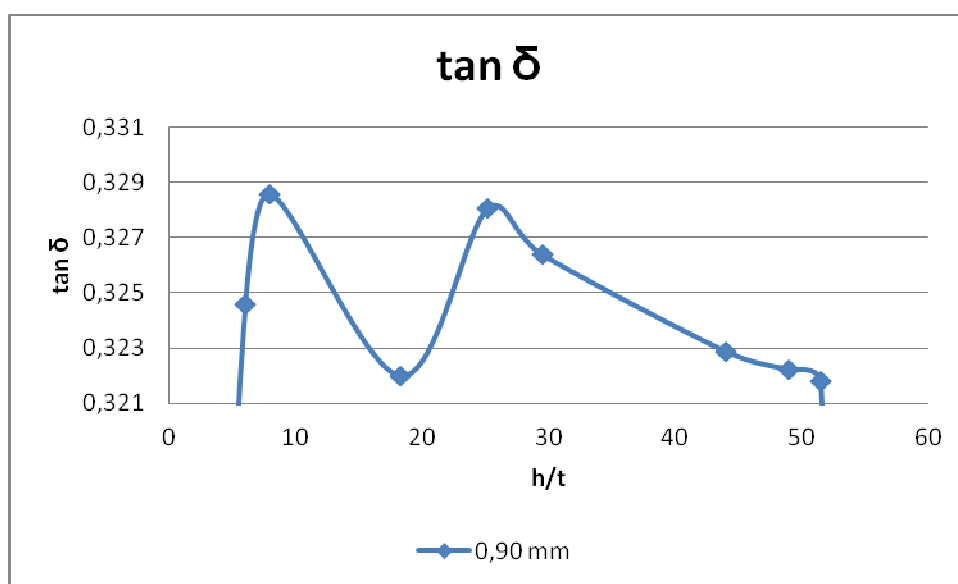
0,90 mm: 316 %

0,45 mm: 427 %

0,15 mm: 180 %

Koekappaleiden paksuudella ei näiden mittaustuloksien perusteella ole merkitystä häviökerroimen muutokseen.

Seuraavassa kuviossa on esitetty 0,90 mm paksun koekappaleen häviökerroin 60 °C vakio lämpötilassa.

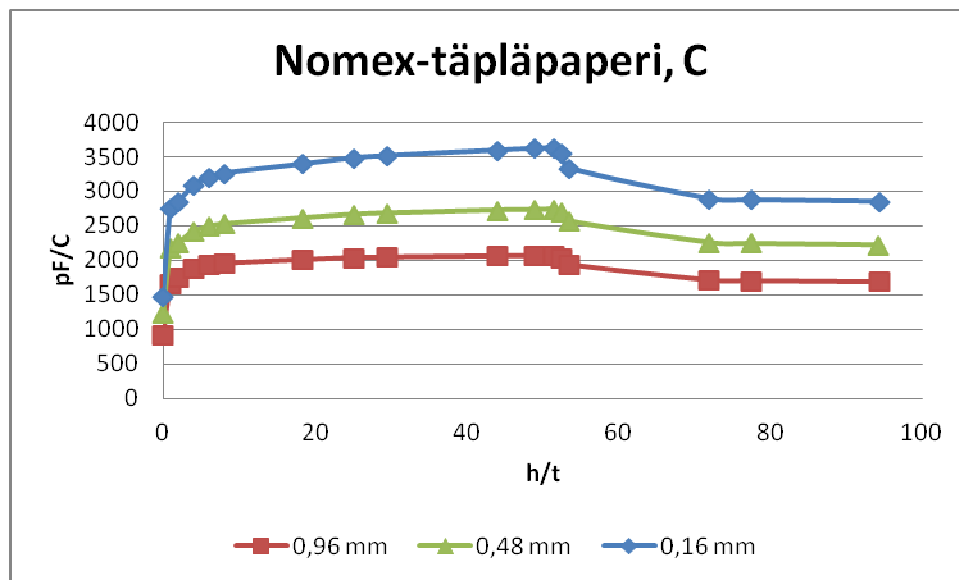


KUVIO 9. 0,90 mm paksun täpläpaperi -koekappaleen häviökerroin ajan funktiona

Mittaustuloksissa on selvästi liian hyvä arvo 18 h kohdalla. Käyrän muodosta on nähtävissä, että täpläpaperin häviökerroin paranee Midelin impregnoitumisesta.

### 6.3.1.3 Nomex-täpläpaperi

Kuvioissa 10–13 käsitellään Nomex-täpläpaperin paksuuden vaikutusta impregnointiin. Kuviossa 10 on esitetty koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona.



KUVIO 10. Nomex-täpläpaperi -koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona

Koekappaleiden kapasitanssit eroavat toisistaan materiaalin paksuuden vaikutuksen mukaisesti. Kapasitanssit kasvoivat impregnoitumisen aikana seuraavasti:

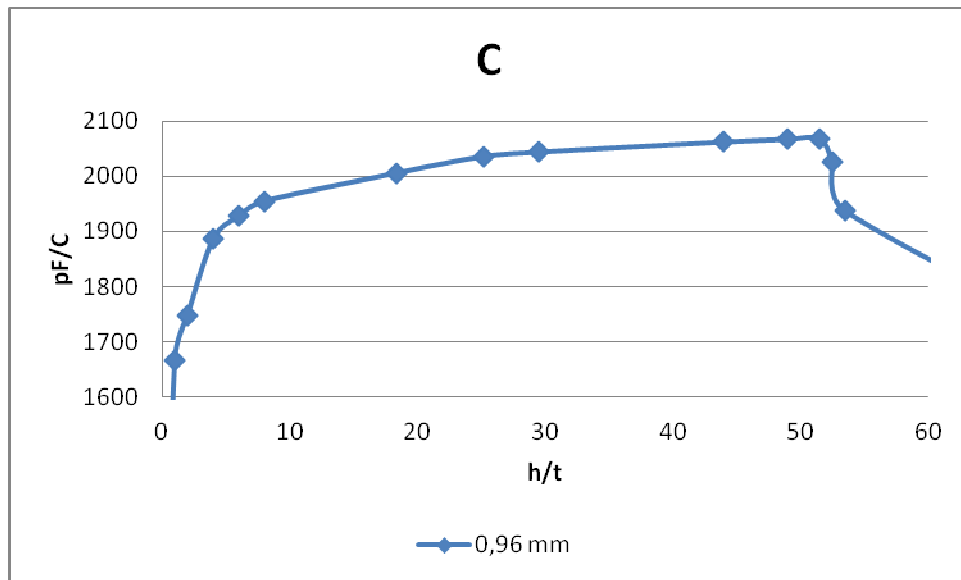
0,96 mm: 84,1 %

0,48 mm: 80,5 %

0,16 mm: 94,5 %

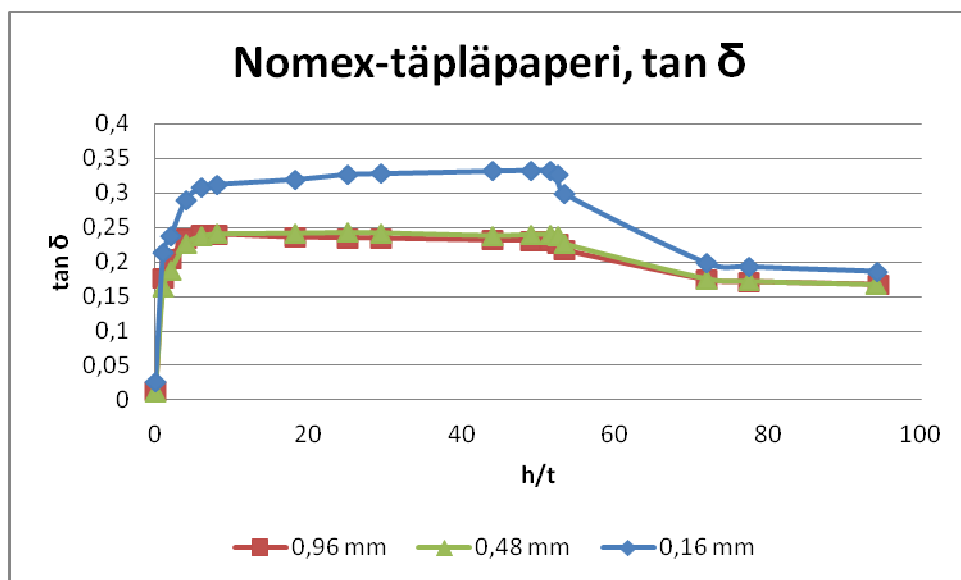
Tuloksista huomataan, ettei paksuudella ole vaikutusta Nomex-materiaalin kapasitanssin suhteelliseen kasvuun.

Seuraavassa kuviossa on esitetty 0,96 mm paksun koekappaleen kapasitanssin muutos 60 °C vakio lämpötilassa.



KUVIO 11. 0,96 mm paksun Nomex-täpläpaperi -koekappaleen kapasitanssin muutos ajan funktiona

Kuviosta nähdään, että impregnointi kasvattaa Nomex-täpläpaperin kapasitanssia 111,7 pF välillä 8–51,5 h. Suhteellinen kasvu on 5,7 %. Kapasitanssin muutosnopeus on 44–51,5 h kohdalla enää 0,4 pF/h, kun se on ollut 8-51,5 h aikana keskimäärin 2,59 pF/h.



KUVIO 12. Nomex-täpläpaperi -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona

Kuviosta 12 nähdään, että 0,16 mm paksu koekappale heikkenee eniten kuumen Mide-lin imeytymisestä, mutta jäähtymisen jälkeen eri paksuisten koekappaleiden häviöker-toimien ero on sama. Impregnoitumisen vaikutuksesta häviökertoimet kasvoivat seuraavasti:

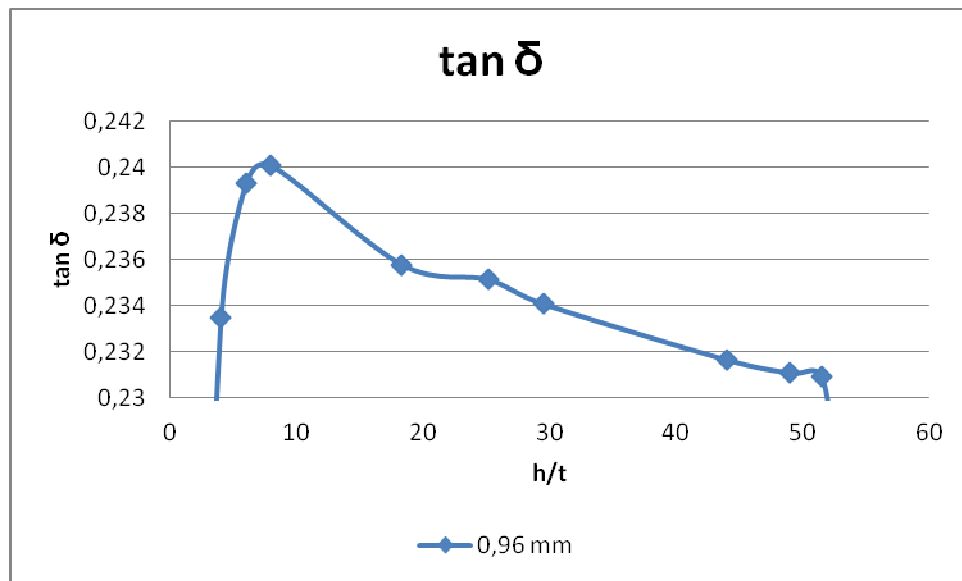
0,96 mm: 1117 %

0,48 mm: 1230 %

0,16 mm: 578 %

Koekappaleen paksuudella ei vaikuttaisi olevan merkitystä häviökertoimen muutokseen.

Seuraavassa kuviossa on esitetty 0,96 mm paksun koekappaleen häviökertoimen muutos 60 °C vakio lämpötilassa.



KUVIO 13. 0,96 mm paksun Nomex-täpläpaperi -koekappaleen häviökertoimen muutos ajan funktiona

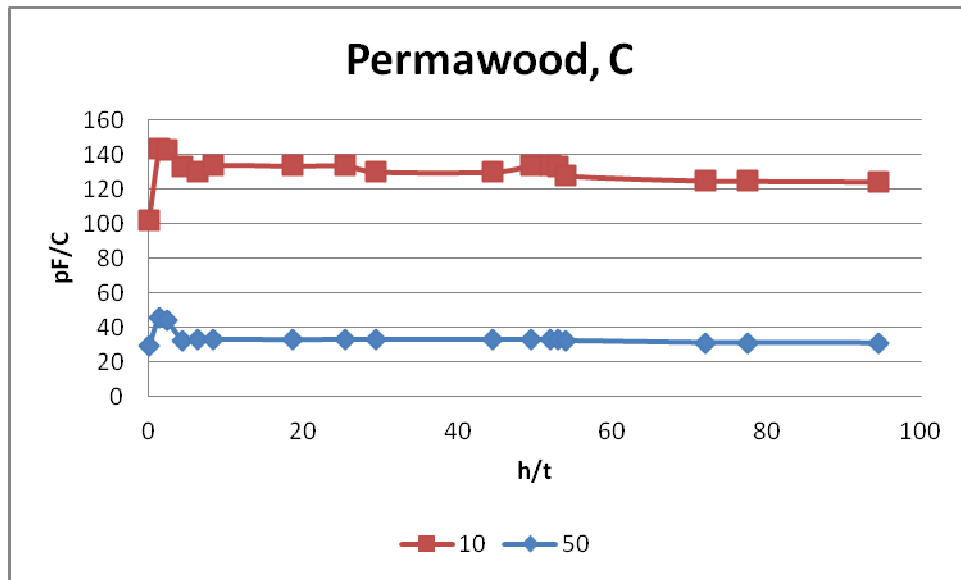
Kuviosta nähdään, että impregnoituminen parantaa Nomex-täpläpaperin häviökerrointa.

### 6.3.2 Tasokoekappaleet

Tässä luvussa käsitellään eri materiaaleista valmistettujen tasokoekappaleiden kapasitanssin ja häviökertoimien arvoja ajan funktiona.

