

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Ympäristötekniikka

Tutkintotyö

Janne Kohonen

LIUOTINVAPAIEN HARTSIEN SOVELTUVUUS KEMPPI OY:N
HARTSAUSPROSESSIIN

Työn ohjaaja
Työn teettäjä
Tampere 2006

Yliopettaja Torolf Öhman
Kemppi Oy, valvojana DI Antti Syrjä

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Ympäristötekniikka

Kohonen, Janne	LIUOTINVAPAIEN HARTSIEN SOVELTUVUUS KEMPPI OY:N HARTSAUSPROSESSIIN
Tutkintotyö	72 sivua + 7 liitesivua
Työn ohjaaja	DI Torolf Öhman
Työn teettäjä	Kemppi Oy, valvoja DI Antti Syrjä
Kesäkuu 2006	
Hakusanat	hartsit, hartsaaminen, pinnoittaminen, impregnointi, kyllästys

TIIVISTELMÄ

Työn teoriaosuudessa on selvitetty kyllästyshartsien ominaisuuksia sähkötarviketeollisuudessa. Käytännön osuudessa käydään läpi Kemppi Oy:n hartsausprosessi ja liuotinvapaiden hartsien soveltuvuus nykyiseen kastoallasprosessiin.

Tiukentuneet vaatimukset ympäristön suojelemiseksi ovat tuoneet markkinoille yhä enemmän liuotinvapaita hartsvaihtoehtoja. Nykyisin ne ovatkin varteenotettava vaihtoehto niin ominaisuuksiensa kuin hintansakin puolesta.

Hartsaamisella tarkoitetaan käämikomponenttien eli muuntajien ja kuristimien kyllästämistä polymeeripohjaisella pinnoitteella. Kyllästyshartsin päätarkoituksena on suojata käämikomponentteja kosteudelta, lämpötilanvaihteluilta sekä suolavedeltä. Hitsauskoneita käytetään paljon erilaisissa olosuhteissa, ja ne altistuvat ilmankosteudelle. Käämikomponenttien kyllästyshartsit ovat yleisesti tyydyttymättömiä polyesteri- tai epoksihartseja. Liuotinvapaiden hartsien viskositeetti on usein suurempi kuin liuotinpohjaisilla hartseilla, joten niiden soveltuvuus on aina tarkistettava tapauskohtaisesti. Käämikomponenttien esilämmityksen avulla saadaan alennettua hartsin viskositeettia ja siten parannettua tunkeutuvuutta rakenteisiin. Hartsin viskositeetti alenee lämpötilan noustessa.

TAMPERE POLYTECHNIC
Chemical Engineering
Environmental Engineering

Kohonen, Janne	MONOMER FREE RESINS APPLICABILITY TO KEMPPI OY'S IMPREGNATION PROCESS
Engineering thesis	72 pages, 7 appendix
Thesis Supervisor	DI Torolf Öhman
Comissioning Company	Kemppi Oy, M.Sc. Antti Syrjä
June 2006	
Keywords	resin, coating, impregnation

ABSTRACT

The theoretical part of this thesis deals with the characteristics of impregnation resin in the electronic components industry. The second part is about Kemppi Oy's impregnation process and the applicability of monomer-free resin to the current dip-and-bake process.

The increasingly strict environmental legislation concerning impregnation resin has brought about an increasing amount of monomer-free resins in the markets. Nowadays monomer-free resin is a valid option due to both its characteristics and the price.

Resin impregnation is the process of impregnating coil components, such as transformers and chokes, with polymer-based coating. The main function of impregnation resin is to protect the coil components from environmental factors like moisture, temperature differences and salt water. Welding machines are used in various conditions, and they are exposed to air humidity. Impregnation resins are usually unsaturated polyester or epoxy resins. The viscosity of monomer-free resin is usually greater than the viscosity of monomer-based resin. Therefore the applicability of monomer-free resin is case-specific and should be checked. With preheated coil components, viscosity deals with more suitable range and it penetrate better in the coils. Viscosity reduces when temperature raise.

ALKUSANAT

Tutkintotyön aihe on saatu Kemppi Oy:ltä, joka on toiminut myös työn rahoittajana. Haluaisin kiittää kaikkia henkilöitä, joita olen joutunut vaivaamaan asian tiimoilta, erityisesti Oy T.Stenbacka AB:n Ari Hakomäkeä, Carlo Casagrande Oy:n Jyrki Rautvuorea ja kaikkia Kempin henkilökuntaa, joilta olen saanut tietoa ja tukea työn menestyksekkääseen tekemiseen. Haluan kiittää myös työn ohjaajaa DI Antti Syrjää Kemppi Oy:stä tuesta ja avusta sekä työn ohjaajaa yliopettaja Torolf Öhmania Tampereen ammattikorkeakoulusta.

Tampereella 28.5.2006

Janne Kohonen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	
ABSTRACT	
ALKUSANAT	
SISÄLLYSLUETTELO	5
1 JOHDANTO.....	7
2 KYLLÄSTYSHARTSIN VAATIMUKSET ELEKTRONIIKKATEOLLISUUDELLE /5, s. 1, 4-5/.....	7
2.1 Ympäristötekijöiltä suojaaminen.....	9
2.1.1 Kosteussuoja /5, s. 5/	9
2.1.2 Korroosio /5, s. 11-14/	10
2.1.3 Kovuus.....	11
2.1.4 Kemikaalikestävyys /5, s. 21/	12
2.2 Polymeerieristeiden sähköiset ominaisuudet.....	12
2.2.1 Ominaisvastus ja pintavastus.....	13
2.2.2 Dielektrinen häviökerroin.....	14
2.2.3 Lämpilyöntikestävyys ja dielektrinen lujuus	15
2.2.4 Ryömyvirrankestävyys	16
2.3 Termiset ominaisuudet	17
2.4 Impregnointilaitteistot	17
2.4.1 Kastopinnoitus	19
2.4.2 Tyhjiöhartsaus	20
3 MUOVIEN POLYMEERIKEMIA	21
3.1 Tyydyttymättömät polyesterihartsit.....	22
3.1.1 Reaktiiviset monomeerit /1, s. 31-33/.....	26
3.1.2 Lisäaineet /6, s. 33-34/.....	27
3.1.3 Tyydyttymättömien polyesterihartsien kovettuminen /1, s. 34-55/.....	28
3.2 Liuotinvapaat tyydyttymättömät polyesterihartsit.....	32
3.3 Epoksihartsit	33
3.3.1 Epoksien kovettuminen /5, s. 85-87/	35
3.3.2 Epoksien ominaisuuksia /5, s. 96-99/	37
4 HARTSIEN YMPÄRISTÖ- JA TERVEYSVAIKUTUKSET	38
4.1 Hartsien ympäristövaikutukset	38
4.1.1 Haihtuvat orgaaniset yhdisteet /14, s. 5/.....	38
4.1.2 Lainsäädäntö /13/.....	39
4.1.3 VOC-yhdisteet ilmakehässä /14, s. 9-11/	40
4.1.4 VOC-yhdisteiden terveysvaikutukset	42
4.2 Hartsien terveysvaikutukset.....	43
4.2.1 Epoksihartsien terveysvaikutukset /11, s. 167-169/	43
4.2.2 Happoanhydridit /11, s. 150-155/.....	44
4.2.3 Polyesteripohjaiset hartsit /9, s. 24-27/.....	45
4.2.4 Reaktiiviset monomeerit.....	45
4.3 Riskien minimointi	46
5 IMPREGNOINTI KEMPPI OY:SSA	46
5.1 Lämpimenoajat	48
5.2 Ongelmat nykyisessä prosessissa	49
5.3 Nykyinen hartsi	52

5.4 Hartsin vaatimuksia Kempillä	52
5.4.1 Muuntajat ja kuristimet.....	52
5.4.2 Tuotannolliset vaatimukset.....	53
5.4.3 Käyttöturvallisuus.....	53
5.4.4 Kustannukset	54
6 HARTSIVAIHTOEHDOT	55
6.1 Harts 1	56
6.2 Harts 2	57
6.3 Harts 3	58
6.4 Harts 4	59
6.5 Harts 5	59
6.6 Harts 6	60
6.7 Muutokset prosessiin	60
6.7.1 Kyllästettävien kappaleiden esilämmitys	60
6.7.2 Uunituslämpötilan nostaminen	61
6.7.3 Hartsin lämmityslaitteisto.....	62
6.7.4 Puhallin kaston jälkeen.....	62
6.8 Yhteenveto hartsivaihtoehtoista	63
7 TESTAUS.....	63
8 TULOKSET	69
LÄHTEET	71
LIITTEET	

1 JOHDANTO

Päättötyön tarkoituksena on selvittää, minkälaisia ominaisuuksia hartsilta vaaditaan käämikomponenttien pinnoituksessa elektroniikkateollisuudessa, ja kartoittaa markkinoilla olevia liuotinvapaita hartsiainevaihtoehtoja Kemppi Oy:n käyttötarkoituksiin. Tutkintotyössä on myös käyty läpi nykyistä hartsausprosessia ja sen ongelmia.

Nykyiset tiukentuneet vaatimukset ympäristön suojelemiseksi ovat merkittävä asia monelle yritykselle, ja halu panostaa ympäristömyönteisimpiin tuotantomenetelmiin on kasvanut. Elektroniikkateollisuudessa käytetään erilaisia polymeeripohjaisia pinnoitteita parantamaan sähköisten komponenttien suojaa ympäristötekijöitä vastaan. Tässä työssä perehdytään tarkemmin tyydyttymättömiin polyesteri- ja epoksihartseihin, joita käytetään käämikomponenttien kyllästykseen. Hartsaamisella tarkoitetaan muuntajien ja kuristimien kyllästämistä polymeeripohjaisilla hartseilla. Hitsauskoneiden käämikomponentit, lähinnä muuntajat ja kuristimet, lämpenevät käytössä korkeisiin lämpötiloihin ja hitsauskoneita käytetään vaativissa olosuhteissa. On erityisen tärkeää, että pinnoite kestää vaihtelevat olosuhteet ja takaa mahdollisimman pitkän käyttöiän hitsauskoneille.

Kemppi Oy on vuonna 1949 perustettu yksityisessä omistuksessa oleva hitsauskoneita valmistava yritys. Hitsauskoneista menee 90 % vientiin.

2 KYLLÄSTYSHARTSIN VAATIMUKSET ELEKTRONIKKATEOLLISUUDELLE /5, s. 1, 4-5/

Erilaisia kyllästyshartseja on käytetty suojapinnoitteina erilaisissa sähköisissä komponenteissa yli 40 vuoden ajan. Kyllästyshartsien päätehtävät elektroniikkateollisuudessa kappaleiden päällystyksessä ovat suojautuminen ympäristötekijöiltä, pääasiassa kosteuden suoja sekä sähköiset eristysominaisuudet. Kyllästyshartsin tehtävänä on suojata elektronista kappaletta

kosteudelta, kemikaaleilta ja epäpuhtauksilta, jotka saattavat aiheuttaa sähköisiä vikoja sekä korroosiota.

Riippuen sovellutuksesta hartsin täytyy täyttää tiettyjä vaatimuksia. Kosteuden ja suolaveden kestävyys on tärkeää useissa eri komponenteissa erityisesti, jos tuotteita käytetään ulkoilmassa. Yksi tärkeimmistä kyllästyshartsien ominaisuuksista on sen tarttuminen erilaisiin pintoihin sekä pysyminen tuotteessa sen eliniän ajan. Kyllästyshartsin tarttuvuus riippuu paljon siitä, minkälaisissa olosuhteissa pinnoitus tehdään sekä kyllästettävästä materiaalista.

Kyllästyshartsien muita vaatimuksia sähköteollisuudessa ovat

- alhainen veden absorptio
- pinnoite ei saa irrota tai hilseillä
- korkea puhtaus. (ei kloridi-, natrium-, kalium- tai ammoniumioneja)
- kyky vastustaa mikro-organismeja, sienikasvustoa ja muita bio-organismeja.
- alhainen lämpölaajenemiskerroin
- suojaa metalleja korroosiolta
- erinomaiset sähköiset ominaisuudet: eristysresistanssi, eristyskerroin, häviökerroin, läpilyöntijännite ja niiden säilyvyys vanhetessa, kosteudessa ja laajalla taajuus alueella
- alhaiset kustannukset
- alhainen materiaalihävikki prosessissa
- hartsin pitkä elinikä altaissa
- alhaiset VOC-päästöt
- syttymätön ja vaaraton.

2.1 Ympäristötekijöiltä suojaaminen

Sähkötekniset komponentit, jotka altistuvat kosteudelle ja suurille lämmönvaihteluille on syytä pinnoittaa niiden eliniän parantamiseksi. Osa muuntajista ja kuristimista on pääasiassa valmistettu raudasta, jolla on taipumus ruostua kosteuden läsnä ollessa.

2.1.1 Kosteussuoja /5, s. 5/

Tärkein tehtävä kyllästyshartsilla käämikomponenteissa on suojata kosteuden aiheuttama korroosiota metalleissa. Polymeeripohjaiset hartsit eivät täysin suojaa kosteudelta vaan läpäisevät pieniä määriä kosteutta. Kosteuden suojaus riippuu polymeerien molekulaarisesta rakenteesta, uunitusajasta sekä epäpuhtauksista päällystettävässä komponentissa. Kappaleiden päällystäminen polymeereillä ei tuo koskaan täysin ilmatiivistä eristystä, vaan ne läpäisevät aina hieman kosteutta. Useimmissa tapauksissa saavutetaan kuitenkin riittävä suojaus kosteutta vastaan. Ainostaan kaikkein vaativimmissa ympäristöissä, kuten sota-, avaruus- ja lääketieteellisyydessä tarvitaan täysin ilmatiiviitä virtapiirejä.

Valittaessa optimaalista pinnoitetta suojaamaan käämikomponenttia kosteudelta, ioneilta ja kaasuilta täytyy tietää pinnoitteen vedenläpäisevyys. Alhainen veden läpäisevyys ja absorptio ovat tärkeimmät parametrit kyllästyshartsia valittaessa. Ei siis voida väittää, että epoksipohjaiset olisivat parempia kuin silikonipohjaiset pinnoitteet, koska niitä voidaan valmistaa tuhansilla erilaisilla koostumuksilla ja lisäaineilla. Pienet muutokset koostumuksessa (täyteaine, täyteaineen määrä, ristikidosten määrä ja polaaristen molekyylien määrä) voivat muuttaa merkittävästi pinnoitteen ominaisuuksia. Esimerkiksi epoksit voivat absorboida vettä 0,1 % aina 5 % asti riippuen sen kemiallisesta rakenteesta.

Kosteuden imeytyminen ilmoitetaan kuinka paljon kosteutta on imeytynyt tietyssä ajassa ja lämpötilassa kappaleeseen. Tarkasti punnittu hartsilla pinnoitettu kappale upotetaan veteen tietyksi ajaksi ja punnitaan tietyn ajan jälkeen. Kyllästyshartsien valmistajat ilmoittavat yleisesti johonkin standardiin (ASTM D570-98)

pohjautuvilla mittauksilla veden absorption kyllästyshartsiin. Näin eri valmistajien hartsit ovat periaatteessa vertailukelpoisia keskenään. Pahimmassa tapauksessa kosteus voi läpäistä pinnoitteen mikrohalkeamien kautta ja aiheuttaa ajan kuluessa korroosiota hartsatuissa kappaleessa.

2.1.2 Korroosio /5, s. 11-14/

Kyllästyshartseja käytetään yleisesti suojaamaan metallipintoja kemialliselta ja galvaaniselta korroosiolta. Korkea lämpötila tehostaa korroosiota. Yleisimpiä korroosion aiheuttajia löytyy taulukosta 1.

Taulukko 1 Korroosiota aiheuttavia ympäristötekijöitä

Ympäristö	Syövyttävä ainesosa
Ilmankosteus	kosteus, happi, rikkidioksidi, hiilidioksidi
Vesi	Kalsiumsuolat ja muut metallien suolat, ionit
Suolavesi	Natrium- ja kloridi-ionit, merieliöt
Kemikaalit ja liuottimet	Monet hapot, emäkset, hapettimet ja pelkistimet, liuottimet
Maaperä	Kosteus, sienet, muut mikro-organismit

Metallit syöpyvät erilalla riippuen metallin luonteesta ja minkälaisessa ympäristössä niitä altistetaan. Korroosio tapahtuu joko kemiallisessa tai elektrokemiallisessa mekanismissa kosteuden läsnä ollessa. Ilman kanssa reagoivissa epäorgaaniset metallioksidikalvot saattavat muodostua metallin pinnalle, kunnes metalli on heikentynyt tai syöpynyt piloille (esim. rauta) tai metalli voi muodostaa suojaavan oksidikerroksen metallin pinnalle (esim. alumiini). Paksumpi kerros pinnoitetta vähentää pinnoitettavan kappaleen kykyä altistua korroosiolle ja lisätä kulumiskestävyyttä.

Galvaaninen korroosio tai elektrokemiallinen korroosio aiheutuu, kun eri metallit ovat kosketuksissa toisiinsa joko fyysisesti tai sähköisesti. Nopeampaa korroosiota tapahtuu aktiivisemmassa metallissa (anodi) ja vähäisempää korroosiota vähemmän aktiivisessa metallissa. Galvaanisen korroosion määrä voidaan ennustaa sähkökemiallisesta jännitesarjasta. Mitä suurempi on

potentiaaliero kahdella metallilla, sitä suurempi on näillä metalleilla taipumus korroosioon. Jos käytetään kahta erilaista metallia kosketuksissa toisiinsa, on niiden välillä syytä käyttää eristettä, ettei galvaanista korroosiota pääse syntymään. Taulukossa 2 on esitetty erilaisia korroosiotyyppejä metalleille, joita käytetään muuntajissa ja kuristimissa.

Taulukko 2 Yleisimpiä korroosiotyyppejä eri metalleille

Metalli/metalliseos	Korroosion tyyppi
Kupari	kosteassa ilmassa kuparin pintaan muodostuu vihreää kuparikarbonaattia (kupariruoste, patina) joka suojaa kuparia.
Kupari-nikkeliseos	rikkipitoisessa tai kosteassa ympäristössä kupariseos saattaa tummua
Alumiini	muodostuu valkoista hapettumista pintaan, ei viittaa rakenne vaurioon
Alumiiniseokset	galvaanista korroosiota eripari metalliliitoksissa

2.1.3 Kovuus

Kovuus määritellään usein pinnoitteen kykyä vastustaa muodonmuutosta. Pinnoitteen kovuus vaikuttaa merkittävästi pinnoitetun kappaleen kulutuskestävyyteen. Pehmeä pinnoite on herkempi hankautumiselle, naarmuille ja muille mekaanisille kulutuksille kuin kova pinnoite. Yleisimpiä menetelmiä pinnoitteen kovuuden mittaamiselle ovat *Sward*-kovuuskoe, *Shore*- ja *Pencil* kovuuskokeet. *Sward*-kovuuskoe perustuu tärykoneen värähtelyyn. Värähtelytaajuus on sitä pienempi mitä pehmeämpi on pinnoitteen pinta. Tärykone vertailee pinnoitteen kovuutta standardipinnoitteen kovuuteen. Arvoa verrataan kiillotettuun lasiin, jonka arvo on 100. Koska *sward hardness test* rikkoo mitattavan kappaleen pinnan, sitä ei voida käyttää oikeissa olosuhteissa vaan se on tehtävä testikappaleilla.

Pinnoitteen kovuus riippuu uunitusajasta. Hartsu kovettuu uunissa tietyssä ajassa ja sen jälkeen sen kovuus ei enää muutu. *Sward*-kovuuskokeella pystytään

optimoimaan uunitusajat sopiviksi, koska pinnoitteen kovettuessa ei ole enää hyötyä uunittaa kappaleita. Näin voidaan myös säästää energiaa. /5, s. 18/

Shore kovuuskoetta käytetään erityisesti muovien ja elastomeerien kovuuden mittauksiin. Shore A -mittausta käytetään pehmeiden pintojen mittaukseen ja Shore D -mittausta kovien pinnoitteiden mittaamiseen. Mittaus perustuu timanttikärkisen iskuriin, joka tiputetaan tietyltä korkeudelta mittavaan pintaan. Shore-kovuus määritellään siitä, kuinka korkealle iskuri kimpoaa mitattavasta pinnasta. Mitä korkeammalle iskuri kimpoaa, sitä kovempi on pinnoite. Shore-mittari antaa kovuuden empiirisen mittauksen perusteella, mutta se ei kerro pinnoitteen muista ominaisuuksista. Shore-kovuus ilmoitetaan asteikolla 0 – 100. Mitä suurempi arvo, sitä kovempi pinta on pinnoitteella. /12/

2.1.4 Kemikaalikestävyys /5, s. 21/

Sähköiset kappaleet joutuvat usein alttiiksi erilaisille puhdistusaineille, orgaanisille liuottimille, kemikaaleille, rasvoille ja öljyille kun ne on kyllästetty. On tärkeää valita oikeanlainen pinnoitemateriaali. Akryylipinnoitteet saattavat liueta orgaanisten liuotteiden läsnä ollessa. Silikonipinnoitteet eivät kestä halogenoituja liuottimia. Epoksi- ja polyesteripinnoitteilla on tunnetusti hyvä kemikaalien ja liuottimien kestävyys.

