



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
VASA YRKESHÖGSKOLA  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

*Anna Niemi*

LÄMPÖSTABILOIDUN ERISTEPAPE-  
RIN VANHENEMINEN MUUNTAJAN  
VALMISTUSPROSESSISSA

Tekniikka ja liikenne  
2015

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Anna Niemi
Opinnäytetyön nimi	Lämpöstabiloituneen eristepaperin vanheneminen muuntajan valmistusprosessissa
Vuosi	2015
Kieli	suomi
Sivumäärä	49 + 7 liitettä
Ohjaaja	Pekka Stén

---

Vaasan ABB Oy:n muuntajatehtaalla on otettu käyttöön uusi muuntajien lämpöstaabiili eristepaperi. Työssä tutkittiin eristepaperin vanhenemistä muuntajan valmistusprosessissa. Tutkimuksessa mallinnettiin tehtaan kahta eri tuotantolinjaa. Muuntajan elinkaarena pidetään yleisesti paperieristeen elinkaarta, joten on tärkeää, että uusissa muuntajissa on hyväkuntoinen eristys.

Muuntajan valmistusprosessissa käämejä ja muuntajaa kuivataan uuneissa yli 100 asteen lämpötiloissa. Paperin tiedetään haurastuvan lämmön vaikutuksesta. Tarkoituksena oli selvittää kuinka paljon paperi vanhenee uunituksissa eli mikä on uuden muuntajan eristepaperin kunto. Työssä paperinäytteitä vanhennettiin muuntajatehtaan uuneissa, jonka jälkeen laboratoriossa mitattiin paperin haurastumista kuvaava DP-luku (Degree of Polymerisation).

Toisena tavoitteena työssä on selvittää muuntajissa eristeenä ja tukirakenteena käytettävä prespaanin kuivumista ja kutistumista uuneissa. Prespaani sisältää kosteutta, joka poistuu uuneissa, jolloin prespaani kutistuu. Kutistuma on tärkeä tieto muuntajan käämien mitoituksessa. Kosteus myös huonontaa eristemateriaalien ominaisuuksia.

Tulokseksi saatiin paperin vanhenemiskäyrät tuotantolinjoille, joiden avulla voidaan arvioida uuden muuntajan paperieristyksen kuntoa uunitusajan perusteella. Kuivausuunien asetetut ja mitatut lämpötilat eivät vastanneet toisiaan ja tarve näiden käytönaikaiselle seurannalle havaittiin. Prespaanin jäännöskosteuden ja potentiaalisen kutistuman yhteys ilmeni lineaarisesti.

## ABSTRACT

Author	Anna Niemi
Title	Ageing of Thermally Upgraded Insulation Paper in Transformers Manufacturing Process
Year	2015
Language	Finnish
Pages	49 + 7 Appendices
Name of Supervisor	Pekka Stén

---

New thermally upgraded insulation paper has been taken into use at Vaasa ABB Oy Transformers factory. This thesis studied the ageing of insulation paper in the new transformer manufacturing process. In this thesis two different production lines were modelled. Generally it is thought that the life of a transformer is determined by the life of insulation paper. That is why it is important to have an insulation in a good condition in new transformers.

In the transformer manufacturing process transformer windings and transformers are cured in an ovens at temperatures over 100 degrees. It is known that heat ages the paper. The idea was to find out how much the paper ages in the ovens otherwise what is the condition of an insulation paper of a new transformer. In this thesis paper samples were aged in the ovens of a transformer factory and then Degree of Polymerization (DP-value) which is used to describe a brittleness of a paper was measured in the laboratory.

Pressboard is used in transformers as a supporting structure and insulation material. A secondary aim of this thesis was to find out about curing and shrinkage of pressboard in ovens. Pressboard contains moisture that removes in ovens while shrinking pressboard. Shrinkage is an important information in transformer winding dimensioning. Moisture also worsens the properties of insulation materials.

As a result paper aging curves were drawn for two production lines. The curve is used to estimate the condition of a new transformers insulation paper. The temperature settings of the curing ovens did not correspond measured temperatures and need of real-time monitoring was discovered. Residual moisture and potential shrinkage of pressboard appeared to be linear.

---

Keywords                      Transformer, Degree of polymerisation, insulation paper, pressboard

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	8
1.1	ABB Oy .....	9
2	MUUNTAJA .....	10
2.1	Muuntajan valmistusprosessi ABB Oy:n Transformers-yksikössä .....	11
2.2	Kuivaus ja uunit .....	13
3	MUUNTAJAN ERISTYS .....	15
3.1	Eristepaperi .....	16
3.2	Lämpöstabiili eristepaperi.....	18
3.3	Muuntajaöljy .....	18
3.3.1	Mineraaliöljy .....	19
3.3.2	Synteettiset eristysnesteet .....	19
3.4	Öljypaperieristys .....	20
4	MUUNTAJAN ELINKAARI .....	21
4.1	Eristepaperin lämpövanheneminen.....	22
5	ERISTEPAPERIN VANHENEMISKOE .....	25
5.1	DP-luvun määrittäminen .....	26
5.2	DP-luvun laskeminen.....	29
5.3	Tulokset.....	30
5.4	Mittausten hajonta.....	35
5.5	Virhelähteet.....	36
6	PRESPAANIN KOSTEUS JA KUTISTUMA .....	37
6.1	Prespaanin kosteus ja kutistuma .....	37
6.2	Tulokset.....	38
7	MONIMUUTTUJAKOE.....	42
7.1	Koesuunnitelma .....	43
7.2	Tulokset.....	43
7.3	Virhelähteet.....	45
8	LOPPUPÄÄTELMÄT JA TOIMENPIDE-EHDOTUKSET .....	46
	LÄHTEET .....	48

## LIIITTEET

**KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO**

<b>Kuvio 1.</b> 1-vaihemuuntajan periaate. (Muuntajatekniikan perusteet, ABB.)	10
<b>Kuvio 2.</b> Muuntajatehtaan tuotantolinjojen uunit.	13
<b>Kuvio 3.</b> Selluloosan kemiallinen rakenne (IEC 60450:2004+A1:2007).	17
<b>Kuvio 4.</b> Arrheniuksen elinikäkäyrä öljypaperieristykselle (Aro ym. 2003).	23
<b>Kuvio 5.</b> Paperinäytteen vanhentamisprosessi 2. linjalla.	26
<b>Kuvio 6.</b> Paperinäytteen vanhentamisprosessi 3.linjalla.	26
<b>Kuvio 7.</b> Ubbelohde-kapillaariviskosimetri (IEC 60450:2004+A1:2007).	28
<b>Kuvio 8.</b> Vanhenemiskokeen tulokset ja mallikäyrä 2. linjalla.	31
<b>Kuvio 9.</b> Vanhenemiskokeen tulokset ja niihin sovitettu käyrä 2. linjalla.	32
<b>Kuvio 10.</b> Vanhenemiskokeen tulokset ja mallikäyrä 3. linjalla.	34
<b>Kuvio 11.</b> DP-luvun hajonta.	36
<b>Kuvio 12.</b> Prespaanin kosteus.	39
<b>Kuvio 13.</b> Prespaanin kutistuma.	40
<b>Kuvio 14.</b> Prespaani jäännöskosteus vs. potentiaalinen kutistuma.	41
<b>Kuvio 15.</b> Päätekijäkuvaaja.	44
<b>Kuvio 16.</b> Pareto-kaavio vaikutusten merkittävyydestä.	45
<b>Taulukko 1.</b> Paperin kunto ja DP-luku (IEC 60450:2004+A1:2007).	17
<b>Taulukko 2.</b> Uuden paperin DP-luku.	30
<b>Taulukko 3.</b> DP-luku uunituskerroittain.	33
<b>Taulukko 4.</b> DP-luvun ja kerosiiniuunituksen yhteys.	35
<b>Taulukko 5.</b> Monimuuttujakokeen koematriisi.	43

**LIITELUETTELO**

**LIITE 1.** Rajaviskositeetin ja konsentraation tulo ominaisviskositeetin funktiona

**LIITE 2.** Eristepaperi ja sen ominaisuudet

**LIITE 3.** Prespaanin kuivumiskokeen mittaustulokset

**LIITE 4.** Vanhenemiskokeiden mittaustulokset

**LIITE 5.** Hajontakokeen mittaustulokset

**LIITE 6.** Monimuuttujakokeen mittaustulokset

**LIITE 7.** Uunien lämpötiläkäyrät

## 1 JOHDANTO

Tämä työ on tehty Vaasan ABB Oy:n Transformers -yksikön laatuosaston toimeksiantona. Opinnäytetyössä tutkitaan muuntajan sisäeristeenä toimivan paperin vanhenemista eli haurastumista muuntajan valmistusprosessissa. Lisäksi tutkitaan toisen eristeen, prespaanin, kuivumista ja kutistumista erityisesti muuntajien käämien kuivauksen aikana. Halutaan varmistaa, että uusissa muuntajissa on kestävä ja hyvä eristys. Muuntajien elinkaareissa kestävän eristyksen merkitys on tärkeä, koska usein muuntajan elinkaarena pidetään sisäeristeiden, erityisesti paperin elinkaarta.

ABB Oy:n muuntajatehtaalla on otettu vakiokäyttöön uusi muuntajan eristepaperi. Uusi paperi on Tervakosken Tertrans T50 $\mu$ m lämpöstabiloitu eristepaperi (LIITE 2). Muuntajan valmistuksessa käämejä ja muuntajaa kuivataan kiertoilma-, tyhjiö- tai kerosiiniuuneissa yli 100 °C lämpötiloissa. Tämä vaikuttaa merkittävästi muuntajien paperieristeeseen, koska yksi suuri paperia haurastuttava tekijä on lämpö. Lämpöstabiloidun paperin oletetaan lähtökohtaisesti kestävän paremmin lämpöä kuin ”tavallisen” Kraft-paperin. Tarkoituksena on selvittää kuinka paljon uusi lämpöstabiloitu paperi haurastuu uunituksissa. Vanhenemisen mittarina käytetään paperin polymeroitumisastetta eli DP-lukua.

Prespaania käytetään muun muassa muuntajien käämeissä eristeenä ja tukirakenteena. Käämit kuivataan kokoamisen jälkeen uuneissa kosteuden poistamiseksi eristeistä. Prespaanin kuivumisesta johtuva kutistuma on tärkeä tieto käämien mitoituksen kannalta. Tarkoituksena oli selvittää, ovatko uunien lämpötilat optimaaliset käämien kuivausta ajatellen. Myös mahdollista energiansäästöä uunien lämpötiloja alentamalla haluttiin selvittää.

Työssä prespaaninäytteitä kuivattiin ja paperinäytteitä vanhennettiin muuntajatehtaan uuneissa ja analyysit suoritettiin muuntajaöljylaboratoriossa. Tarkastelussa oli kaksi eri muuntajien valmistuslinjaa: linja 2 ja linja 3.



## 1.1 ABB Oy

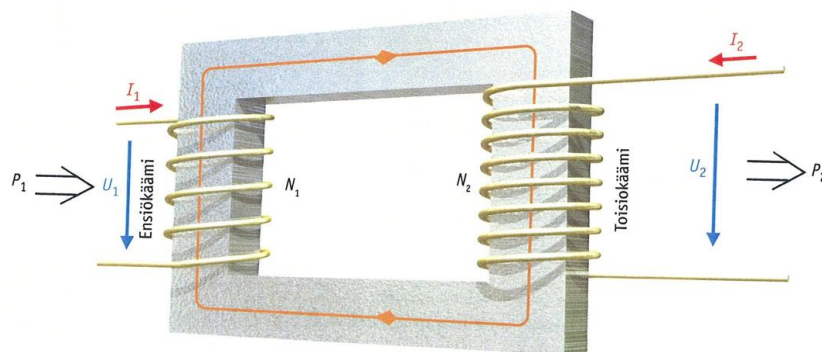
ABB on kansainvälinen sähkövoima- ja automaatioteknologiayhtymä, jolla on toimintaa sadassa maassa. Yhtymä on jaettu viiteen pääliiketoiminta-alueeseen, jotka ovat Sähkövoimatuotteet (Power Production), Sähkövoimajärjestelmät (Power Systems), Sähkökäytöt ja Kappaletavara-automaatio (Discrete Automation and Motion), Pienjännitetuotteet (Low Voltage Products) ja Prosessiautomaatio (Process Automation). Yhtiön pitkä historia ulottuu 120 vuoden päähän ja se on alansa johtava sähkövoima- ja automaatioteknologiayhtymä. (ABB 2015.)

Suomessa ABB Oy on yksi suurimmista teollisuuden työnantajista ja se toimii 30 paikkakunnalla. Tehdaskeskittymiä on kolmella paikkakunnalla ja yksi niistä on Vaasa. Vaasan Transformers-yksikkö on osa sähkövoimatuotteet pääliiketoiminta-alueella ja sen vastuulla on maailmanlaajuisesti ABB:n erikoismuuntajien kehittäminen ja valmistaminen. ABB on globaalisti yksi merkittävin muuntajien valmistajista ja se tarjoaa myös muuntajahuoltoa koko muuntajan elinkaaren ajan. (ABB 2015.)