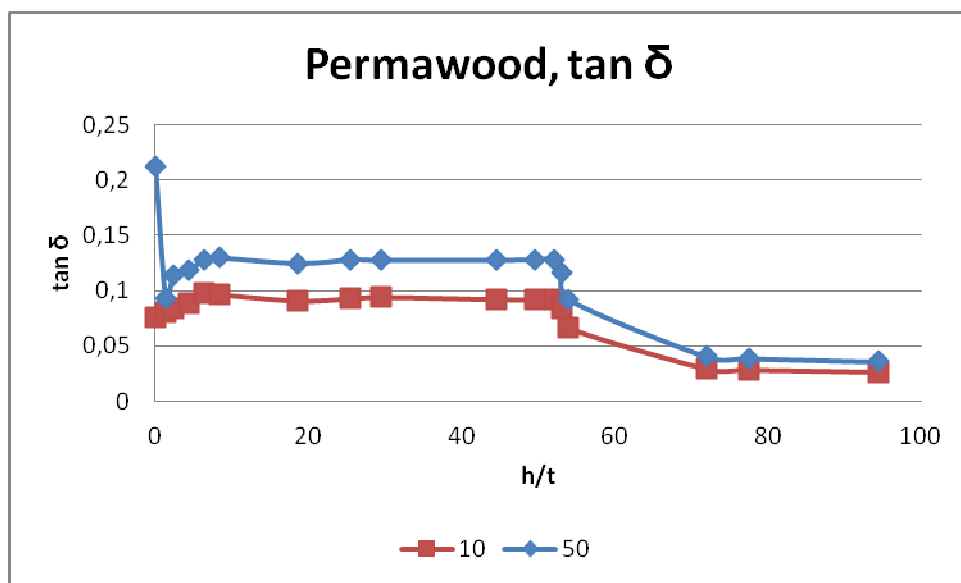
### 6.3.2.1 Permawood

Kuviossa 14 ja 15 on esitetty Permawood -koekappaleiden kapasitanssit ja häviökertoimet ajan funktiona



KUVIO 14. Permawood -koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona

Kuviosta nähdään, että koekappaleiden kapasitanssit eivät muutu laisinkaan 8–51,5 h aikana, jolloin lämpötila pysyi 60 °C:ssa. Permawood ei näiden tuloksien perusteella ole impregnoitunut laisinkaan tai impregnoituminen on tapahtunut ensimmäisen tunnin aikana.



KUVIO 15. Permawood-koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona

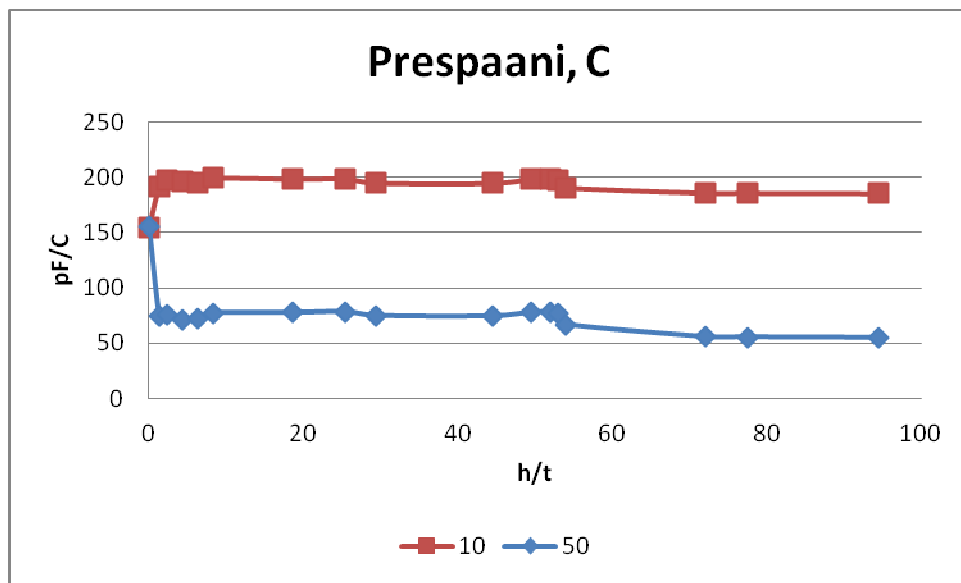
Kuviosta 15 nähdään, että impregnointi pienentää häviökerrointa seuraavasti:

10 mm: 198 %

50 mm: 493 %

### 6.3.2.2 Prespaani

Kuvioissa 16 ja 17 on esitetty prespaani -koekappaleiden kapasitanssit ja häviökertoimet ajan funktiona.

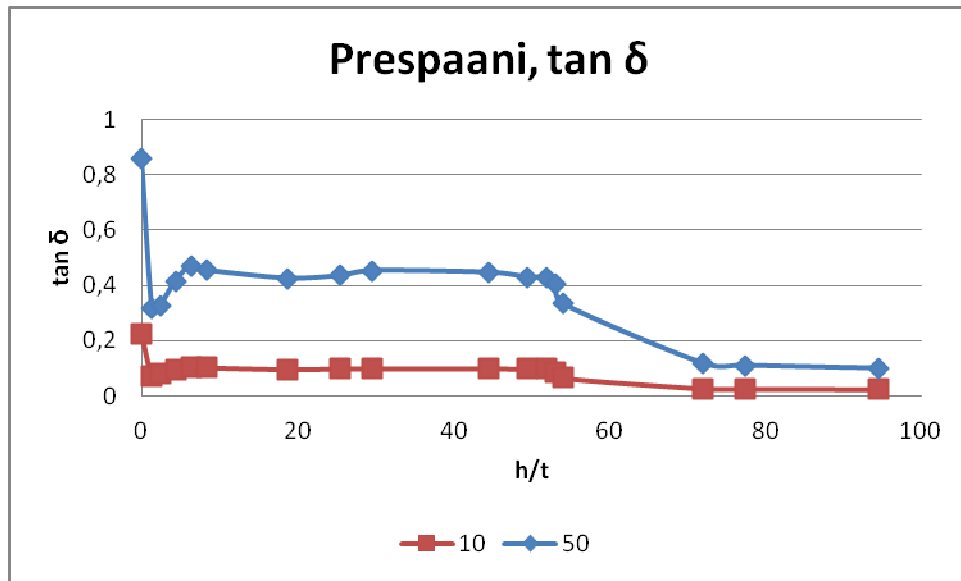


KUVIO 16. Prespaani -koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona

Kuviosta 16 nähdään, että kuivana mitattu tulos on virheellinen. Eri paksuisilla koekappaleilla ei voi olla yhtä suurta kapasitanssia. Prespaani -koekappaleiden kapasitanssi ei enää kasva 8-51,5 h aikana. Viisi kertaa paksumman koekappaleen kapasitanssin tulisi teorian mukaan olla viisi kertaa pienempi (kaava 15). Koekappaleiden kapasitanssien ero on kuitenkin vain 3,3-kertainen. Tämä voi johtua huonosta impregnoinnista, joka on johtanut eriarvoisiin permittiivisyyksiin tai koejärjestelyyn liittyvistä asioista: kaksi-komponenttiliimasta ja säiliön sisällä olevista eripituisista koaksiaalikaapeleista.

10 mm paksun koekappaleen kapasitanssi ei kasvanut lainkaan sen jälkeen kun 60 °C lämpötila saavutettiin 8,5 h kohdalla, jonka perusteella sitä voidaan pitää impregnointi-aikana. Prespaani -koekappaleista 50 mm impregnoituu 25 h aikana.

Seuraavassa kuviossa on esitetty prespaani -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona.



KUVIO 17. Prespaani -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona

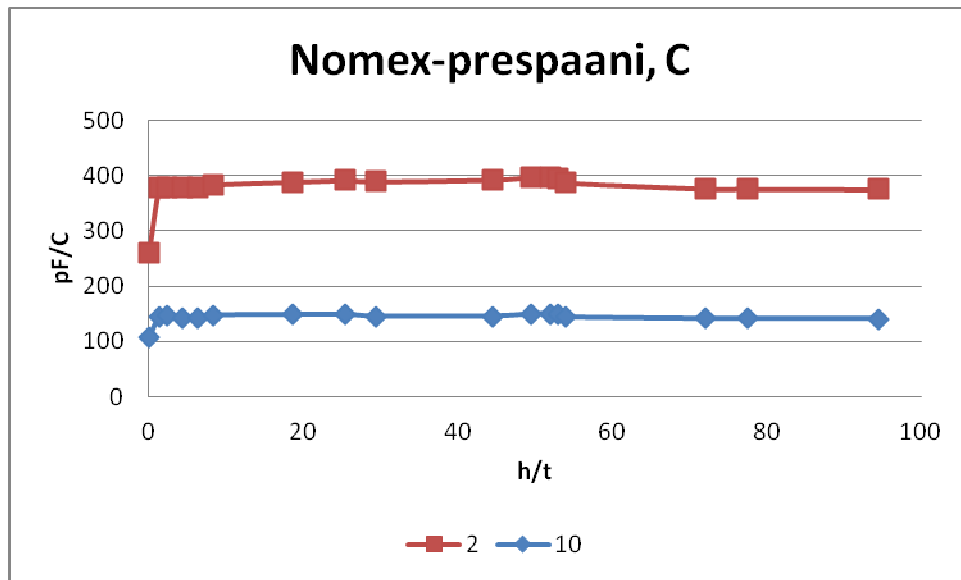
Kuviosta 17 nähdään, että impregnointi pienentää häviökerrointa seuraavasti:

10 mm: 817 %

50 mm: 757 %

### 6.3.2.3 Nomex-prespaani

Kuviossa 18 ja 19 on esitetty Nomex-prespaani -koekappaleiden kapasitanssit ja häviökertoimet ajan funktiona.



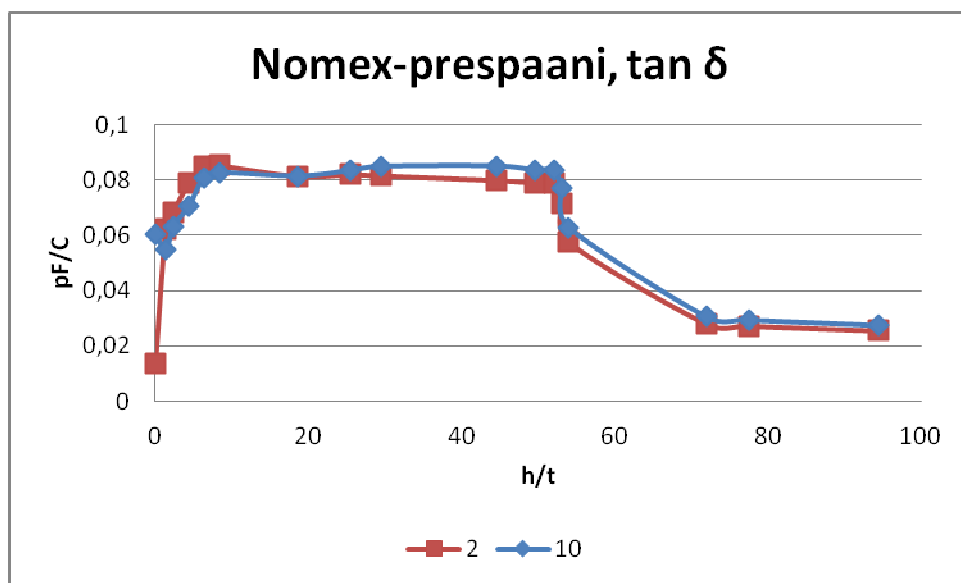
KUVIO 18. Nomex-prespaani -koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona

Koekappaleiden kapasitanssit kasvoivat impregnoitumisen aikana seuraavasti:

2 mm: 44,6 %

10 mm: 30,3 %

Koekappaleista 2 mm kasvoi 1h 20 min – 52 h impregnoitumisen aikana keskimäärin 0,38 pF/h. Viimeisen impregnoitumistunnin aikana kasvunopeus oli enää 0,09 pF/h. 10 mm paksun koekappaleen keskimääräinen kasvu 1h 20 min – 52 h aikana oli 0,08 pF/h. Lopussa kasvu oli lähes pysähtynyt. Suhteellisen muutosnopeuden perusteella Nomex-prespaanit eivät kyllästyneet täydellisesti 50 h impregnoitumisen aikana.



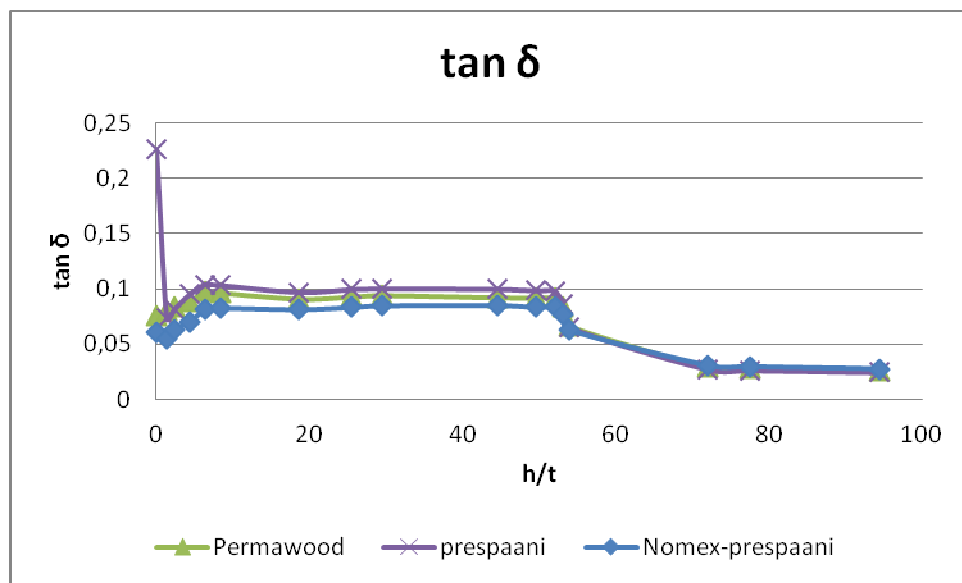
KUVIO 19. Nomex-prespaani -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona



Huomioitavaa kuviossa 19 on, että eristysnesteen impregnoituminen johtaa yhtä suuriin häviökertoimiin.

#### 6.3.2.4 Materiaalivertailu

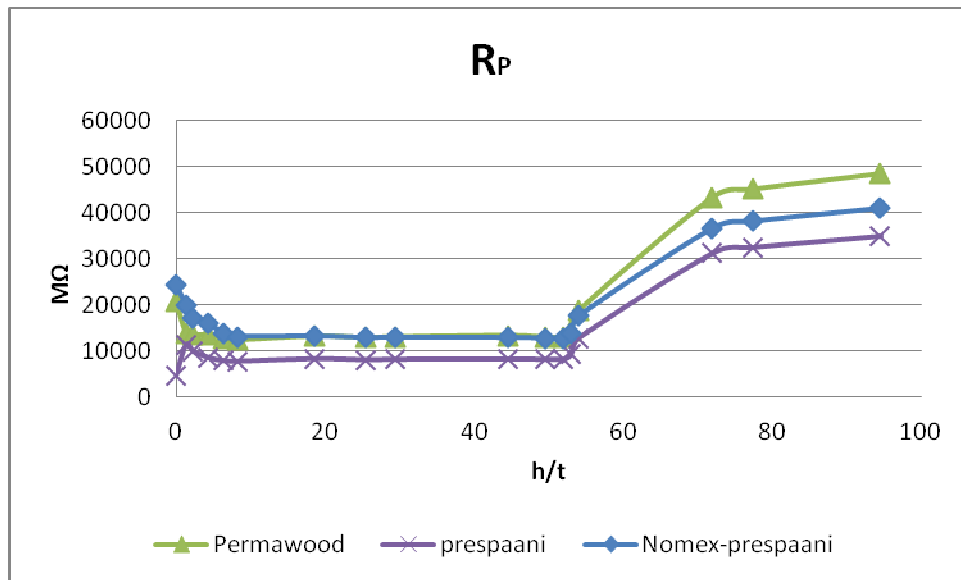
Kuviossa 20 ja 21 vertaillaan 10 mm paksujen tasokoekappaleiden häviökertoimia ja vuotovirtaa vastustavaa resistanssia.