2.2 Polymeerieristeiden sähköiset ominaisuudet

Sähkötekniikan kehitys liittyy läheisesti eristeaineiden kehitykseen ja siksi sähkötekninen teollisuus käyttää nykyisin noin 10 % koko muovituotannosta. Muovit eivät johda sähköä, joten niitä käytetään eristeinä sähkökomponenteissa. /8, s. 79/

Kyllästyshartsia ei lasketa eristeeksi käämikomponenteissa vaan sen tehtävänä on suojata komponenttia. Pinnoitteelta vaaditaan tietynlaisia sähköisiä ominaisuuksia. Niistä kerrotaan tässä kappaleessa tarkemmin. Liitteessä 1 on yleisimpien standardien lyhyt kuvaus.

2.2.1 Ominaisvastus ja pintavastus

Muovien korkea ominaisvastus (10^9 - 10^{18} $\Omega\cdot\text{cm}$) johtuu siitä, ettei niissä ole vapaita elektroneja tai muita varauksenkantajia. Eristemuoveilla ominaisvastus on yleisesti tämän asteikon yläpäässä.

Pintavastus ilmaisee muovikappaleen pinnan sähköneristyskyvyn.

Sähköneristyskykyyn vaikuttavat kappaleen valmistusolosuhteet sekä ulkoiset tekijät, kuten kosteuden ja kemikaalien vaikutus kappaleen pintaan.

Pintavastusmittauksessa sähkövirta kulkee myös kappaleen sisällä ja kappaleen sisäinen kosteus vaikuttaa mittaustulokseen. Pintavastusta mitataan asettamalla muovilevy kahden elektronin väliin ja mittaamalla siitä eristevastus 100 tai 1000 voltin tasajännitteellä.

Pintavastuksen ollessa yli 10^{12} Ω muoveilla on taipumus latautua staattisella sähköllä, mikä johtaa pölyn kerääntymiseen kappaleen pinnalle. Potentiaaliero pinnan erikohtien välillä voi aiheuttaa ylilyönnin, joka voi taas sytyttää pölyn. Pintavastusta voidaan alentaa ns. antistaattisilla aineilla, jotka sitovat kappaleen pinnalle kosteutta. /7, s. 80-82/

On tärkeää tietää, minkälaisia sähköisiä ominaisuuksia pinnoitettavalla kappaleella on, kun valitaan hartsia. Eristysresistanssia ei kannata pitää samanarvoisena läpilyöntijännitteen kanssa. Puhtaalla kuivalla pinnoitteella voi olla erittäin hyvä eristysresistanssi, mutta heikko läpilyöntikestävyys johtuen pinnoitteen huokoisuudesta. Pinnoitteen pintavastus on riippuvainen kovettumisajasta tai polymerointiasteesta. Pintavastus kasvaa siihen asti, kunnes

hartsit on täysin kovettuneet ja pintavastusmittausta voidaan käyttää määriteltäessä optimaalista uunitusaikaa hartseille.

Lämmön riippuvuus ominaisvastuksesta on tärkeä asia huomioida. Kappaleella voi olla huoneenlämmössä riittävä ominaisvastus, mutta korkeissa lämpötiloissa (esimerkiksi muuntajat ja kuristimet lämpenevät käytössä) ominaisvastus voi olla täysin eri. Ominais- ja pintavastukseen vaikuttavat myös taajuus, jännite, paine ja valo (jotkin polymeerit ovat fotojohtavia). /5, s. 33-34/

2.2.2 Dielektrinen häviökerroin

Sähkökentän vaikutuksesta eristeaineissa eli dielektrisissä aineissa tapahtuu dielektrinen polarisaatio. Sähkökenttä pyrkii siirtämään varauksia joko kentän suuntaiseksi tai vastaiseksi. Vaihtovirtakentässä dipolit pyrkivät liikkumaan sähkökentän vaihtelujen mukaisesti, tämä aiheuttaa eristeaineen lämpenemistä. Osa sähköenergiasta kuluu lämmönmuodostukseen, varsinkin suurjännite- ja suurtaajuuslaitteissa. Tämän kaltaista energian menetystä pyritään välttämään.

Eristeissä lämmöksi muuttuneen dielektrisen häviön suuruus on:

$$N = E^2 \times 2\pi f \times C_0 \times \epsilon_r \times \tan \delta_d \quad (1)$$

jossa N = dielektrinen häviö
 E = sähkökentän voimakkuus
 f = taajuus
 C_0 = kapasitanssi ilmassa
 ϵ_r = suhteellinen permeabiliteetti
 $\tan \delta$ = häviökerroin

Dielektristä häviötä kuvataan $\epsilon_r \times \tan \delta_d$:llä eli häviöluvulla. Häviöluku kuvaa eristeen lämpiämistä. Eristeen suhteellinen permittiivisyys eli dielektrisyysvakio on niiden kapasitanssien suhde, jotka kondensaattoreilla on, kun eristeenä

käytetään muovia tai ilmaa. Häviökerroin kertoo, kuinka paljon tästä energiasta muuttuu lämmöksi. /6, s. 88/

2.2.3 Läpilyöntikestävyys ja dielektrinen lujuus

Dielektrinen lujuus kuvaa sitä, kuinka paljon pinnoite kykenee sietämään jännitettä ennen kuin läpilyönti tapahtuu. Yksikkönä käytetään usein [V/mm] eli voltteja per pinnoitteen paksuus. Jotkut puhuvat mieluummin kynnysjännitteestä, jolloin läpilyönti tapahtuu(=läpilyöntikestävyys). Molemmat termit tarkoittavat samaa asiaa.

Jopa parhaat eristeet sisältävät aina pieniä määriä vapaita ioneja ja elektroneja, mutta tämänkaltaisissa tapauksissa läpilyöntiin tarvitaan erittäin korkeita jännitteitä. Pinnoitteessa tai eristeessä olevat epäpuhtaudet, halkeamat ja kolot alentavat kappaleen läpilyöntijännitettä. Elektronisissa piirikorteissa ja käämikomponenteissa käytetään orgaanisia pinnoitteita johtuen niiden korkeasta dielektrisestä lujuudesta verrattuna epäorgaanisiin tai keraamisiin pinnoitteisiin. Ohuemmalla eristekerroksella on parempi läpilyöntikestävyys kuin paksummalla, koska silloin on suuremmat mahdollisuudet huokoisten sähköä johtavien kanavien muodostumiselle.

Yleisesti polymeeripinnoitteiden dielektrinen lujuus vähenee pinnoitteen epäpuhtauksien ja pintavaurioiden lisääntyessä. Polymeeripinnoitteille on luonteenomaista, että dielektrinen lujuus pysyy vakaana alhaisissa lämpötiloissa, mutta saavuttaessaan kriittisen lämpötilarajan alenee voimakkaasti ja vakiintuu sen jälkeen. Esimerkiksi muuntajat lämpenevät käytössä ja on tärkeää, että pinnoite säilyttää ominaisuutensa myös korkeissa lämpötiloissa. /5, s. 50-53/

2.2.4 Ryömyvirrankestävyys

Ryömyvirrankesto tai valokaarenkestokyky on aika sekunteina, jonka pinnoite kestää valokaarta ennen kuin sähköinen läpilyönti tapahtuu. Usein valokaarimittaukset perustuvat ASTM D495- tai IEC 60112 -standardeihin. Mittaus suoritetaan elektrodeilla, joiden väliin laitetaan mitattava kappale. Valokaari synnytetään näiden elektrodien välille tietyn ajanjaksojen mukaan ja tietyllä virran arvoilla, kunnes läpilyönti tapahtuu.

Läpilyönti voi tapahtua kolmella eri tavalla valokaaren synnyttyä:

- Läpilyönti tapahtuu elektrodien välille.
- Kuumenemisestä aiheutuva pinnoitteen hiiltymisen, jonka seurauksena pinnoitteeseen muodostuu sähköä johtavia kanavia.
- Pinnoite syttyy palamaan.

Pinnoitteiden ryömyvirrankestävyys vaihtelee laajasti riippuen niiden molekylaarisesta rakenteesta, lisäaineista, kuten täyteaineista ja katalyyteistä sekä pinnan fyysisistä ja kemiallisista olosuhteista. Tutkimuksissa on ilmennyt, että tietynlaisilla lisäaineilla voidaan helposti saavuttaa kaksin- tai kolminkertainen ryömyvirrankestävyys pinnoitteisiin. Ryömyvirrankestävyyttä voidaan parantaa pitämällä pinnoitteet kuivina ja puhtaina. Jopa sormenjäljet heikentävät ryömyvirrankestävyyttä johtuen, että niistä siirtyy pinnoitetulle pinnalle kosteutta, suoloja ja rasvaa. Ryömyvirrankestävyyksmittauksia voidaan käyttää pinnoitteen laadun tarkkailuun, koska pinnoitteiden ominaisuudet muuttuvat ajan, säteilyn, kosteuden ja lämpötilojen mukaan. /5, s. 54-55/

Ryömyvirrankesto määritetään ryömyvirtaluvulla CTI (comparative trackin index). Ryömyvirtalukumittaukset perustuvat IEC 60112 -standardiin. /6, s. 89/

2.3 Termiset ominaisuudet

Käämikomponentit, erityisesti muuntajat ja kuristimet, lämpenevät käytössä. Pinnoitteen on tärkeää siirtää lämpöä pois kappaleesta, jolloin käämikomponentit toimivat viileämmin.

Tärkeä ominaisuus polymeeripinnoitteissa on lämmönjohtavuus. Polymeeripinnoitteilla on erittäin alhainen lämmönjohtokyky verrattuna metalleihin. Tämän vuoksi niitä käytetään lämmöneristeinä. Yleisesti pinnoitukseen käytettävien polymeerien lämmönjohtokyky on luokkaa 0,125 – 0,335 W/mK. Metalleilla lämmönjohtavuus on jopa 100- tai 1000-kertainen. Polymeeripinnoitteiden ominaisuuksia voidaan säädellä lisäaineilla. Lämmönjohtavuus on kääntäen verrannollinen pinnoitteen paksuuteen. Mitä paksumpi pinnoite, sitä paremmin se siirtää lämpöä pois kappaleesta. Käytännössä lämmönjohtavuutta parantavia lisäaineita lisättäessä hartsin muut ominaisuudet heikkenevät: siitä tulee tiksotrooppinen, viskositeetti kasvaa ja hartsin käyttö vaikeutuu. Polymeeripinnoitteen lämmönjohtavuuden parantaminen lisäaineilla heikentää merkittävästi pinnoitteen ominaisvastusta. /5, s. 55-56/

Muovimateriaalien lämmönjohtavuus saadaan systeemin aineosien johtavuuksien ja muiden lämmönsiirtotapojen summana. Täyteaineilla, kuten kvartsi- tai metallijauheilla, saadaan lisättyä muovien lämmönjohtokykyä, kun taas kaasumaiset ainekset, kuten ilma ja hiilidioksidi, pienentävät sitä. Kosteus lisää lämmönjohtavuutta huokoisessa aineessa. /7, s. 86/

2.4 Impregnointilaitteistot

Elektroniset komponentit ovat erimuotoisia ja kokoisia, tästä johtuen on olemassa monia erilaisia pinnoitusmenetelmiä. Komponenttien koot vaihtelevat erittäin pienistä puolijohteista suuriin moottoreihin. Yleisimmät menetelmät muuntajia ja kuristimia kyllästettäessä on kastopinnoitus ja tyhjiöhartsaus. Erilaisia pinnoitusmenetelmiä on vertailtu taulukossa 3.

Taulukko 3 Erilaisia hartsausmenetelmiä

Menetelmä	Hyödyt	Rajoitukset	Käyttö
Sumutus	nopea, helppo, halpa	hävikki, vaikea saavuttaa hyvä peitto monimutkaisille kappaleille, pinnoitteen paksuus, liuotinpäästöt	piirilevyissä, sähköiset moduulit, komponentit, suojakotelot, auton alustat
Upotus/Kasto	hyvä peitto monimutkaisille kappaleille, halpa	altaiden viskositeetin ja lämmön hallinta välttämätön, hartsin epästabiilisuus, liuotinpäästöt	muuntajat, kuristimet, johtimet
Rotaatio	toistettava, erittäin ohuet pinnoitukset, tasainen pinnoitteen paksuus	pinnoitettavien kappaleiden koko ja muoto rajallinen, hävikki	puolijohteet, ohutkerrospinnoitukset, monikerrospinnoitteet, näyttöjen pinnoitus
Leijukerros-pinnoitus	paksu kerros yhdellä upotuksella, tasapaksuinen pinnoite,	kappaleiden esilämmitys jauhemaisen pinnoitteen sulamislämpöön	moottoreiden staattorit, vaativat eristys olosuhteet, metallien pinnoitus
Höyrytys	erittäin ohut huokosvapaa pinnoite, erinomainen pinnoitus monimutkaisille kappaleille	vaatii erityislaitteiston, muokkaaminen vaikeaa	piirilevyt, saavutetaan hyvä kosteussuoja ja eristysominaisuudet
Ekstruusio	alhainen materiaalihävikki i verrattuna rotaatiopinnoitukseen	vaatii erityislaitteiston, pinnoitettava kappale oltava tasainen	ohutkalvomikropiirit, näytöt, multisirumoduulit, puolijohteet
Tyhjiökyllästys	erittäin hyvä pinnoitus monimutkaisille kappaleille, täyttää pienet kolot hyvin	Vaatii tyhjiöhartsaus laitteiston	muuntajat, käämit, huokoiset materiaalit, metallin pinnoitus

2.4.1 Kastopinnoitus

Kastopinnoitus on tehokas ja halpa menetelmä pinnoitettaessa käänikkomponentteja. Komponentit kastetaan hartsialtaaseen, minkä jälkeen ne siirretään uuniin kovettumaan. Laitteistot ovat yleensä täysin automatisoituja. Kastopinnoituksella saavutetaan parempi hartsin tunkeutuminen ja peitto verrattuna sumutuspinnoitukseen. Elektroniikkateollisuudessa käytetään usein kastopinnoitusta elektroniikkakorttien ja muuntajien pinnoitukseen. Muuntajien pinnoitus vaatii hartsilta hyvää tunkeutuvuutta ja lämmönkestoa. Kastopinnoituksessa käytetään usein yksikomponenttisiä hartseja, joiden kovettumisreaktio käynnistyy lämmöllä. Kastoallasprosessi vaatii hartsin viskositeetin ja lämmön tarkkaa seuraamista ja ylläpitoa, jotta saavutetaan haluttu tulos. Viskositeetin muutos vaikuttaa pinnoitteen paksuuteen ja tunkeutuvuuteen. Pinnoitettavat kappaleet on laskettava ja nostettava altaista hitaasti, jotta saavutettaisiin tasapaksu pinnoite. Kastopinnoituksessa pinnoitettavan kappaleen alaosaan tulee paksumpi kerros pinnoitetta kuin yläosaan. Hartsilla on tapana muodostaa pinnoitettavaan kappaleeseen pisaroita, jotka uunissa kovettuvat kyllästettävän kappaleen alaosiin. Kastoallasprosessissa on oltava tehokas ilmanvaihto, jotta liuotinhöyryt eivät pääse tehdasalueelle.

Pinnoitettavien kappaleiden esilämmityksellä ennen kastoaa saavutetaan tiiviimpi ja siten kestävämpi pinnoite kulutusta ja kosteutta vastaan.

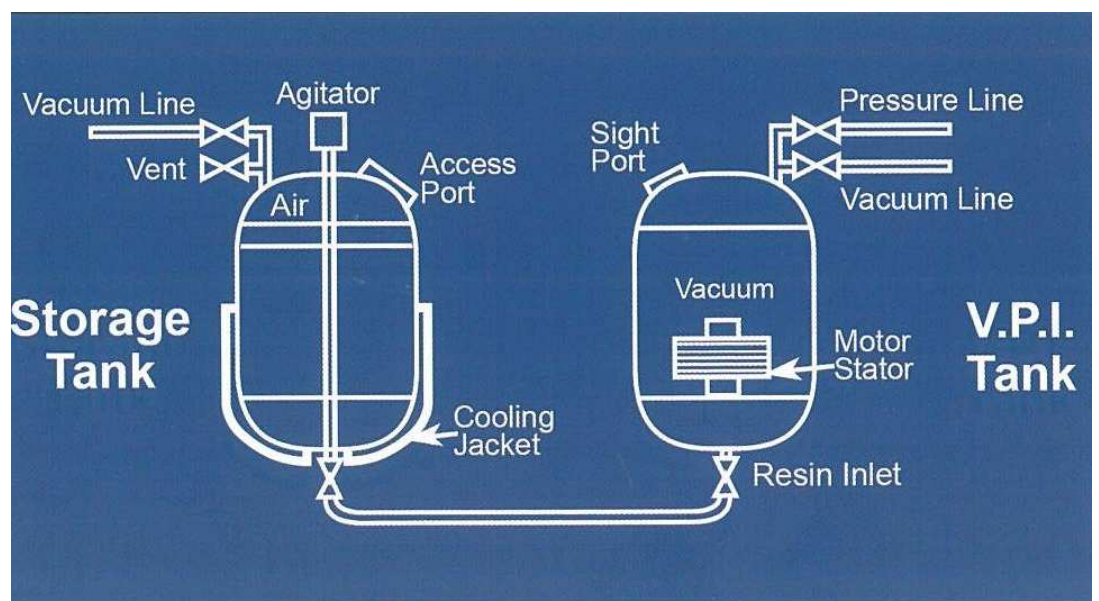
Kastoaltaissa täytyy olla jäähdytysjärjestelmä ylläpitämään hartsin lämpötilaa halutulla tasolla. Kastoaltaissa oleva hartsi täytyy uusia määräajoin tai vaihtoehtoisesti hartsin vaihtuvuus oltava tarpeeksi suuri, jotta vältettäisiin hartsin ominaisuuksien heikkeneminen likaantumisen takia. Kastoallasprosessissa voidaan pinnoitteen paksuutta lisätä useammalla kastokerralla.

Kastoallasprosessissa on monia muuttujia, jotka täytyy hallita onnistuneen pinnoituksen saavuttamiseksi. Nämä muuttujat ovat hartsin viskositeetti ja lämpötila, upotusnopeus, kappaleen lämpötila, ilmankosteus ja lämpötila. Kun nämä parametrit ovat hallinnassa, kastoallasprosessilla saavutetaan taloudellinen, laajamittainen ja täysin automatisoitu hartsausprosessi. /5, s. 235-238/

2.4.2 Tyhjiöhartsaus

Tyhjiöhartsaus on eräänlainen muunnos kastopinnoituksesta. Pinnoitettavat kappaleet kyllästetään vakuuissa olosuhteissa. Tyhjiöhartsausta käytetään usein sellaisten kappaleiden kyllästykseen, jossa tarvitaan erittäin hyvää tunkeutuvuutta pieniin rakosiin. Tällaisia ovat erilaiset käämikomponentit, kuten muuntajat, kuristimet, käämit sekä huokoiset metallit. Tyhjiöhartsauksessa pinnoitettavat kappaleet kyllästetään tyhjiössä, näin vältetään ilmataskujen jääminen kappaleisiin. Tyhjiöhartsauksella saavutetaan yliveritaiset ominaisuudet verrattuna perinteiseen kastoallasprosessiin. /5, s. 240/

Tyhjiöhartsauksessa kappaleet esilämmitetään ensin kosteuden poistamiseksi ja hartsin viskositeetin alentamiseksi. Kyllästettävä kappale laitetaan tyhjiökammioon ja imetään ilma pois. Hartsia päästetään tyhjiöön ja kyllästettävä kappale peittyy hartsilla. Tämä vaihe kestää tavallisesti 30–60 minuuttia riippuen kyllästettävistä kappaleista. Kyllästysvaiheen jälkeen kammio paineistetaan ilmalla, ja lopuksi kyllästettävät kappaleet valutetaan kammion päällä, jotta valuva hartsia saadaan talteen. Tyhjiöhartsauksen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 1. /2/



Kuva 1 Tyhjiöhartsauksen toimintaperiaate /2/

3 MUOVIENTYÖN POLYMEERIKEMIA

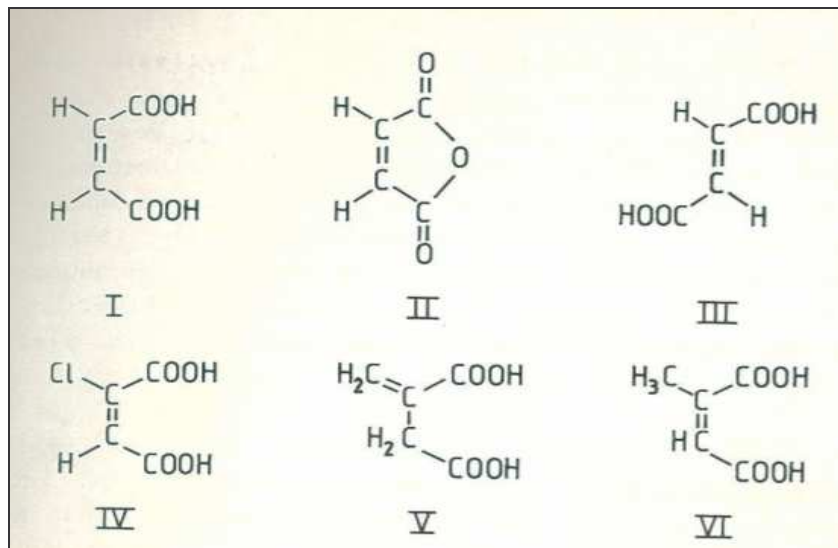
Sähkötarviketeollisuudessa, kuten käännekomponenttien pinnoituksessa, käytetään usein H- ja B-luokan eristeluokitusta. H-luokan eristeen täytyy kestää hetkellistä 200 °C:n ja jatkuvaa 180 °C:n lämpötilaa. B-luokan eristeen on kestävä jatkuvaa 130 °C:n ja hetkellistä 155 °C:n lämpötilaa. H-luokan hartsit ovat yleisesti tyydyttymättömiä polyesteri- tai epoksihartseja. Tässä kappaleessa perehdytään tarkemmin näiden kemialliseen rakenteeseen. Epoksi- ja polyesteripohjaiset hartsit eroavat toisistaan kemiallisen rakenteen ja valmistusmenetelmien osalta. Epoksihartsit eivät sisällä liuottimia ja ns. VOC-vapaita hartseja. Nykyään käytetään yhä enemmän liuotinvapaita tyydyttymättömiä polyesteri- ja epoksihartseja kasvavien ympäristövaatimusten takia.