Vaasan Strömberg Parkissa toimii myös Suomen ABB Oy:n muuntajaöljylaboratorio. Laboratorio on toiminut jo yli 50 vuotta. Vuonna 2012 laboratorio muutti uusiin ajanmukaisiin tiloihin, joissa työskentelee kaksi laboranttia ja tuotepäällikkö. Laboratoriossa analysoidaan pääasiassa muuntajaöljyjä ja eristepaperia. Analyysit tehdään IEC-standardien mukaan. Muuntajaöljylaboratorio tekee myös yhteistyötä muiden ABB Oy:n vastaavien laboratorioiden sekä muuntajien tuotekehitysyksikön kanssa. (Muuntajan kunnonvalvonta 2013).

## 2 MUUNTAJA

Muuntaja on sähkömagneettinen laite, jossa on vähintään kaksi vahvan sähkömagneettisen kentän avulla toisiinsa linkitettyä käämiä ja magneettikenttää vahvistava rautasydän. Näitä kutsutaan muuntajan aktiiviosiksi. Muuntajan toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Kun ensiökäämiin kytketään vaihtojännite, muodostuu sydämeen muuttuva magneettivuoto, joka lävistää samalla sydämellä olevan toisiokäämin indusoiden siihen vaihtojännitteen. Ensiökäämiksi kutsutaan käämiä, johon teho  $P_1$  syötetään ja toisiokäämiksi käämiä, josta teho  $P_2$  tulee ulos. (Muuntajatekniikan perusteet, ABB.)



**Kuvio 1.** 1-vaihemuuntajan periaate. (Muuntajatekniikan perusteet, ABB.)

Ensi- ja toisiojännitteet  $U_1$  ja  $U_2$  ovat suoraan verrannollisia käämien kierroslukujen suhteeseen  $N_1/N_2$  ja virrat  $I_1$  ja  $I_2$  ovat kääntäen verrannollisia kierroslukujen suhteeseen yhtälön 1 mukaisesti. (Muuntajatekniikan perusteet, ABB.)

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1)$$

Muuntajan avulla voidaan vaihtojännitettä tai -virtaa suurentaa tai pienentää käyttötarpeen mukaan. Muuntajia käytetään yleisesti esimerkiksi sähkönsiirrossa, jossa

tehohäviöiden minimoimiseksi voimalaitoksilta energiaa siirretään suurella jännitteellä siirtojohtoihin ja kuluttajan päässä jännite muunnetaan taas pieneksi sähköturvallisuuden varmistamiseksi. (Muuntajatekniikan perusteet, ABB.)

## **2.1 Muuntajan valmistusprosessi ABB Oy:n Transformers-yksikössä**

Kuvassa 1 on tiivistetty muuntajan tilaus- ja toimitusprosessi. Tämän työn kannalta oleellimmat työvaiheet ovat kuivaukset, joita prosessissa on kaksi. Ensimmäinen kuivaus on käämien kuivaus, joka tapahtuu käämien valmistelun ja kokonpanon välissä. Toinen, muuntajan aktiiviosan kuivaus, tapahtuu aktiiviosan katselmuksen jälkeen. (Laatusuunnitelma 2012). Aktiiviosa ja siihen liittyvät muut eristeosat kuivataan samassa prosessissa. Kuivauksella pyritään saamaan eristeiden kosteuspitoisuus vaadittuihin rajoihin tai niiden alle (Suurmuuntajien kerosiinikuivaus 1999).

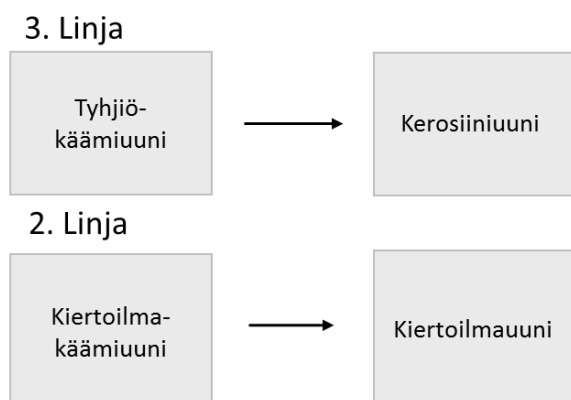
Lopuksi uusi muuntaja koestetaan. Jos koestuksessa ilmenee ongelmia ja muuntaja täytyy avata uudelleen, on kuivausprosessi myös tehtävä uudelleen. Muuntajan eristepaperin kannalta tämä on huono tilanne, koska paperi vanhenee kuivauksen aikana. (Muuntajatekniikan perusteet 2007.)



## 2.2 Kuivaus ja uunit

Muuntajissa käytettävät eristeet paperi ja prespaani sisältävät kosteutta noin 6–8 % painostaan. Kosteus huonontaa eristeiden ominaisuuksia ja lyhentää muuntajan elinikää. Käämit täytyy kuivata ennen kokoonpanoa myös sen vuoksi, että ne saadaan oikeaan mittaansa, koska prespaani kutistuu kuivuessaan. (Muuntajatekniikan perusteet 2007.)

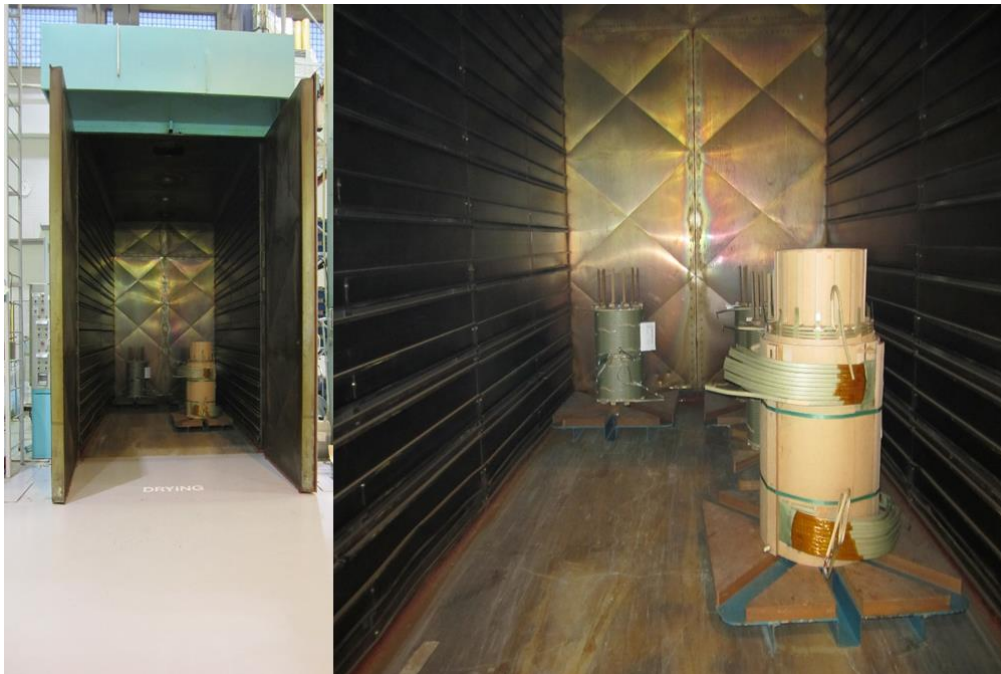
Vaasan muuntajatehtaalla kuivaukseen käytetään kiertoilmauuneja, tyhjiöuunia ja kerosiiniuunia. Kuviossa 2 on esitetty uunit tuotantolinjoittain. Linjalla 2 on kaksi kiertoilmauunista ja linjalla 3 on tyhjiö- sekä kerosiiniuuni.



**Kuvio 2.** Muuntajatehtaan tuotantolinjojen uunit.

Kiertoilmauunia käytetään pienemmille muuntajille. Kiertoilmauunit ovat lämmitettäviä kammiouuneja, joissa kierrätetään ilmaa puhaltimien avulla normaalipaineessa. Kosteutta poistuu uunista lämpimän ilman mukana. Tyhjiöuunia käytetään, kun vaaditaan parempaa kuivaustulosta. Siinä uuniin imetään tyhjiö ja se lämmitetään. Tyhjiössä lämpö siirtyy lämpöelementeistä kohteeseen lämpösäteilynä. Kuvassa 2 esitetään linjan 2. kiertoilmakäämiuuni. (Suurmuuntajien kerosiinikuivaus 1999.)

Tehokkain tapa poistaa kosteutta on kerosiini kuivaus. Sitä käytetään, kun kuivatava kohde on suuri ja tarvitaan hyvä kuivaustulos. Kerosiiniuunissa lämpöä siirretään väliaineen avulla. Kerosiini höyrystetään tyhjiössä ja johdetaan uuniin, jossa se tiivistyy siellä olevan kylmän kuivauskohteen pinnalle. Tiivistyminen on voimakkainta kylmimmissä kohdissa, jolloin kohde lämpenee tasaisemmin. (Suurmuuntajien kerosiini kuivaus 1999.)



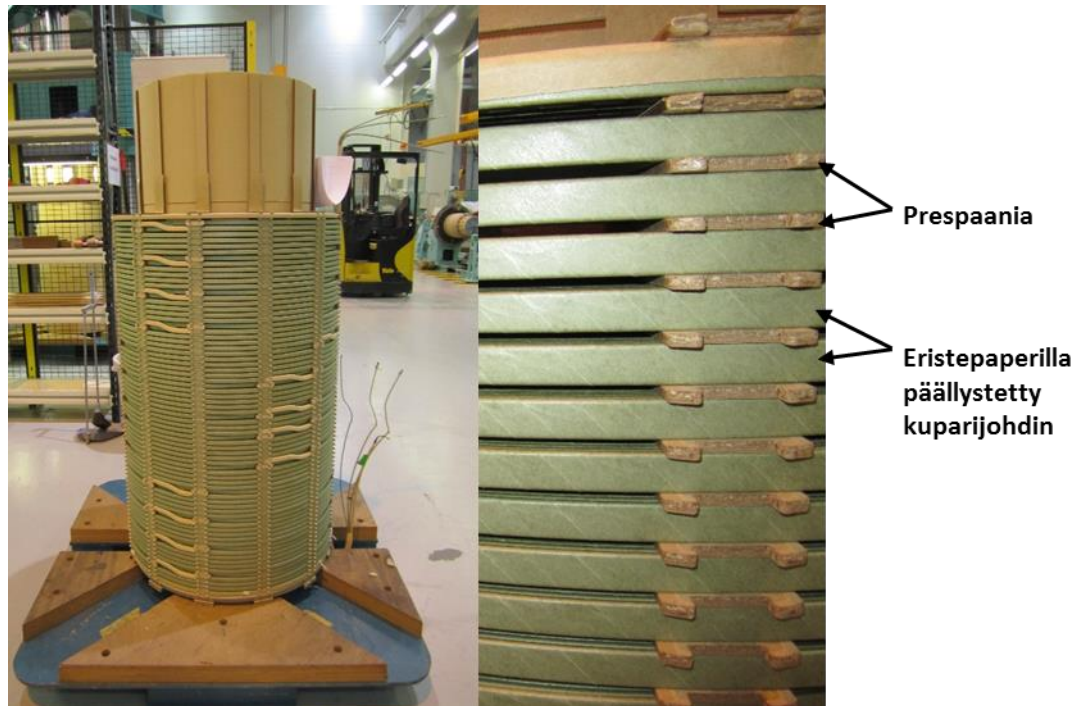
**Kuva 2.** Kiertoilmakäämiuuni tuotantolinjalla 2.

### 3 MUUNTAJAN ERISTYS

Yksi tärkeimmistä muuntajan rakenteista on eristys. Muuntajan sisäeristyksen pettäminen aiheuttaa muuntajaan suuria ja kalliita vaurioita. Tämän vuoksi luotettava eristys on erittäin tärkeä. Muuntajissa käytetään sekä kiinteitä että nestemäisiä eristeitä. Eniten käytetyt kiinteät sisäeristeet ovat paperi ja prespaani. Prespaani on käytännössä paperiliuskoja, jotka on puristettu ja liimattu yhteen. Muita käytettyjä kiinteitä eristeitä ovat muun muassa puu ja kauppanimellä NOMEX tunnettu orgaaninen polymeeri. Eristysnesteinä käytetään erilaisia muuntajaöljyjä. (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen, Palva 2003; Heathcote 2007, 60–104.)

Kiinteitä eristeitä käytetään jännitteisten osien tukemiseen ja turvaamaan niiden sähköinen eristys. Sähkölujuus ja mekaaninen lujuus ovat kiinteän eristyksen tärkeimpiä ominaisuuksia. Muuntajissa yleisesti käytettyjen prespaanin ja paperin etuina on niiden kustannustehokkuus ja helppo käsiteltävyys. Toisaalta korkeat lämpötilat huonontavat helposti näiden eristeiden ominaisuuksia. (Aro ym. 2003, 121–127.)