KUVIO 20. 10 mm paksujen tasokoekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona

Mittaustuloksien mukaan koekappaleen häviökertoimet hakeutuvat samalle tasolle impregnoitumisen vaikutuksesta. Kuuma eristysneste heikentää suhteessa eniten prespaania, kun taas Nomex-Prespaanin eristyskyky säilyy kuumassa eristysnesteessä parhaiten.

Kuviossa 21 on esitetty kaavalla 12 lasketut  $R_P$ :n arvot.



KUVIO 21. Tasokoekappaleiden vuotovirtaa vastustava  $R_P$  ajan funktiona

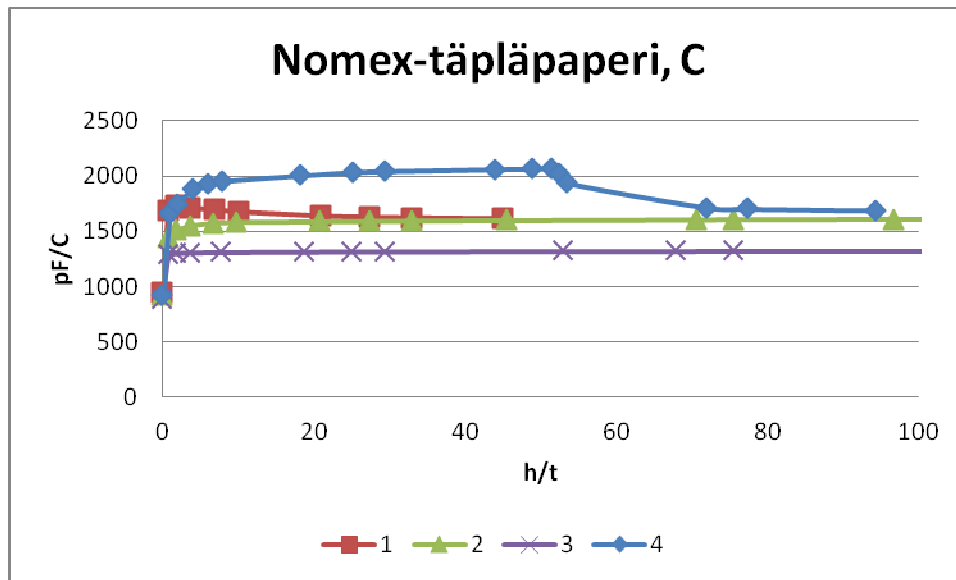
Tuloksien mukaan impregnointi parantaa vuotovirtaa vastustavaa  $R_P$ :tä.

### 6.3.3 Päätelmiä

Tämän mittaussarjan mittaustulokset olivat onnistuneimmat. Tuloksista näkyy lämpötilan muutoksesta sekä impregnoinnista johtuvat muutokset kapasitanssin ja häviökertoimen arvoihin. Käämikoekappaleissa näkyi selvästi materiaalien ja paksuuksien aiheuttamat erot. Permawood koekappaleiden häviökertoimen ja kapasitanssin arvot eivät muutu lainkaan impregnoinnin vaikutuksesta 8–52 h aikana. Arvot muuttuvat pelkästään eristysnesteen lämpötilan muutoksen vaikutuksesta. Käytäntö on osoittanut, että eristysnesteen imeytyminen kutistaa eristemateriaaleja (Hirvikoski, 2012). Tämä näkyy koekappaleiden levyvälien pienentymisenä, mikä pienentää kapasitanssia. Paksuissa tasokoekappaleissa kutistumisen muutos voi näkyä suurempana kapasitanssin pienentymisenä, joka kompensoituu eristysnesteen impregnoituessa.

## 6.4 Eristysnestevertailu

Seuraavassa kuvioissa vertaillaan neljän eri mittaussarjan kapasitanssin ja häviökertoimen muutoksia 0,96 mm Nomex-täpläpaperi -koekappaleessa. Kuvioissa käyrien numerointi vastaa eri mittaussarjoja.

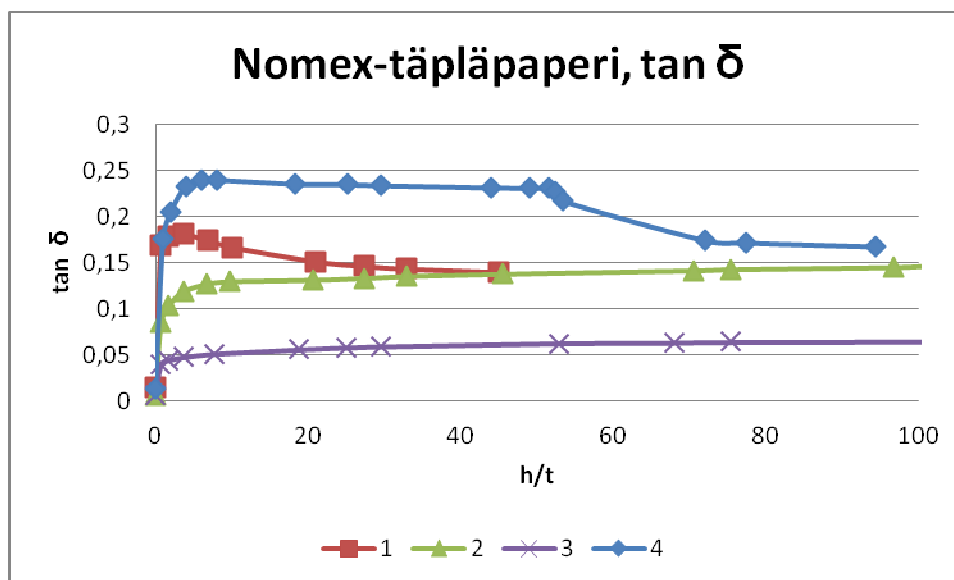


KUVIO 22. 0,96 mm paksun Nomex-täpläpaperi -koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona

Kuviosta nähdään, että koko prosessin ajan lämmitetty Midel (4. mittausarja) impregnoituu parhaiten, kun eristysnesteinä on Midel. Ensimmäisessä mittausarjassa jäähtyvä Midel kasvattaa koekappaleen kapasitanssia yhtä paljon kuin toisen mittausarjan huoneenlämpöinen Midel. Nytro 10XN impregnoituu nopeasti. Kolmannen mittausarjan koekappaleen kapasitanssi jää muita alhaisemmaksi Nytro 10XN:n pienen permittiivisyyden takia (taulukko 2). Koekappaleiden kapasitanssit kasvavat suhteellisesti seuraavasti:

1. Midel 75 °C: 71 %
2. Midel 23 °C: 75,3 %
3. Nytro 10 XN 23 °C: 49,8 %
4. Midel 75 °C, lämmitys: 84,1 %

Kuviossa 23 on esitetty koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona.



KUVIO 23. 0,96 mm paksujen Nomex-täpläpaperi -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona

Kuviosta nähdään kuumen ja kylmän eristysnesteen aiheuttamat erot. Huomioitavaa on, että käyrät 1, 2 ja 4, joissa eristysnesteenä on Mideliä, hakeutuvat samalle tasolle. Nytro 10XN impregnoiminen ei heikennä koekappaleen häviökerrointa yhtä paljon kuin Midel.

## 6.5 Impregnointiajat

Tässä luvussa on esitetty Nytro 10XN ja Midelin impregnointiajat eri materiaaleihin. Ajat on otettu kapasitanssin muutosnopeuden perusteella. Joko muutosta ei ole enää ollut, tai se on ollut hyvin pientä.

TAULUKKO 7. Impregnoimisajat eri materiaaleihin

Eristemateriaali	Impregnoitumisaika (h)	
	Midel 60 °C	Nytro 10 XN
täpläpaperi 0,90 mm	51,5+	5
Nomex-täpläpaperi 0,96 mm	50	20
paperi 0,90 mm	6	1
Nomex-paperi 0,91 mm	30	20
Permawood 10 mm	-	4
prespaani 10 mm	6	8
Nomex-prespaani 10 mm	52+	25

## 7 YHTEENVETO

Tavoitteet koe- ja mittausjärjestelyn kehittämiseen eristysnesteiden impregnoitumisen tutkimiseksi saavutettiin. Mittaustulokset ovat suuntaa-antavia, koska koekappaleiden rakenteista, liimauksesta ja erimittaisista kaapeleista tuli virheitä. Mittaustuloksissa olevat virheet eivät muutu mittaussarjojen aikana, joten koekappaleiden arvojen muutoksia, eli impregnoitumisen nopeutta, pystyy tutkimaan.

Mittausjärjestelyä kehitettiin koko työn ajan. Lopullinen järjestely poikkesi paljon suunnitellusta mittausjärjestelystä. Alun perin tavoitteena oli saada mittalaite IDAX-300 ja vaihtoyksikkö Agilent 34970A mittaamaan automaattisesti halutun ohjelman mukaisesti. Mittalaitteet eivät pystyneet kommunikoimaan keskenään, eikä työhön suunniteltu aika riittänyt ulkopuolisen ohjauslaitteiston käyttöönottoon. Tämän takia mittauspisteitä tuli suunniteltua vähemmän, koska mittaukset toteutettiin manuaalisesti. Usean samaan aikaan mitattavan koekappaleen takia jouduttiin käyttämään releohjausta, kuorittuja koaksiaalikaapeleita sekä säiliön sisällä erimittaisia teflonpinnoitteisia kaapeleita. Nämä tekijät toivat tuloksiin näkyviä virheitä.

Mittaustuloksista näkyi seuraavaa: materiaalin paksuus vaikuttaa impregnointiin hidastavasti, eristysnesteiden impregnoiminen kasvattaa eristemateriaalin kapasitanssia ja pienentää häviökerrointa. Lämpötilan kasvaessa eristemateriaalin häviökerroin kasvaa resistanssin pienenemisen takia, koska materiaalin johtavuus kasvaa. Midelin lämpötilaa on pidettävä korkealla, jotta impregnoiminen on tehokkaampaa. Vuorokaudessa huoneenlämpötilaan jäähtyvä Midel ei impregnoitu huoneenlämpöistä Mideliä kovin paljoa paremmin. Nytro 10XN impregnoituu Mideliä nopeammin.

Mittaustuloksien mukaan sekä Nytro 10XN että Midel heikentää kuivien käämikoekappaleiden häviökertoimia, mutta parantaa tasokoekappaleiden häviökertoimia. Tämä voi johtua siitä, että koekappaleiden kuivaus- ja tyhjiökäsittely ei ollut riittävä paksuille tasokoekappaleille. Eristysnesteessä olevat epäpuhtaudet ja kosteus imeytyivät käämikoekappaleisiin tasokoekappaleita helpommin ja heikensivät niiden häviökertoimia.

Permawood -koekappaleiden kapasitanssit eivät kasvaneet yhdessäkään mittauksessa ensimmäisen mittauspisteen jälkeen, kun eristysnesteinä oli Midel. Tuloksista ei voida

todeta, kyllästyvätkö koekappaleet ensimmäisen tunnin aikana, mittaavatko kondensattorit vain ympäröivän eristysnesteen hajakapasitanssia, vai kutistuvatko koekappaleet impregnoitumisen tahdissa.

Mittausjärjestely olisi tarkempi ja luotettavampi, mikäli tutkittaisiin yhtä koekappaletta kerrallaan. Tällöin eri mittaustuloksissa olevat virheet olisivat pienempiä ja kaikilla koekappaleilla yhtä suuria, koska koaksiaalikaapeleita ei tarvitsisi kuoria eikä säiliön sisällä käyttää erimittaisia kaapeleita. Lisäksi mittalaite IDAX-300 voisi mitata yhtä tutkittavaa materiaalia ilman releohjausta automaattisesti matalimmilla taajuuksilla. Usean koekappaleen mittaaminen ilman häiriöitä vaatisi uuden releohjauksen ilman kaapeleiden kuorimista ja juottamista sekä kaapeleiden kiinnittämisen säiliöön ja mitta-laitteeseen liitinkappaleilla, joissa on luotettavampi kosketus.

Nytro 10XN:lle riittää vuorokausi kaikkien eristemateriaalien impregnoimiseen. Midel impregnoituu vaihtelevasti eri eristemateriaaleihin. Verrattaessa neljättä mittaussarjaa ensimmäiseen ja toiseen mittaussarjaan, voidaan todeta, että paremman impregnoimisprosessin kannalta olisi tärkeää ylläpitää Midelin lämpötilaa mahdollisimman korkealla. Tämän voisi toteuttaa joko seisonta-ajan aikana säiliön sisälle upotettavilla lämmitysvastuksilla, tai eristysnesteenkiertojärjestelmällä, jossa lämmintä eristysnestettä syötetään säiliön sekä suodatus- ja lämmitysjärjestelmän kautta koko impregnointiprosessin ajan.

## LÄHTEET

ABB Group presentation February 2012. Power point.

ABB Suomessa avainluvut 2011. Power point.

ABB Transformers Official Presentation 2011. Power point.

Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K. & Palva, K. 2003. Suurjännitetekniikka. 2. Helsinki: Otatieto.

Aura, L. & Tonteri, A.J. 2000. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 3. Porvoo: WSOY.

Dai, J., Wang, Z.D., Dyer, P., Darwin, A.W. & James, I., 2007. Investigation of the impregnation of cellulosic insulation by ester fluids. Manchester, UK: The University of Manchester, School of Electrical and Electronic Engineering.

DuPont Product. Nomex®. Luettu 12.4.2012. <http://www.pleo.com/dupont/nomex.htm>

Hiironniemi, 1977. Jänniterasitukset ja –lujuus II. Vaasa: Strömberg Oy.

Matweb. DuPont™ Nomex® 455 (NOMEX III) Aramid Staple Fiber. Luettu 12.4.2012. <http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=920f9c539b394c2cbdce6e3d1c257d4>

Meyer-vastus. Lämpötilan säätöyksiköt 16S. Luettu 3.5.2012. [http://www.meyervastus.fi/content/products/pdf/S%E4%E4t%E4j%E4t%2016S\\_2012.pdf](http://www.meyervastus.fi/content/products/pdf/S%E4%E4t%E4j%E4t%2016S_2012.pdf)

Meyer-vastus. Tynnyrilämmitin. Luettu 3.5.2012. <http://www.meyervastus.fi/content/products/pdf/Kaikki%20tynnyril%E4mmittimet.pdf>

Paavola, M. 1970. Sähkötekniikan oppikirja. 10. Porvoo: Werner Söderström Osakeyhtiö.

Pax diagnostics. IDAX-300. Luettu 6.4.2012. [http://www.paxdiagnostics.com/uploads/Idax-300\\_A4\\_080909.pdf](http://www.paxdiagnostics.com/uploads/Idax-300_A4_080909.pdf)

Hirvikoski, J. 2012. sähköposti.

Testing Power Trasnformers, Strömberg, 12-1.

Transformerscommittee. 2009. Dielectric Frequency Response Testing. Luettu 1.3.2012. <http://www.transformerscommittee.org/info/F09/F09-Tutorial-DFR.pdf>

Cp literature. Agilent 34970A. Luettu 20.2.2012. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-5290EN.pdf>

## Liite 1. Nytro 10XN datasheet

1(2)

SUPER GRADE

## Nytro 10XN

Maximum performance insulating oil

Nytro 10XN is an inhibited super grade that conforms to both ASTM D3487 and IEC 60296 Edition 4.0, including the fulfilment of specific requirements for special applications. Developed and formulated to deliver maximum resistance to oil degradation, Nytro 10XN provides outstanding oxidation stability for a longer transformer life with less maintenance. This makes it a popular choice worldwide.