Muovit jaetaan niiden ominaisuuksien mukaan kesto- ja kertamuoveihin. Kestomuovissa molekyylit muodostavat pitkiä polymeeriketjuja, joiden välillä ei ole kemiallisia sidoksia. Kestomuoveja lämmittäessä molekyylejä yhdessä pitävät voimat heikkenevät, ja näin niitä voidaan muokata lämmön ja paineen avulla eli ne ovat termoplastisia. Polyeteeni on käytetyin kesto- muovina. Polyeteeniä käytetään esimerkiksi leluissa, auton lokasuojissa ja putkissa. /6, s. 39/

Kertamuoveissa polymeeriketjut ovat sidoksissa toisiinsa ja niitä ei voi muokata ilman, että polymeerirakenne hajotetaan. Yleisimpiä kertamuoveja ovat tyydyttymättömät polyesteri- ja epoksihartsit. Tyydyttymättömät polyestereit ovat käytetyin kertamuovina johtuen sen helposta työstettävyydestä ja kemikaalien kestävydestä. Nykyään epoksihartseja käytetään yhä enemmän sähköteollisuudessa pinnoittamiseen, johtuen niiden erinomaisista ominaisuuksista ja halventuneesta hinnasta. Hiilikuituvahvisteista epoksia käytetään paljon urheiluvälineiteollisuudessa niiden kestävästä rakenteesta. /6, s. 74-76/

3.1 Tyydyttymättömät polyesterihartsit

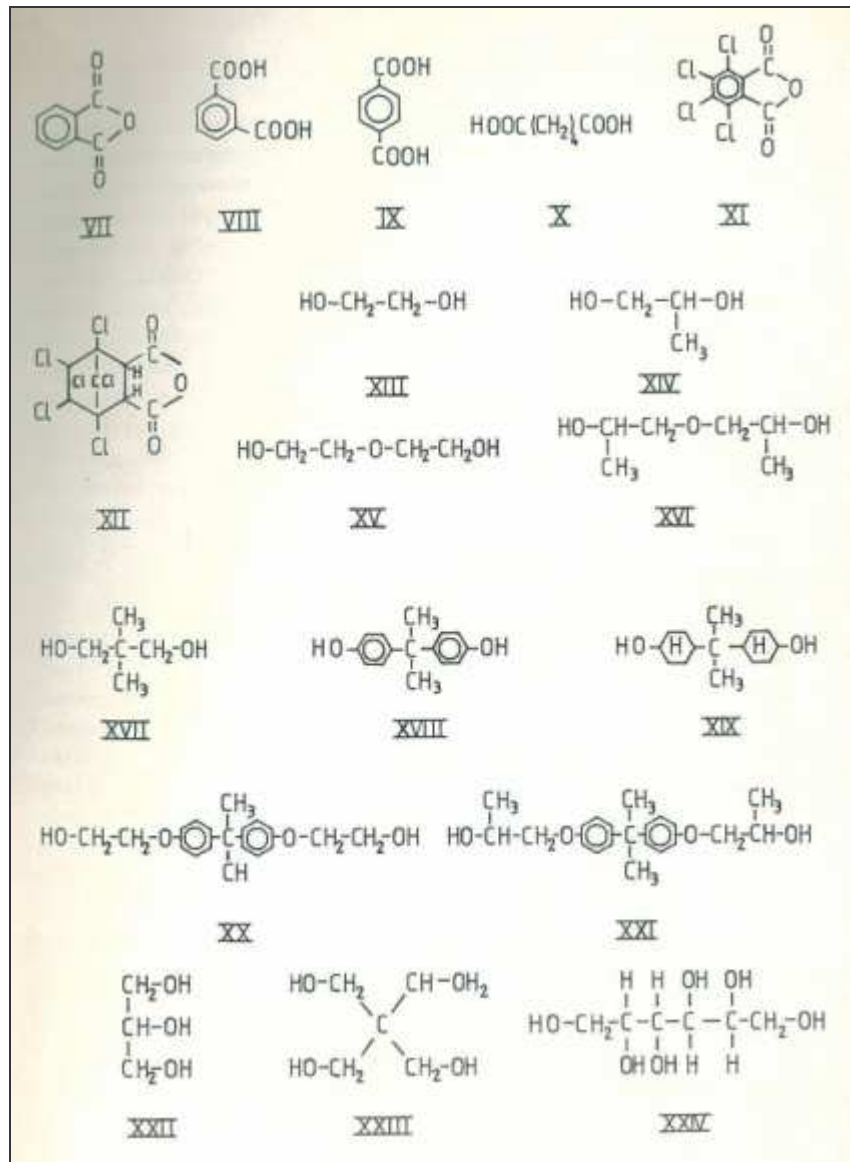
Tyydyttämätön polyesterihartsit koostuu tyydyttymättömästä polyesteristä ja tyydyttymättömästä monomeeristä. Yleisimpiä monomeerejä ovat styreeni ja vinyylitolueeni. Tyydyttymättömiä polyesterihartseja valmistetaan esteröimällä kahdenarvoista alkoholia kaksiarvoisen tyydyttymättömän hapon kanssa, jolloin on usein mukana myös tyydyttynyttä kaksiarvoista happoa. Yleisimmin käytetään kahdenarvoisia alkoholeja eli dioleja, kuten eteeniglykolia, 1,2-propeeniglykolia, 1,3-propeeniglykolia ja hydrattua bisfenoli A:ta. Lopullisen muovituotteen pehmeys vaikuttaa diolin rakeenteen pituus. Mitä pidempi rakenne sitä pehmeämpi on lopputuote. Tyydyttyneistä kaksiarvoisista hapoista yleisimpiä ovat maleiinihappo (happoanhydridi), fumaanihappo ja itakohappo. /4, s. 73-74/ Tyydyttymättömien kahdenarvoisten happojen rakennekaavat ja nimitykset ovat kuvassa 2 ja taulukossa 4.



Kuva 2 Tyydyttymättömiä kaksiarvoisia happoja

Taulukko 4 Kuvan 2 rakennekaavojen nimet

Tyydyttymättömiä kaksiarvoisia happoja	nimitys
I	maleiinihappo
II	maleiinihapon anhydridi muoto
III	fumaarihappo
IV	kloorimaleiinihappo
V	itakohappo
VI	sitrakonihappo



Kuva 3 Tyydyttymättömien polyesterien raaka-aineiden rakennekaavoja

Tyydyttyneistä hapoista ortoftaalihapponanhydridi on yleisimmin käytetty, koska se on halpa, helposti esteröityvä, jäykkyyttä lisäävä sekä monomeerin liukenevuutta parantava lähtöaine. Isoftaalihapolla voidaan valmistaa polyestereitä, joilla on parempi sitkeys ja veden kesto kuin ortoftaalihapponanhydrideilla. Tereftaalihappoa käytetään harvemmin johtuen sen vaikeasta esteröitymisestä ja heikosta liukenemisestä monomeereihin. Tereftaalihapolla saavutetaan parempi säänkesto kuin ortoftaalihapponanhydrideilla. Apidiinihappoa käytetään pehmeiden ja sitkeiden happojen valmistukseen. /1, s. 26-27/

Taulukoissa 5, 6 ja 7 on kuvan 3 rakennekaavojen nimitykset.

Taulukko 5 Tyydyttyneitä kaksiarvoisia happoja kuvasta 3

Tyydyttyneet hapot	nimitys
VII	ortoftaalihappoanhydridi
VIII	isoftaalihappo
IX	tereftaalihappo
X	adipiinihappo

Taulukko 6 Palonestoaineet kuvasta 3

Palonestoaineet	nimitys
XI	tetraklooriftaalihappoanhydridi
XII	HET-happoanhydridi

Taulukko 7 Glykolisten nimitykset kuvasta 3

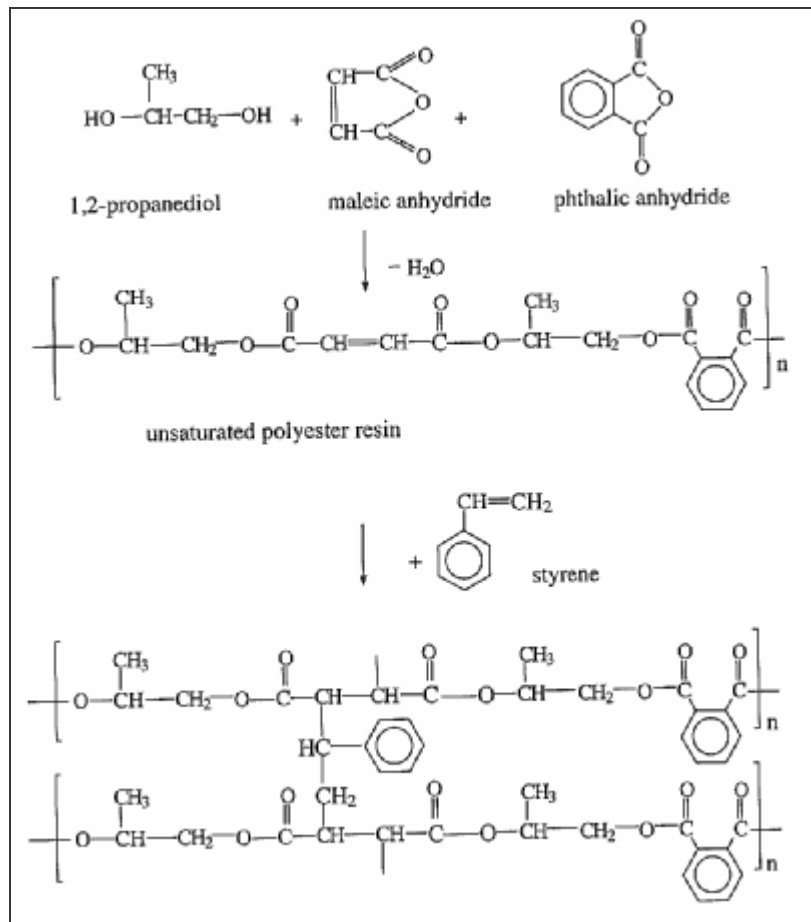
glykolit	nimitys
XIII	eteeniglykoli
XIV	1,2-propeeniglykoli
XV	dieteeniglykoli
XVI	dopropeeniglykoli
XVII	neopentyyliglykoli
XVIII	bisfenoli-A
XIX	hydrattu bisfenoli-A
XX	hydratun bisfenoli-A:n johdannainen
XXI	hydratun bisfenoli-A:n johdannainen

Yksinkertaisin kaksifunktionaalinen alkoholi on eteeniglykoli. Usein sen kanssa käytetään muita glykoleja, koska eteeniglykolilla on taipumus muodostaa kiteitä. Joustavuuden lisäämiseksi käytetään dieteeniglykolia ja dipropeeniglykolia. Neopentyyliglykolia käytetään lisäämään polyesterien kemikaalinkestoja, mutta se heikentää hartsin kovettumista ja styreenin liukoisuutta. Bisfenoli A:sta valmistetuilla hartseilla on hyvä kemikaalinkesto ja korkea pehmenemislämpötila.
/1, s. 28/

Taulukko 8 Moniarvoisten alkoholien nimitykset kuvasta 3

moniarvoiset alkoholit	nimitys
XXII	glyseroli
XXIII	pentaerytritoli
XXIV	mannitoli

Moniarvoisilla alkoholeilla aikaansaadaan haarautuneita polyesteriketjuja, joka lisää kovettuneen hartsin kovuutta ja lämmönkestoa.



Kuva 4 Tyydyttymättömän polyesterin reaktiosarja /9 s. 5/

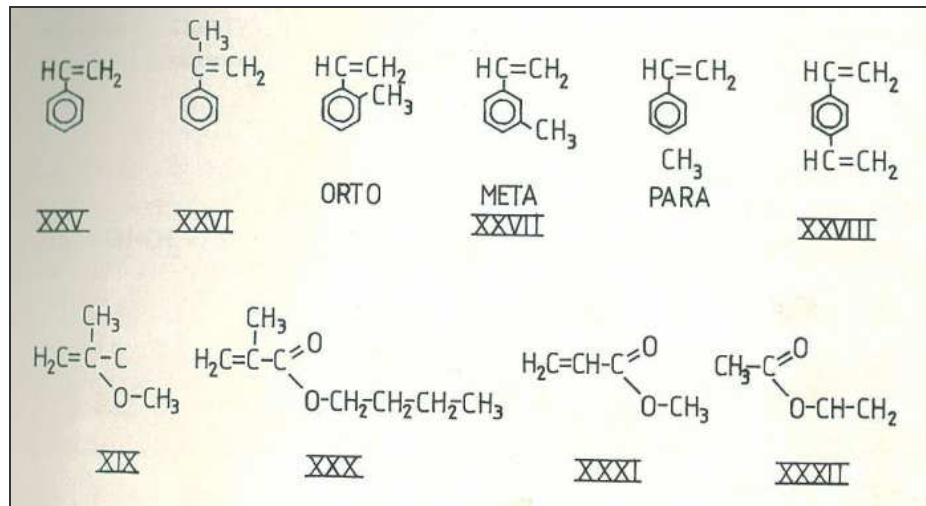
Yleinen polyesterirakenne on maleiinihapon ja eteeniglykolin reaktio, josta muodostuu polyesterin perusosa. Kondensoituminen tapahtuu korkeassa lämpötilassa, jolloin vesi tislautuu pois. Reaktiossa käytetään inerttiä suojakaasua, jolloin pystytään välttämään maleiinihapon kaksoissidosten reagointi hapen kanssa. Maleiinihapon ja eteeniglykolin reaktion lopputuote sisältää reaktiokykyisiä kaksoissidoksia, joten siihen sekoitetaan reaktiivista monomeeriä, esimerkiksi styreeniä. Monomeerin tehtävänä on osallistua kovettumisreaktioon, muodostaen polyesteriketjujen kaksoissidosten kohdalle siltoja. Näin kovettuessa muodostuu verkkomainen rakenne. Reaktio on palautumaton. Monomeeriä lisätään myös hartsin käyttävyuden parantamiseksi, lähinnä viskositeetin alentamiseksi. Korkeista monomeeri- eli liuotinpitoisuuksista johtuen

kovettumisreaktion yhteydessä vapautuu haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC), jotka ovat vahingollisia ilmakehän otsonille. /5, s. 73-74/

Lopullisen kovettuun pinnoitteen ominaisuuksiin vaikuttavat monet eri tekijät, kuten lähtöaineet, monomeerit, lisäaineet, kovettimet, kiihdyttimet, inhibiittorit, kovettuminen, lämpötila ja prosessi. Näillä tekijöillä säädellään tarvittavat ominaisuudet hartseille, ja erilaisia vaihtoehtoja on tuhansia. Onkin tärkeää tiedostaa nämä tekijät valittaessa hartsia. /1, s. 23/

3.1.1 Reaktiiviset monomeerit /1, s. 31-33/

Monomeerin tehtävä on muodostaa ristsidoksia lineaaristen polyesteriketjujen kanssa hartsin kovettuessa ja säädellä hartsin viskositeetti halutulle tasolle. Styreeni on yleisesti käytetty monomeeri, johtuen sen halvasta hinnasta ja alhaisesta viskositeetistä. Styreeni haihtuu erittäin helposti ja se aiheuttaa työhygienisiä ongelmia. Vinyylitolueeni on toinen yleisesti käytetty monomeeri. Vinyylitolueenilla saavutetaan parempi lämmönkesto ja pienempi kutistuma verrattuna styreeniin. Divinylibentseeni on erittäin reaktiivinen, mutta kovettuneesta pinnoitteesta tulee hauras. Muita monomeerejä ovat metakrylaatit ja akrylaatit, kuten metyylimetakrylaatti ja metyyliakrylaatti. Akrylaatteilla on korkeampi molekyyli massa, joten ne eivät haihdu juurikaan uunituksen aikana, joten niitä käytetään liuotinvapaissa hartseissa reaktiivisena monomeerinä. Vinyylisetaatilla on heikot veden- ja säänkesto-ominaisuudet. Kuvassa 5 on eräiden reaktiivisten monomeerien rakennekaavat ja taulukossa 9 niiden nimitykset.



Kuva 5 Reaktiivisia monomeerejä

Taulukko 9 Kuvan 5 reaktiivisten monomerien nimet

reaktiiviset monomeerit	nimitys
XXV	styreeni
XXVI	metyylistyreeni
XXVII	vinyyli-tolueeni
XXVIII	divinyylibentseeni
XIX	metyylimetakrylaatti
XXX	n-butyylimetakrylaatti
XXXI	metyyliakrylaatti
XXXII	vinyyliasetaatti

3.1.2 Lisäaineet /6, s. 33-34/

Monomeeripitoiseen hartsiin lisätään käyttötarkoituksesta riippuen monia lisäaineita, joilla parannetaan hartsin ominaisuuksia. Yleisimpiä lisäaineita ovat kiihdyttimet, inhibiittorit, palonestoaineet, tiksotropointiaineet, UV-stabilisaattorit ja muut lisäaineet. Kiihdyttimiä käytetään nopeuttamaan hartsin hyytymistä ja kovettumista alhaisemmissa lämpötiloissa. Kiihdyttiminä käytetään joko metalliyhdisteiden suoloja tai tertiäärisiä amiineja.

Inhibiittorit reagoivat radikaalien kanssa muodostaen inaktiivisia molekyyliä. Inhibiittorit estävät ennen aikaisen reaktion käynnistymisen. Inhibiittoreilla voidaan säädellä joko hartsin hyytymis- tai kovettumisaikaa tai molempia. Inhibiittoreiden avulla parannetaan huomattavasti hartsin säilyvyyttä varastoitaessa.

Inhibiittoreina käytetään erilaisia fenoleja ja hydrokinoneja. Yleisimpiä ovat tert-butyylikatekoli, di-tert-butyyli-p-kresoni, toluenihydrokinoni ja hydrokinoni.

Hartseihin lisätään palonestoaineita, koska ne ovat orgaanisia yhdisteitä eli ne myös palavat. Hartsin palo-ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa käyttämällä kloorattuja tai bromattuja hiilivetyjä tai palonestoaineita kuten fosforiyhdisteitä.

Tiksotropointiaineita käytetään hartsin valumisen minimointiin. Hartsit ovat yleensä paikoillaan ollessaan geelimäisiä. Kun hartsia sekoitetaan, sen viskositeetti alenee. Näin saavutetaan parempi tunkeutuvuus kyllästettävän kappaleen rakenteisiin ja vältetään hartsin valuminen kaston jälkeen.