Kuvassa 3 voi nähdä käämin eristysrakennetta. Käämin johtimet on päällystetty eristepaperilla ja käämin johdinkierrosten välissä on prespaanikappaleita. Kuva on otettu muuntajatehtaan 2. linjalta, jossa käämi on seuraavaksi menossa kuivaukseen kiertoilmauniin.



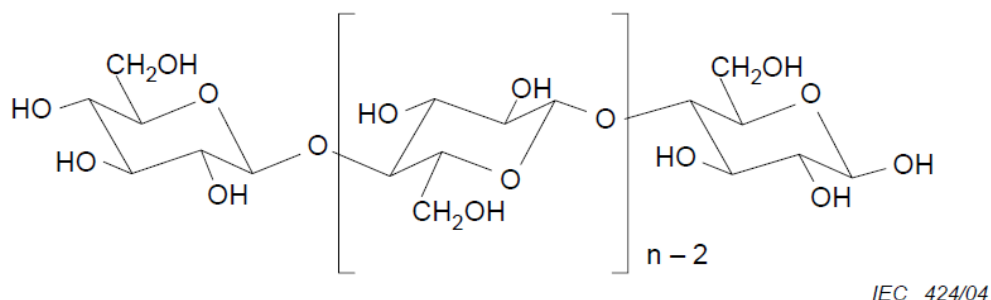
**Kuva 3.** Käämi 2. linjalla.

### 3.1 Eristepaperi

Muuntajassa paperieriste on kierretty käämin johtimien ympärille. Paperi on ohutta esimerkiksi 1,5 cm levyistä nauhaa. Paperia kierretään johtimen ympärille useampi kierros, jotta saadaan haluttu paperieristeen paksuus. (Transformer Handbook 2010, 7–106.)

Eristepaperi valmistetaan selluloosakuidusta. Selluloosa on lineaarinen glukoosianhydrideistä koostuva polysakkaridi. Siinä glukoosirakenneyksiköt ovat liittyneet toisiinsa  $\beta$ -glykosidisilla (1 $\rightarrow$ 4) -sidoksilla. Kuviossa 3 on esitetty selluloosan rakenneperiaate. Paperin DP-luku kuvaa selluloosamolekyylin glukoosiyksiköiden lukumäärää. (Isotalo 2004, 41–42.)





**Kuvio 3.** Selluloosan kemiallinen rakenne (IEC 60450:2004+A1:2007).

DP-lukua käytetään eristepaperin vanhenemisen mittarina. Paperin vanhetessa selluloosan rakenneyksiköiden väliset sidokset katkeilevat, jolloin selluloosamolekyylit lyhenevät, mikä aiheuttaa DP-luvun pienenemisen. Taulukossa 1 on kuvattu paperin DP-luvun ja paperin kunnan välistä yhteyttä. Uuden paperin DP-luku on noin 1200 ja sen tekninen käyttöikä on loppuillaan kun DP-luku on noin 200. (Aro ym. 2003, 178–179; IEC 60450:2004+A1:2007).

**Taulukko 1.** Paperin kunto ja DP-luku (IEC 60450:2004+A1:2007).

Paperin kunto	DP
Uusi	1000–2000
Hyvä	650–1000
Kohtalainen	350–650
Ikääntynyt	< 350

Käytännössä paperin DP-luvun määrittäminen käytössä olevasta muuntajasta on mahdollista. Paperi on muuntajan sisäeriste, eikä näytekappaletta saa otettua ilman, että muuntaja avataan. Paperieristeen hajotessa lämmön johdosta muuntajaöljyyn liukenee furaaniyhdisteitä. Analysoimalla muuntajaöljyn furaaniyhdisteitä, voidaan arvioida käytössä olevan muuntajan paperieristyksen kuntoa (Aro ym. 2003). Furaaniyhdisteiden ja DP-luvun välinen suhde riippuu siitä, onko kyseessä Kraft-paperi vai lämpöstabiili paperi. Jotta paperin kuntoa voisi arvioida furaaniyhdisteistä, on

siis ainakin tiedettävä millaista eristepaperia muuntajassa on käytetty (Prevost 2005).

### **3.2 Lämpöstabiili eristepaperi**

Lämpöstabiloitu paperi on tullut markkinoille Pohjois-Amerikassa jo 1950-luvun lopulla ja 1960-luvulla sen käyttö oli jo yleistä muuntajissa. Euroopassa lämpöstabiloidun paperin käyttö on ollut harvinaista viime vuosikymmeneen asti (Prevost 2005.)

Eristepaperin ongelmana on sen herkkyys lämmölle, hapelle ja kosteudelle, jotka kaikki nopeuttavat paperin hajoamista. Modifioimalla paperia kemiallisesti pyritään parantamaan sen kestävyyttä eristeenä. Lämpöstabiili eristepaperi on selluloosapohjainen paperi, jota on kemiallisesti käsitelty siten, että paperin hajoaminen hidastuu. Lämpöstabiilia paperia voidaan valmistaa osittain eliminoimalla selluloosamolekyylin vettä muodostavia hydroksyyli-, eli OH-ryhmiä joko syanoetyloimalla tai asetyloimalla. Tai lämpöstabiiliapaperia valmistetaan esimerkiksi käyttämällä stabilointiaineita, jotka inhiboivat veden muodostumista (IEC 60076-7, 8–9; Prevost 2005). Tässä työssä tutkittavan lämpöstabiilin eristepaperin tarkka valmistusprosessi ei ole tiedossa.

Lämpöstabiilin paperin valmistusprosesseissa käytetään tyypeä sisältäviä kemikaa- leja. Kraft-paperi ei sisällä tyypeä, koska tyyppi ei ole osa selluloosan kemiallista rakennetta. Kemiallisen modifikaation astetta voidaan mitata määrittämällä paperin tyypipitoisuutta. (Prevost 2005.)

### **3.3 Muuntajaöljy**

Muuntajaöljyllä on kaksi pääasiallista tehtävää, toimia nestemäisenä eristeenä sekä jäähdytysväliaineena. Muuntajissa käytettävillä öljyillä on siis oltava hyvä lämmönsiirtokyky. Lisäksi vaaditaan muun muassa suurta jännitelujuutta, suurta resistiiviteettiä, alhaista häviökerrointa ja hyvää sietokykyä osittaispurkauksille. Eri

muuntajaöljyiltä vaadittavat ominaisuudet on määritelty kansainvälisissä IEC -standardeissa. Vaadittavat ominaisuudet riippuvat käytettävistä laitteista ja käyttöolosuhteista. (Aro ym. 2003, 113–127; Transformer Handbook 2010, 13-166–13-167.)

Vaasan muuntajatehtaalla yleisimmin käytetty muuntajaöljy on nafteeninen mineraaliöljy Nytro 10XN. Tämä on erinomainen muuntajaöljy arktiseen ilmastoon, koska naftaaniset ominaisuudet sopivat hyvin alhaisiin lämpötiloihin (Nynas AB 2015).

### **3.3.1 Mineraaliöljy**

Mineraaliöljy on yleisimmin käytetty muuntajaöljy. Se on hinnaltaan ja ominaisuuksiltaan usein paras vaihtoehto ja myös sen saatavuus on hyvä. Se valmistetaan tislaamalla maaöljystä. Maaöljyn ominaisuudet raaka-aineena vaihtelevat jonkin verran, joten myös mineraaliöljyn ominaisuudet voivat olla vaihtelevia. Mineraaliöljy on usein tehokkain väliaine siirtämään lämpöä muuntajan kuumista osista viileämpiin. (Aro ym. 2003, 113–114; Transformer Handbook 2010, 13-166; Heathcote 2007, 76–80.)

Mineraaliöljy koostuu hiilivedyistä ja se sisältää myös pieniä määriä epäpuhtauksia kuten typpeä, rikkiä ja happea. Tavallisimmat hiilivetyrakenteet mineraaliöljylle ovat parafiinit, nafteenit ja aromaattiset öljyt. Mineraaliöljyn ominaisuudet vaihtelevat pääasiallisen hiilivetyrakenteen ja epäpuhtauksien mukaan. (Aro ym. 2003, 113–114; Heathcote 2007, 76–80.)

### **3.3.2 Synteettiset eristysnesteet**

Mineraaliöljyn rinnalle on kehitetty monia synteettisiä eristysnesteitä, joiden ominaisuudet ovat vakaampia ja ne soveltuvat paremmin joihinkin käyttökohteisiin. Hinnaltaan synteettiset nesteet ovat mineraaliöljyä kalliimpia. Synteettisiä eristysnesteitä ovat esimerkiksi silikoniöljyt ja synteettiset esterit. (Aro ym. 2003, 113–114; Heathcote 2007, 102–103.)

Silikoniöljyn vahvuus on sen korkea leimahduspiste, jonka vuoksi se soveltuu paloherkille kohteille. Se on myös mineraaliöljyä ympäristöystävällisempi vaihtoehto. Heikkouksina on sen huono lämmönjohtokyky, purkausten sietokyky ja ominaisuus imeä itseensä helposti kosteutta. (Aro ym. 2003, 113–114; Transformer Handbook 2010, 13-166; Heathcote 2007, 102–103.)

Synteettiset esterit ovat biohajoava ja myrkytön vaihtoehto ja siksi niitä käytetään esimerkiksi laivamuuntajissa. Myös estereillä on korkea leimahduspiste, eivätkä ne kehitä myrkyllisiä yhdisteitä korkeissakaan lämpötiloissa. (Aro ym. 2003, 113–114; Heathcote 2007, 102–103.)

### **3.4 Öljypaperieristys**

Käytännössä muuntajan eristysrakenteissa käytetään nesteen ja kiinteän eristeen kombinaatioita. Yleisimmin käytetään paperin ja muuntajaöljyn yhdistelmää, jolloin saadaan sähkönlujuudeltaan paljon kestävämpi eristys kuin kummallakaan eristeellä yksittäin. (Aro ym. 2003.)

Paperi impregnoidaan öljyllä, joka tunkeutuu paperin huokosiin ja rakoihin tehden siitä paremman eristysrakenteen. Heikkoutena tässä eristerakenteessa on kummankin eristemateriaalin herkkyys epäpuhtauksille varsinkin kosteudelle ja hapettumiselle. Materiaalien oikeanlaisella valinnalla voidaan parantaa eristyksen ominaisuuksia ja ennakoida eristerakenteen käyttäytymistä. (Aro ym. 2003, 129–130.)

## 4 MUUNTAJAN ELINKAARI

Muuntajat ovat pitkäikäisiä sähkölaitteita ja ennen ajateltiin niiden keskimääräisen eliniän olevan noin 30 vuotta. Käytännön kokemusten mukaan muuntajat voivat kuitenkin toimia ilman vikoja käytössä jopa 50–60 vuotta käyttökohteesta riipuen. Omistajan kannalta muuntajan eliniän arvioiminen olisi tärkeää, jotta vanhenevan laitteen käyttöön liittyvät riskit voisi arvioida ja investointia uuteen laitteeseen voisi suunnitella paremmin. (Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers 2007, 11.)

Elinkaariarvio perustuu laitteen vanhenemisprosessiin. Muuntajien kohdalla pääasiallisia vanhenemistä aiheuttavia tekijöitä ovat kosteus ja lämpökuormitus, joilla on suuri vaikutus muuntajan eristepaperin haurastumiseen. Muuntajan elinkaarena pidetään yleisesti muuntajan eristepaperin elinkaarta vaikka myös prespaani ja muuntajaöljy ovat alttiita heikkenemiselle ja kontaminoitumiselle. Eristepaperin ikääntyminen on palautumaton prosessi. Muuntajan sisäeristeitä ei voida vaihtaa tai kunnostaa ilman, että sille tehdään täydellinen huolto. Siksi on tärkeä kiinnittää erityistä huomiota paperieristettä vanhentaviin tekijöihin. (Fofana, Borsi, Gockenbach & Farzaneh 2006; Working group 09, 1993; Service Handbook for Transformers, 79.)

Muuntajan jäljellä olevan eliniän määrittämiseen ei ole yksinkertaista menetelmää tai tarkkoja kriteereitä. Muuntajan ikääntymisessä ja jäljellä olevan eliniän arvioimisessa on tärkeää huomioida eristeiden kunto. Käytössä olevan muuntajan eristys ei pysy muuttumattomana vaan käytönaikaiset olosuhteet ja rasitukset vaikuttavat eristyksen kuntoon. Eristeiden vanhenemiseen vaikuttaa eniten lämpö, kosteus, hiukkaset eli roskat, happipitoisuus ja öljyn happamuus. (Aro ym. 2003; IEC 60076-70.)