**Designed for heavy duty**

This product has been specially developed for use in oil-filled electrical equipment – including power and distribution transformers, rectifiers, circuit breakers and switchgears.

**Performance and benefits**

Extremely good heat transfer. Thanks to low viscosity and viscosity index, this super grade offers extremely good heat transfer characteristics, ensuring heat is efficiently removed from core and windings.

Outstanding oxidation stability. Developed and formulated to deliver maximum resistance to oil degradation, this grade provides outstanding oxidation stability for enhanced transformer life and minimum maintenance.

Very good low temperature properties. Naphthenic characteristics allow the transformer to start at the lowest possible temperature – without using pour point depressants.

High dielectric strength. This insulating oil both meets and exceeds the toughest demands on dielectric strength – when stored and handled correctly.

**Product description**

Nytro 10XN fulfils the requirements for IEC 60296 Edition 4.0 fully inhibited oil. Nynas classify this product as a super grade.

Nytro 10XN is rigorously analysed and passes the following corrosion tests:

- ASTM D1275 method B
- IEC 62535
- DIN 51353

In accordance with IEC 60296 Edition 4.0, all additives are declared.

**There's more to us than this**

We're delighted you chose one of our transformer oils. If you have any questions about other products and services, get in touch with your local Nynas contact. Besides top quality oils, we offer a wide range of services, including rapid delivery worldwide, sample analysis, training, seminars and much more. All you have to do is ask. Find out more at [www.nynas.com](http://www.nynas.com)





## PRODUCT DATA SHEET

## Nytro 10XN

PROPERTY	UNIT	TEST METHOD	SPECIFICATION LIMITS		TYPICAL DATA
MIN					
MAX					
1 - Function					
Viscosity, 40°C	mm²/s	ISO 3104		8.0	7.6
Viscosity, -30°C	mm²/s	ISO 3104		800	730
Pour point	°C	ISO 3016		-45	-63
Water content	mg/kg	IEC 60814		30	<20
Breakdown voltage					
- Before treatment	kV	IEC 60156	30		40-60
- After treatment	kV		70		>70
Density, 20°C	kg/dm³	ISO 12185		0.895	0.877
DDF at 90°C		IEC 60247		0.005	<0.001
2 - Refining/stability					
Appearance		IEC 60296	Clear, free from sediment		complies
Acidity	mg KOH/g	IEC 62021		0.01	<0.01
Interfacial tension	mN/m	EN 14210	40		50
Total sulphur content	%	ISO 14596		0.15	<0.01
Corrosive sulphur		DIN 51353	non-corrosive		non-corrosive
Potentially corrosive sulphur		IEC 62535	non-corrosive		non-corrosive
Corrosive sulphur		ASTM D 1275 B	non-corrosive		non-corrosive
DBDS	mg/kg	IEC 62697-1		not detectable	not detectable
Antioxidant	wt %	IEC 60666		0.4	0.3
Metal passivator additives	mg/kg	IEC 60666		not detectable	not detectable
2-Furfural and related compounds content	mg/kg	IEC 61198		0.05	<0.05
Aromatic content	%	IEC 60590			6
3 - Performance					
Oxidation stability at 120°C,500 h		IEC 61125 C			
Total acidity	mg KOH/g			0.30	0.04
Sludge	wt %			0.05	<0.02
DDF at 90°C				0.050	0.03
4 - Health, safety and environment (HSE)					
Flash point, PM	°C	ISO 2719	140		144
PCA	wt %	IP 346		3	<3
PCB		IEC 61619	not detectable		not detectable

Nytro 10XN is an inhibited insulating oil with extremely good electrical and low temperature properties and excellent ageing properties. This product meets IEC 60296 Ed.4 (2012), special applications and ASTM D3487 type II (excluding gassing tendency).

Severely Hydrotreated Insulating Oil  
Issuing date: 2012-04-01



**MIDEL<sup>®</sup>**

MIDEL® 7131

## Dielectric Insulating Fluid Overview

December 2010 Page 1 of 2

## MIDEL 7131 Product Overview

MIDEL 7131 is a synthetic ester-based dielectric fluid that has been serving the global transformer market for over 30 years. MIDEL 7131 has been specifically formulated to provide a safe, superior alternative to traditional fluid and dry-type transformers and can be used in indoor or outdoor locations.

MIDEL 7131 is a high performance fluid that offers increased fire safety, greater environmental protection and superior moisture tolerance. Testing has also proven that MIDEL 7131 has excellent dielectric properties.

**IEC 61099 Conformity**

MIDEL 7131 conforms to IEC 61099 "Specifications for Unused Synthetic Organic Esters for Electrical Purposes". It is classified as type T1, a halogen-free pentaerythritol ester.

### Areas of Application

MIDEL 7131 filled transformers are available from all major transformer manufacturers. MIDEL 7131 is suitable for a wide range of transformer applications, including sealed and breathing.

- ▶ Distribution transformers
- ▶ Power transformers
- ▶ Traction transformers
- ▶ Rectifier transformers
- ▶ Pole-type transformers
- ▶ Tapchangers
- ▶ Thyristor cooling

## Retrofilling

MIDEL 7131 has been used to retrofit thousands of distribution transformers to improve service life, reduce environmental hazards or increase fire safety.

### Corrosive Sulphur

MIDEL 7131 has been tested by independent laboratories to ASTM D1275 B and IEC 62535, it was found to be non-corrosive.

### Increased Fire Safety

MIDEL 7131 has a high fire point and a low net calorific value (<32 MJ/kg) and is therefore classified as a K3 class liquid.

- ▶ 100% fire safety record
- ▶ High fire point (>300°C)
- ▶ K-class to IEC 61100 / 61039
- ▶ FM Global® approved transformer fluid
- ▶ Reduced fire safeguarding costs

### Greater Environmental Protection

MIDEL 7131 is an environmentally friendly alternative to conventional transformer fluids because it is classified as readily biodegradable and non-water hazardous.

- Readily biodegradable (OECD 301)
- Fully biodegradable (IEC 61039)
- Classified as non-water hazardous by (UBA)
- Non-toxic
- Will not evaporate into the environment
- Not detrimental to activated sludge in biological treatment plants
- RoHS compliant

### High Performance

MIDEL 7131 is an extremely robust fluid that delivers long-term stability even when exposed to extreme temperature variations. MIDEL 7131 also has excellent oxygen stability allowing it to be used in breathing transformers.

- ▶ Robust and stable at high temperatures over long periods
- ▶ Suitable for compact transformer design
- ▶ Superior oxygen stability
- ▶ Excellent lubricant
- ▶ No sludge formation

### Molsture Tolerance

MIDEL 7131 is moisture tolerant and can absorb far more water than alternative fluids, without compromising the breakdown voltage.

- ▶ No reduction of breakdown voltage (up to 600ppm / 20°C)
- ▶ Allows moisture to migrate from cellulose into the fluid
- ▶ Potentially keeps the cellulose drier and slows the rate of ageing
- ▶ Very high saturation limit making condensation virtually impossible
- ▶ Reduced risk of bubble formation

### Delivery

MIDEL 7131 can be delivered in 24.5kg, 195kg or 1000kg sealed containers; bulk tanker deliveries available for >20 tonnes.

### Disposal

For disposal, it is recommended that used MIDEI 7131 or remains of the Insulating fluid be burnt in a suitable installation.

[www.midel.com](http://www.midel.com)

Any recommendation or suggestion relating to the use, storage, handling or disposition of the products supplied by WMI-Wanda Ltd either in sales and technical literature or in response to a formal enquiry shall constitute a request in good faith, which neither creates nor constitutes part of the contract between the parties to the said purchase order. It may need further discussion.

MIDEL<sup>®</sup> 7131

## Dielectric Insulating Fluid Overview

December 2010 Page 2 of 2

Table 1 - Characterisation of Type T1 Transformer Ester According to IEC 61099 and DIN VDE 0375

	Unit	Test Method	Requirement	MIDEL 7131
<b>Physical Properties According to IEC 61099</b>				
Colour	HU	ISO 2211	max. 200	125
Appearance	-	IEC 61099 7.1.2	clear, free from suspended matter and sediment	clear, free from suspended matter and sediment
Density at 20°C	kg/dm <sup>3</sup>	ISO 3675	max. 1.00	0.97
Kinematic Viscosity at 40°C	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104	max. 35.0	28
Kinematic Viscosity at -20°C	mm <sup>2</sup> /s		max. 3000	1400
Flash Point	°C	ISO 2719	min. 250	260
Fire Point	°C	ISO 2592	min. 300	316
Pour Point	°C	ISO 3016	max. -45	-60
Crystallisation	-	IEC 61099 (2010) Annex A	No crystals	No crystals
<b>Chemical Properties According to IEC 61099</b>				
Water Content	mg/kg	IEC 60814	max. 200	50
Neutralisation Value	mg KOH/g	IEC 62021-2	max. 0.03	<0.03
Oxidation Stability				
- Total Acid Content	mg KOH/g	IEC 61125	max. 0.3	0.01
- Total Sludge Content	% mass		max. 0.01	<0.01
Net Calorific Value	MJ/kg	ASTM D 240-02	<32	31.6
<b>Dielectric Properties According to IEC 61099</b>				
Breakdown Voltage	kV	IEC 60156	min. 45	>75
Dielectric Dissipation Factor Tan δ at 90°C and 50 Hz	-	IEC 60247	max. 0.03	<0.008
Volume Resistivity DC at 90°C	Gohm-m	IEC 60247	min. 2	>30

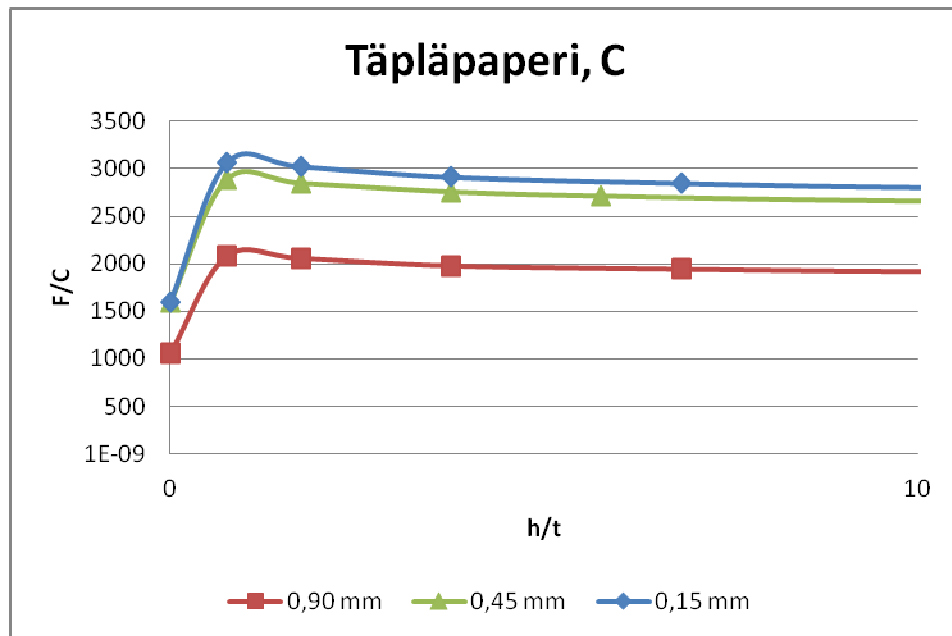
Data quoted above are typical values, may be altered without notice and do not constitute a specification

[www.midel.com](http://www.midel.com)

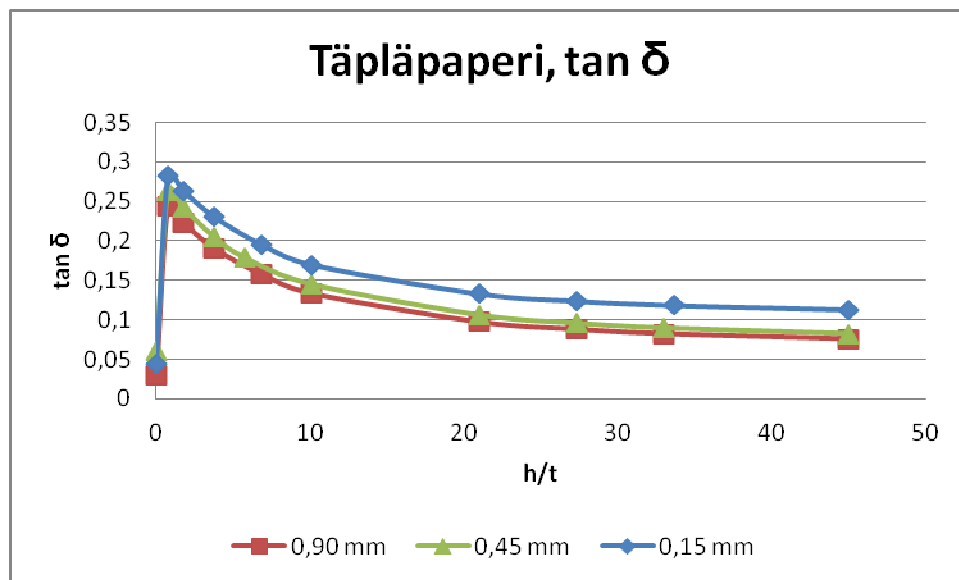
All recommendations are subject to change without notice. The use, storage, handling or disposal of the products supplied by MIDEL should be in accordance with the relevant technical literature and the applicable regulations. MIDEL is not responsible for any damage or loss resulting from the use of the products supplied by MIDEL.