3.1.3 Tyydyttymättömien polyesterihartsien kovettuminen /1, s. 34-55/

Tyydyttymättömien polyesterien kovettuminen tapahtuu reaktiivisen monomeerin muodostaessa kaksoissidoksia polyesteriketjujen kanssa eli tapahtuu radikaalipolymerointi. Vapaiden radikaalien muodostajina toimivat erilaiset peroksidit, joiden hajoamisnopeus määrää polyesterin hyytymis- ja kovettumisajan. Polyesterin kovettuminen tapahtuu kolmessa vaiheessa.

Hyytymisajalla tarkoitetaan aikaa jolloin hartsi muuttuu nestemäisestä geeliksi. Hyytymisajat vaihtelevat yleensä noin viidestä kahdeksaankymmeneen minuuttiin riippuen hartsista ja sen ominaisuuksista. Hartsien valmistajat ilmoittavat yleisesti hyytymisajan 100 °C:n lämpötilassa.

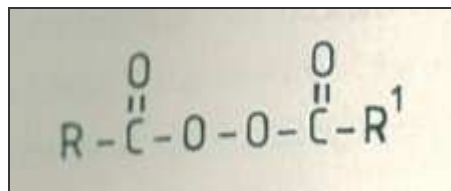
Kovettumisaika, jonka hartsi vaatii saavuttaakseen ominaisuutensa. Hartsin kovettuminen tapahtuu yleisesti noin 1–4 tunnissa riippuen lämpötilasta ja kappaleesta. Kovettumisajat lasketaan siitä, kun kappale on saavuttanut uunituslämpötilan.

Jälkikovetus, jolloin hartsi saavuttaa lopulliset ominaisuutensa. Tyydyttymättömät polyesterihartsit kovettuvat nopeammin korkeammassa uunituslämpötilassa.

Kovettumisreaktio voi tapahtua huoneenlämmössä, jos hartsiin on lisätty kovetinta tai reaktio voidaan käynnistää lämmön avulla. Tällöin hartsi on aktivoitu tehtaalla ennen sen toimittamista asiakkaalle eli se on yksikomponenttinen. Kaksikomponenttihartsissa kovetin lisätään hartsiin joukkoon vasta ennen sen käyttöä. Huoneenlämpötilassa kovettumisreaktion alussa kulutetaan ensin lisätty inhibiittori, mitä ennen ei tapahdu viskositeetin tai lämmön kohoamista. Tämän jälkeen alkaa hartsin lämpötila nousta eksotermisen silloitusreaktion johdosta voimakkaasti. Huoneenlämpötilassa ei saavuteta täydellistä ristisilloitusta vaan yleensä tarvitaan yli 100 °C:n uunituslämpötiloja. Uunituslämpötilat vaihtelevat hartsien ominaisuuksien mukaan, mutta käämiäkomponenttien pinnoittamisessa käytetään yleisesti 140–170 °C:n lämpötiloja. Korkeammalla uunituslämpötilalla voidaan lyhentää uunitusaikoja ja sen kautta nopeuttaa prosessia.

Peroksidien soveltuvuus erilaisiin prosesseihin määräytyy peroksidien hajoamisnopeudesta, puoliintumisaikasta, kriittisestä lämpötilasta ja aktiivihapen määrästä. Kriittinen lämpötila on se lämpötila, jossa alkaa muodostua vapaita radikaaleja. Puoliintumisaika on se aika, jossa puolet peroksidista on hajonnut tietyssä lämpötilassa. Peroksidit voidaan luokitella kemiallisen tyyppin mukaan kuuteen ryhmään.

Diasyyliperoksidit

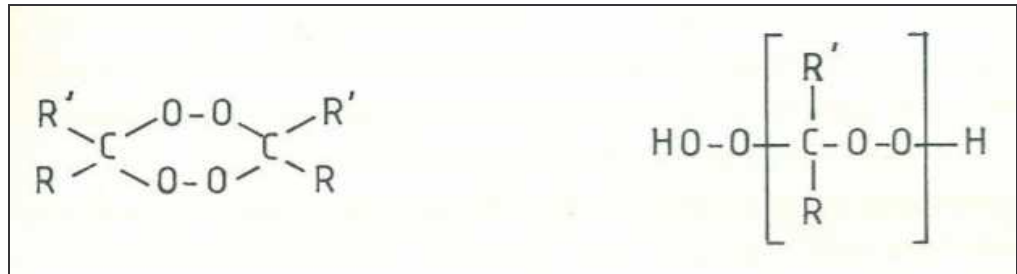


Kuva 6 Diasyyliperoksidin yleiskaava

Yleisin tähän ryhmään kuuluva peroksidi on dibentsyyliperoksidi, jota yleensä kutsutaan myös bentsoyyliperoksidiksi (BPO). Muita ovat 2,4-diklooribentsoyyliperoksidi, diasetyyliperoksidi ja dikapryyliperoksidi. Nämä peroksidit tarvitsevat huoneenlämmössä amiinikiihdyttimen kovettuakseen.

Korkeimmissa lämpötiloissa ei tarvita kiihdytintä. Kuvassa 6 on diasyyliperoksidin rakennekaava.

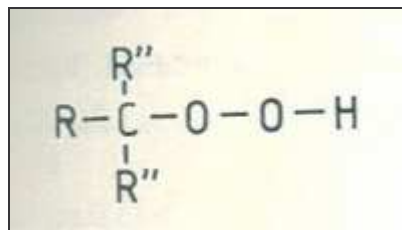
Ketoniperoksidit



Kuva 7 Ketoniperoksidin ja hydroperoksidin yleiskaava

Polyestereiden kovettamiseen käytetään yleisimmin ketoniperoksidia. Huoneenlämmössä tapahtuvaan kovettumiseen käytetään yleisimmin metyylietyyliketoniperoksidia (MEK) ja sykloheksanoniperoksidia. Nämä ovat yleisesti monien peroksidien seoksia. Muita ketoniperoksidiin kuuluvia ovat asetyyliasetoniperoksidi, metyyli-isobutyryliketoniperoksidi ja erilaiset ketoniperoksidi sekoitukset. Kuvassa 7 on ketoniperoksidin ja hydroperoksidin rakennekaavat.

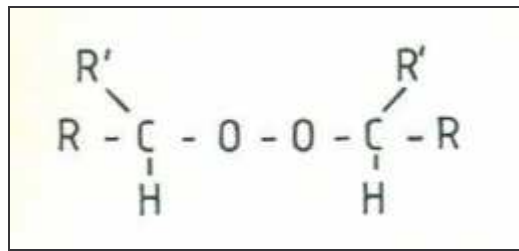
Hydroperoksidit



Kuva 8 Hydroperoksidin yleiskaava

Hydroperoksidiin yleisimmät ovat kumeenihiydroperoksidi ja tert-butylihiydroperoksidi. Molempien kanssa voidaan käyttää koboltti- tai vanadiinikiihdytintä, jolloin polyestereille saadaan pitkä hyytymisaika ja hyvä loppukovetus. Kuvassa 8 on hydroperoksidin rakennekaava.

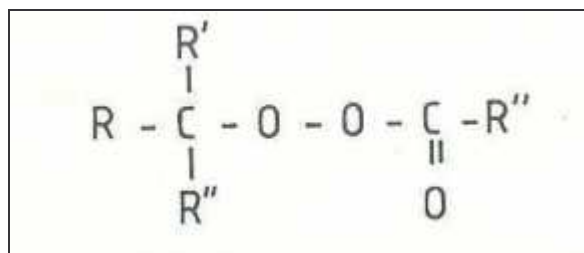
Diakyyli- ja diaralkyyliperoksidit



Kuva 9 Diakyyliperoksidin yleiskaava

Diakymuuliperoksia käytetään lämpökovetteisiin sovellutuksiin, sitä ei voida kiihdyttää. Paras lopputulos saavutetaan korotetuissa lämpötiloissa. Kuvassa 9 on diakyyliperoksidin rakennekaava.

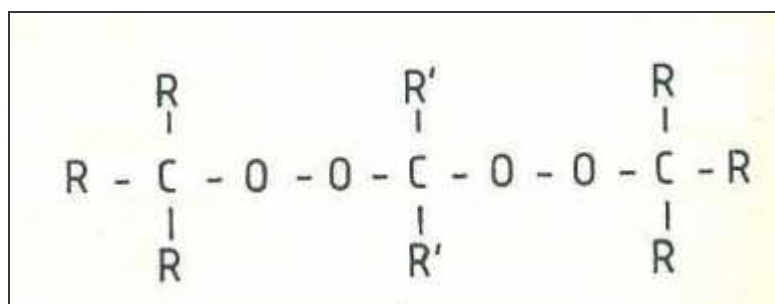
Peroksidiesterit



Kuva 10 Peroksidiesterin yleiskaava

Peroksidiestereitä käytetään usein kuumapuristukseen ja levyjen valmistukseen. tert-butyyliperbentsoattia voidaan käyttää 130 – 150 °C lämpötiloissa ilman kiihdytintä.

Perketaalit



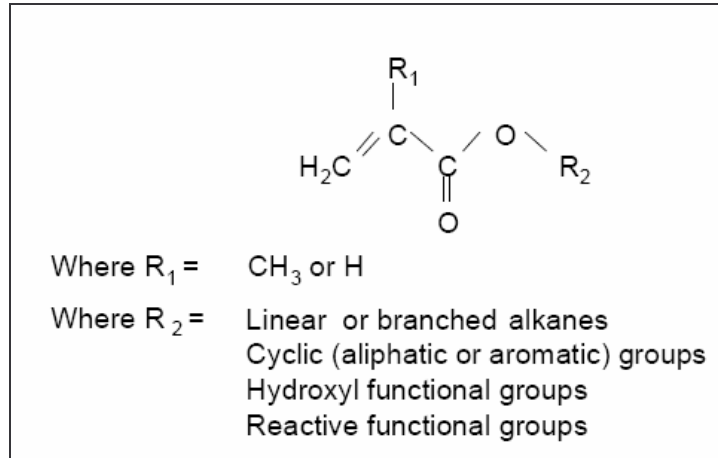
Kuva 11 Perketaalin yleiskaava

Perketaaleja käytetään lämpökovetussovelluksiin metallien kanssa. Yleisimpiä kaupallisia perketaaleja ovat 1,1-bis(tert-butyyliperoksidi)-sykloheksaani ja 1,1-bis(tert-butyyliperoksidi)-3,3,5-trimetyylisykloheksaani. Kuvassa 11 on perketaalin rakennekaava.

3.2 Liuotinvapaat tyydyttymättömät polyesterihartsit

Ympäristölakeihin tulevat muutokset vaikuttavat tyydyttymättömien polyesterihartsien teolliseen tuotantoon. Yhä enemmän suositaan liuotinvapaita vaihtoehtoja liuotinpohjaisten hartsien sijaan. Nopea kehitys liuotinvapaissa tai minimoiduissa hartseissa on tuonut niistä merkittävän vaihtoehdon liuotinpohjaisille hartseille niin ominaisuuksien kuin hinnankin puolesta.

Yleisesti käytetään joko styreeni- tai vinyylitolueenipohjaisia tyydyttymättömiä polyesterihartseja. Yksinkertaisimmillaan reaktiivinen monomeri eli liuotin vaihdetaan sellaiseen reaktiiviseen monomeeriin joka toimii liuottimen tavoin, mutta ei haihdu. Alhaisen molekyylipainon omaavat styreeni, vinyylitolueeni ja metyylimetakrylaatti eivät tule kysymykseen, koska ne ovat helposti haihtuvia. Useat erikoisakrylaattit ja metakrylaattit eivät haihdu niin paljoa, koska niiden molekyylipaino on suurempi. Niiden avulla saavutetaan huomattavia parannuksia ympäristönsuojelun kannalta. Kuvassa 12 on erään akryylimonomeerin kemiallinen rakenne. /10/



Kuva 12 Akryylimonomerin rakennekaava /10/

Liuottimen korvaaminen jollain toisella reaktiivisella monomeerilla vaikuttaa merkittävästi hartsien viskositeettiin. Yleisesti käytettyjen monomeerien, kuten styreenin ja vinyylitolueenin, korvaaminen metakrylaatilla nostaa hartsin viskositeettia merkittävästi. Tämän takia prosesseihin, jossa viskositeetilla on suuri merkitys, kuten kastoallasprosessiin, niiden soveltuvuus on tarkistettava tapauskohtaisesti. Viskositeetin kasvaessa hartsin tunkeutuminen kyllästettävän kappaleen rakenteisiin heikkenee. Tunkeutuvuutta voidaan parantaa esilämmittämällä kyllästettävät kappaleet ennen kastoamista hartsiin tai lämmittämällä hartsia.

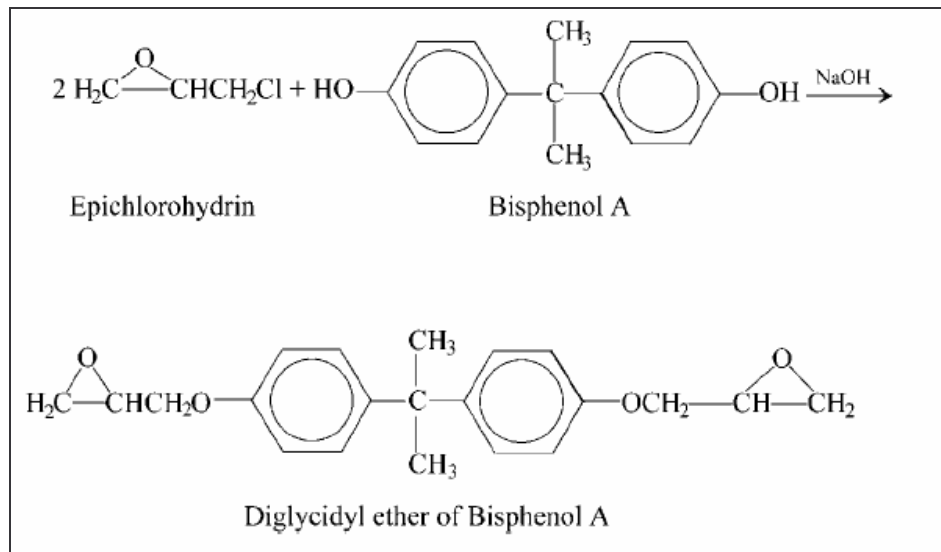
3.3 Epoksihartsi

Epoksihartseja on käytetty vuosikymmeniä erilaisiin käyttötarkoituksiin. Pääasiassa niitä käytetään kaksikomponenttisissa maaleissa, lakoissa, liimoissa ja lattiapinnoitteissa. Epoksihartseja käytetään myös sähköteollisuudessa niiden erinomaisten ominaisuuksien johdosta suojaamaan komponentteja ympäristötekijöiltä sekä parantamaan niiden sähköisiä ominaisuuksia.

Epoksihartsin reaktiivinen kohta on epoksiryhmä eli glysidyyliryhmä. Kovetuksen yhteydessä epoksiryhmät reagoivat amiinien, polyamiinien tai anhydridien kanssa. Kovettunut hartsi eli epoksimuovi ei sisällä epoksiryhmiä,

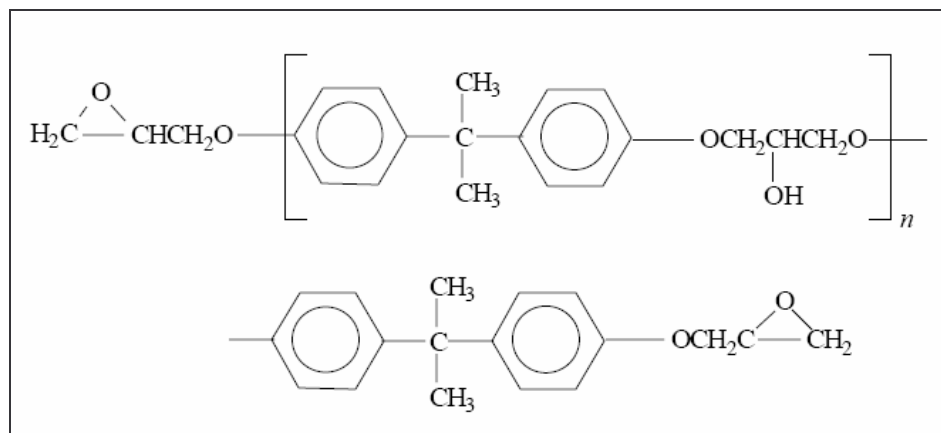
joten nimi on harhaanjohtava. Epoksihartsit ovat nestemäisiä. Epoksihartsit sisältää tietyn määrän reaktiivisia ryhmiä, ja kovetinta on oltava stökiometrisessä suhteessa reaktiiviseen epoksiin.

Bisfenoli A-pohjaiset hartsit ovat eniten käytettyjä epokseja. Ne valmistetaan epikloorihydriinistä ja bisfenoli A:sta, joista muodostuu bisfenoli A:n diglysidyylietteri eli DGEBA. /11, s. 167/ Reaktio on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14 Bisfenoli A:n reaktio epikloorihydriinin kanssa /5 s. 83/

Bisfenoli A-pohjaisen hartsin rakenne muodostuu seuraavasti:



Kuva 15 Yleinen DGEBA-rakenne bisfenol A-pohjaiselle epoksihartsille. /5 s. 83/

Kuvassa 15 n on peräkkäisten ketjujen lukumäärä. Se vaihtelee välillä 0–24.
Arvon ollessa alle 1 on epoksi nestemäistä ja molekyylipainon kasvaessa n kasvaa.
Halogenoidut epoksit ovat syttymättömiä. /5, s. 82/

3.3.1 Epoksien kovettuminen /5, s. 85-87/

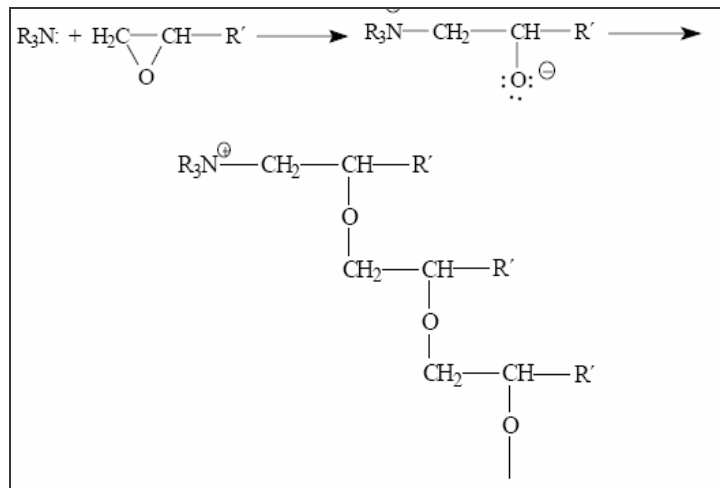
Epoksihartsit kovettuvat, kun niihin lisätään sopivaa kovetinta, jonka avulla muodostuu erittäin kestäviä kolmiulotteisia ristisidoksia kovettuneeseen pinnoitteeseen. Kaupallisissa epoksihartseissa on käytössä lukuisia eri kovettimia. Käytettävä kovetin määrittää hartsin kovettumis- ja uunitusajat. Erilaisia kovettimia on lueteltu taulukossa 10.

Taulukko 10 Epoksihartsien kovettimia

Kovetin	Edut	Haitat
Polyamiinit(primääri-, sekundääri- ja tertiäärisetamiinit)	-nopea kovettuminen huoneenlämmössä -hyvä vedensietokyky	-lyhyt elinikä (< 30 min) -vaatii tarkkaa annostusta ja sekoitusta -eksoterminen reaktio -pinnoitteesta tulee värillinen -hajuhaitat -ihottuma
Polyamidit	-joustava ja kestävä pinnoite mekaanisille rasituksille -hyvä eristyskyky ja tarttuvuus -elinikä	-huonot sähköiset ominaisuudet -vedensietokyky
Anhydritit	-elinikä -lämmönkesto -lämmönsietokyky -läpinäkyvä	-vaatii tertiäärisiäamiinia tai jotain muuta kiihdytintä kovettumisen nopeuttamiseksi -vaatii korkeamman uunituslämmön kovettuakseen -pitkä kovettumisaika
Boori-trifluoridi yhdisteet	-nopea kovettuminen	-eksoterminen -lyhyt elinikä -kosteutta sitova

Useimmat tertiääriset amiinit, joiden molekyylipaino on alhainen, vaativat asteittain nostettavan uunituslämmön kovettuakseen. Suuren molekyylipainon omaavat epoksit voidaan kovettaa huoneenlämmössä johtuen niiden suuresta hydroksyyliyhymien lukumäärästä. Epokseja käsiteltäessä on hyvä muistaa niiden aiheuttavan ihon ärsytystä. Boori-trifluoridi on erittäin reaktiivinen, ja sitä on käytännössä mahdoton hallita käytännön tilanteissa.