Käytössä olevan muuntajan ja sen eristysrakenteiden kuntoa voidaan arvioida ja seurata muuntajasta otettavasta öljynäytteestä. Muuntajan toiminnan kannalta muuntajaöljyn on täytettävä tietyt laatukriteerit. Analyysimenetelmille ja

laatukriteereille löytyy standardeja, joiden mukaan toimitaan. Vaasan ABB:n muuntajaöljylaboratoriossa analyysit suoritetaan ja raportoidaan IEC-standardien mukaan (Muuntajan kunnonvalvonta 2013). Yksi tärkeimmistä muuntajadiagnostiikan analyyseistä on kaasuanalyysi. Siinä analysoidaan öljyyn liuenneiden kaasujen (DGA, dissolved gas in oil analysis) pitoisuudet, keskinäiset suhteet ja arvioidaan kaasujen kehitysnopeudet. Öljyanalyysillä voidaan tarkkailla muuntajan kuntoa, ennakoida alkavia vikoja, testata hajoamiseen muuntajan hajoamisen syitä tai varmistaa uuden muuntajan hyvä kunto. (Aro ym. 2003, 197–199; Service Handbook for Transformers, 96.)

#### 4.1 Eristepaperin lämpövanheneminen

Eristeiden vanheneminen lämmön vaikutuksesta tapahtuu kemiallisten reaktioiden kautta, jotka ovat sitä todennäköisempiä mitä korkeampi on lämpötila. Vanhenemista edistää myös kosteus, happipitoisuus ja happamuus. Lämpövanhenemista voidaan tarkastella Arrheniuksen yhtälöllä (2). Reaktion nopeus  $r$ , on riippuvainen absoluuttisesta lämpötilasta  $T$ .  $A$  on reaktiolle tyypillinen vakio,  $E$  reaktion aktivaatioenergia ja  $k_B$  Boltzmannin vakio. (Aro ym. 2003, 175–177.)

$$r = A \cdot e^{\frac{-E}{TK_B}} \quad (2)$$

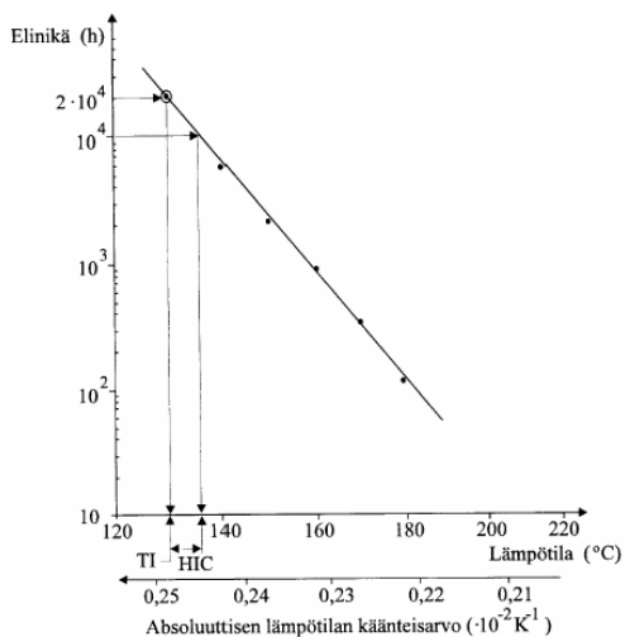
Eristeen vanhenemista ja elinikää voidaan tarkastella yhtälöllä (3), jossa oletetaan, että elinikä päättyy ajanhetkellä  $\tau$ , kun eristeen kannalta kriittinen ominaisuus  $P$  saavuttaa asetetun raja-arvon  $P_0$ . Yhtälössä oletetaan eristeen absoluuttisen lämpötilan käyttäytyvän Arrheniuksen yhtälön (2) mukaan. (Aro ym. 2003, 175–177.)

$$\frac{P_0}{\tau} = A e^{\frac{-E}{TK_B}} \quad (3)$$

Yleisesti eristeen elinikää voidaan tarkastella seuraavan yhtälön (4) avulla, jossa B ja A ovat eristeelle ja tarkasteltavalle reaktiolle ominaisia vakioita.

$$\ln \tau = \frac{B}{T} + \ln \frac{P_0}{A} \quad (4)$$

Lämpövanhenemistä kuvataan usein kuvion 4 esittämällä Arrhenius-käyrällä. Yhtälön (4) mukaan elinikä  $\ln \tau$  kuvautuu suorana absoluuttisen lämpötilan käänteisarvoasteikolla. Kuviossa TI (Temperature index) on lämpötila-arvo (130 °C) kohdassa, jossa elinikä on 20 000 tuntia. Lämpötilassa 136 °C elinikä on puolittunut. HIC (Halving interval in C°) on siis lämpötilaväli, jossa elinikä puolittuu. Arvo olisi kuvion mukaan yli 6 °C, mutta elinikäarvioinnissa on aina mukana epävarmuutta ja yleisesti käytetäänkin arvoa 6 °C. (Aro ym. 2003, 175–177.)



**Kuvio 4.** Arrheniuksen elinikäkäyrä öljypaperieristykselle (Aro ym. 2003).

Paperin vanhetessa lämmön johdosta selluloosan molekyylipaino ja DP-luku pienenevät, koska selluloosan rakenneyksiköiden väliset sidokset katkeilevat. Vanhe-

nemisen kinetiikkaa voidaan kuvata Ekenstamin yhtälöllä (5). Paperin haurastuminen on kemiallinen reaktio, jonka reaktiokinetiikan on todettu noudattavan Arrheniuksen yhtälöä (2). Ekenstam osoitti DP-luvun ja ajan keskinäisen yhteyden ja yhdisti tämän Arrheniuksen yhtälöön. Näin saatiin myös lämpötilariippuvuus mukaan (Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers, 2007). Yhtälöstä (5) laskettua matemaattista vanhenemismallia on käytetty myöhemmin tässä työssä tuloksien arviointiin.

Yhtälössä  $DP_t$  on vanhenemisen jälkeen mitattu DP-luku ja  $DP_0$  on alkuperäinen, uuden paperin DP-luku.  $R$  on yleinen kaasuvakio, 8,314 J/mol/K ja  $T$  lämpötila Kelvineinä.  $E_A$  on selluloosan aktivaatioenergia eli pienin vaadittava energia reaktion käynnistymiseksi. Yhtälössä oleva  $A$  on ympäristökerroin. Se on riippuvainen ympäröivistä olosuhteista, erityisesti paperin kosteudesta ja happipitoisuudesta. (Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers 2007.)

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = A \cdot e^{\frac{-E_A}{RT}} \cdot t \quad (5)$$



## 5 ERISTEPAPERIN VANHENEMISKOE

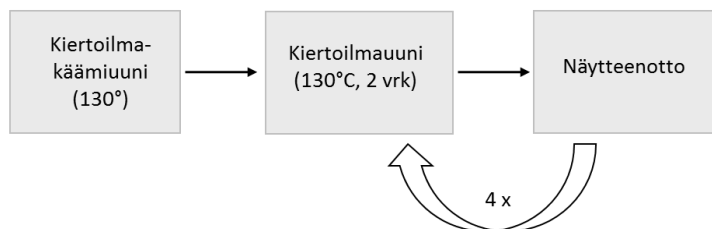
Paperinäytteitä vanhennettiin näytepulloissa, joihin oli porattu ilmareikiä. Näytepullot olivat alumiinisia pulloja, joita käytetään muuntajaöljynäytteille. Yhteen pulloon laitettiin 8–10 kappaletta paperinäytteitä (kuva 4). Käytetty paperi oli Tervakosken Tertrans T50 $\mu$ m, density 1,10 lämpöstabiili eristepaperi (LIITE 2). Näytekappaleissa eristepaperi oli käärittynä noin 15 cm pitkien kuparisten johtimien ympärille.



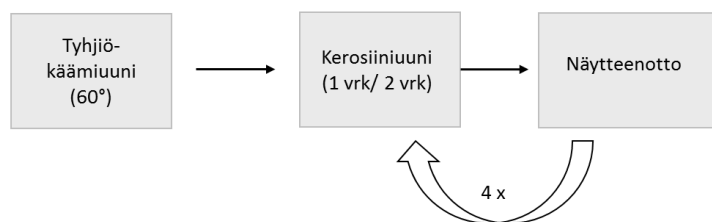
**Kuva 4.** Näytepulloja ja paperinäytteitä.

Vanhenemiskokeet suoritettiin siten, että näytteet kulkivat tuotantolinjoja mukailleen (kuvio 5 ja kuvio 6). Ensin näytteet kävivät käämiuunissa, missä tuotannossakin käämit kuivataan. Seuraavaksi näytteet menivät uuneihin, joissa muuntajat lopuksi kuivataan. Näytteitä vanhennettiin muuntajien kuivausuuneissa yhteensä 5 kertaa. Jokaisen uunituksen jälkeen otettiin näytepulloista paperinäytekappale ja analysoitiin sen DP-luku. Ensimmäisen uunituksen jälkeen näytteet kastettiin muuntajaöljyllä. Käytetty öljy oli Nynasin 10 XN inhiboitu muuntajaöljy. Samalla seurattiin uunien lämpötiloja ja uunitusaikoja. Kiertoilma- ja tyhjiöuuneissa näytteiden mukana oli kalibroitu paine- ja lämpötilamittari, jotta todelliset lämpötilaolosuhteet saatiin selville.

## 2. Linja

**Kuvio 5.** Paperinäytteen vanhentamisprosessi 2. linjalla.

## 3. Linja

**Kuvio 6.** Paperinäytteen vanhentamisprosessi 3.linjalla.**5.1 DP-luvun määrittäminen**

Paperin DP-luvun mittaaminen perustuu IEC 60450 -standardiin. DP-lukua käytetään arvioitaessa eristepaperin kuntoa ja se on mittayksikkö paperin haurastumiselle.

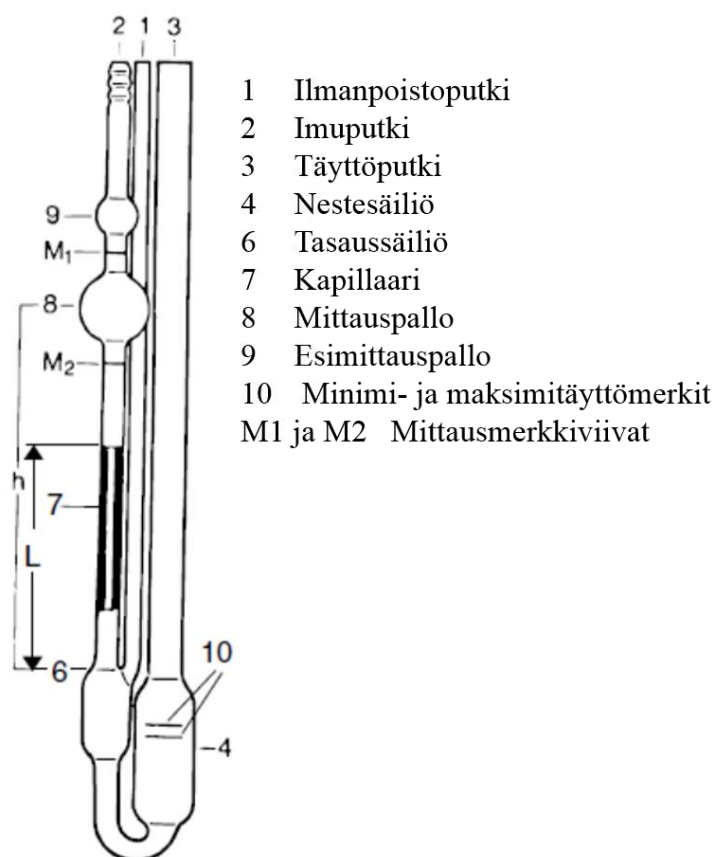


**Kuva 5.** Paperinäytteitä.

Paperinäytekappaleista (kuva 5) analyysiä varten käytettiin johtimen ympäriltä kaksi ulointa paperikerrosta. Paperinäyte pestiin pentaanilla, jos se oli öljyinen. Osa yksiköistä tehtiin kuivalla paperilla ja osa näytteistä oli impregnoitu eli kyllästetty öljyllä. Kuivunut paperi leikattiin saksilla noin 1 mm · 1 mm kokoisiksi palasiksi. Paperinäytettä punnittiin pulloon 50–80 mg. Näytteeseen lisättiin 10 ml puhdistettua vettä ja seos laitettiin magneettisekoitukseen jääkaappiin vähintään 10 minuutiksi. Tämän jälkeen näytteeseen lisättiin 10 ml 100 % CED-liuosta<sup>1</sup> ja näytepullo täytettiin 50 % CED-liuksella. Tarkka tilavuus merkittiin ylös. Näytepullon korkin septumin läpi pistettiin neula, jotta saadaan ilmassa oleva happi ulos pullosta. Näytepullot laitettiin jääkaappiin magneettisekoitukseen yön yli. Seuraavana päivänä mitattiin liuoksen viskositeetti Ubbelohde-viskosimetrillä. Viskosimetriä pidettiin vesihauteessa 20 °C ja näytteen annettiin temperoitua siinä vähintään 20 minuuttia ennen mittausta. Nollanäytteenä mitattiin käytetty 50 % CED-liuos.