Liite 3. Ensimmäisen mittauksen tulokset, Midel 75 °C

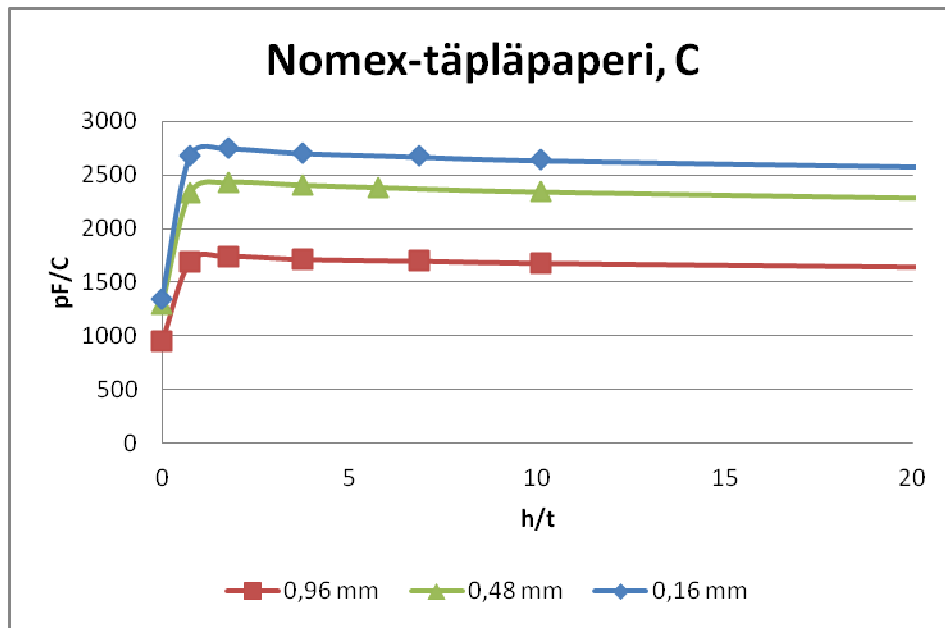
1(5)



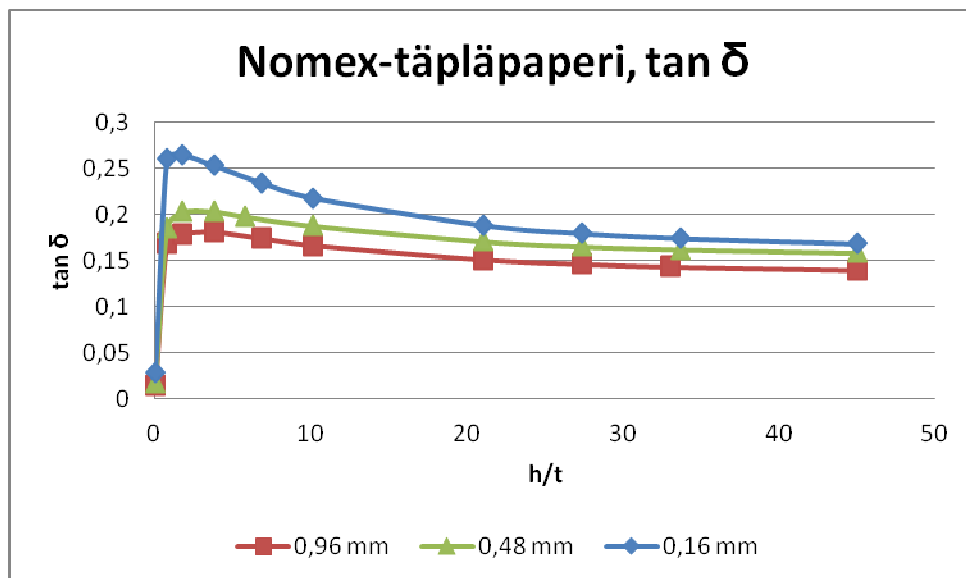
KUVIO 24. Täpläpaperi -koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona



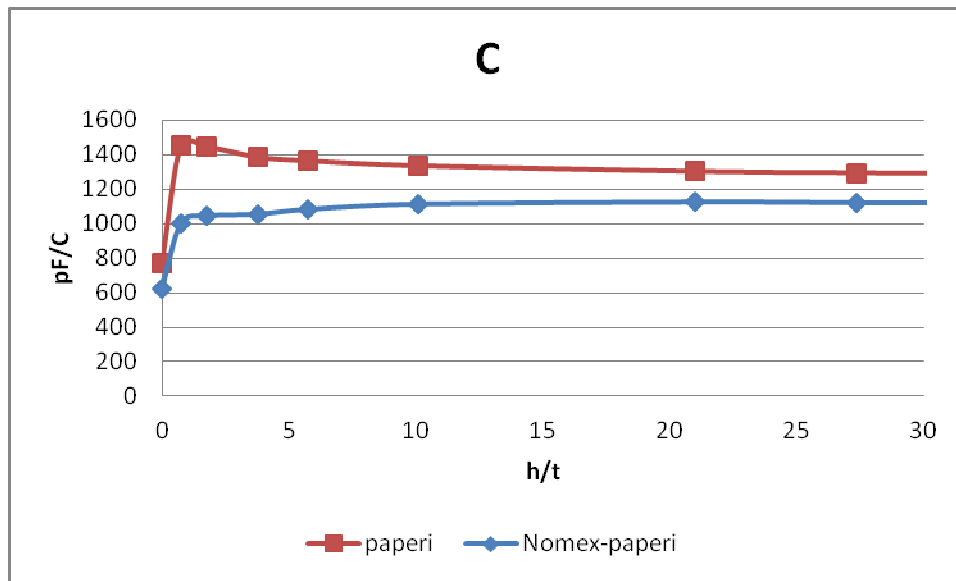
KUVIO 25. Täpläpaperi -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona



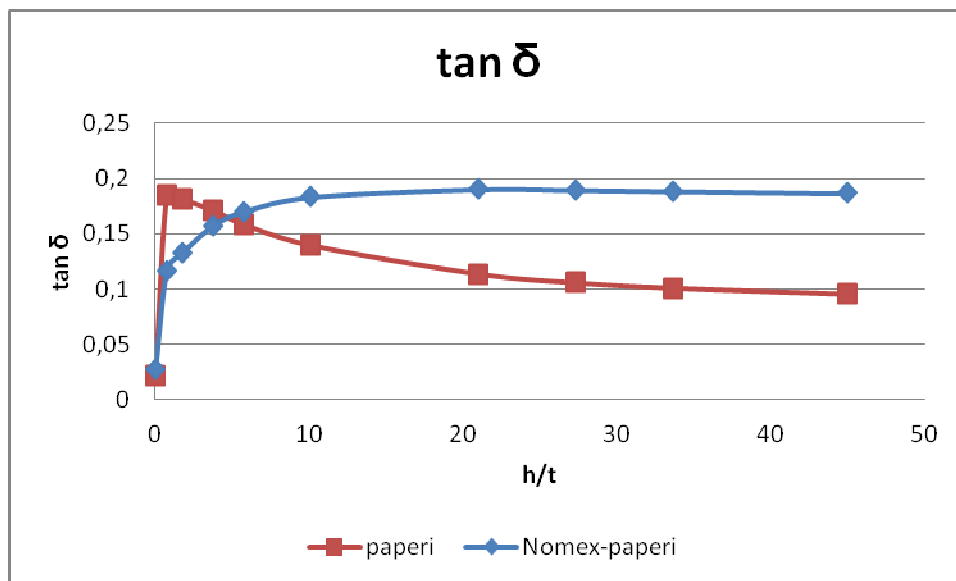
KUVIO 26. Nomex-täpläpaperi -koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona



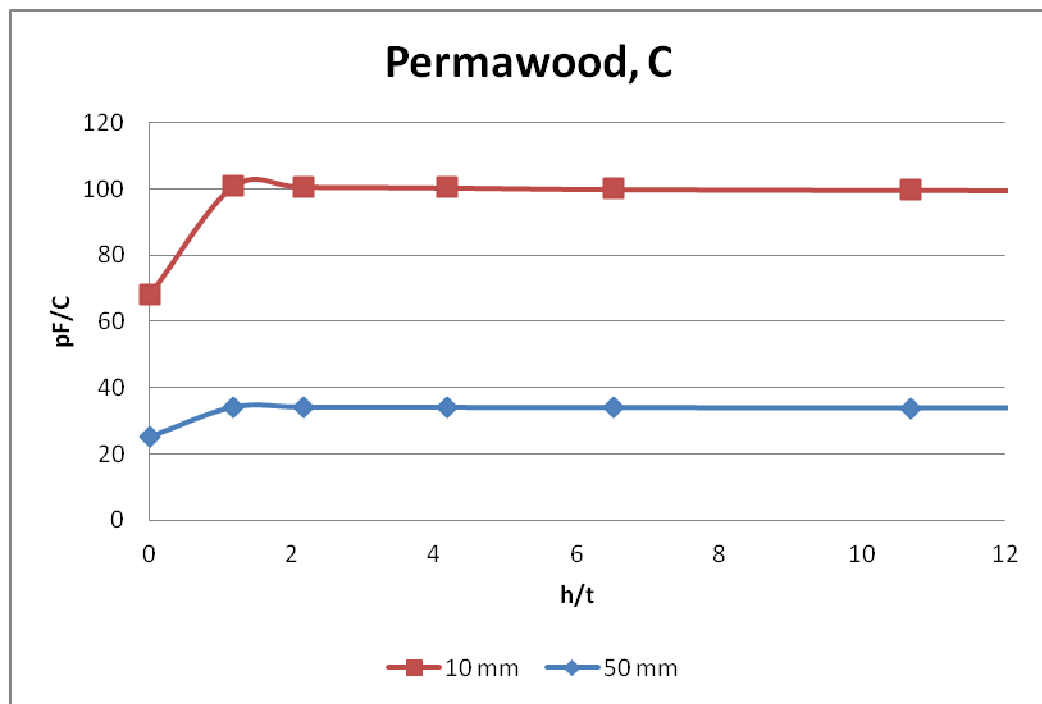
KUVIO 27. Nomex-täpläpaperi -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona



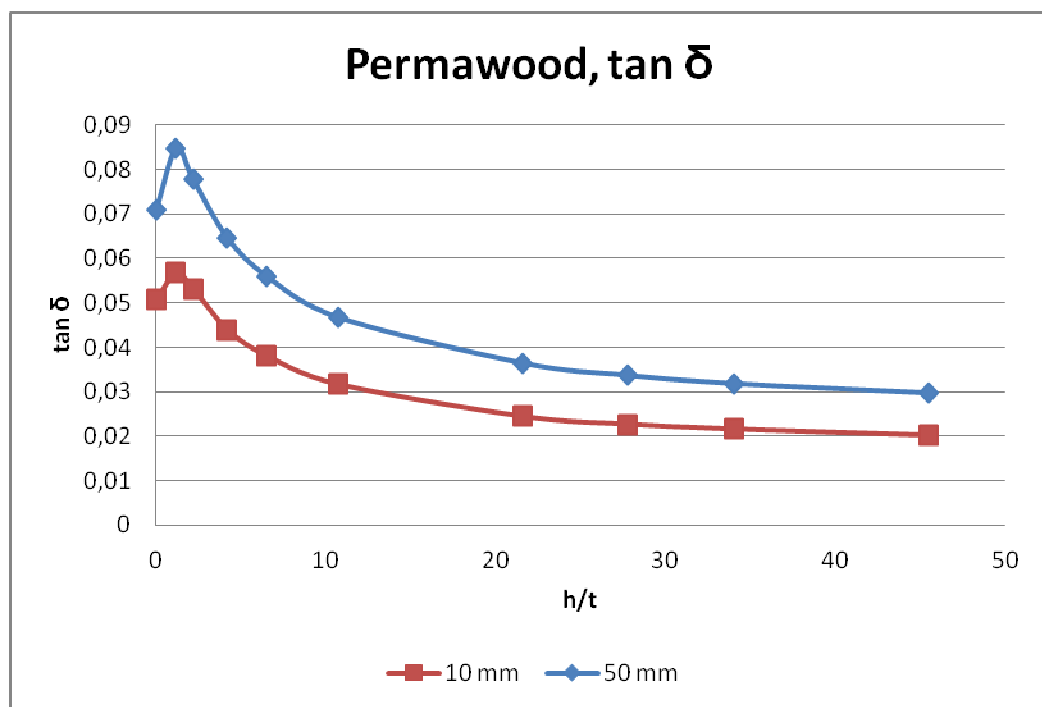
KUVIO 28. Paperin ja Nomex-paperin kapasitanssit ajan funktiona



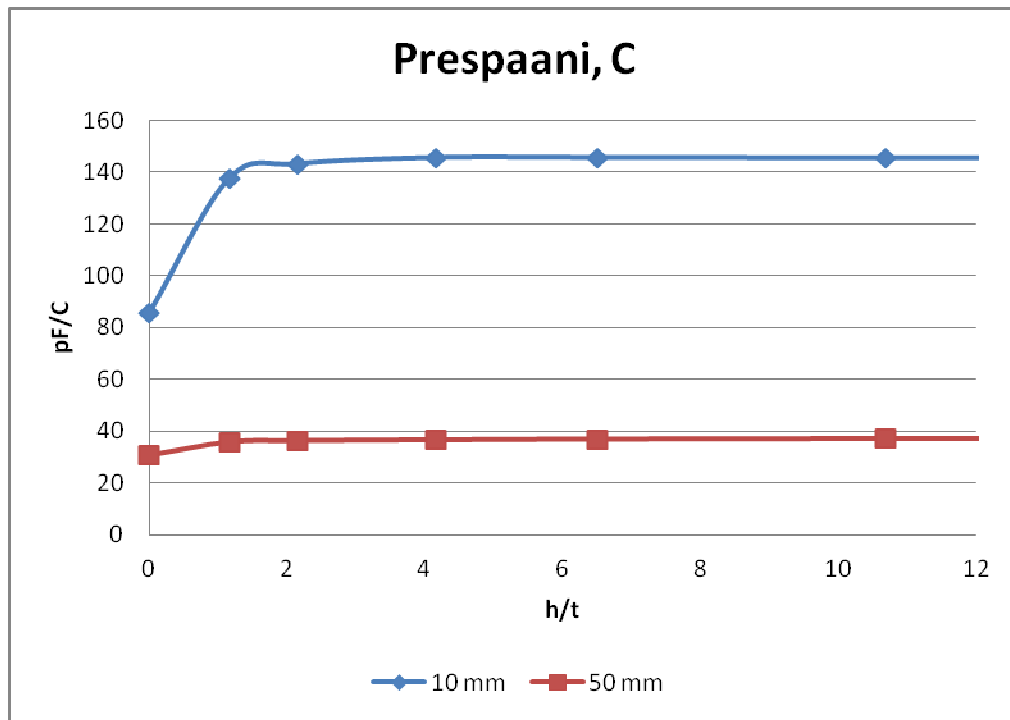
KUVIO 29. Paperin ja Nomex-paperin häviökertoimet ajan funktion



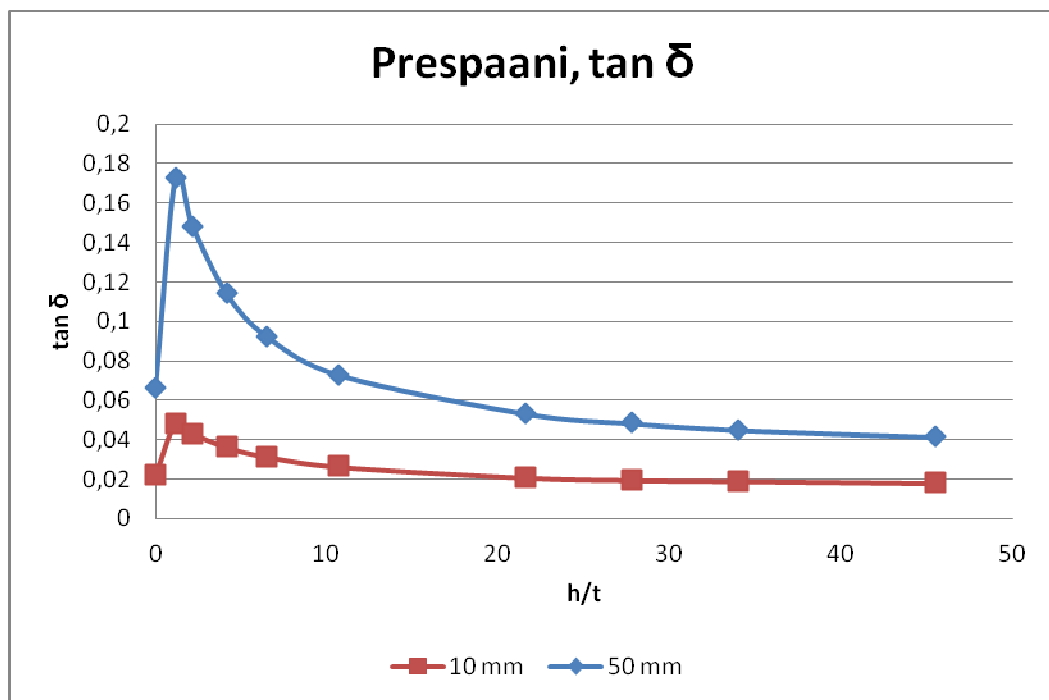
KUVIO 30. Permawood -koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona



KUVIO 31. Permawood -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona



KUVIO 32. Prespaani -koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona

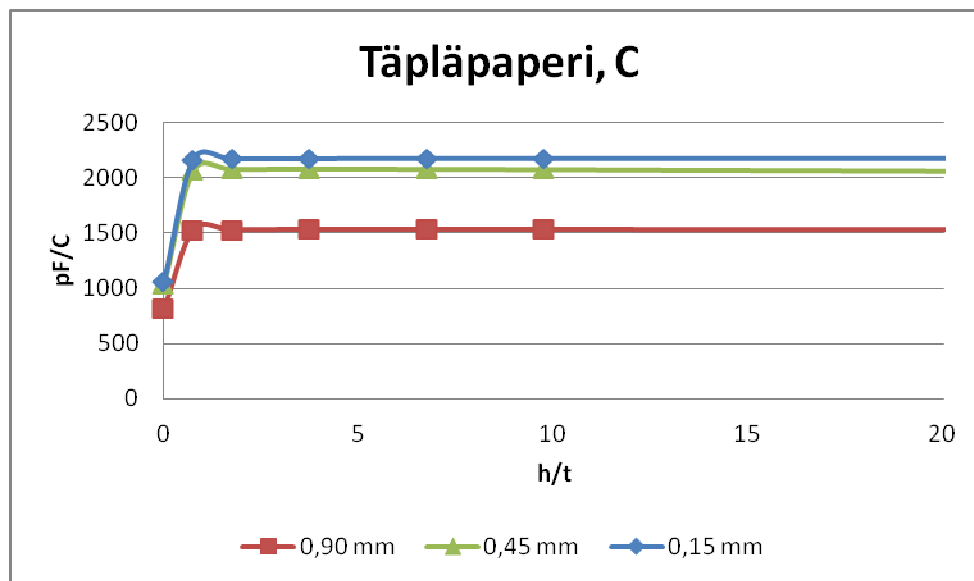


KUVIO 33. Prespaani -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona

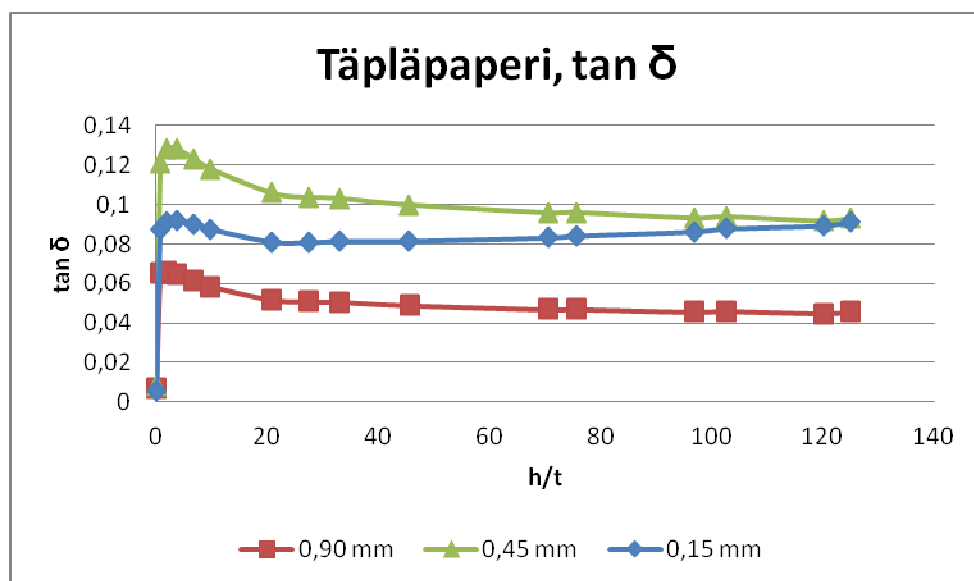


## Liite 4. Toisen mittauksen tulokset, Midel 23 °C

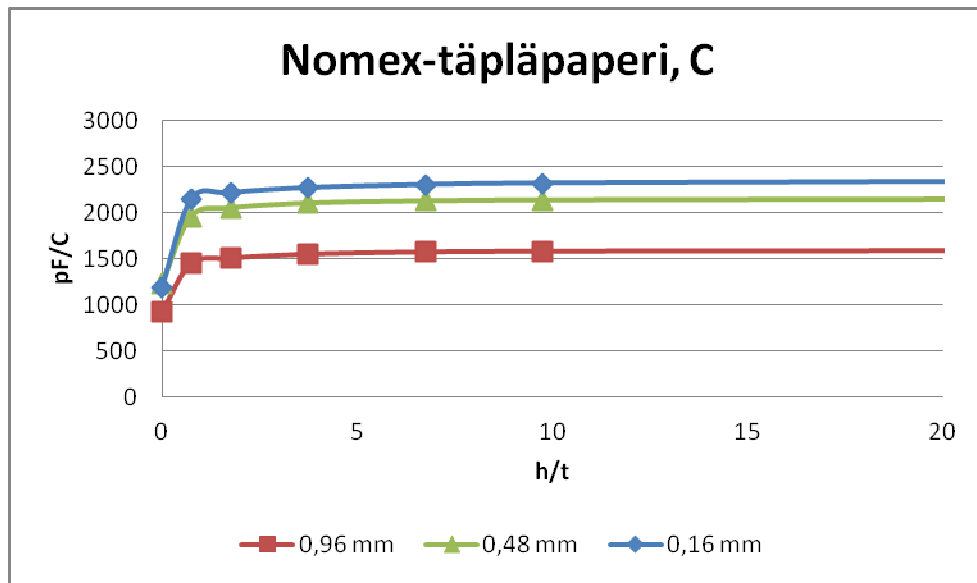
1(6)



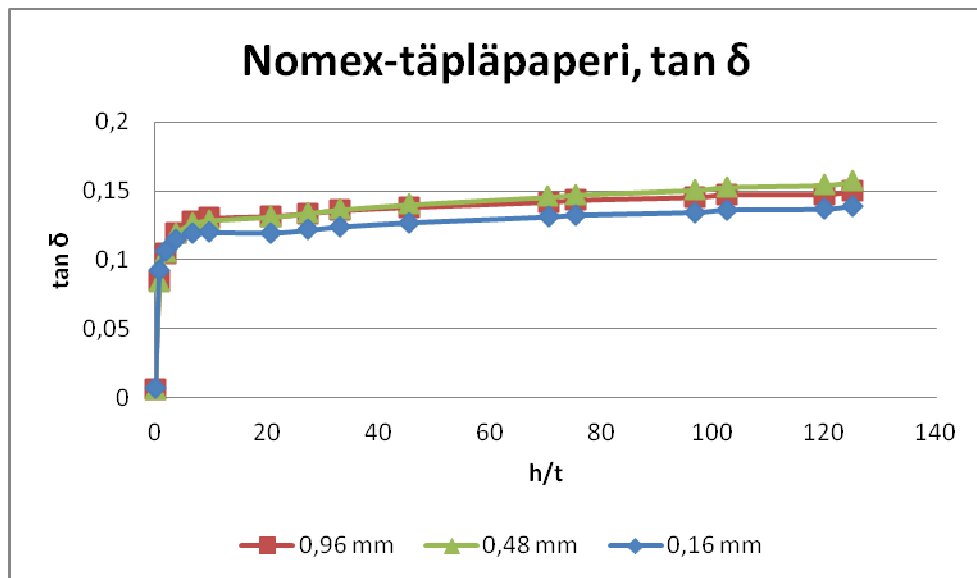
KUVIO 34. Täpläpaperi -koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona



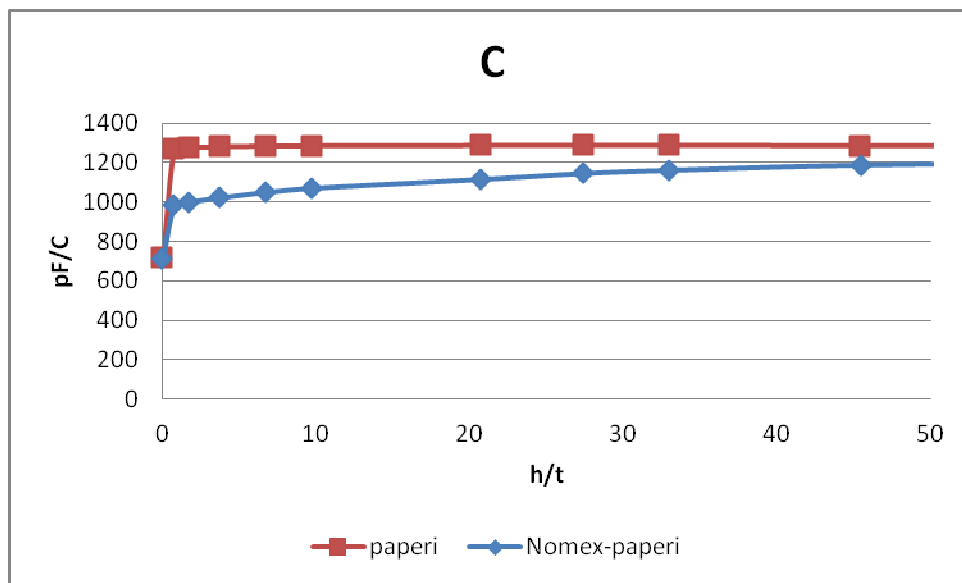
KUVIO 35. Täpläpaperi -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona



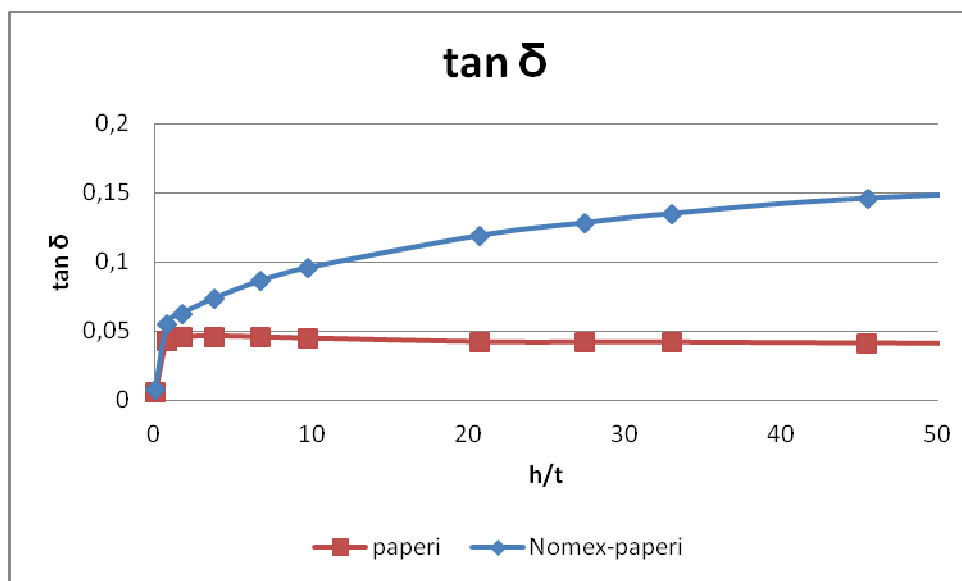
KUVIO 36. Nomex-täpläpaperi -koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona



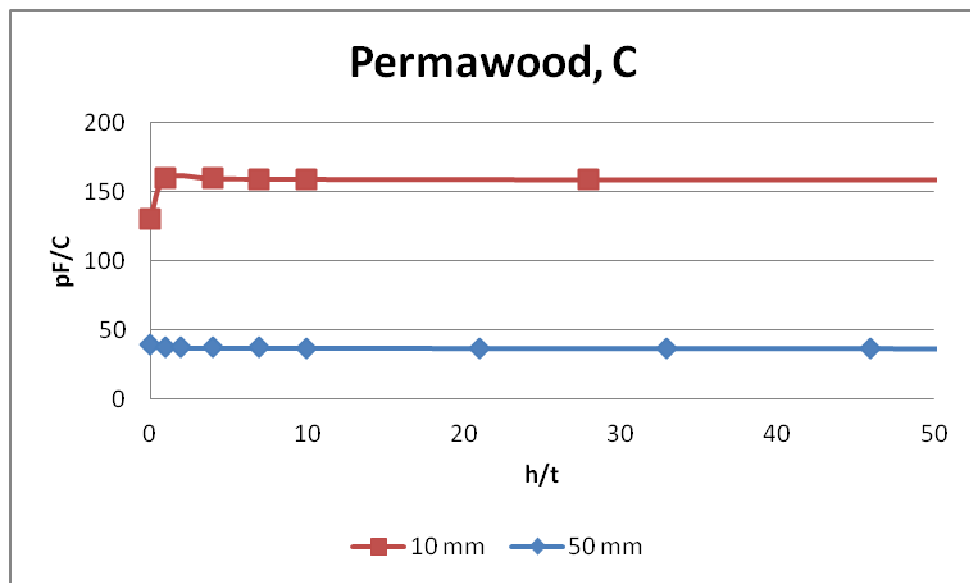
KUVIO 37. Nomex-täpläpaperi -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona



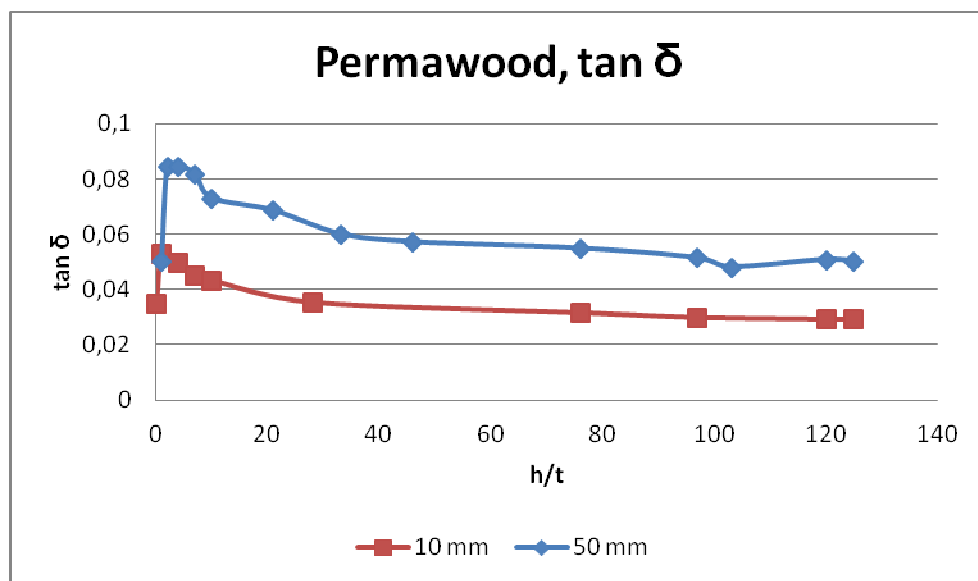
KUVIO 38. Paperin ja Nomex-paperin kapasitanssit ajan funktiona