Tertiäärinen amiini rikkoo ensin epoksirenkaan muodostaen kvaternäärisen pohjan ja happiatomi luovuttaa elektroniparin. Negatiivisesti varautunut happiatomi avaa seuraavan epoksirenkaan ja näin muodostuu pitkäketjuinen polymeeri. Reaktio on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16 Epoksin kovettaminen tertiääriamiinin avulla /1 s. 89/

Epokseilla, jotka on kovitettu amiiniyhdisteillä, on hyvä kemikaalin kestävyys sekä elektroniset ominaisuudet. Epokseilla on verrattuna muihin polymeereihin verrattain hyvät ominaisuudet, kuten kemikaalikestävyys, vedensietokyky ja suolaveden kesto. Epoksinpinnoitteita käytetään erityisesti vaativissa olosuhteissa, kuten auto-, sota- ja laivasteollisuudessa. Epoksit säilyttävät sähköiset ominaisuutensa kosteissa olosuhteissa ja korkeissa lämpötiloissa parhaiten. Epoksien huonoina puolina pidetään niiden erittäin kovaa pintaa. Epokseissa voidaan käyttää pehmentimiä, mutta ne heikentävät muita ominaisuuksia aiheuttaen esimerkiksi lisääntyneen veden imeytymistä. Epoksit tarttuvat hyvin erilaisiin pintoihin, koska se on polaarinen. Pinta-aktiivinen luonne muodostaa sekä vahvoja kemiallisia sidoksia että mekaanisia kytköksiä kyllästettävään

pintaan. Lukuisat eetterisidokset epoksihartsissa, jossa on vapaa elektronipari happisidoksessa, muodostavat vetysidoksia metalli-, keraami- tai muovipinnan vapaiden vetyatomien kanssa. Bisfenolin aromaattinen eetteri vahvistaa kykyä muodostaa vetysidoksia, koska sen happi on elektronegatiivisempi fenolirenkaan resonanssivaikutuksen takia. Hydroksyyliyhymien läsnäolo epoksirakenteessa määrää pysymättömän vetyatomien ottamaan osaa vetysidokseen. Näiden sidosten ansiosta epoksit tarttuvat erittäin lujasti pinnoitettavaan pintaan. Epoksirenkaat voivat muodostaa kyllästettävään pintaan kemiallisia sidoksia aktiivisen happiatomin johdosta. Tämän takia epokseja käytetään paljon eristeinä. Epoksit tarttuvat hyvin alumiiniin, magnesiumiin, rautaan, titaaniin, berylliumiin, kupariin, useimpiin metalliseoksiin, muoveihin ja keraamisiin pintoihin. Polyamideilla kovetettu epoksi tarttuu hyvin kosteisiin ja jopa likaisiin pintoihin. Epoksin ominaisuudet vaihtelevatkin paljon riippuen siitä, minkä avulla se on kovetettu.

3.3.2 Epoksien ominaisuuksia /5, s. 96-99/

Epoksit kestävät erittäin hyvin jopa kiehuva vettä. Veden imeytyminen ilmoitetaan usein sillä, kuinka paljon prosentteina on vettä imeytynyt pinnoitteeseen 24 tunnissa. Epokseilla se on yleisesti luokkaa 0,1 aina viiteen prosenttiin asti, kun taas polyesteripinnoitteilla usein suurempi. Epoksihartseilla on erittäin tärkeää, että kovetinta on stökiometrisessä määrässä hartsiin nähden, muuten kovettuneeseen pinnoitteeseen jää reagoimatonta ainetta, ja silloin pinnoitteen ominaisuudet heikkenevät huomattavasti. Yksikomponenttihartseissa ei ole tätä ongelmaa, koska ne on aktivoitu valmistajan puolesta. Epoksinpinnoitteita käytetään erityisesti veneteollisuudessa suojaamaan metalleja suolavedeltä.

Epoksit säilyttävät sähköiset ominaisuudet erinomaisesti myös korkeissa lämpötiloissa, ja ne ovat suhteellisen vakaat vielä 150 °C:n lämpötilassa ja suhteellisen kosteuden ollessa 100 %. Anhydrideillä tai aromaattisella amiinilla kovetettu epoksit säilyttävät ominaisuudet jopa 200 °C:n lämpötilassa. Tämän jälkeen alkavat pinnoitteen ominaisuudet heikentyä. Epoksinpinnoitteet säilyttävät

korkeissa lämpötiloissa ominaisuutensa paremmin kuin polyesteripohjaiset pinnoitteet. Epoxy-novolakkahartsit kestävät paremmin lämpöä kuin bisfenoli A - pohjaiset hartsit, koska metyleenisidokset ovat kestävämpiä kuin isopropylideenisidokset bisfenoli A:ssa.

4 HARTSIEN YMPÄRISTÖ- JA TERVEYSVAIKUTUKSET

Hartsien ympäristövaikutukset johtuvat lähinnä tyydyttymättömien polyesterihartsien liuotinpitoisuuksista, joista osa haihtuu ilmaan prosessin aikana. Tyydyttymättömien polyesterihartsien liuotainainepitoisuudet ovat suhteellisen korkeita, noin 40–50 % luokkaa. Tästä noin puolet sitoutuu kovettuneeseen pinnoitteeseen muodostaen ristsidoksia polyesteriketjujen kanssa ja puolet vapautuu ympäristöömme haihtuvina orgaanisina yhdisteinä. Tässä kappaleessa selvitetään haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) päästöjen vaikutusta ilmakehään, lainsäädäntöä sekä hartsien terveysvaikutuksia.

4.1 Hartsien ympäristövaikutukset

Hartsien ympäristövaikutukset aiheutuvat pääasiassa liuotinpohjaisten hartsien VOC-päästöistä. Kovettunut hartsi ei ole haitallista ympäristölle tai ihmisille. Nestemäisessä muodossa hartsi voi aiheuttaa pitkäaikaisia haittavaikutuksia vesiympäristössä.

4.1.1 Haihtuvat orgaaniset yhdisteet /14, s. 5/

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (Volatile Organic Compounds, VOC) on yhteinen nimitys metaanille ja muille kaasumaisille yhdisteille. Haihtuviksi orgaanisiksi yhdisteiksi luetellaan kaikki orgaaniset yhdisteet, jotka tuottavat valokemiallisia

hapettimia, kuten otsonia, reagoidessaan typen oksidien ja ilmakehän hapen kanssa auringonvalon läsnäollessa. Nestemäisiä orgaanisia yhdisteitä, joiden kiehumispiste on välillä 60–120 °C huoneen lämpötilassa, kutsutaan myös orgaanisiksi yhdisteiksi.

Haihtuviin orgaanisiin yhdisteisiin kuuluvat hiilivedyt, aldehydit, alkoholit, eetterit, esterit, fenolit, ketonit ja orgaaniset hapot. Orgaaniset yhdisteet lisäävät alailmakehän otsonipitoisuutta, mikä taas edistää kasvihuoneilmiötä ja lämmittää ilmakehää.

4.1.2 Lainsäädäntö /13/

Merkittävin asetus orgaanisia yhdisteitä käytettäessä on VOC-asetus (435/2001), jossa rajoitetaan haihtuvien orgaanisten yhdisteiden käyttöä tietyissä teollisissa toiminnoissa ja laitoksissa. Asetuksen tavoitteena on vähentää haihtuvia orgaanisia yhdisteitä toimialakohtaisesti.

Asetus määrittelee tavoitearvot eri toimialoille ja niiden voimaantulon. Uusissa laitoksissa päästöjen on oltava 31.10.2004 alle tavoitearvon. Jo olemassa olevissa laitoksissa 31.10.2004 alkaen päästöt saavat olla enintään 1,5 kertaa tavoitearvon ja 31.10.2007 jälkeen alle tavoitearvon. Asetuksessa määritellään ympäristölupa- ja rekisteröintivelvolliset yritykset liuotinkulutuksen mukaan toimialakohtaisesti. Taulukossa 11 on raja-arvot tietyille teollisille toiminnoille, joiden ylittyessä on haettava ympäristölupaa tai tehtävä ilmoitus paikalliselle ympäristöviranomaiselle.

Taulukko 11 Liuottimien kulutus erilaisissa teollisissa toiminnoissa

Laitos tai toiminta	Liuottimien kulutus	Menettely
ulkaissuypäpainot	> 25 t/a	ympäristölupa
muut painolaitokset	> 15 t/a	ympäristölupa
tekstiilien/kartongin rotaatioseripaino	> 30 t/a	ympäristölupa
pintojen puhdistus	> 1 t/a	ympäristölupa
muu pintojen puhdistus	> 2-10 t/a > 10 t/a	rekisteröinti ympäristölupa
ajoneuvojen maalaus ja korjausmaalaus	> 0-15 t/a > 15 t/a	rekisteröinti ympäristölupa
jatkuvatoiminen nauhapinnoitus	> 25 t/a	ympäristölupa
muu pinnioitus sekä metallin, muovin, tekstiilien, folion ja paperin pinnoitus/maalaus	> 5-15 t/a > 15 t/a	rekisteröinti ympäristölupa
puupintojen maalaus	> 15 t/a	ympäristölupa
nahan viimeistely	> 10-15 t/a > 15 t/a	rekisteröinti ympäristölupa
lankalakkaus	> 5-15 t/a > 15 t/a	rekisteröinti ympäristölupa
kemiallinen pesu		
Huom! poikkeussäännös 5 §	ei alarajaa	rekisteröinti
puun kyllästämisen	> 25 t/a	ympäristölupa
jalkineiden valmistus	> 5-10 t/a > 10 t/a	rekisteröinti ympäristölupa
puun ja muovin laminointi	> 5-10 t/a > 10 t/a	rekisteröinti ympäristölupa
liimaus	> 5-10 t/a > 10 t/a	rekisteröinti ympäristölupa
maalien, lakkojen, liimojen ja painovärien valmistus	> 100 t/a	ympäristölupa
kuminjalostus	> 15 t/a	ympäristölupa
kasviöljyjen sekä eläinrasvojen uutto ja kasviöljyjen jalostustoiminnot	> 10 t/a	ympäristölupa
lääketeollisuus	> 50 t/a	ympäristölupa

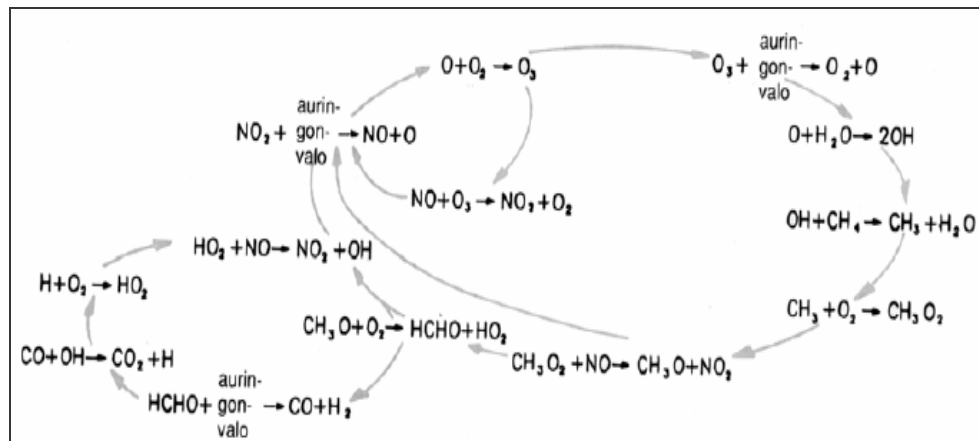
Toiminnanharjoittajan, jonka toiminta on merkitty ympäristönsuojelun tietojärjestelmään, on vuosittain helmikuun loppuun mennessä ilmoitettava kunnan ympäristönsuojeluviranomaiselle tiedot siitä, miten on noudattanut VOC-asetuksen säännöksiä, ja kerrottava vähennyssuunnitelman tavoitteiden saavuttamisesta.

4.1.3 VOC-yhdisteet ilmakehässä /14, s. 9-11/

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet ovat myrkyllisiä ihmiselle ja luonnolle. Ne reagoivat alailmakehässä ja muodostavat otsonia, joka on haitallista ihmisten

terveydelle ja lisää kasvihuoneilmion vaikutusta. Yleisesti hiilivetyypitoisuudet saavuttavat ihmiselle haitallisia pitoisuuksia vain päästölähteen välittömässä läheisyydessä.

Otsoni muodostuu fotokemiallisessa reaktiossa, jossa VOC – yhdisteet hapettuvat auringonvalossa typpimonoksidin ja typpidioksidin läsnäollessa. Oheistuotteina syntyy myös muita ilmansaasteita, kuten vetyperoksidia ja peroksiasetyyli-nitraattia (PAN), typpihappoa, formaldehydia, asetaldehydiä ja orgaanisia happoja. Otollisimmat olosuhteet otsonin muodostumiselle ovat tyynenä kuumana kesäpäivänä, jolloin saasteet eivät pääse leviämään. Otsoni muodostuu kuvan 18 reaktiosarjan mukaisesti. Otsoni on ilmansaaste alailmakehässä, mutta yläilmakehässä se estää auringon lähettämää haitallisia ultraviolettisäteilyä pääsemästä maanpinnalle.



Kuva 18 Otsonin reaktiosarja ilmakehässä /14, s. 9/

Ilmakehällä on kyky poistaa saasteita ilmasta hapetuskykynsä ansiosta. Ilmakehä hapettaa saasteet helpommin poistuvaan muotoon vesiliukoisuutta kasvattamalla, jolloin niiden kyky muodostaa hiukkasia tai reagoida muiden yhdisteiden kanssa lisääntyy. Ilmakehän tärkeimpiä hapettimia ovat hydroksyyli-radikaalit, jotka aloittavat saasteiden hapetusketjut. Muita hapettimia ilmakehässä ovat vetyperoksidi, otsoni ja nitraattiradikaali, joka jatkaa reaktiota öisin, kun tarvittavaa valoa ei ole saatavilla.

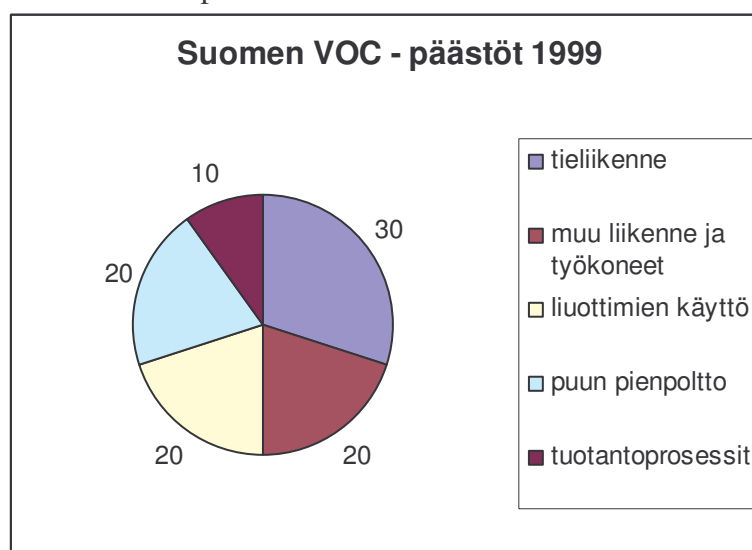
4.1.4 VOC-yhdisteiden terveysvaikutukset

VOC-yhdisteet aiheuttavat ihmisessä pääasiassa silmien ja limakalvojen ärsytystä, huimausta, päänsärkyä ja uneliaisuutta. Otsonin vaikutukset ovat samankaltaisia kuin VOC-yhdisteistäkin aiheutuvat oireet, mutta suurina annoksina otsoni on tappava. Suomessa Ilmatieteen laitos mittaa otsonipitoisuutta ja raportoi siitä tarvittaessa.

VOC-yhdisteiden muodostamat happamat yhdisteet lisäävät maaperän happamoitumista mikä taas heikentää kasvien kasvua. Kaasumaiset yhdisteet aiheuttavat kasveissa biokemiallisia prosesseja, jotka heikentävät kasveja ja niiden kasvua. Esimerkiksi tupakkakasvit ovat erittäin herkkiä otsonille. Niitä käytetään indikaattoreina mittaamaan otsonipitoisuuksia. Kaupunkiolosuhteissa otsonipitoisuudet ovat alhaisempia, koska pakokaasuista muodostuva typpimonoksidi kuluttaa otsonia.

Suomen metsät ovat suurin yksittäinen VOC-lähde Suomessa. Havupuiden pihkasta haihtuu terpenihiilivetyjä ilmaan. Suomen luonnon aiheuttamat VOC-päästöt ovat noin 320 000 tonnia. Ihmisten toiminnasta johtuvia VOC-päästöjä on lueteltu kaaviossa 1. /14, s. 12/

Kaavio 1 VOC päästöt Suomessa vuonna 1999 aihealueittain /15/



4.2 Hartsien terveysvaikutukset

Nestemäisessä muodossa hartsit saattavat aiheuttaa ihmisille ihon herkistymistä. Kovettunut hartsi ei ole ihmisille vaarallista.

4.2.1 Epoksihartsien terveysvaikutukset /11, s. 167-169/

Epoksihartseja käytetään pääasiassa kaksikomponenttisissä maaleissa, lakoissa, lattiapinnoitteissa, liimoissa sekä erilaisina pinnoitteina sähköteollisuudessa. Eniten epokseille altistutaan maalaus- ja rakennustöissä sekä sähkö- ja elektroniikkatuotteiden kokoamistöissä. Sähköteollisuudessa käytetään yksikomponenttisiä orgaanisilla karboksyylihapoanhydrideillä kuumentamalla kovettuvia bisfenoli A-pohjaisia epoksihartseja. Epoksiliimoja käytetään pieniä määriä erilaisiin puun ja metallien liimauksiin. Talonrakennusteollisuudessa käytetään epokseja betoninpinnoitukseen ja korjauksiin. Epokseja käytetään lasikuidun valmistuksessa veneteollisuudessa, urheiluvälineissä ja muissa lujitemuovituotteissa.

Suomessa altistuu voimakkaasti epoksihartseille ja niiden kovettimille ainakin 3000 työntekijää vuodessa. Epoksihartsit eivät ole haihtuvaa, joten niille altistutaan pääasiassa sumua tai pölyä synnyttävissä prosesseissa, kuten erilaisissa maalauksissa ja hionnassa. Sähköteknisten tuotteiden pinnoituksessa vapautuu haitallisia pitoisuuksia ilmaan karboksyylihapoanhydridikovettimista korotetuissa lämpötiloissa.

Työperäisten sairauksien rekisteriin ilmoitetaan vuosittain 25 – 40 epoksihartsien, reaktiivisten ohentimien ja niiden kovettimien aiheuttamaa allergista ihottumaa sekä alle 10 nuha- ja astmatapausta. Epoksihartsit, reaktiiviset ohenteet ja kovettimet aiheuttavat eniten muovikemikaaleista aiheutuvia työperäisiä ihottumatapauksia. Yli puolet herkistymisistä johtuu bisfenoli A-pohjaisista hartseista.

4.2.2 Happonhydrit /11, s. 150-155/

Orgaaniset happonhydrit ovat pienimolekyylisiä, reaktiivisia yhdisteitä joita ei esiinny luonnossa. Happonhydridejä käytetään kovettimina epoksi- alkydi- ja polyesterihartseissa. Kloorattuja happonhydrideja käytetään palonestoaineina epoksi- ja polyesterihartseissa. Sähköteollisuuteen tarkoitetuissa epoksihartseissa happonhydrit ja muut lisäaineet on sekoitettu nestemäiseen hartsiin jo valmistusvaiheessa.

Happonhydrit esiintyvät ilmassa höyryinä, huuruina tai pölyinä. Altistuminen tapahtuu hengitysteitse tai ihon kautta. Altistuminen tapahtuu tasaisesti tai jaksottaisesti. Hartsien käsittelypaikat on syytä eristää muista työskentelypaikoista, jolloin vältetään muiden työntekijöiden altistuminen. Sähköteollisuudessa eristyksiin ja kyllästykseen käytettävät epoksihartsit sisältävät metyyliheksahydroftaalihapponhydriä (MHHPA) ja ftaalihapponhydriä (PA). Sähköteollisuudessa korkeita MHHPA-pitoisuuksia on todettu kyllästys- ja kovetusvaiheessa, uunituksessa ja jäähtymisvaiheessa. Epoksihartsilla tapahtuvat kyllästystoiminnot on syytä suorittaa sellaisissa olosuhteissa, etteivät syntyvät höyryt vapaudu tehtaan puolelle.

Sosiaali- ja terveysministeriö on luokitellut asetuksessa (634/2001) happonhydrit hengitysteitä ja ihoa herkistäviksi ja ärsyttäviksi yhdisteiksi. Ne ovat myös haitallisia nieltynä ja voivat aiheuttaa vakavan silmävaurion. Hartsien turvalomakkeessa on kerrottu minkälaisia terveysvaikutuksia niillä on, R- ja S-lausekkeiden avulla. R-lausekkeet kertovat, minkälaisia vaaroja aine voi aiheuttaa, ja S-lausekkeet kertovat, millaisia turvatoimia pitää käyttää käsiteltäessä ainetta.