---

<sup>1</sup> Kuparietyleenidiamiini (CED)-liuos scan 16:62, Oy FF-Chemicals Ab



**Kuvio 7.** Ubbelohde-kapillaariviskosimetri (IEC 60450:2004+A1:2007).

Kuviossa 7 esitetty Ubbelohde-viskosimetri on eräänlainen kapillaariviskosimetri. Siinä neste kulkeutuu paine-eron avulla ohuen kapillaarin läpi ja nesteen mittausmerkkiviivojen välissä kulkema aika mitataan. Liuoksen keskimääräinen molekyylimassa  $\bar{M}$  saadaan empiirisesti todetusta Mark-Houwink-yhtälöstä (6) rajaviskositeetin  $[\eta]$  avulla.  $K$  ja  $a$  ovat vakioita, jotka riippuvat molekyyli-liuotin -parista ja mittauslämpötilasta. (Atkins 1982, 825–826).

$$[\eta] = K \cdot \bar{M}^a \quad (6)$$

## 5.2 DP-luvun laskeminen

Polymeroitumisaste eli DP-luku lasketaan alla olevien yhtälöiden mukaan. Selluloosakupariliuoksen, paperi/CED-liuos, ominaisviskositeetti  $v_s$  voidaan laskea yhtälöstä (7) ja konsentraatio  $c$  yhtälöstä (8). Rajaviskositeetin ja konsentraation tullelolle  $[v] \cdot c$  löytyy arvoja taulukoituna ominaisviskositeetin funktiona IEC 60450 -standardista (LIITE 1). Tästä saadaan arvo rajaviskositeetille, jolloin voidaan laskea DP-luku,  $\overline{DP}_v$  yhtälöstä (9). (IEC 60450:2004+A1:2007.)

$$v_s = \frac{t_s - t_0}{t_0} \quad (7)$$

$v_s$  = ominaisviskositeetti

$t_s$  = CED/Paperiliuoksen virtausaika

$t_0$  = CED-liuoksen virtausaika (nollanäyte)

$$c = \frac{m_{paperi}}{V_{CED}} \quad (8)$$

$c$  = konsentraatio

$m_{paperi}$  = paperinäytteen paino

$V_{CED}$  = kupariliuoksen tilavuus

$$[v] = K \cdot \overline{DP}_v^\alpha \quad (9)$$

$[v]$  = rajaviskositeetti

$\overline{DP}_v$  = DP-luku

$\alpha = 1$  (Mark Houwink vakio)

$K = 0,0075$  (Mark Houwink vakio)

### 5.3 Tulokset

Uuden paperin DP-luku määritettiin lähtöarvoksi paperin vanhenemiselle. Paperin valmistaja antaa myös arvon uuden paperin DP-luvulle (LIITE 2). Taulukossa 2 on verrattu valmistajan ilmoittamaa arvoa ja mitattua arvoa, jotka ovat linjassa keskenään. Vanhenemiskokeiden mittaustulokset esitetään liitteessä 4.

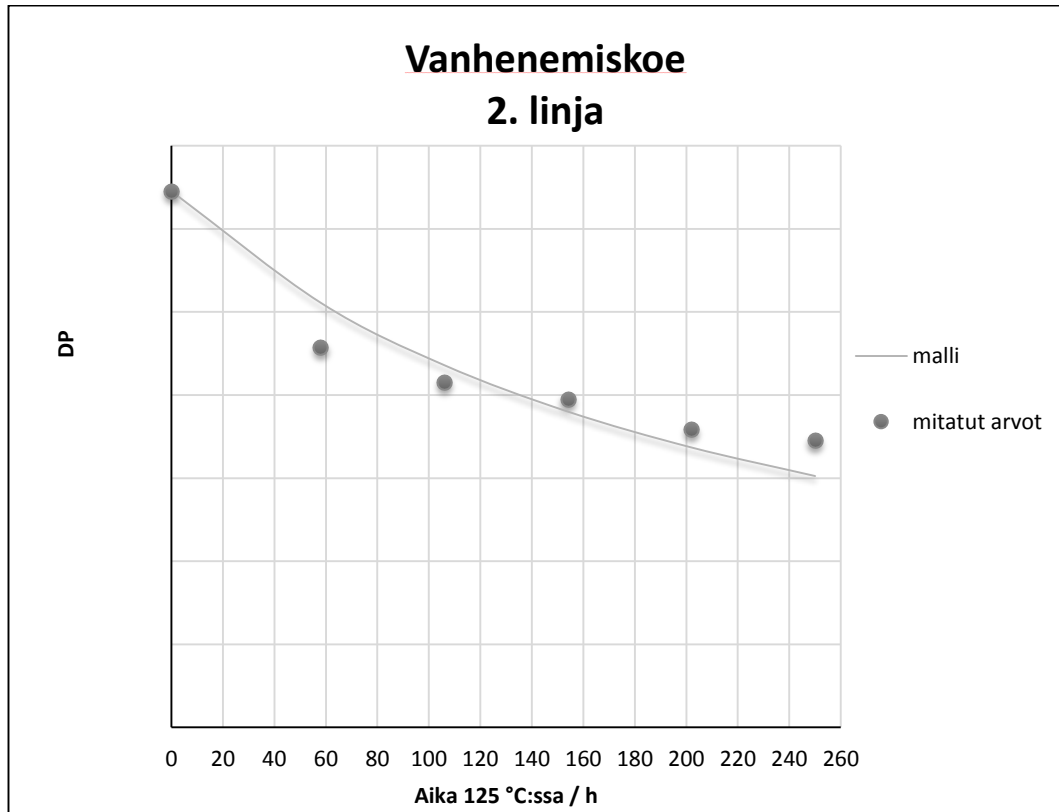
**Taulukko 2.** Uuden paperin DP-luku.

Uuden paperin DP	
Valmistaja	Mitattu
min. 1200	1291

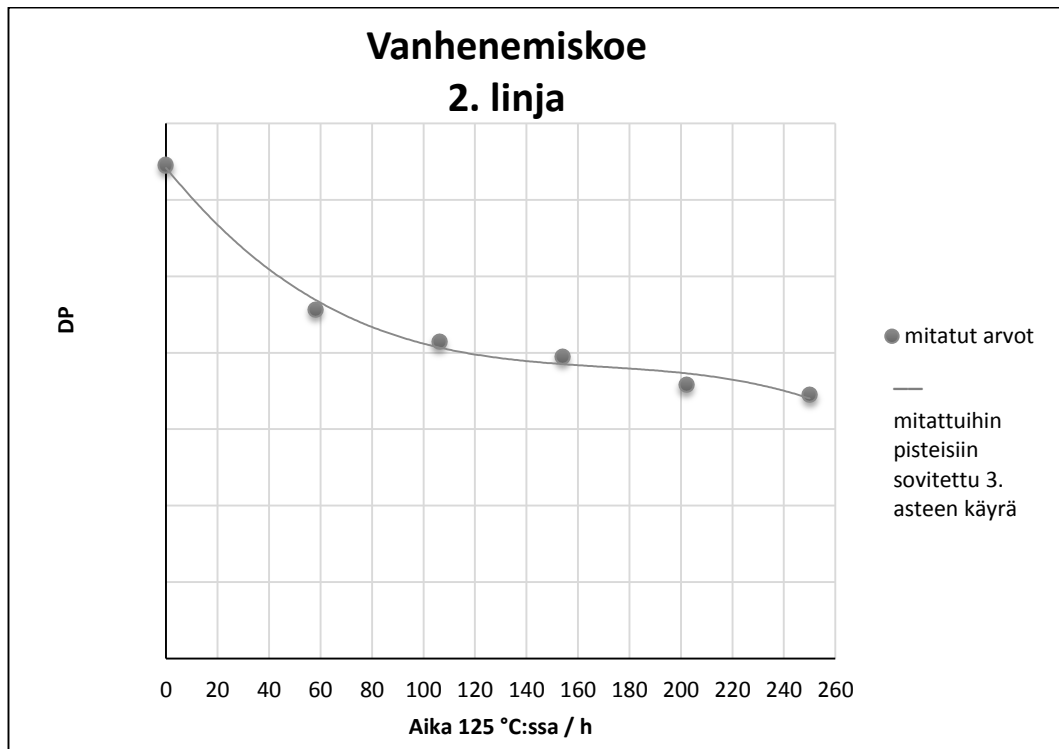
Vanhenemiskokeiden tuloksista piirrettiin kuvaajat, joissa toisena muuttujana on aika, jonka näyte on uunin maksimilämpötilassa ja toisena muuttujana mitattu DP-luku. Kuvaajissa käytetään korkeinta lämpötilaa, koska vanheneminen on silloin suurinta. Jo aiemmin on todettu, että Arrhenius-käyrän mukaan elinikä puolittuu, kun lämpötila nousee 6–8 astetta. Lämpötilakäyrät ovat työn liitteinä (LIITE 7). Kuvaajissa on myös yhtälön (5) mukaan laskettu matemaattinen malli paperin vanhenemiselle.

Aktivaatioenergiana on mallissa käytetty kirjallisuudessa esiintyvää keskiarvoa 111 kJ/mol. Tutkimuksessa on todettu, että aktivaatioenergia on sama lämpöstabii- lille paperille ja Kraft-paperille (ks. Lundgaard ym. 2004, 238). Ympäristökertoimelle ei ole olemassa yhtä oikeaa arvoa, vaan se on olosuhteita kuvaava vakio. Kirjallisuudesta löytyy monenlaisia arvoja eri olosuhteille ja tässä malliin on sovitettu siihen sopiva arvo.

Kuviossa 8 on esitetty vanhenemiskokeen tulokset 2. linjalta ja samaan kuvioon on piirretty vanhenemistä kuvaava mallikäyrä. Mallikäyrän yhtälö näkyy myös kuvaajassa. Malli ja mitatut arvot eivät täysin vastaa toisiaan. Kuviossa 9 on mittaustuloksiin sovitettu kolmannen asteen yhtälö, joka vastaa paremmin mitattuja pisteitä, helpottamaan mittapisteiden välisten arvojen arviointia.



**Kuvio 8.** Vanhenemiskokeen tulokset ja mallikäyrä 2. linjalla.



**Kuvio 9.** Vanhenemiskokeen tulokset ja niihin sovitettu käyrä 2. linjalla.

Linjan 2 kiertoilmauunissa, jossa muuntajia kuivataan, yhden uunituskerran kesto on 48 tuntia. Periaatteessa kiertoilmauunia käytetään 130 asteen lämpötilassa. Vanhenemiskokeen aikana mitattu uunin todellinen lämpötila oli maksimissaan 125 °C. Laskuissa on käytetty kokeen aikana mitattua lämpötilaa.

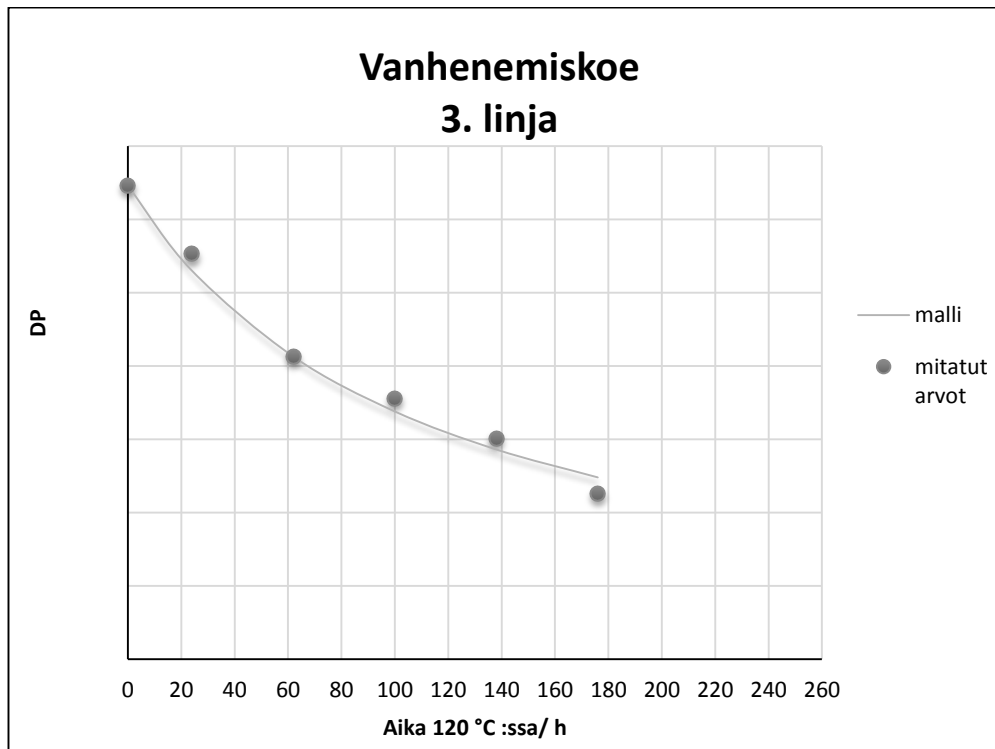
Taulukossa 3 on esitetty DP-luvun ja uunituskertojen yhteys.