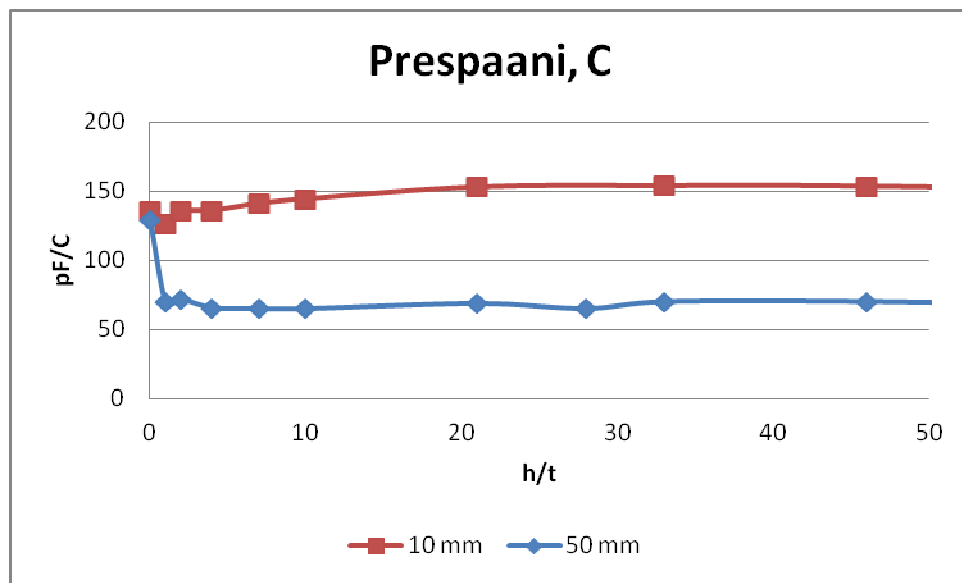
KUVIO 39. Paperin ja Nomex-paperin häviökertoimet ajan funktiona



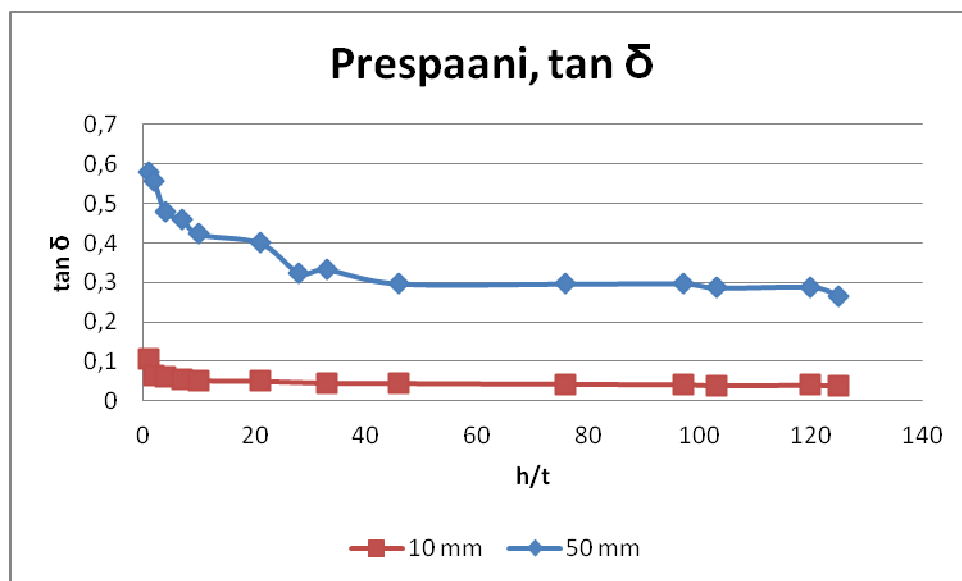
KUVIO 40. Permawood -koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona



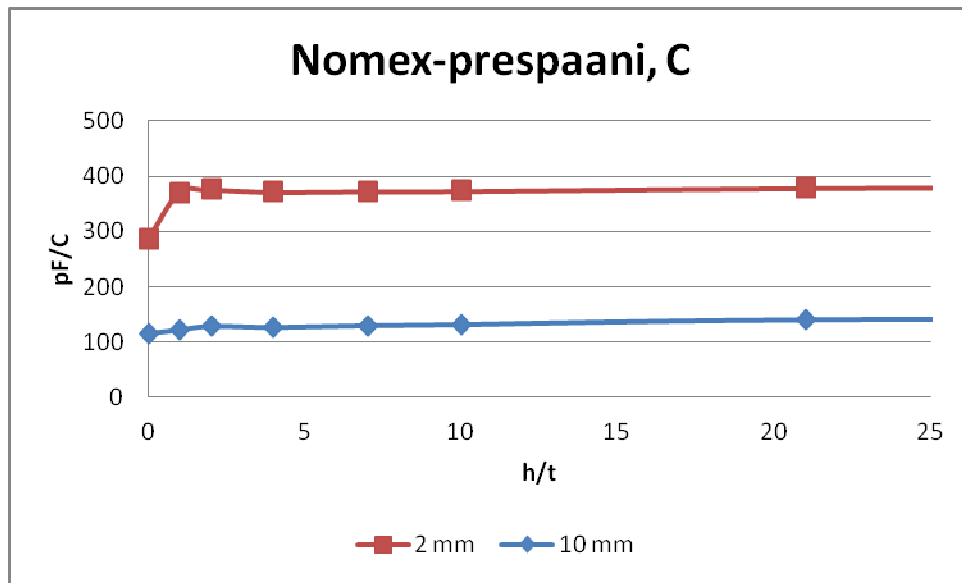
KUVIO 41. Permawood -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona



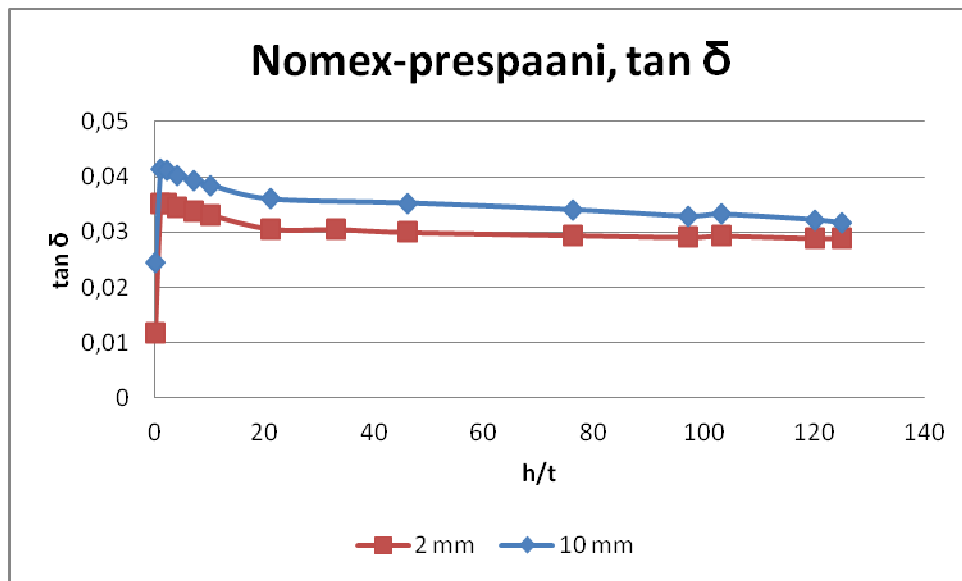
KUVIO 42. Prespaani -koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona



KUVIO 43. Prespaani -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona



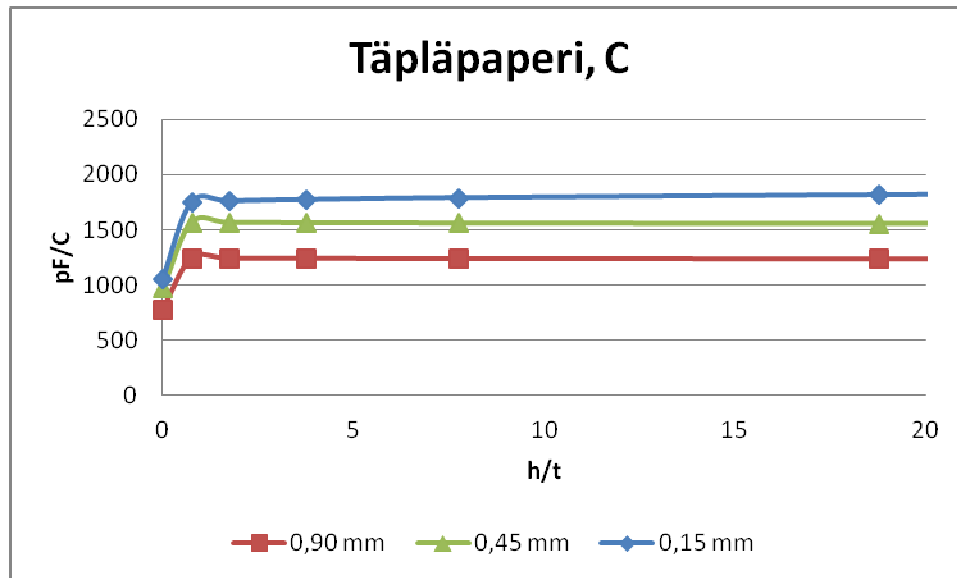
KUVIO 44. Nomex-Prespaani -koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona



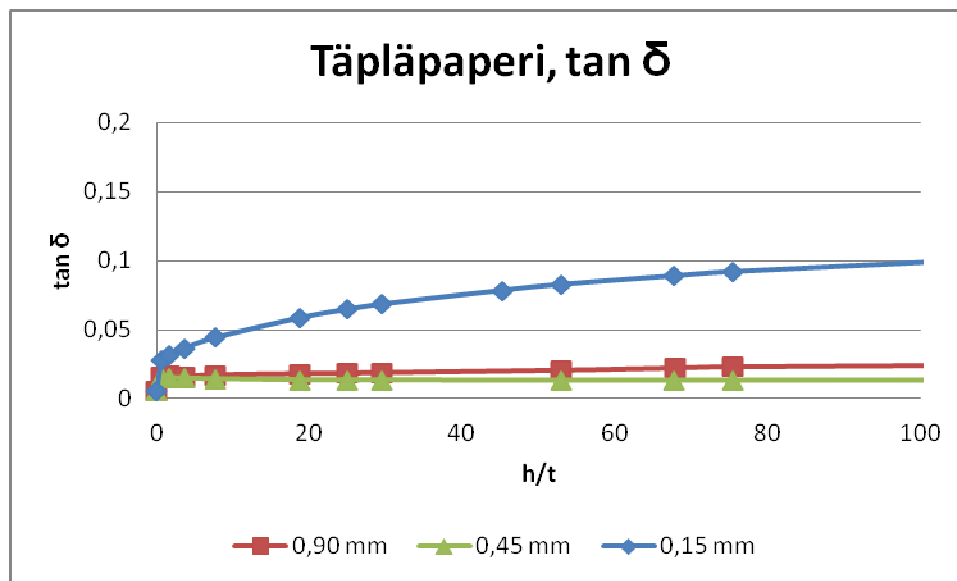
KUVIO 45. Nomex-Prespaani -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona

Liite 5. Kolmannen mittauksen tulokset, Nytro 10 XN 23 °C

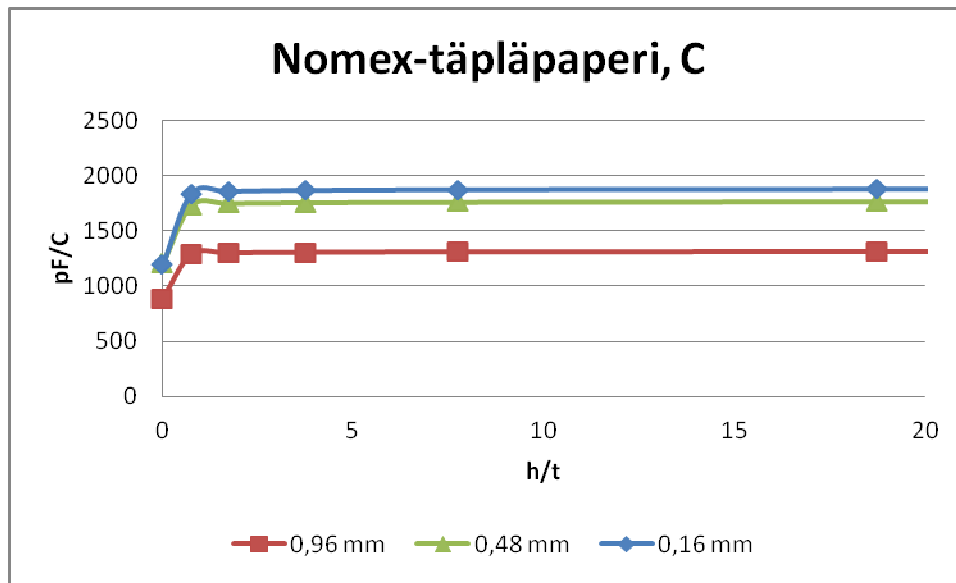
1(6)



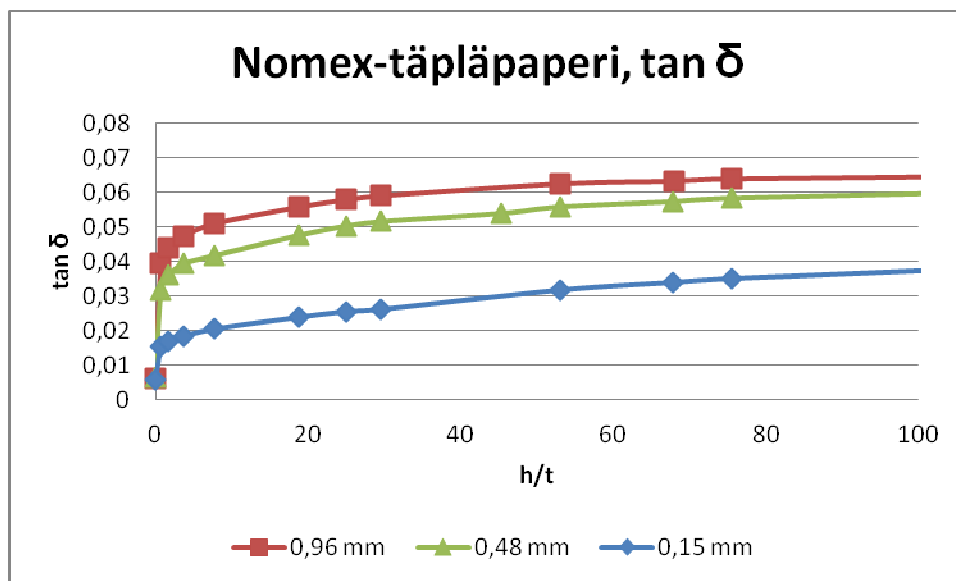
KUVIO 46. Täpläpaperi -koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona



KUVIO 47. Täpläpaperi -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona

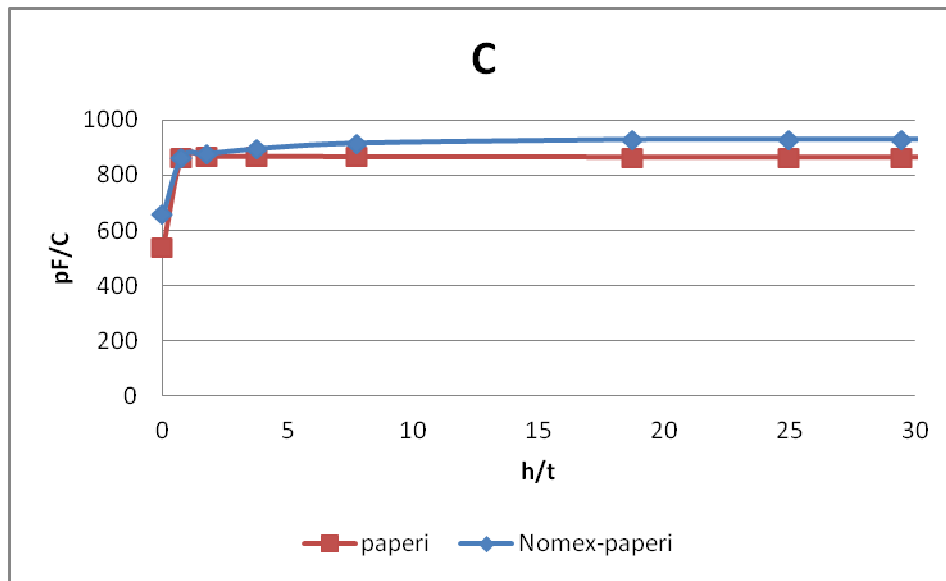


KUVIO 48. Nomex-täpläpaperi -koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona

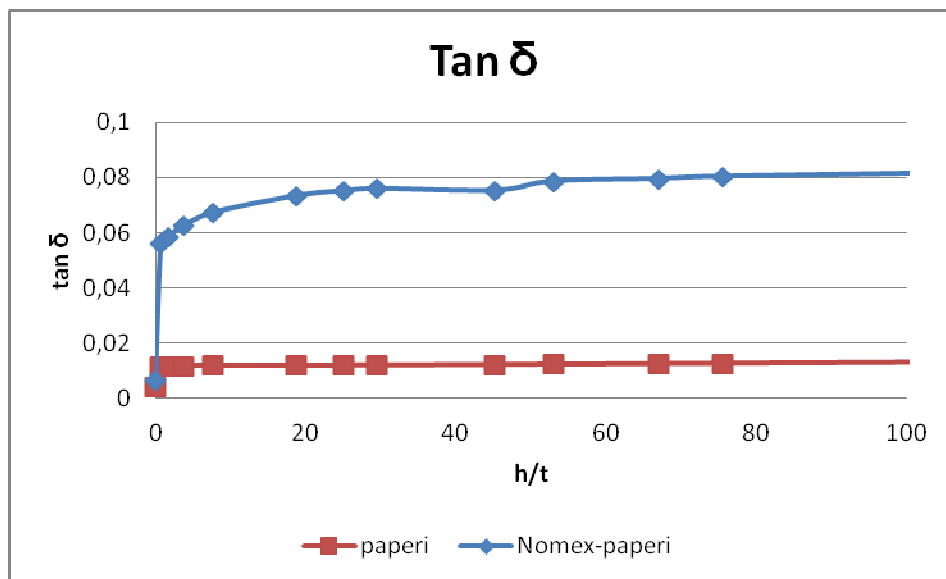


KUVIO 49. Nomex-täpläpaperi -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona

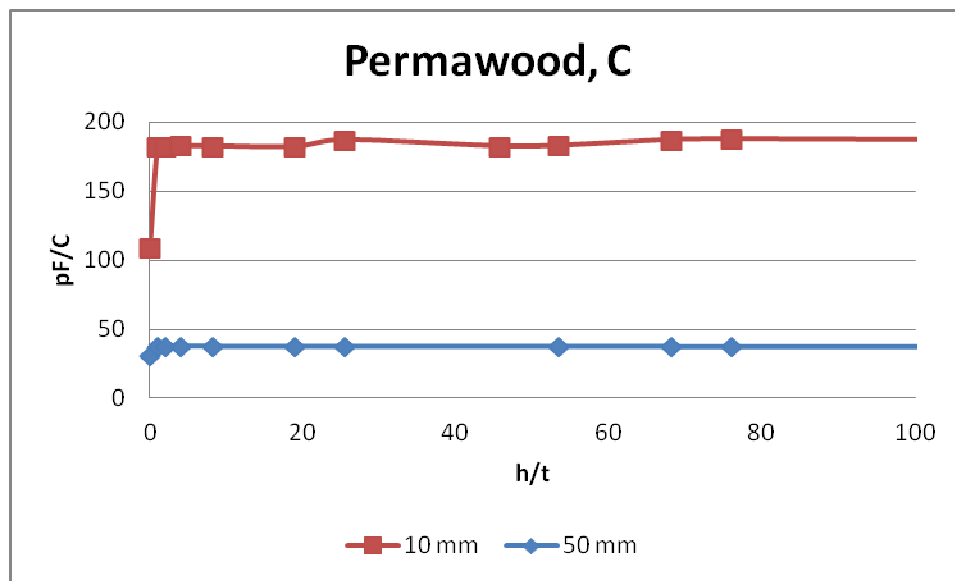




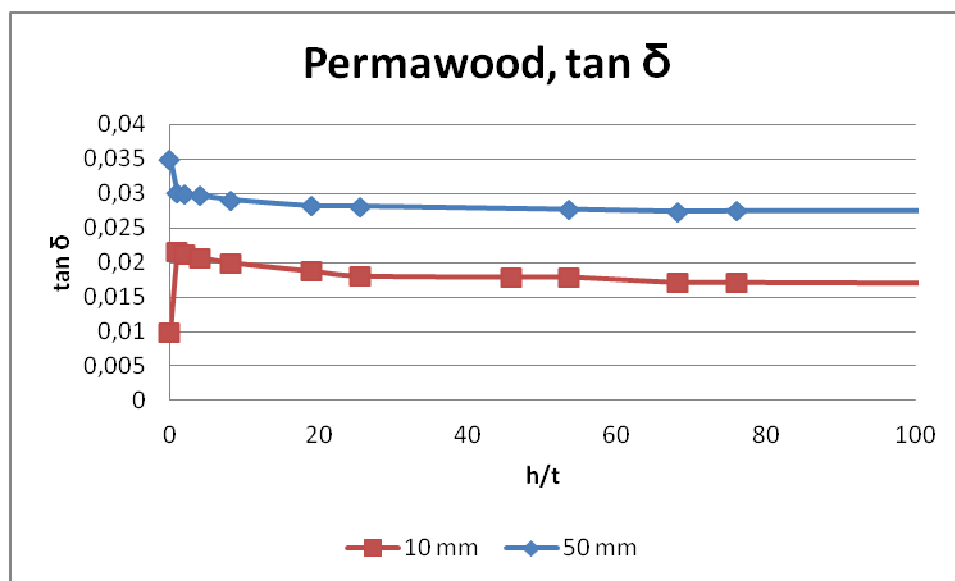
KUVIO 50. Paperin ja Nomex-paperin kapasitanssit ajan funktiona



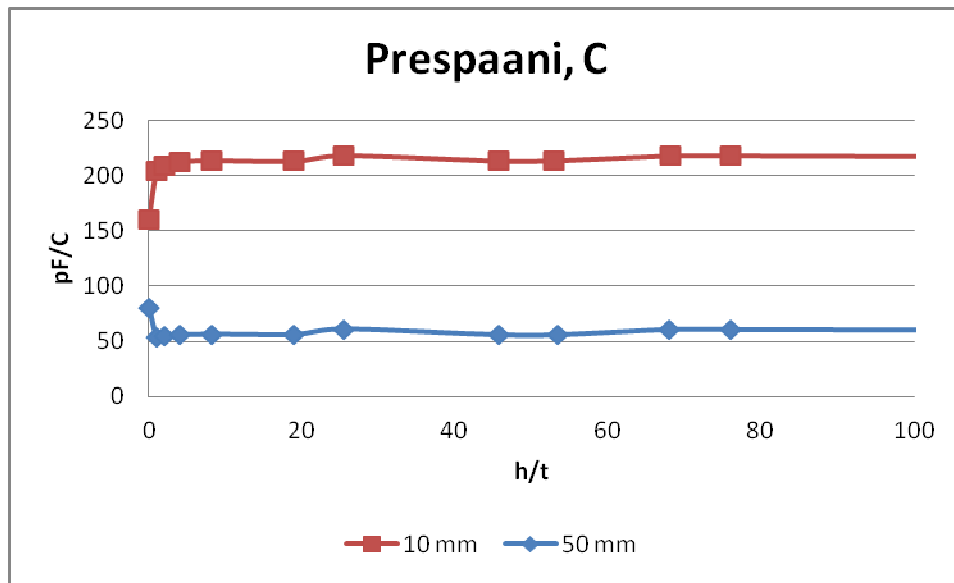
KUVIO 51. Paperin ja Nomex-paperin häviökertoimet ajan funktiona



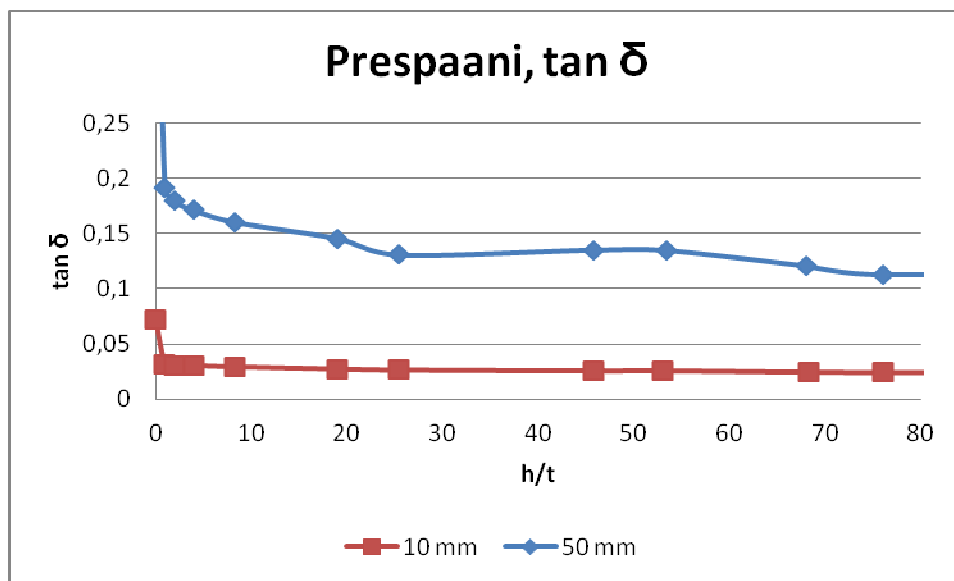
KUVIO 52. Permawood -koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona



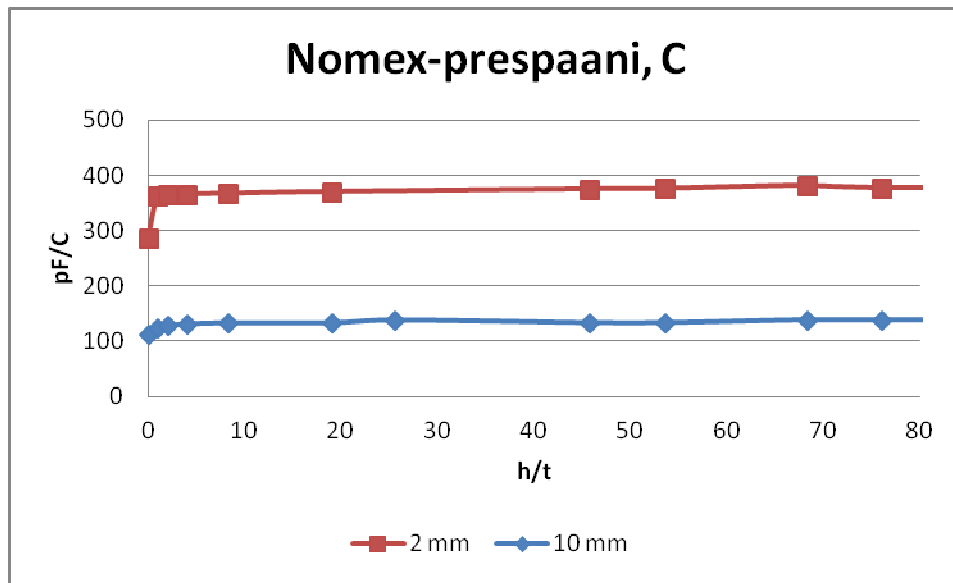
KUVIO 53. Permawood -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona



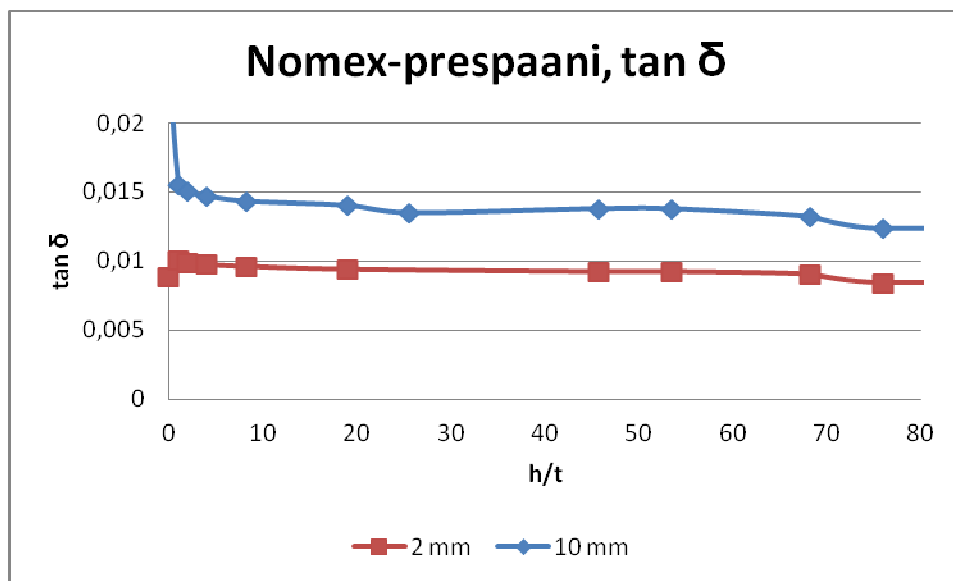
KUVIO 54. Prespaani -koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona



KUVIO 55. Prespaani -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona



KUVIO 56. Nomex-Prespaani -koekappaleiden kapasitanssit ajan funktiona



KUVIO 57. Nomex-Prespaani -koekappaleiden häviökertoimet ajan funktiona