Toistuva altistuminen happonhydrideille saattaa aiheuttaa ihon herkistymistä, ammattiastmaa, -nuhaa, allergista koskettamisihottumaa, kosketusurtikariaa sekä silmän sidekalvon tulehdusta.

4.2.3 Polyesteripohjaiset hartsit /9, s. 24-27/

Vuosina 1974-1993 työterveyslaitos tutki 2178 muoviteollisuudessa työskentelevää työntekijää, joilla on ilmennyt työperäistä ihottumaa. 43 työntekijää oli altistunut erilaisille hartseille, 74 % näistä oli altistunut tyydyttämättömälle polyesterihartsille ja 26 % epoksihartseille ja loput joko molemmille tai tyydyttämättömille polyestereille ja vinyyliesterihartsille. Altistumista oli tapahtunut erilaisissa työtehtävissä kuten veneiden valmistuksessa, urheiluvälineiden valmistuksessa, laminoinnissa, siivouksessa ja tuotekehitys ja -testaustoiminnassa. Tyydyttämättömät polyesterihartsit aiheuttavat eniten ihon ärsytystä muoviteollisuudessa. Suurin osa näistä tutkituista ovat joutuneet vaihtamaan työpaikkaa tai työpistettä. Kaikilla työperäisistä ihottumista kärsivillä olivat ihottumat käsissä, mutta ihon ärsytystä on havaittu myös ranteissa, kasvoissa ja jaloissa. Yleensä henkilöt, joilla on havaittu ihottumaa, ovat allergisia myös reaktiivisille ohenteille, joita käytetään yleisesti tyydyttämättömien polyesterihartsien kanssa. Lähes kaikki altistuneista olivat käyttäneet suojahanskoja (88 %). Yleisimmin tyydyttämättömissä polyesterihartseissa herkistyminen on tapahtunut reaktiivisen monomeerin, styreenin takia, jota käytetään hartsin lisäaineena parantamaan sen käytettävyyttä. Muita vastaavia reaktiivisia ohenteita on vinyylitolueeni ja metyyylimetakrylaatti.

4.2.4 Reaktiiviset monomeerit

Reaktiiviset monomeerit ovat tyydyttämättömissä polyesterihartseissa usein herkistymistä aiheuttavia ainesosia. Styreeni imeytyy elimistöön pääasiassa hengityksen kautta, mutta myös pieninä määrinä ihon läpi. Pieninä määrinä styreeni aiheuttaa pääasiassa hengitysteiden ärsytystä, ruokahaluttomuutta, huonovointisuutta, ja silmien kirvelyä. Pidempiaikainen altistuminen voi aiheuttaa keskushermoston toiminnan häiriöitä, kuten epätavallista väsymistä, keskittymisvaikeuksia ja reaktioaikojen pitenemistä. Vinyylitolueeni aiheuttaa samankaltaisia oireita kuin styreeni. Ihokosketuksessa sekä styreeni että vinyylitolueeni voivat aiheuttaa herkistymistä. /11 s. 113/

4.3 Riskien minimointi

Epoksihartseja käytettäessä liuottimien korvaaminen vedellä ei vähennä herkistymisriskiä, koska epoksihartsityyppi on edelleen sama. Allergiavaaroista tiedottaminen ja oikeanlainen suojautuminen vähentävät altistumista työskenneltäessä hartsien kanssa. Nestemäisen hartsin kanssa työskentelevien henkilöiden olisi syytä käyttää suojavaatetusta, jota ei tule kuljettaa kotiin. Näin vältetään perheenjäsenien altistumista hartseille.

5 IMPREGNOINTI KEMPPI OY:SSA

Kemppi Oy on hitsauskoneiden valmistaja. Muuntajat ja kuristimet valmistetaan pääsääntöisesti itse. Hartsaamisella varmistetaan mahdollisimman pitkä elinikä lopulliselle tuotteelle.

Nykyinen hartsaamo on rakennettu vuonna 1989. Kemppi Oy:n hartsauslinja muodostuu kuudesta lähetyspuolen työpisteestä, kastohartsaamosta, neljästä kuivausuunista, häkkivarastosta ja yhdeksästä vastaanottotyöpisteestä. Sähkömekaaninen siirtolaite siirtää täytetyt häkit hartsaamoon ja noutaa tyhjt häkit palautusradalta työpisteisiin. Siirtolaite ohjaa kuljetukset pyydetyssä järjestyksessä. Hartsausprosessi on täysin automatisoitu ja sitä ohjataan tietokoneen avulla.

Pienemmät muuntajat ja kuristimet ripustetaan kastohäkkeihin ja isot laitetaan häkkien pohjalle. Häkkien kastosyvyys määritetään jokaiselle tuotteelle yksityiskohtaisesti. Hartsaamossa on kaksi hartsauslinjaa, toinen isoille ja toinen pienille käämikomponenteille. Kummankin hartsauslinjan päässä on kaksi uunia päällekkäin eli yhteensä neljä uunia. Kaksi näistä uuneista on ohjattu isoille ja yksi pienille tuotteille. Vapaana oleva uuni voidaan ohjata vaihtokytkimellä isoille tai pienille tuotteille. /8, s. 5/

Logiikkakeskuksessa sijaitsevalla kosketusnäytöllä voidaan seurata prosessitulannetta, uunien lämpötilaa sekä viskositeettiä.

Kuljetinvaunu kulkee hartsaamossa sykleittäin. Ensin kuljetusvaunu vie täytetyn häkin hartsaamoon, sieltä se menee suoraan kastoaltaille. Häkki on kastoaltaassa 20 minuuttia ja sen jälkeen se on hetken aikaa kastoaltaan päällä valumassa. Tämän jälkeen häkki siirtyy valutusaltaan päälle ja siitä sitten kuivatusuuneihin. Kuivatusuuneissa on viisi sykliä. Isoilla tuotteilla yksi sykli kestää 55 minuuttia ja pienillä tuotteilla 40 minuuttia. Isoilla tuotteilla on pidempi uunitusaika, koska ne kestävät kauemmin lämmitä uunituslämpötilaan. Uunitus tapahtuu 140 °C:ssä.

Kastoallas hartsausprosessissa on tärkeää säilyttää hartsin viskositeetti ja lämpötila tietyissä rajoissa, jotta saavutetaan optimaalinen kyllästystulos. Hartsin viskositeetti ja siten tunkeutuvuus muuttuu selvästi lämpötilan noustessa tai laskiessa. Lämpötilan noustessa viskositeetti alenee eli hartsi ohenee. Hartsin elinikä laskee kriittisesti, jos hartsin lämpötila pääsee nousemaan yli 25 asteen (8 vrk). Hartsin viskositeettia säädellään ohentimen avulla. Hartsia kierrätetään kastoaltaissa pumppujen avulla, jottei hartsi jämähtäisi kastoaltaisiin. Hartsin viskositeettia mitataan paineantureiden avulla. Kerran viikossa suoritetaan myös viskositeettimittaus niin sanotulla 4 mm:n DIN-kuppitestillä. DIN-kuppi on kahvikupinkokoinen kuppi, jossa on 4 mm:n halkaisijan reikä pohjassa. Hartsi valuu sitä nopeammin kupista mitä pienempi viskositeetti. Näitä kahta tulosta verrataan toisiinsa ja mahdollisesti säädetään paineantureita näyttämään oikein. Hartsauslinjasto on varustettu automaattisella CO₂-sammuusjärjestelmällä.

Yhteenvedona kastoallashartsaukseen liittyy monia muuttujia; hartsin viskositeetti, hartsin lämpötila, hartsattavien kappaleiden lämpötila, ilmankosteus ja – lämpötila. Näiden muuttujien hallitseminen tarjoaa kastoallashartsauksesta taloudellisen ratkaisun laajamittaiseen tuotantoon ja automatisoituun hartsaukseen. Prosessikuvaus löytyy liitteestä 3. /3, 8/

5.1 Lämpimenoajat

Nykyisen prosessin läpimenoajat pienille ja isoille muuntajille on esitetty taulukoissa 12 ja 13. Lämpimenoajat ovat noin laskettu siitä, kun hähki saapuu hartsaamoon.

Taulukko 12 Teoreettinen läpimenoaika pienille muuntajille ja kuristimille

Pienet	aika
Kastoaika	15 min
Valutusaika	25 min
Uunitusaika (esilämmitys + kovettumisaika)	80+120= 200 min
Jäähdytysaika	30 min
Muut	5 min
Yhteensä	275 min

Taulukko 13 Teoreettinen läpimenoaika isoille muuntajille ja kuristimille

Isot	aika
Kastoaika	15 min
Valutusaika	25 min
Uunitusaika (esilämmitys + kovettumisaika)	155+120= 275 min
Jäähdytysaika	45 min
Muut	5 min
Yhteensä	365 min

Lämpimenoaika nykyiselle hartsille

Lämpimenoaika(140 °C) =15 min + 25 min + 120 min = 160 min

Lämpimenoaika = kastoaika + valutusaika + kovettumisaika

Jäähdytysaika ja muut sekä muuntajien esilämmitykseen kuluva aika voidaan olettaa vakioiksi. Kun käytetään samaa esilämmitysaikaa.

Nykyiselle hartsille kovettumisaika 140 °C:ssa on 120 min. Kovettumisaika lasketaan siitä kun kappale saavuttaa ko. lämpötilan. Isoilla muuntajilla lämpeneminen uunituslämpötilaan kestää 155 min ja pienillä 80 min nykyisessä prosessissa.

5.2 Ongelmat nykyisessä prosessissa

Nykyinen prosessi on toimiva, mutta ongelmaksi muodostuu pääasiassa hartsin likaantuminen. Muuntajista ja kuristimista irtoaa kastettaessa hitsauspölyä, lasikuitupölyä ja hitsausroiskeita. Isot kolmivaihemuuntajat hitsataan kasaan, joten niistä saattaa irrota hitsausroiskeita hartsin sekaan. Hartsin likaantuessa heikentyvät sen eristysominaisuudet. Pahimmassa tapauksessa metallipölyn ja hitsausroiskeiden takia hartsista saattaa tulla sähkönjohtavaa. Likainen hartsi kuluttaa hartsin kiertopumppujen akselia ja laakeria. Pumput on avattava kolme kertaa vuodessa ja puhdistettava. Noin kerran vuodessa akseli ja laakeri on vaihdettava. Hitsaus- ja lasikuitupöly tunkeutuu laakerin ja akselin väliin kuluttaen akselin urille. Hartsin suodattaminen on vaikeaa, johtuen sen korkeasta viskositeetista, suodatin tukkeutuu helposti. Muuntajien ja kuristimien puhdistus ennen kastoa vähentäisi hartsin likaantumista, mutta tuo lisätyötä ja käytännön toteutus pitäisi suunnitella siten, että puhdistus tapahtuisi järkevästi ja ei hidastaisi prosessia. /21/

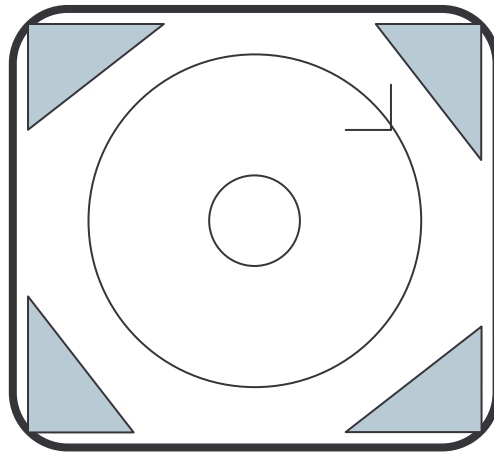
Hartsin valuminen uuniin riippuu siitä kuinka suuri on hartsin hyytymisaika ja kuinka nopeasti tapahtuu hyytyminen. Hartsien tietolomakkeissa on yleisesti ilmoitettu hartsin hyytymisaika 100 °C:n lämpötilassa minuutteina. Tämä tarkoittaa sitä, että kauan hartsilla kestää muuttua nestemäisestä olomuodosta geelimäiseksi uunissa. Hartsin valuminen pitäisi loppua silloin. Nykyisessä hartsissa hyytymisaika on noin 60 minuutin luokkaa.

Uusissa liuotinvapaissa hartsivaihtoehdoissa on hyytymisajat selvästi lyhyemmät noin 10 min luokkaa. Tämä vähentää hartsin valumista uuneihin ja siten turhaa hävikkiä prosessin aikana. Kun hartsaushäkki menee uuniin, kuuma ilma muuttaa ensimmäiseksi hartsin ulkopinnan geelimäiseksi ja estää hartsin valumisen uuniin, vaikka rakenteissa oleva hartsi onkin vielä nestemäistä. Mitä suurempi uunituslämpötila sitä nopeammin hartsi hyytyy.

Hyytymisajasta johtuen ei suositella hartsaushäkkeitä laitettavan kylmään uuniin, koska silloin ne valuttavat hartsia kunnes hartsi saavuttaa riittävän lämpötilan

hyytymisprosessin muodostumiseksi. Nykyisessä prosessissa aina aamun ensimmäinen hartsaushäkki menee kylmään uuniin ja uuni kytkeytyy päälle vasta kun ensimmäinen häkki menee uuniin. Hartsaushäkkien laittaminen lämmitettyyn uuniin vähentäisi valumahäviöitä uuneissa. /18/

Hartsaushäkki menee upotusaltaan jälkeen valutusaltaan päälle valumaan. Hartsin hyytymistä voidaan tehostaa tässä vaiheessa asentamalla lämpöpuhallin (puhaltaa 80-90 °C ilmaa) valutusaltaan kohdalle. Näin saataisiin hartsin pinta geelimäiseksi ennen uunitusta eikä uuniin valuisi hartsia ”ollenkaan”. /18/



Kuva 19 Kastoallas

Kuvassa 19 on kuvattu kastoaltaan hartsinkiertojärjestelmä. Altaan pohjassa on venttiili josta pumpataan hartsia kastoaltaaseen. Hartsia kiertää altaassa ympyrän muotoista kehää, tämä aiheuttaa sen, että hartsia pääsee kovettumaan altaiden kulmiin. Ajan kuluessa tämä estää hartsaushäkkien kastamisen riittävän syvälle kastoaltaisiin. Kovettuneen hartsin poistaminen vaatii linjaston tyhjentämisen. Kiertojärjestelmä pitäisi suunnitella siten, että hartsia pääsisi kiertämään myös kastoaltaan nurkkien kautta. /21/

Jäähdytysjärjestelmä /19/

Hartsaamoon rakennettiin lakan vaihdon yhteydessä (vuonna 2000) uusi tehokkaampi jäähdytysjärjestelmä kastoaltaisiin. Talvella järjestelmässä kiertää

+7 °C jäädytysneste. Kesällä järjestelmässä kiertää +3 °C jäädytysneste ja sen lisäksi käytetään alkuperäistä jäädytysjärjestelmää kesähelteillä pitämään hartsin lämpötilaa halutulla tasolla (21 °C).

Jäädytysjärjestelmän ongelmat tulevat ilmi kesällä, silloin hartsin lämpötila kastoaltaissa nousee yli halutun 21 °C. Hartsaamon kastoallasosastolla kierrätetään ilmaa, jotta liuotinpitoisuus ilmassa ei olisi niin suuri.

Kastoallasosastolle imetään korvaavaa ilmaa tehtaan puolelta katon rajasta. Kesäisin ilman lämpötila on suhteellisen korkea, ja se lämmittää hartsaamon rakenteita, joka taas lämmittää hartsia. Hartsaamon sisäilman lämpötila saattaa nousta lähelle +40 °C:ttä. Nykyistä jäädytysjärjestelmää joudutaan ajamaan täydellä teholla kesäisin, ja myös alkuperäinen jäädytysjärjestelmä on käytössä. Hartsaamossa on neljä uunია, joista yleensä on kaksi tai kolme käytössä, riippuen tuotannosta. Uunit lämmittävät myös hartsaamon sisäilmaa. Häkkejä laitettaessa uuneihin niistä vapautuu lämpöä kastoallasosastolle. Uunien ovisysteemiä voisi kehittää laittamalla niihin tuplaovet tai eristämällä uunitustilan kastoallastilasta väliseinällä. Nykyisellä kapasiteetilla mennään kesäisin jäädytysjärjestelmän maksimi rajoilla. Kapasiteetin noustessa uuneja joudutaan pitämään kauemmin päällä, ja se saattaa nostaa hartsin lämpötilaa, joka taas lyhentää hartsin elinikää ja heikentää lopputulosta.

Jäädytyksen tehostamiseksi on mahdollista ajaa nykyisessä järjestelmässä aina -10 °C jäädytysnesteellä. Tämä johtaa siihen, että jäädytysjärjestelmän putket pitäisi eristää, jotta vältetään putkien hikoilu ja nesteen tiivistyminen jäädytysputkiin. Jäädytysjärjestelmää pitäisi testata käytännössä ja siten todeta sen toimivuus -10 °C asteisella jäädytysnesteellä. Toinen mahdollisuus on jäädyttää hartsaamon sisälle imettävää korvausilmaa ja siten välttää rakenteiden lämpiäminen. Viime vuodesta tuotanto lisääntyy tänä vuonna 20 %, joten saattaa ilmetä ongelmia jäädytyksen suhteen nykyisellä prosessilla, jos tulee oikein lämmin kesä. Asia kannattaa tutkia ennen kesähelteitä, jotta välttyttäisiin ongelmilta.

5.3 Nykyinen hartsi

Nykyinen hartsi on yksikomponenttinen tyydyttymätön polyesterihartsi. Hartsi sisältää 41,5 % reaktiivista monomeriä (liuotinta) vinyylitolueenia. Hartsin viskositeetin säätelyyn käytetään lisäksi vielä noin 10 % vinyylitolueenia. Kastoaltaissa oleva hartsi sisältää noin puolet vinyylitolueenia. Vinyylitolueenista haihtuu noin puolet uunituksen aikana ja toinen puoli vinyylitolueenista osallistuu kemiallisesti ristikidosten muodostamiseen polyesteriketjujen välille. Kokonaishäviöt prosessin aikana on noin 30–40 % hartsin kulutuksesta. Häviöt muodostuvat pääasiassa haihtumisesta uunituksen aikana ja hartsin valumisesta. Stabilisaattoria käytetään hartsin elvyttämiseen, jos se on päässyt vanhenemaan. Hartsin säilyvyys on 4 kk, joka aiheuttaa sen, että hartsi meinaa vanhentua ennen sen käyttöä ja varastoissa ei voida säilyttää kovinkaan suuria määriä hartsia. Pahimmassa tilanteessa joudutaan käyttämään stabilisaattoria hartsin elvyttämiseen. Nykyistä hartsia ei ole mahdollista uunittaa korkeammassa lämpötilassa kuin 140 °C, koska silloin saattaa tulla pinnoitteeseen huokoisuutta johtuen vinyylitolueenista ja sen haihtumisesta. Liitteessä 1 on liitteen 2 standardien selityksiä lyhyesti. Teoriaosuudessa on tarkemmin selostettu sähköisiä ominaisuuksia pinnoitteille. Liitteessä 2 on nykyisen hartsin tietolomake.

/20/

5.4 Hartsin vaatimuksia Kempillä

5.4.1 Muuntajat ja kuristimet

Kemppi Oy:n muuntajarakenteet voidaan jakaa kahteen pääryhmään, konventionaalisiin eli isoihin ja invertteritekniikalla toimiviin pieniin käämikomponentteihin. Konventionaaliset muuntajarakenteet eivät vaadi hartsilta erityistä sitovuutta. Invertterihitsauskoneiden ferriittimuuntajat vaativat hartsilta sitovuutta. Hartsi sitoo ferriitit kelakoteloon. Liitteessä 4 on valokuvat konventionaalisesta ja ferriittimuuntajasta invertterihitsauskoneen päämuuntaja.

Jos hartsauksesta tulee heikko, niin ferriitit saattavat irrota kelakotelosta. Sen jälkeen ferriitit helisevät kelakotelossa ja murtuvat ajan myötä. Lopullisen hartsauksen tulisi olla hieman joustava. Näin saavutetaan paras mahdollinen ferriittien pysyvyys muuntajarakenteissa.