**Taulukko 3.** DP-luku uunituskerroittain.

2. Linja Kiertoilmauuni		
DP	Aika 125:ssa °C/h	Uunituskerta
	44	0,9
	199	4,2
	258	5,4

Linjalla kolme olevaa kerosiiniuunia käytetään yleensä 1 vrk:n tai 2 vrk:n ohjelmilla. Kerosiiniuunin ajojen lämpötiläkäyristä selviää, että ohjelmien maksimilämpötila on 120 °C (LIITE 7). Lyhemmällä ohjelmalla uunissa on maksimilämpötila noin 24 tuntia ja pidemmällä ajolla noin 38 tuntia. Tätä tietoa on käytetty 3. linjan vanhenemismallia laskettaessa. Kuviossa 10 on piirretty mitatut arvot ja malli samaan kuvaajaan. Malli noudattaa melko hyvin mitattuja arvoja. Myös mallin yhtälö näkyy kuvaajassa.



**Kuvio 10.** Vanhenemiskokeen tulokset ja mallikäyrä 3. linjalla.

Taulukossa 4 on esitetty DP-luvun ja kerosiiniuunituskertojen yhteys. Taulukossa on eritelty pitkä ja lyhyt kerosiiniuunitus. Taulukon arvot on laskettu edellä esitetystä mallista

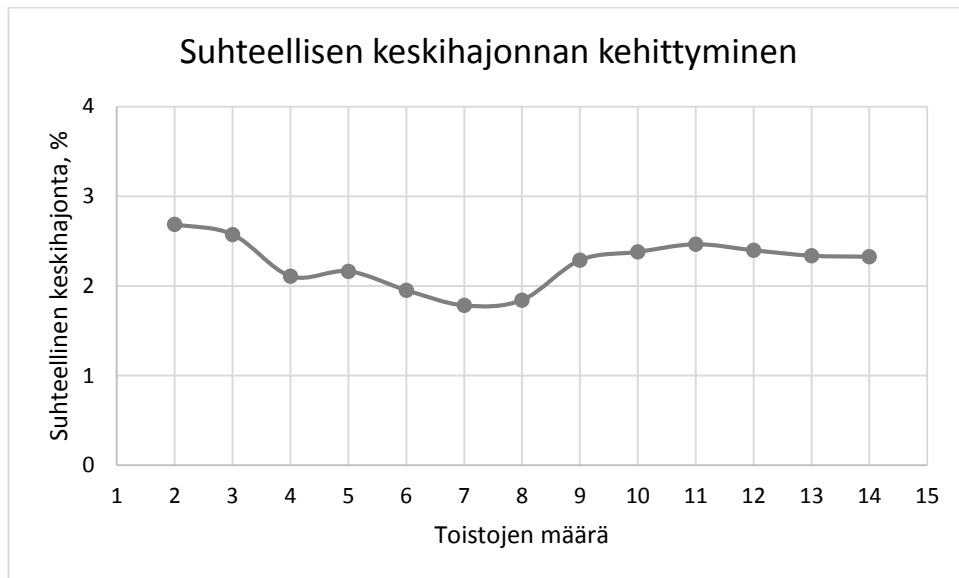
**Taulukko 4.** DP-luvun ja kerosiiniuunituksen yhteys.

3. Linja Kerosiiniuuni			
DP	Aika 120:ssa °C/h	Uunituskerta/ 1 vrk:n ohjelma	Uunituskerta/ 2 vrk:n ohjelma
	32	1,3	0,8
	67	2,8	1,8
	108	4,5	2,8

#### 5.4 Mittausten hajonta

DP-luvun mittausten yhteydessä määritettiin myös tilastollinen hajonta. Hajonnan määrityksen näytteet olivat paperinäytteitä, joita uunitettiin 3. linjan tyhjiökäämiuunissa ja kerosiiniuunissa. Kaikki näytteet ovat samasta uunituserästä. Näytteistä mitattiin DP-luku ja laskettiin suhteellinen keskihajonta. Hajontakokeen mittaustulokset esitetään liitteessä 5.

Kuviossa 11 on kuvattu hajonnan kehittymistä. Oletuksena oli, että hajonta pienenesi toistojen määrän kasvaessa. Näin ei kuitenkaan tapahtunut. Aluksi suhteellinen keskihajonta lähti kyllä pienemään toistojen mukaan, mutta seitsemännen näytteen jälkeen keskihajonta lähti pieneen kasvuun ja tasoittui siten, että toisen ja viimeisen mittauksen suhteellinen keskihajonta läheni toisiaan. Mittausten suhteellinen keskihajonta on alle 3 %.



**Kuvio 11.** DP-luvun hajonta.

### 5.5 Virhelähteet

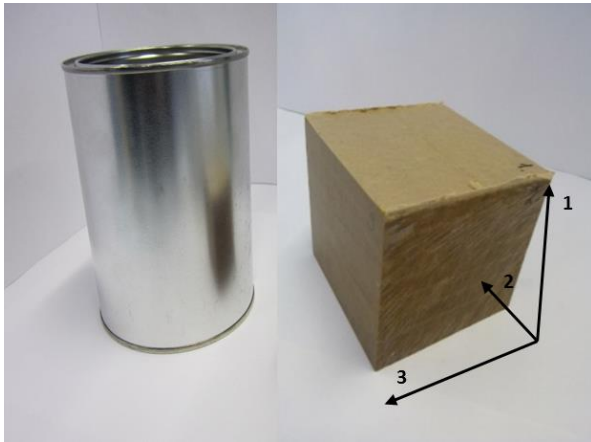
Näytteitä valmistettaessa DP-luvun mittaukseen, paperi ei aina liukene kunnolla CED-liuokseen. Vaikuttaisi, että mitä useampi uunitus näytteelle on tehty, sitä huommin näyte liukenee. Uuden uunittamattoman paperin liukenevuus oli täydellistä. Tarkkaa syytä tälle ilmiölle ei tiedetä, mutta liukenematon paperi aiheuttaa virhettä mittaukseen. Paperin liukenemista tarkasteltiin visuaalisesti mittauksen yhteydessä.

## **6 PRESPAANIN KOSTEUS JA KUTISTUMA**

Prespaania käytetään käämien tukemiseen ja eristämiseen. Tässä luvussa kuvataan järjestelyjä, joita käytettiin prespaanin kosteuden ja kutistuman mittaamiseen. Tarkoituksena oli selvittää, prespaanin kuivumista ja kutistumista, muuntajan valmistuksessa käytettävissä uuneissa. Mittausjärjestelyillä mallinnettiin uunitusten osalta muuntajien valmistuslinjoja (ks. kuvio 2).

### **6.1 Prespaanin kosteus ja kutistuma**

Prespaanin kosteuden mittaamenetelmä perustuu SFS EN 14774 -standardiin. Mittaus suoritettiin uunikuivausmenetelmällä ja kosteuspitoisuus laskettiin massan menetyksestä (Metsäteollisuus 2012). Koekappaleiksi valittiin prespaanikappaleita, jotka olivat noin 6 cm paksuja kanteiltaan. Koekappaleiksi valittiin paksumpia prespaanipaloja kuin mitä käämien eristeissä käytetään, koska erot haluttiin selvästi näkymään. Käämien prespaanieristerakennetta ei ollut mahdollista mallintaa suoraan. Prespaaninäytteistä mitattiin kosteutta ja kutistumaa. Kuvassa 6 esitetään prespaaninäyte, jossa näkyy kutistuman mittaussuunnat sekä näytepurkki.



**Kuva 6.** Prespaanikappale ja näytepurkki.

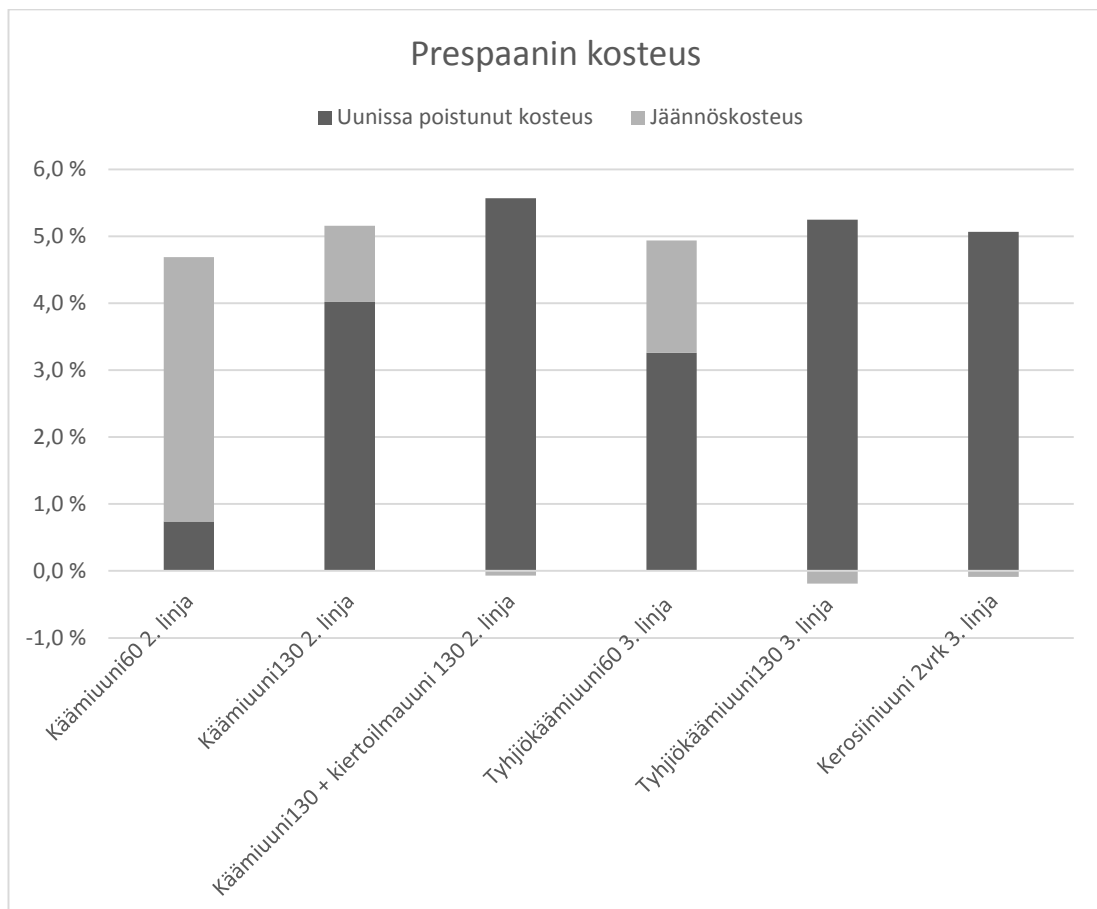
Ennen uunituksia näytekappaleiden paksuudet mitattiin mikrometrillä kolmelta kantilta ja kappaleet punnittiin. Näytepurkit näytteineen laitettiin haluttuihin uuneihin valmistuslinjan mukaan. Uunituksen jälkeen jäähtynyt näyte punnittiin ja paksuudet mitattiin. Prespaaninäytteitä kuivattiin vielä jäännöskosteuden ja potentiaalisen kutistuman selvittämiseksi 24 h 105 °C. Tämän jälkeen jäähtyneet näytteet punnittiin ja mitattiin paksuudet. Näytepurkit suljettiin aina tiiviisti uunitusten jälkeen, jotta niihin ei imeytyisi kosteutta. Kosteuspitoisuus (märkäpainosta) massaprosentteina laskettiin yhtälön 7 mukaan (Metsäteollisuus 2012).

$$w_{vesi} = \frac{m_{alkup.} - m_{kuivattu}}{m_{alkup.} - m_{astia}} * 100 \quad (10)$$

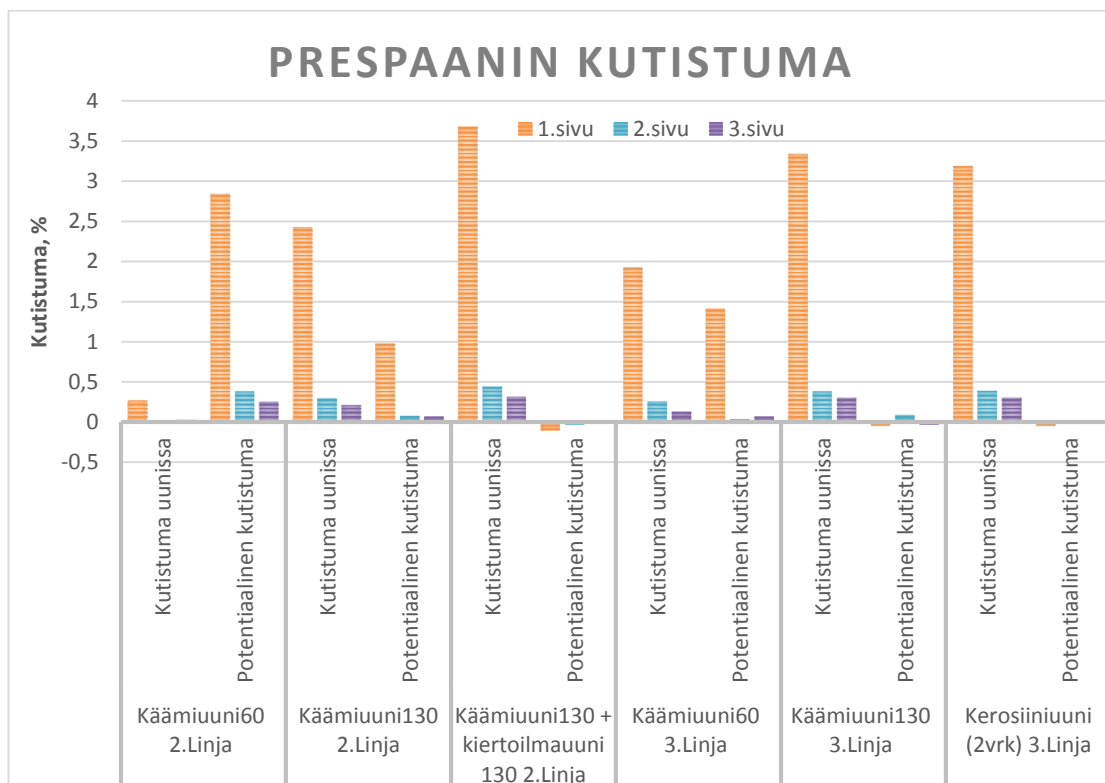
## 6.2 Tulokset

Prespaaninäytteiden kosteuspitoisuudet eri uuneissa tai uuniyhdistelmissä on esitetty kuviossa 12. Tuloksista ei voida tehdä suoria johtopäätöksiä käämien prespaanieristysten ja testikappaleiden kuivumisen välille. Uunien väliset kuivaustulokset kuvaajasta voidaan nähdä. Kerosiiniuunissa kuivaustulos on paras ja kiertoilmuunissa huonoin. Tuloksista ilmenee myös, että 2. linjan käämiuunin kuivausteho

60 °C ohjelmalla on hyvin pieni. Prespaaninäytteistä mitattiin myös kutistumaa ja tulokset on esitetty kuviossa 13. Tulokset ovat linjassa kosteustuloksien kanssa. Tarkat mittaustulokset ovat liitteessä 3.



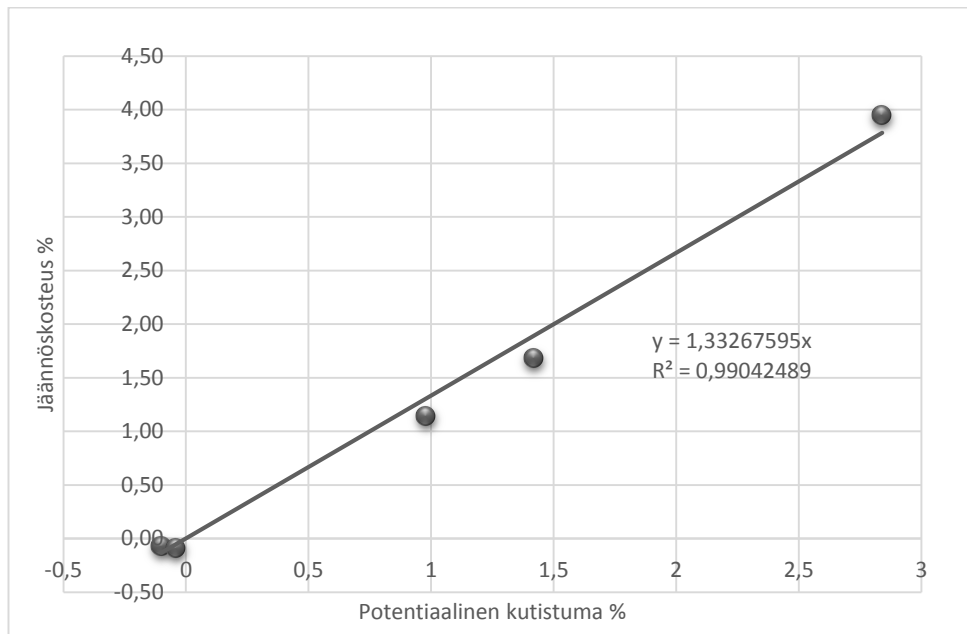
**Kuvio 12.** Prespaanin kosteus.



**Kuvio 13.** Prespaanin kutistuma.

Kuviossa 14 on yhdistetty edellisistä kaavioista prespaanin jäännöskosteus ja sitä vastaava potentiaalinen kutistuma. Kutistumana käytettiin 1. sivun (ks. kuva 6) kutistumaa. Prespaanin jäännöskosteuden ja potentiaalisen kutistuman yhteys näyttää olevan lineaarinen. Trendiviiva on pakotettu nollan kautta, koska kuiva prespaani ei kutistu. Suoran yhtälöstä voi laskea potentiaalisen kutistuman, jos jäännöskosteus tiedetään.





**Kuvio 14.** Prespaani jäännöskosteus vs. potentiaalinen kutistuma.

## 7 MONIMUUTTUJAKOE

Taguchi-menetelmä on japanilaisen tohtorin Genichi Taguchin kehittämä laadun parantamiseen tähtäävä menetelmä tuote- ja prosessisuunnittelussa. Menetelmällä pyritään yhtä aikaa parantamaan laatua sekä alentamaan kustannuksia. Menetelmässä on kolme päävaihetta: systeemisuunnittelu, parametrisuunnittelu ja toleransisuunnittelu. Kaikki nämä yhdessä muodostavat Taguchin laatufilosofian. Näitä vaihteita voidaan käyttää myös itsenäisinä menetelminä. Tärkeimpänä vaiheena Taguchi pitää parametrisuunnittelua, joka onkin eniten itsenäisesti käytetty menetelmä. Koesuunnittelussa parametrisuunnittelulla kokeet tehdään muuttamalla useita tekijöitä samaan aikaan hyväksi käyttäen ortogonaalimatriiseja. Parametrisuunnittelulla pyritään optimoimaan asetetut parametrit ja etsitään parhaat mahdolliset kombinaatiot. (Karjalainen, E 1990, 7–26).

Perinteisessä koesuunnittelussa muutetaan yhtä tekijää kerrallaan, jotta tekijän vaikutus saataisiin selville. Tämä aiheuttaa sen, että suurella määrällä muuttujia, yhtä tekijää kerralla muuttamalla, koemäärä kasvaa nopeasti hyvin suureksi.

”Jos on esimerkiksi testattava 13 tekijän vaikutus kolmessa tasossa, vaaditaan kaikkien kombinaatioiden testaamiseen  $3^{13} = 1\,594\,323$  koetta. Ortogonaalimatriisia käytettäessä selvittäään 27 kokeella.” (Karjalainen 1990, 55.)

Ortogonaalimatriisi on siis koesuunnitelma, jossa vähemmällä koemäärällä voidaan löytää enemmän vaikuttavia tekijöitä. Tämä ei kuitenkaan vaikuta tulosten luotettavuuteen negatiivisesti vaan suurimpana etuna ortogonaalimatriisien käytössä onkin, että se on todettu luotettavaksi ja toistettavaksi analyysimenetelmäksi. Perinteisillä koejärjestelyillä kokeiden määrän vähentäminen huonontaa luotettavuutta. Tulokset arvioidaan yksinkertaisin tilastollisin menetelmin. (Karjalainen 1990, 45–74).

DoE (Design of Experiments) on koesarja, jolla prosessin alkutekijöitä muuttamalla etsitään prosessin lopputulokseen vaikuttavia syitä ja tekijöitä. Tarkoituksena on ymmärtää alkutekijöiden vaikuttavuutta ja keskinäisvaikutuksia lopputulokseen.

Koesuunnittelu (DoE) niin kuin parametrisuunnittelukin ovat osa Taguchi-menetelmää. (Karjalainen, T & Karjalainen, E.E. 2002).

### 7.1 Koesuunnitelma

Taguchi-menetelmää käytettiin monimuuttujakokeen suunnittelussa. Pyrkimyksenä oli selvittää, mikä uunitusvaihe uuden muuntajan valmistusprosessissa vaikuttaa eniten eristepaperin haurastumiseen. Kokeet suunniteltiin osittaistekijäkokeena eli screening kokeena, jonka tarkoituksena on selvittää, mikä monista tekijöistä vaikuttaa prosessiin eniten. (Karjalainen, T & Karjalainen, E.E. 2002, 163.)

Näytteet uunitettiin taulukon 5 mukaan siten, että jokainen näyte kävi halutussa uunituksessa vaakarivin mukaisessa järjestyksessä vasemmalta oikealle. Lopuksi, neljännen uunituksen jälkeen, mitattiin näytteiden DP-luku ja tehtiin tilastollinen analyysi. Osassa uunituksissa oli mukana kalibroitu paine- ja lämpötilamittari.

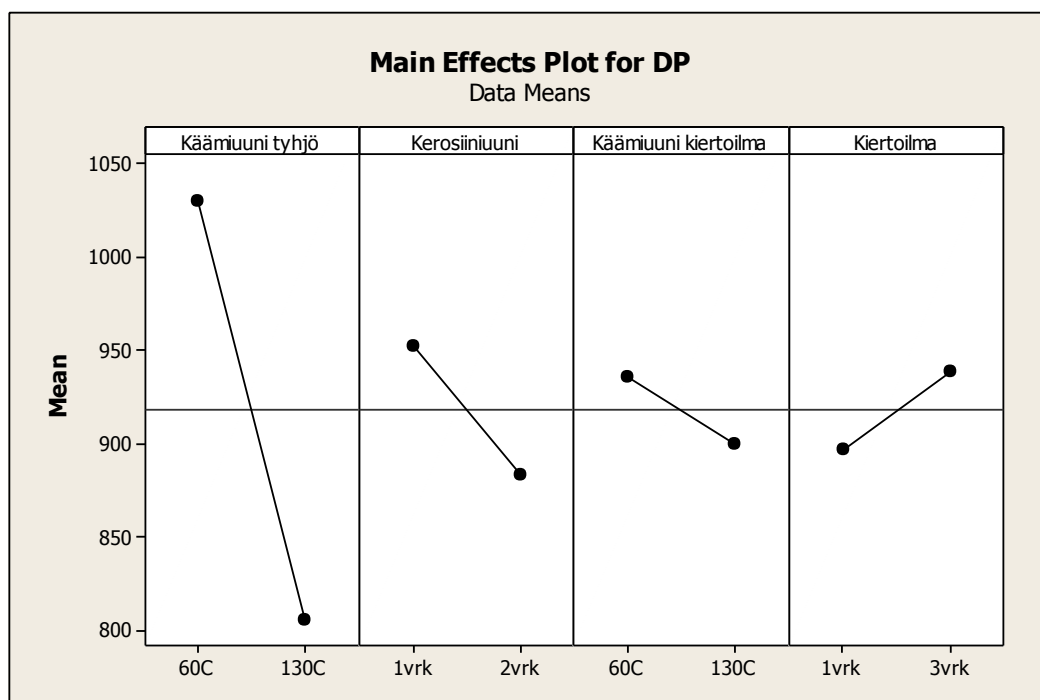
**Taulukko 5.** Monimuuttujakokeen koematriisi.

	<b>1. uunitus</b>	<b>2. uunitus</b>	<b>3. uunitus</b>	<b>4. uunitus</b>
Näyte	Tyhjiökää- miuuni (3. linja)	Kerosiiniuuni (3. linja)	Kiertoilmakää- miuuni (2. linja)	Kiertoilmauuni 130 °C (2. linja)
1	60 °C	1 vrk	60 °C	1 vrk
2	60 °C	1 vrk	130 °C	3 vrk
3	60 °C	2 vrk	60 °C	3 vrk
4	60 °C	2 vrk	130 °C	1 vrk
5	130 °C	1 vrk	60 °C	3 vrk
6	130 °C	1 vrk	130 °C	1 vrk
7	130 °C	2 vrk	60 °C	1 vrk
8	130 °C	2 vrk	130 °C	3 vrk

### 7.2 Tulokset

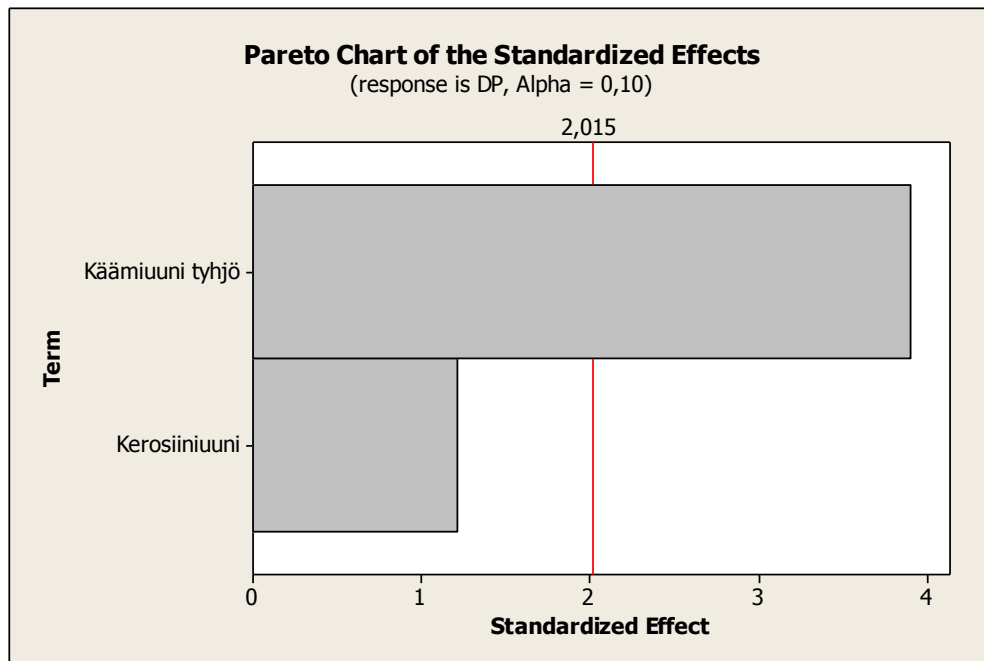
Tuloksena saatiin päätekijäkuvaaja eri muuttujien (uunit) tasojen (lämpötila tai aika) vaikuttavuudesta sekä Pareto-kaavio vaikuttavuuden tilastollisesta merkittävyydestä.