Ferriitit muodostuvat kahdesta E-muotoisesta osasta, jotka liimataan yhteen liimalla. Hartsien vaikutus erityisesti ferriittien liimauksiin on tarkistettava. Muita materiaaleja joiden sopivuus on tarkistettava tapauskohtaisesti: litz-lanka, alumiini- ja kuparifolio, emaloitu kuparilanka, eristeet, lasikuitusukat, sidontateipit, Viledon pehmuste ja kelakotelot. Erityisesti hartsin pysyvyys kupari- ja alumiinifolioissa on tarkistettava, koska joillain hartsivaihtoehdoilla on ollut ongelmia alumiinifolioon tarttumisessa. /3, 17/

Kaikilla käämikomponenteilla on samat vaatimukset hartsin suhteen. Testejä tehdessä lähtökohtana on hyvä verrata uusia hartseja nykyiseen ja tehdä sen pohjalta johtopäätöksiä. Liitteessä 4 on valokuvia muuntajista. Ylemmässä kuvassa on iso konventionaalinen päämuuntaja ja alemmassa kuvassa on kaksi erilaista pienempää ferriittimuuntajaa. Konventionaalinen muuntaja painaa noin 25 kg ja ferriittimuuntajat noin 1 kg.

5.4.2 Tuotannolliset vaatimukset

Tuotannolliset vaatimukset ovat hartsin soveltuvuus hartsauslaitteiston sisäisiin komponentteihin, kuten tiivisteisiin ja laitteiston materiaaleihin. /3/

5.4.3 Käyttöturvallisuus

Hartsien käyttöturvallisuus on yleisesti hyvä, mutta nestemäisen hartsin kanssa työskennellessä on muistettava, että hartsit saattavat aiheuttaa ihon herkistymistä.

Sopivaa suojavaatetusta on käytettävä työskennellessä nestemäisen hartsin kanssa. Paljaat ihoalueet on suojattava ja käytettävä suojalaseja. Hartsaamon sisällä työskennellessä kannattaa käyttää sinne tarkoitettuja kenkiä, koska hartsi kovettuu kenkien pohjaan ja niistä saattaa tulla vaarallisen liukkaat. Siivoajia on informoitava, etteivät siivoa hartsaamon aluetta muilla siivousvälineillä kuin sinne tarkoitetuilla. Näin vältetään hartsin leviäminen muihin työpisteisiin. Isoja konventionaalisista muuntajista joudutaan hiomaan suurimpia hartsi kovettumia pois loppukykentää varten. Hionta on suoritettava suljetussa tilassa ja käytettävä hengityssuojausta. Näin vältetään hengitysteitse tapahtuva altistuminen hartsauspölylle. Hartsien käyttöturvallisuus ilmenee käyttöturvallisuustiedotteesta.

5.4.4 Kustannukset

Liutinvapaat hartsivaihtoehdot ovat hieman kalliimpia kuin nykyinen vaihtoehto, mutta niiden avulla saavutetaan merkittäviä parannuksia prosessiin.

Kustannuksiin vaikuttaa se, minkälaiseen vaihtoehtoon päädytään. Muuntajien esilämmityslaitteiston avulla saavutetaan paras hyöty liutinvapaisissa hartseissa.

Laitteistomuutokset eivät ole välttämättömiä, mutta niiden avulla voidaan parantaa kyllästystulosta ja siten varmistaa käämikomponenttien toimintavarmuus tuotteen eliniän ajan.

Halvimmassa tapauksessa jokin hartsivaihtoehto voi sopia suoraan nykyiseen prosessiin ilman suurempia muutoksia. Vaikka liutinvapaat hartsivaihtoehdot kalliimpia, niin niiden hävikki on huomattavasti pienempi verrattuna nykyiseen hartsiin. Pienemmän hävikin vuoksi hartsin kulutus pienenee ja siten kokonaiskustannukset pienenevät vuositasolla.

6 HARTSIVAIHTOEHDOT

Tiukentunut lainsäädäntö liittyen liuottimien käyttöön ja rajoituksiin teollisissa prosesseissa on tuonut markkinoille ns. liuotinvapaita hartsivaihtoehtoja. Epoksihartsit ovat liuotinvapaita johtuen niiden kemiallisesta rakenteesta. Liuotinvapaisissa tai liuotinminimoiduissa hartseissa on liuotin korvattu sellaisella reaktiivisella monomeerillä, jonka molekyylipaino on suurempi kuin yleisesti käytössä olevilla vinyylitolueenilla ja styreenillä. Mitä suurempi molekyylipaino sitä vähemmän aineella on taipumus haihtua. Liuotinvapaisissa hartseissa on käytetty tavallisesti reaktiivisina monomeerinä erilaisia akrylaatteja kuten metakrylaattia. Liuotinvapaiden hartsien viskositeetti on yleisesti ottaen selvästi suurempi kuin liuotinpitoisten hartsien. Liuotinvapaiden hartsien hävikki on selkeästi pienempi, koska ne eivät haihdu uunituksen aikana niin paljoa. Yleensä puhutaan noin 5-10 prosentin luokkaa kokonaiskulutuksesta. Liuotinvapailta hartseilla kulutus on pienempi. Johtuen korkeammasta viskositeetistä kastettavien kappaleiden esilämmityksellä ennen kasta saavutetaan parempi hartsin tunkeutuvuus rakenteisiin. Esilämmitys ei ole välttämätön, mutta suositeltavaa parhaimman lopputuloksen saavuttamiseksi. Käytännön testeillä tiedetään onko, esilämmitys tarpeellinen. /20, 22/

Hartsi vaihtoehtoista tutkittiin liuotinvapaita tai -minimoituja polyesterihartseja sekä epoksihartseja. Hartsit lajiteltiin nykyiseen prosessiin soveltuviksi ilman suurempia muutoksia ja sellaisiin vaihtoehtoihin, jotka saattavat vaatia muutoksia prosessiin. Kaikki hyväksytyt vaihtoehdot ovat yksikomponenttisiä eli ne ovat aktivoitu tehtaalla ja alkavat siitä vanheta. Kovettumisreaktio aloitetaan lämmön avulla.

Lähtökohtana hartseja valittaessa oli, että ne ovat H-lämpöluokan hartseja. Tutkittaessa vaihtoehtoja tutkinnan alla oli vaihtoehdot joiden pitäisi soveltua ilman suurempia muutoksia nykyiseen prosessiin. Vaihtoehtojen soveltuvuudet perustuvat valmistajilta saatuihin tietoihin, sähköpostikeskusteluihin sekä

tapaamisiin. Tärkeitä ominaisuuksia hartsia valittaessa on läpimenoaika, hinta, ominaisuudet ja yrityksen luotettavuus.

6.1 Hartsit 1

Hartsit on markkinoilla suhteellisen uusi vaihtoehto, se on ollut tuotannossa vasta 3-4 vuotta. Hartsivaihtoehto 1 on huoneenlämpötilassa matalaviskositeettinen, joten esilämmitys prosessi ei välttämättä ole tarpeellinen. Parhain kyllästystulos saavutetaan korkeammassa 160 °C uunituslämpötilassa. Hartsit on VOC-vapaa. Tätä vaihtoehtoa kannattaa tutkia tarkemmin, käytännön testien avulla.

Läpimenoaika = kastoaika + valutusaika + kovettumisaika

Läpimenoaika (150 °C) = 12 + 12 + 120 = 144 min

Läpimenoaika (160 °C) = 12 + 12 + 60 = 84 min

Suosittelava uunituslämpötila on 150 °C ja aika 2 tuntia. Uunitus voidaan tehdä myös korkeammassa tai matalammassa lämpötilassa. Kastoaika määräytyy sen mukaan milloin ei enää tule kuplia kastoaltaassa olevista käämikomponenteista. Hartsaushäkki voidaan laittaa uuniin heti kun valuminen loppuu.

Edut:

- hinta
- VOC-päästöt
- ominaisuudet
- uunitusajat

Haitat:

- referenssit.

6.2 Hartsit 2

Hartsit 2 on yksikomponenttinen tyydyttymätön polyesterihartsi. Hartsivaihtoehto 2 on ollut markkinoilla jo 10 vuotta ja se on käytössä myös Suomessa vastaavanlaisessa muuntajien kyllästyksessä. Hartsi on VOC-vapaa. Johtuen hartsin korkeasta viskositeetistä, esilämmitys on suositeltavaa, mutta ei pakollista. Tässä vaihtoehdossa myös hartsin lämmittäminen on mahdollista sen erinomaisen säilyvyyden johdosta. Tarkemmat testit kertovat, onko hartsin tunkeutuma riittävä. Hartsin valmistajalla on erinomainen tekninen tukipalvelu ja he ovat valmiita auttamaan esimerkiksi uunituslämpötilojen optimoinnissa. Kovettunutta hartsia voidaan lähettää valmistajalle analysoitavaksi ja siten saada tietoa, onko polymerointiprosessi mennyt loppuun asti. Jos polymerointiprosessi on mennyt loppuun asti, niin silloin ei käämikomponentteja kannata pitää enää uunissa. Vaihtoehdolla 2 hartsattaessa on vältettävä horisontaalisesti tasaisten pintojen muodostumista, koska silloin hartsauksesta tulee näihin kohtiin hauras. Käämikomponentit olisi ripustettava hartsaushäkkeihin vähintään 5 asteen kulmaan. Näin hartsi valuu tasaisesti jokaiselle pinnalle ja saavutetaan parhain kyllästystulos. Johtuen korkeasta viskositeetistä käämikomponenttien upotus- ja valutusaika on suhteellisen pitkä. Valutusaikaa voi lyhentää puhaltamalla kuumaa noin 90-100 °C ilmaa käämikomponentteihin. Näin estetään hartsin valuminen kuivatusuuneihin. Tätä vaihtoehtoa kannattaa tutkia tarkemmin käytännön testien avulla.

Läpimenoaika = kastoaika + valutusaika + kovettumisaika

Läpimenoaika (150 °C) = 45 min + 60 min + 150 min = 225 min

Läpimenoaika (160 °C) = 45 min + 60 min + 120 min = 195 min

Läpimenoaika (170 °C) = 45 min + 60 min + 75 min = 180 min

Edut:

- varastointiaika
- stabiilisuus korkeissa lämpötiloissa
- tekninen neuvonta
- referenssit

- syttymätön

Haitat:

- viskositeetti huoneenlämmössä

- läpimenoajat.

6.3 Hartsit 3

Vaihtoehto 3 on yksikomponenttinen epoksihartsi ja se on ollut markkinoilla noin 4 vuotta. Epoksihartsit vaativat pidemmän uunitusajan kuin tyydyttymättömät polyesterihartsit. Johtuen korkeasta viskositeetistä esilämmitys suositeltavaa, mutta ei pakollista. Hartsi on suunniteltu tyhjiöhartsaukseen, mutta soveltuu myös kastoallasprosessiin. Tämä vaihtoehto on vertailu kohde testejä tehdessä, saadaan tietoa onko epoksien ominaisuudet todella niin hyviä kuin luvataan. Tätä vaihtoehtoa kannattaa tutkia tarkemmin käytännön testien avulla.

Läpimenoaika (xxx °C) = kasto aika + valutusaika + kovettumisaika

Läpimenoaika (140 °C) = 30 + 30 + 420 = 480 min

Läpimenoaika (150 °C) = 30 + 30 + 240 = 300 min

Läpimenoaika (165 °C) = 30 + 30 + 100 = 160 min

Edut:

- epoksien erinomaiset ominaisuudet

- hinta

- syttymätön

- pitkät uunitusajat

Haitat:

- referenssit

- kova pinta(epokseilla ominaista)

- terveyden kannalta hankalampi kuin polyesterit.

6.4 Hartsit 4

Hartsivaihtoehto 4 on yksikomponenttinen tyydyttymätön polyesterihartsit. Tuote on ollut markkinoilla 10 vuotta, joten se on käytössä monissa vastaavissa yrityksissä. Johtuen hartsin korkeasta viskositeetista, siihen on lisätty 5 prosenttia vinyylitolueenia alentamaan viskositeettia ja parantamaan sen käytettävyyttä Tätä vaihtoehtoa kannattaa tutkia tarkemmin käytännön testien avulla. Tästä vaihtoehdosta on saatavilla myös liuotinvapaa vaihtoehto.

Läpimenoaika (xxx °C) = kastoaika + valutusaika + kovettumisaika

Läpimenoaika (130 °C) = 15 – 30 min + 15 – 30 min + 120 min = 150 - 180 min

Läpimenoaika (150 °C) = 15 - 30 min + 15 - 30min + 60 min = 90 min -120 min

Edut:

- aikaisemmat kokemukset valmistajasta
- tekninen neuvonta
- läpimenoajat

Haitat:

- kallein vaihtoehto
- sisältää hieman vinyylitolueenia, VOC-päästöt.

6.5 Hartsit 5

Hartsausainevaihtoehto 5 on tyydyttymätön polyesterihartsit. Korkeasta viskositeetista johtuen se ei suoraan sovellu nykyiseen prosessiin. Vaihtoehto 5 on suunniteltu valutus prosessiin, joten nykyisessä prosessissa hartsia valuu paljon hukkaan. Tätä vaihtoehtoa ei kannata testata tarkemmin.

6.6 Hartsit 6

Hartsivaihtoehto 6 kaksikomponenttinen epoksihartsi. Tämä hartsi ei täytä Kempin Oy:n H-lämpöluokan eriste vaatimusta. Tätä vaihtoehtoa ei kannata testata tarkemmin.

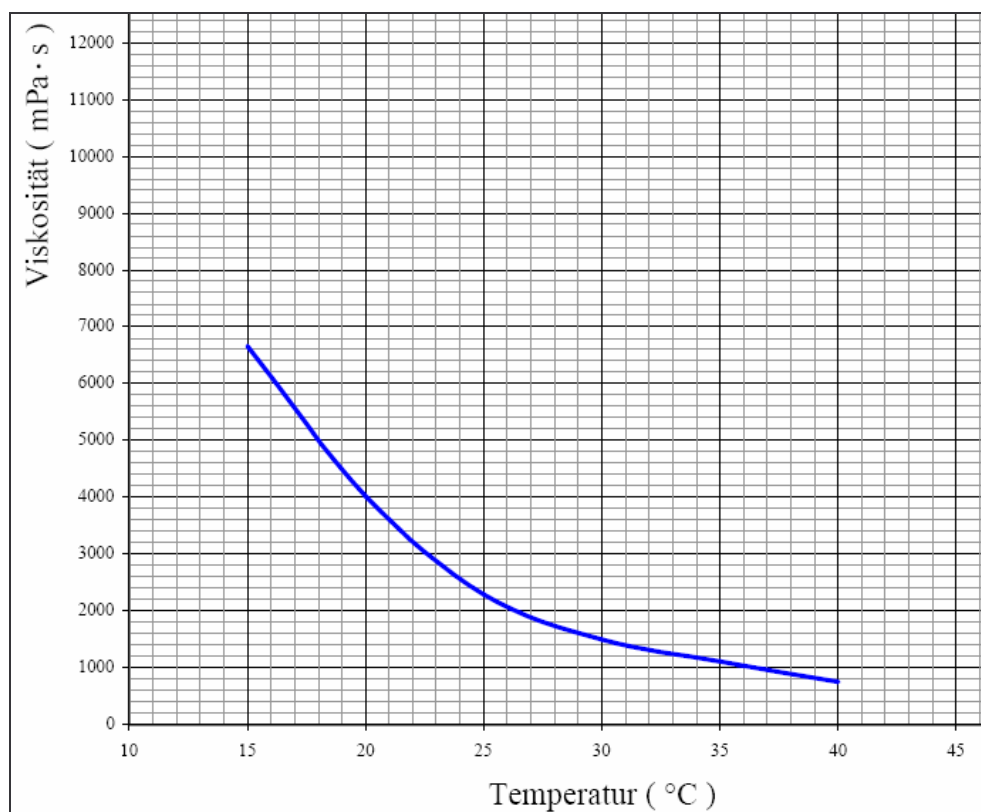
6.7 Muutokset prosessiin

Liutinvapaita hartsivaihtoehtoja saattavat vaatia erilaisia prosessimuutoksia nykyiseen prosessiin, jotta saavutettaisiin paras mahdollinen kyllästystulos. Tässä kappaleessa käydään läpi muutoksia, joiden avulla voidaan parantaa kyllästystulosta ja saada paras mahdollinen hyöty liutinvapaita hartsivaihtoehtoja. Liutinvapaiden hartsien korkeasta viskositeetistä johtuen, jos niitä hartsataan huoneenlämpötilassa niin silloin niihin tulee paksu kerros hartsiä. Uuniin laitettaessa hartsin viskositeetti alenee, ja koska sitä on niin paljon käämikomponentissa, sitä valuu uuneihin.

6.7.1 Kyllästettävien kappaleiden esilämmitys

Johtuen liutinvapaiden hartsien korkeasta viskositeetista voidaan viskositeettia alentaa esilämmittämällä pinnoitettavia kappaleita ennen kastoamista. Esilämmityksen avulla voidaan myös parantaa pinnoitteen tarttuvuutta kappaleen pintaan. Esilämmittämällä kappale ensin noin 100 °C lämpötilaan saadaan siitä pois kosteus ja muita haihtuvia ainesosia. Ennen kuin kappaleet laitetaan kastoaltaisiin, on niiden lämpötilan laskettava riittävän alhaiseksi, ettei pääse tapahtumaan hartsin ennen aikaista kovettumista kastoaltaissa. Usein riittävä tunkeutuma kyllästettävän kappaleen rakenteisiin saavutetaan 30-40 °C:n lämpötilassa. Valmistajilta on saatavilla viskositeettikäyriä, joissa ilmenee viskositeetin suhde lämpötilaan. Esilämmitys tapahtuu joko uuneilla tai lämpöpuhaltimilla ennen kuin kyllästettävät kappaleet laitetaan kastoaltaisiin.

Esilämmityksen avulla kastoaltaissa olevan hartsin viskositeetin säätäminen ei ole niin tärkeää kuin nykyisessä prosessissa. Esilämmitetty (30-40 °C) muuntaja kastetaan kastoaltaaseen ja sen ympäröimän hartsin viskositeetti alenee ja siten tunkeutuvuus rakenteisiin paranee. Huomioitavaa on, ettei hartsin lämpötila pääse kasvamaan liian suureksi, koska hartsin elin-ikä laskee lämpötilan noustessa. Kuvassa 20 on erään hartsin viskositeettikäyrä ja siitä huomataan, että riittävä viskositeetin alenema saavutetaan 30–40 °C:n lämpötilassa. /18/



Kuva 20 Viskositeettikäyrä

6.7.2 Uunituslämpötilan nostaminen

Uunituslämpötilojen nostaminen tulee silloin kysymykseen, kun tarvitaan nopeampia läpimenoaikoja. Uunituslämpötiloja nostamalla hartsin kovettumisreaktio tapahtuu nopeammin, ja läpimenoaika lyhenee. Varsinkin epoksihartsit vaativat pidempiä uunitusaikoja ja korkeampia uunituslämpötiloja

verrattuna tyydyttymättömiin polyesterihartseihin. Uunituslämpötilojen nostaminen nykyisestä 140 °C:sta lämpötilasta 160 °C:een nostaa arviolta sähkön kulutusta noin 10 %. Uunituslämpötiloja nostettaessa on varmistettava muuntajien ja kuristimien raaka-aineiden lämmönkesto. Ferriittimuuntajissa kriittisiä kohtia ovat ferriittien liimaukset ja eristeteippien kestävyys yli 140 °C:een lämpötilassa. /21/

Uunien vastusten kunto kannattaa tarkastaa ennen uunituslämpötilojen nostamista.

6.7.3 Hartsin lämmityslaitteisto

Halvempi ratkaisu esilämmityslaitteistolle on kastoaltaissa olevan hartsin lämmitys. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että aina kun hartsin lämpötila nousee 10 °C:een, niin hartsin elinikä laskee puolella. Jos hartsin elinikä on 23 °C asteessa 6 kk, niin 33 °C:ssa se on enää 3 kk. Tämä ei haittaa, jos hartsin vaihtuvuus on riittävän suuri, vähintään 15 % kokonaistilavuudesta kuukaudessa. Yleisesti kastoallasprosesseissa on jäähdytysjärjestelmät, mutta ei hartsin lämmitysjärjestelmää. Joillakin hartseilla kriittinen lämpötila on noin 40 °C. Tämän jälkeen ne eivät säily enää vaan alkavat vanheta. /22/

6.7.4 Puhallin kaston jälkeen

Hartsia valuu uuniin aina jonkin verran, koska hartsin viskositeetti alenee eli hartsit muuttuu juoksevaksi lämmön noustessa. Hartsin valuminen uuneihin voidaan välttää valutusvaiheessa puhaltamalla kuumaa noin 90-100 °C:n ilmaa. Tällöin hartsin ulkopinta muuttuu geelimäiseksi, vaikka muuntajien rakenteissa hartsit olisivat vielä juoksevia. Hartsin hyytymisaika vaikuttaa merkittävästi tähän valumiseen, uusilla liuotinvapailta hartseilla hyytymisaikat ovat merkittävästi alempia kuin liuotinpohjaisilla hartseilla.