Päätekijäkuvaajasta (kuvio 15) näkee, että suurin merkitys on 3. linjan tyhjiökäämiuunilla. Seuraavaksi eniten vaikuttavat päätekijät valituilla tasoilla ovat järjestyksessä kerosiiniuuni, kiertoilmakäämiuuni ja kiertoilmauuni. Korkeampi lämpötila ja pidempi aika vanhentavat paperia ja se näkyy päätekijäkaaviossa. Kiertoilmauunin kohdalla näyttäisi olevan toisinpäin, mutta tämä on todennäköisesti kohinaa, koska kiertoilmauuni ei ole merkittävä tekijä Pareto-kaaviossa (kuvio 16).



**Kuvio 15.** Päätekijäkuvaaja.

Pareto-kaaviolla voidaan selvittää, onko kokeeseen valituilla päätekijöillä merkittävää vaikutusta prosessin lopputulokseen. Pareto-kaaviossa (kuvio 16) ylimmäksi valitaan eniten merkittävä tekijä ja alempana tässä kaaviossa on toiseksi eniten merkittävä tekijä. Kohinarajaksi on valittu 10 %. Kohinaraja näkyy kuviossa punaisena viivana. Jos joku tekijä ylittää kohinarajan, on sillä merkittävä vaikutus.



**Kuvio 16.** Pareto-kaavio vaikutusten merkittävydestä.

Tässä tapauksessa ainoastaan tyhjiökäämiuunin lämpötilalla on merkittävä vaikutus paperin haurastumiseen. Koska seuraavaksi eniten vaikuttava tekijä eli kerosiiniuuni ei ylitä kohinarajaa, ei muillakaan päätekijöillä ole merkitsevää vaikutusta.

### 7.3 Virhelähteet

Kokeessa uunien mitatut lämpötilat eivät vastanneet asetettuja lämpötiloja. Tyhjiökäämiuunin ohjelman 130 °C mitattu maksimilämpötila oli 135 °C. Kun kiertoilmakäämiuunissa ohjelman 130 °C mitattu maksimilämpötila ylsi vain 120 °C:een. Jo muutaman asteen lämpötilan vaihtelulla on merkittävä vaikutus paperin vanhenemisprosessissa (vrt. kuvio 4).

## 8 LOPPUPÄÄTELMÄT JA TOIMENPIDE-EHDOTUKSET

Lämpöstabiilin eristepaperin vanhenemisen tutkiminen oli ajankohtaista, koska se on otettu ABB Oy:n Transformers-yksikössä vakiokäyttöön. Aikaisempia vanhenemiskokeita kyseisestä paperista ei ole muuntajatehtaalla tehty. Asiakkaat ovat osoittaneet kasvavaa kiinnostusta paperin vanhenemiseen muuntajan kuivausprosessissa erityisesti kerosiiniuunikuivauksessa ja haluavat saada tietoa uuden muuntajan paperieristyksen kunnosta. Tämän työn tavoitteena oli saada tietoa paperin vanhenemisprosessista kuivauksien aikana, jotta uuden muuntajan paperieristyksen kuntoa voitaisiin perustellusti arvioida. Paperin kunnan arviointiin käytettiin laboratoriossa mitattavaa paperin DP-lukua.

Tässä työssä 2. linjan vanhenemiskokeissa paperin kunnan todettiin olevan vielä uuden paperin raja-arvoissa käämien ja muuntajan kuivauksen jälkeen. Vaikka muuntajaa jouduttaisiin avaamaan ja kuivaamaan uudelleen, tulosten mukaan pysyy paperin kunto vielä hyvänä useankin kuivauksen jälkeen. Paperi kuitenkin haurastuu jokaisessa kuivauksessa, joten ylimääräisiä kuivauksia tulisi välttää.

3. linjalla vanhenemiskokeissa työn tuloksissa käsiteltiin erikseen kahta kerosiiniuunin kuivausohjelmaa, jotka eroavat toisistaan kuivausajan pituudessa.

Uuden muuntajan eristepaperin DP-luvulle ei ole olemassa määriteltyä minimiarvoa. Kuitenkin eristepaperi on sitä parempi mitä suurempi DP-luku on. Asiakkailla kuitenkin voi olla omia vaatimuksia paperin kunnolle. IEC-standardin mukaan paperia pidetään uudenveroisena kun DP-luku on yli 1000 ja hyvänä kun luku on yli 650. Laadun kannalta voisi ajatella, että uudessa muuntajassa paperin DP-luvun tulisi olla lähellä arvoa 1000.

Prespaanin kuivumiskokeissa testikappaleen ja käämien kuivumisesta ei voi suoraan verrata toisiinsa. Suuntaa antavia johtopäätöksiä uunien kuivaustuloksista voi kuitenkin tehdä. Yksi keskeinen havainto kokeessa oli, että 2. linjan käämiuunin 60 °C ohjelmalla kuivuminen on erittäin vähäistä. Käytännössä prespaanieriste ei uunissa

tässä lämpötilassa juuri kuivu. Linjan työntekijät olivat havainneet tämän myös käytännössä. Voidaan miettiä, onko tällä kuivauksella mitään merkitystä. Uunit kuivumistuloksen mukaisessa järjestyksessä heikoin kuivaustulos ensin mainittuna ovat kiertoilmauuni, tyhjiöuuni ja kerosiiniuuni.

Prespaanin jäännöskosteuden ja potentiaalisen kutistuman yhteys havaittiin lineaariseksi. Tästä seuraa, että jäännöskosteuden avulla voidaan laskea potentiaalinen kutistuma. Uunissa käytettävän testikappaleen avulla voisi potentiaalista kutistumaa arvioida, kun jäännöskosteus tiedetään.

Monimuuttujakokeessa havaittiin vain 3. linjan tyhjiökäämiuunin lämpötilan vaikutuksen olevan tilastollisesti merkittävä. Tyhjiökäämiuunin käyttö 130 °C ohjelmalla heikentää merkittävästi paperin kuntoa. Tässäkin kokeessa uunien mitatut ja asetetut lämpötilat eivät vastanneet toisiaan, joko korosti saatua tulosta.

Paperin vanhenemisen kannalta lämpötila ja kuivausaika ovat suuria vaikuttavia tekijöitä. Pienikin lämpötilan muutos vaikuttaa paperin vanhenemiseen. Työssä kävi ilmi, että uunien asetetut lämpötilat ja mitatut lämpötilat eivät suurelta osin vastanneet toisiaan. Uuneissa ei myöskään ollut lämpötilan tai muiden parametrien seurantajärjestelmää, josta olisi selvinnyt todelliset kuivausolosuhteet. Ainoastaan kerosiiniuunista sai raportin jälkikäteen uunitusolosuhteista. Esimerkiksi kuivausprosessin mahdollisten häiriötilanteiden havaitseminen on mahdotonta ilman seuranta. Työn aikana ilmeni tarve kuivausuunien parametrien käytön aikaiseen seurantaan ja monitorointiin. Tämän voisi toteuttaa esimerkiksi SPC-menetelmällä (Statistical Process Control).

## LÄHTEET

ABB Oy. 2015. viitattu 16.1.2015. <http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti>

Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers. CIGRE Brochure 323. Task Force D1.01.10. 2007. CIGRE

Aro, M., Elovaara J., Karttunen M., Nousiainen K., Palva, V. 2003. Suurjännitetekniikka. 2. korjattu ja täydennetty painos. Jyväskylä. Oy Yliopistokustannus.

Atkins, P.W. 1982. Physical Chemistry. 2<sup>nd</sup> edition. Lontoo. Oxford University Press.

Fofana, I., Borsi H., Gockenbach E. & Farzaneh M. 2006. Aging of transformer insulation materials under selective conditions. International Transactions on Electrical Power 17, 450–470.

Heathcote, M.J. 2007. J&P Transformer Book. 13<sup>th</sup> edition. Unkari. Newnes.

IEC 60076-7. Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers. International Electrotechnical Commission. Edition 1.0 2005-12

IEC 60450:2004+A1:2007. Measurement of the average viscosimetric degree of polymerization of new and aged cellulosic electrically insulating materials. International Electrotechnical Commission. Edition 2.1 2007-07.

Isotalo, K. 2004. Puu- ja sellukemia. 3. uudistettu painos. Opetushallitus.

Karjalainen, E. 1990. Tuotteen ja prosessin optimointi koesuunnittelulla Taguchi-menetelmä. Helsinki. Metalliteollisuuden kustannus Oy.

Karjalainen, T & Karjalainen, E.E. 2002. Six Sigma Uuden sukupolven johtamis- ja laatumenetelmä. Hollola. Quality Knowhow Karjalainen Oy.

Laatusuunnitelma 2012 . Sisäinen dokumentti. ABB Oy.

Le, T., Hill D.J.T. & Darveniza M. 1996. Aging of Transformer Insulation Paper. Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry. 33, 12, 1885-1895.

Lundgaard, L.E., Hansen, W., Linhjell, D. & Painter, T.J. 2004. Aging of Oil-Impregnated Paper in Power Transformers. IEEE Transactions on Power Delivery 19,1, 230–239

Muuntajan kunnonvalvonta, Muuntajaöljyanalyysi, 2013. ABB Oy.



Muuntajatekniikan perusteet 2007. Opintomoniste. ABB Oy.

Metsäteollisuus. 2012. SFS-Käsikirja 35-2. Kiinteät biopolttoaineet. Osa 2: Terminologia, näytteenotto ja näytteen esikäsittely, fysikaaliset ja mekaaniset testimenetelmät sekä analyysitulosten muuntaminen eri ilmoittamisperustoille. 1. painos. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS Ry.

Nynas AB, viitattu 20.2.2015. <http://www.nynas.com/Segment/Transformer-oils/Our-transformer-oil-products1/Nyro-10XN---Super-grade/>

Prevost, T.A. 2005. Thermally Upgraded Insulation in Transformers. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2005, 120–125.

Service Handbook for Transformers. 3.painos. 2007. ABB

Suurmuuntajien kerosiini kuivaus. 1999. Sisäinen dokumentti. ABB Oy.

Transformer Handbook. 3. Painos. 2010. ABB

Working Group 09 (Thermal aspects of transformers) of Study Committee 12. 1993. Lifetime Evaluation of Transformers. Electra. 150, 39–51



# specification



Customer:  
Grade: Tertrans T 50µm, density 1,10

Date: 29.5.2013  
No.: Rev 2

Testing conditions: 50 % r.h., 23°C

NOTE: Tolerances are given on jumbo roll averages for 95 % confidence interval.



Parameter	unit	target	min	Max	standard
thickness (1 sheet)	µm	50	46	54	ISO 534:1988
density	kg/dm <sup>3</sup>	1,10	1,03	1,20	ISO 534:1988
grammage	g/m <sup>2</sup>	56			ISO 536:1995
gurley	s/100 ml	15000	3000		ISO 5636/5:1986
tensile strength, m. d.	kN/m	6,2	4,0		ISO 1924-2:1994
tensile strength, c. d.	kN/m	3,0	2,0		ISO 1924-2:1994
stretch at break, m. d.	%	1,7	1,3		ISO 1924-2:1994
stretch at break, c. d.	%	6,0	4,0		ISO 1924-2:1994
moisture	%	7,0		8,0	ISO 287:1985
ash content	%	0,35		1,0	ISO 2144 :1997
conductivity of water extract	mS/m	0,8		2,0	ISO 6587:1992
pH of water extract		7,0	6,0	8,0	ISO 6588:1981
electric strength, dry	MV/m	11,0	10,0		ASTM D149/D202
nitrogen	%	1,8	1,5		Elemental analyzer
degree of polymerization			1200		IEC60450

Approved by:

Date: \_\_\_\_\_

Juha Huovinen, Technical Customer Service

Tervakoski Oy  
FI-12400 Tervakoski  
T +358 (0)19 771-1 / F +358 (0)19 771-535  
tervakoski@delfortgroup.com



tervakoski