6.8 Yhteenveto hartsivaihtoehtoista

Taulukko 13 Vertailutaulukko

	paino- arvo	Hartsi 1	Hartsi 2	Hartsi 3	Hartsi 4	nykyinen
ominaisuudet	20 %	9	7	6	8	7
hinta	20 %	8	8	8	7	10
valmistaja	20 %	8	10	7	9	8
soveltuvuus	20 %	9	6	6	9	9
ympäristöystävällisyys	20 %	9	9	9	8	4
keskiarvo		8,6	8	7,2	8,2	7,6

Hyväksytyjä hartsivaihtoehtoja on vertailtu taulukossa 13. Ominaisuudet käsittävät hartsin tekniset ominaisuudet, läpimenoajat ja varastointiajat. Hintaa on verrattu nykyisen hartsin hintaan. Liuotinvapaat vaihtoehdot ovat hieman kalliimpia kuin nykyinen hartsi. Valmistaja -kohdassa on arvioitu hartsi valmistajan luotettavuutta ja teknisen tuen laatua. Soveltuvuus kohdassa on arvioitu hartsin soveltuvuutta nykyiseen prosessiin. Periaatteessa kaikki vaihtoehdot soveltuvat sellaisenaan nykyiseen prosessiin, mutta vaihtoehtoista 2 ja 3 saadaan varmuus vasta käytännön testien perusteella. Ympäristöystävällisyyteen vaikuttavat VOC-päästöt. Muut vaihtoehdot ovat VOC-vapaita paitsi vaihtoehto 4, joka on VOC-minimoitu.

7 TESTAUS

Hartsin soveltuvuus käämikomponenttien kyllästämiseen on aina tapauskohtaisesti tarkistettava. Ei riitä pelkästään valmistajien ilmoittamat arvot ja testit. Vertaamalla nykyistä ja uusia hartsivaihtoehtoja saadaan tärkeää ja vertailukelpoista tietoa testien avulla. Testauksilla pyritään löytämään paras vaihtoehto juuri Kempin käyttötarkoituksiin. Testauksella on suuri merkitys hartsia valittaessa, ja testauksen jälkeen voidaan tehdä vasta lopullinen päätös mahdolliselle hartsin valinnalle. Vanhojen testien ajankohtaisuus ja soveltuvuus

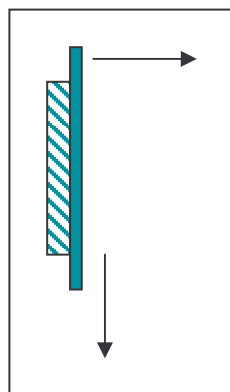
nykypäivän vaatimuksiin todettiin vajavaiseksi, joten pitäisi kehittää uudet testit. Aikataulujen ja resurssien takia todettiin, että kunnollisten testien kehittäminen ja tekeminen vaatii niin paljon aikaa ja resursseja, joten ne jätettiin tämän päättötyön ulkopuolelle. Testien tekeminen samoissa olosuhteissa on edellytyksenä siihen, että testit ovat vertailukelpoisia keskenään.

Testattavat parametrit hartseille Kemppi Oy:ssa /3, 16/

Testauksella pyritään löytämään hartsivaihtoehtojen mahdolliset heikkoudet ja vahvuudet. Testauksella varmistetaan, että löydetään juuri oikea vaihtoehto Kempin käämikomponenttirakenteille. Yksityiskohtaisempiin testausmenetelmiin ei oteta tässä työssä kantaa vaan parametreihin joita testauksessa tulisi tehdä.

Sitovuus

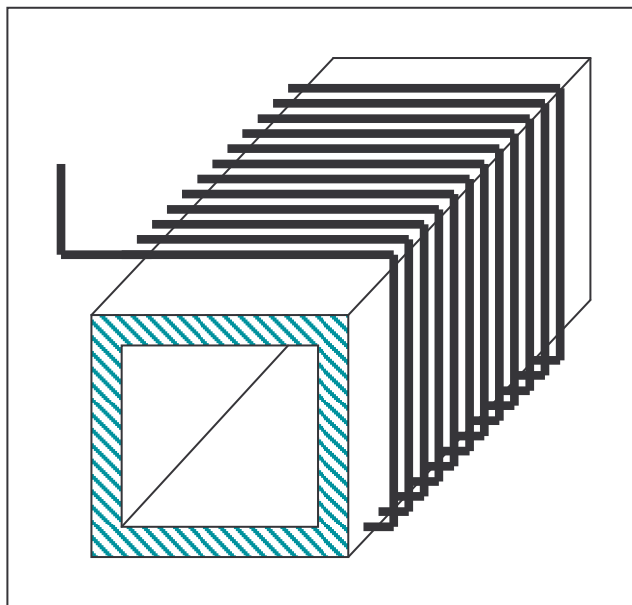
Sitovuutta mitataan yleensä erilaisin vetokokein. Kuvassa 21 on eräänlaisen vetokokeen toimintaperiaate. Hartsataan muuntajalevyypakkaan lasikuitutikkuja ja vedetään irti. Kohtisuoraan muuntajalevyypakkaa kohden vedettäessä saadaan leikkausvoima, ja muuntajalevyypakan suuntaisesti vedettäessä saadaan repimisvoima. Mittaukset pitää tehdä myös korotetuissa lämpötiloissa, koska käämikomponentit lämpenevät käytössä yli 100 °C:een. Testattavat hartsit ovat H-lämpöluokan hartseja niin silloin niillä pitää olla tietyt ominaisuudet vielä 180 °C lämpötilassa. Hartsin sitovuus heikkenee lämpötilan noustessa. Irtoamisvoima mitataan anturilla. Alla olevassa kuvassa on vetokokeen toimintaperiaate.



Kuva 21 Vetokoe

Kuvassa 22 on kuvattu tilannetta, jossa käämilankaan on hartsattu kelakotelon ympärille. Mittaus voidaan tehdä joko vetämällä käämilankaa tai pudottamalla punnusta tietyltä korkeudelta. Voima, jolla käämilanka irtoaa kelakotelosta, voidaan mitata. Koe on tärkeää tehdä 180 °C lämpötilassa. Käytössä käämikomponentit lämpenevät.

Samassa kokeessa voidaan myös tutkia hartsin imeytyvyyttä tietynkokoisiin rakoihin laittamalla kelakotelon ja käämilangan väliin esimerkiksi teipinpalasia.



Kuva 22 Vetokoekappale

Veden imeytyminen

Harts valmistajat ilmoittavat veden imeytyvyyden tietolomakkeessa. Jos kyllästetty kappale imee vettä, niin se muuttuu enemmän tai vähemmän sähkönjohtavaksi.

Korroosiokesto

Korroosion esto on hartsin tärkeimpiä tehtäviä käämikomponenteissa. Hitsauskoneita käytetään erilaisissa olosuhteissa ja ne altistuvat suolavedelle ja kosteudelle esimerkiksi telakoilla. Koekappaleita voidaan altistaa korotetussa lämpötilassa olevassa suolavesiliuoksessa. Koekappaleet ovat sykleittäin liuoksessa ja ilmassa altistuen liuoksen ilmankosteudelle. Koe voidaan tehdä myös ns. aggressiivisessa liuoksessa, jolla simuloidaan ulkoilman, sadeveden ja suolaveden vaikutusta.

Sähköiset ominaisuudet

Muuntajien ja kuristimien pinnoitteella pitää olla tiettyjä sähköisiä ominaisuuksia. Sähköisten ominaisuuksien ymmärtämiseen tarvitaan sähkötekniistä osaamista, joten sähköisten ominaisuuksien testaamiseen ei oteta tarkemmin kantaa tässä työssä.

Imeytyvyys ja tunkeuma

On erittäin tärkeää, että hartsi pääsee tunkeutumaan muuntajien ja kuristimien pienimpiin rakoihin. Näin vältetään korrosio ja saavutetaan mahdollisimman pitkä käyttöikä käämikomponenteille. Hartsin imeytyvyyttä voidaan testata tekemällä koekappaleita, joissa on erikokoisia rakoja ja näin tutkia hartsin tunkeutuvuutta. Liuotinvapaiden hartsien viskositeettiä voidaan alentaa joko lämmittämällä koekappaleita tai hartsia. Näin voidaan tutkia viskositeetin vaikutusta hartsin tunkemaan erikokoisiin rakoihin.

Joustavuus

Invertterimuuntajissa hartsi sitoo ferriitit kelakoteloon. Kovettunut hartsi ei saa olla liian kova, koska silloin se ei joustaa hitsauskoneen kaatuessa tai pudotessa. Sopivan joustava hartsaus sitoo ferriitit kelakoteloon ja joustaa mahdollisissa iskuissa paremmin kuin erittäin kova hartsaus. Hartsin valmistajat ilmoittavat yleisesti hartsien kovuuden Shore D-kovuusasteikolla. Epoksihartseilla

ongelmaksi saattaa muodostua liian kova pinta, joka ei kestä iskuja niin hyvin kuin joustava pinta. Käämikomponentteja käsitellään myös hartsauksen jälkeen ja siten olisi suotavaa, että hartsi ei olisi liian kovaa. Tämä saattaa vaikeuttaa hionnassa ja kytkettäessä kaapelikenkiä muuntajiin.

Tärinä ja iskunkesto

Ferriittimuuntajissa hartsi sitoo lopullisesti ferriitit kelakoteloon. Hartsin sitovuutta voidaan kokeilla erilaisilla iskukokeilla, jossa isku kohdistetaan ferriitteihin ja voima, jolla ferriitit irtoavat kelakotelosta mitataan. Pudotuskoe on hieman epämääräinen, koska jos muuntajia pudotetaan niin silloin ei tiedetä, missä asennossa muuntajat putoavat, vaan ne osuvat aina hieman eri asennossa maahan. Isku- tai heilurikokein saadaan isku suoritettua aina samaan kohtaan ja siten saadaan vertailukelpoista tietoa.

Häviöt ja lämpöjaksotus

Nykyisellä hartsilla on aika suuret häviöt uunituksen aikana johtuen vinyylitolueenin haihtumisesta. Uusien liuotinvapaiden hartsien häviöt ovat selvästi pienemmät noin 5-10 prosentin luokkaa. Uunituksen aikaisia häviöitä voidaan mitata punnitsemalla esimerkiksi muuntaja ennen kuin se laitetaan uuniin ja sen jälkeen.

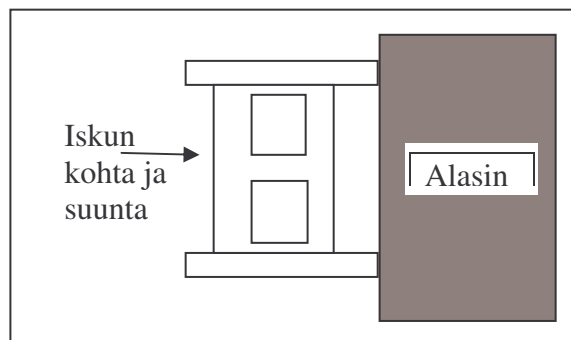
Punnitsemalla muuntaja kyllästyksen jälkeen ja tämän jälkeen tekemällä lämpövanhennus tehostetuissa olosuhteissa, antaa jonkinlaista kuvaa pinnoitteen pysyvyydestä muuntajissa. Korotetuilla olosuhteilla simuloidaan käytännön olosuhteita ja käyttöolosuhteita. Lämpövanhennuksessa muuntajia kuormitetaan sähkövirralla, jolloin ne lämpenevät 180 °C lämpötilaan. Muuntajia kuormitetaan sykleittäin siten, että ne välillä jäähdytetään pakkasenpuolelle. Lämpövanhennus kestää joko 1000 tai 2000 tuntia Kemppi -standardin mukaan.

Kemikaalikesto

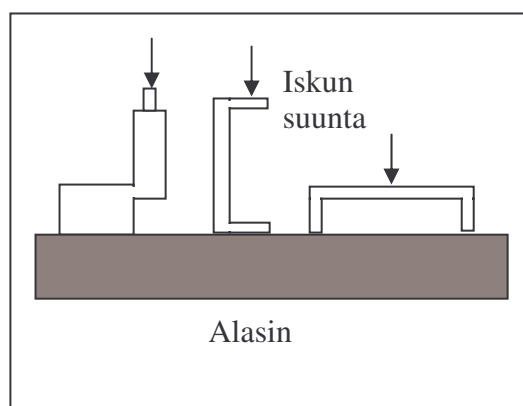
Kemikaalinkesto on yleisesti ottaen hyvä polyesteri ja epoksihartseilla. Hartsien valmistajat ilmoittavat kemikaalien keston yleisesti tietolomakkeessa, joka pohjautuu ISO 175 -standardiin. Hitsauskoneet eivät varsinaisesti suoraan altistu kemikaaleille, koska niissä roiskeveden kestävä kotelo vaan niiden höyryille.

Hartsin vaikutus kelakoteloihin

Hartseilla saattaa olla mahdollisesti haurastava vaikutus kelakoteloihin. Kyllästettyjä kelakoteloita testataan erilaisin iskukokein. Vertailukappaleina käytetään kyllästämättömiä kelakoteloita. Aikaisemmissa testeissä ei ole huomattu hartsilla olevan haurastavaa vaikutusta kelakoteloihin. Iskuvasara ja jousivarakokeiden toimintaperiaate on esitetty kuvissa 23 ja 24.



Kuva 23 Iskuvasarakoe



Kuva 24 Jousivarakoe

8 TULOKSET

Liuotinvapailla hartsivaihtoehdoilla saavutetaan merkittäviä parannuksia ympäristönsuojelun kannalta, koska VOC-päästöjä ei ole lainkaan tai merkittävästi vähemmän kuin nykyisessä hartsissa. Liuotinvapaissa hartseissa hävikki on merkittävästi pienempi kuin nykyisessä vaihtoehdossa ja siten kulutus saattaa jopa pienentyä. Vaihtoehtojen tarkempaa soveltuvuutta on vaikea sanoa ilman minkäänlaisia käytännön testejä. Hartsivaihtoehdot saattavat vaatia muutoksia prosessiin, mutta muutosten avulla saadaan parannettua kyllästystulosta ja paras hyöty irti liuotinvapaista hartsivaihtoehdoista.

Liuotinvapaiden hartsien korkeasta viskositeetistä johtuen, huoneenlämpötilassa tapahtuvalla hartsauksella ei saada parasta hyötyä irti. Hartsia tulee kyllästettävän kappaleen pinnalle paljon ja uuniin laitettaessa ylimääräinen hartsi valuu uunien pohjalle. Tämän takia esilämmitysprosessin avulla saadaan alennettua viskositeettia käämikomponenttien ympärillä ja siten minimoitua hävikkiä. Optimaalinen prosessimuutos olisi muuntajien esilämmityslaitteiston hankkiminen. Riittävä esilämmitys on noin 30-40 °C. Näin saavutetaan tasalaatuinen kyllästystulos läpi vuoden. Kastoaltaissa olevan hartsin lämpötilalla ei ole niin väliä, kunhan sen lämpötila ei pääse nousemaan liian korkeaksi. Kastettaessa esilämmitettyjen käämikomponenttien ympärillä olevan hartsin viskositeetti on aina samalla tasolla ja kyllästystulos sama.

Neljää ensimmäistä hartsivaihtoehtoa kannattaa testata tarkemmin ja siten saada varmuus niiden soveltuvuudesta juuri Kemppi Oy:n käyttötarkoituksiin. Vaihtoehto 1 vaikuttaa parhaimmalta vaihtoehdolta esikartoituksessa. Vaihtoehto 4 on potentiaalinen vaihtoehto, mutta se vertailun kallein vaihtoehto. Vaihtoehdot 2 ja 3 ovat hieman kysymysmerkkejä johtuen niiden korkeasta viskositeetistä ja niiden soveltuvuutta olisi tutkittava tarkempien käytännön testien avulla.

Hartsin lopulliseen valintaan vaikuttaa monia tekijöitä, testeissä paras vaihtoehto ei välttämättä ole lopullinen valinta. Hinta on merkittävässä roolissa valintaa

tehdessä sekä valmistajan luotettavuus. Näitä asioiden summana voidaan tehdä lopullinen valinta.

Päädettäessä hankkimaan käämikomponenttien esilämmityslaitteisto niin silloin hartsivaihtoehtoja löytyy markkinoilta useilta eri valmistajilta. Silloin kannattaa ottaa testeihin hieman erivaihtoehtoja mitä nyt tässä työssä on käyty läpi. Kaikki hyväksytyt neljä vaihtoehtoa soveltuvat hartsaamiseen ilman esilämmitystä tai hartsin lämmitystä, mutta joillain hartseilla tunkeutuvuus voi olla heikko huoneenlämpötilassa (23°).

Tulevaisuudessa tullaan luultavasti siirtymään liuotinvapaisiin hartsivaihtoehtoihin tulevien ympäristönsuojelulakien johdosta, joka rajoittaa liuotainainepitoisuuksia tietyissä teollisissa tuotteissa. Testien tekeminen vaatii paljon aikaa ja resursseja, joten on hyvä olla ajan tasalla markkinoilla olevista vaihtoehdoista ja mahdollisista muutoksista ympäristölakeihin.

LÄHTEET

Painetut lähteet

- 1 Airasmaa et al, Lujitemuovitekniikka, Arvi A. Karisto kirjapaino, Hämeenlinna 1984.
- 2 ALBESIANO SISA Vercini, Vacuum Pressure Impregnation Resins, Selection Chart.
- 3 Kemppi Oy, arkistot, vanhat testit.
- 4 Kulju, Alvar, Muovien teknologia, Werner Söderström osakeyhtiö, Porvoo 1965.
- 5 Licari, J.J, Coating Materials for Electronic Applications –Polymers, Processes, Realibility, Testing. 2003 William Andrew Publishing/Noyes, 547 s.
- 6 Metalliteollisuuden Keskusliitto MET, Raaka-aine käsikirja: Muovit ja Kumit. Tammer-Paino Oy, Tampere 2001.
- 7 Seppälä, Jaakko, Polymeerikemia. Valopaino Oy. Helsinki 2003
- 8 Suni, Kimmo, Hartsaamon Toimintaselostus ja käyttöohje, INDEL Automation Oy 2002.
- 9 Tarvainen, Kyllikki, Occupational dermatoses from plastic composites based on polyester resins, epoxy resins and vinyl ester resins, Finnish Institute of Occupational Health, Helsinki 1996.

Sähköiset lähteet

- 10 SATOMER Company, Reducing styrene emissions with multifunctional acrylic monomers, [pdf-dokumentti]. [viitattu 15.4.2006]. Saatavissa: <http://www.sartomer.com/wpapers/5515.pdf>.
- 11 Työterveyslaitos, Kemikaalit ja työ, [verkkokirja]. [viitattu 6.3.2006]. Saatavissa: <http://www.ttl.fi/Internet/Suomi/Aihesivut/Kemikaaliturvallisuus/Kemikaalit+ja+tyo/>.
- 12 University of Maryland, [www-sivu]. [viitattu 31.3.2006] Saatavissa: [http://www.calce.umd.edu/general/Facilities/Hardness_ad .htm#1](http://www.calce.umd.edu/general/Facilities/Hardness_ad.htm#1).
- 13 Valtioneuvoston asetus orgaanisten liuottimien käytöstä eräissä toiminnoissa ja laitoksissa aiheutuvien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöjen rajoittamisesta 25.5.2001/435.
- 14 VOC-selvitys Kokkolassa, [www-sivu]. [viitattu 6.4.2006] Saatavissa: <http://www.kokkola.fi/tekninen/Kaupunkiymparisto/ymparisto/VOC-selvitys%20Kokkolassa.pdf>.
- 15 Ympäristöministeriö, Suomen VOC-päästöt vähentyneet oletettua vähemmän, [www-sivu]. [viitattu 16.4.2006] Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=72183&lan=fi>.

Painamattomat lähteet

- 16 Aaltonen, Lasse, tuotekehityspäällikkö. Keskustelut maaliskuu-huhtikuu 2006. Kemppi Oy, Lahti.
- 17 Forsback, Raimo, rakennesuunnittelija. Keskustelu 15.4.2006. Kemppi Oy. Lahti.
- 18 Hakomäki, Ari, Hartsien soveltuvuus. [sähköpostiviesti] 26.4.2006.
- 19 Kytönummi, Matti, sähkömies. Keskustelu 20.4.2006. Kemppi Oy. Lahti.
- 20 Lindsted, Carola. Hartsit. [sähköpostiviestit] 1.3-1.5.2006.
- 21 Paakkunainen, Reijo, laitoshuoltomies. Keskustelut huhtikuu 2006. Kemppi Oy. Lahti.
- 22 Rautvuori, Jyrki. Hartsit [sähköpostiviestit] 1.3-1.5.2006.
- 23 Vierailu Kemppi Oy:ssä Ari Hakomäki & Michele Aragno. Kemppi Oy. Lahti.

LIITE 1 Standardikuvaukset tietolomakkeesta

Määritelmä	Standardi	Selitys
Sidoslujuus	IEC 61033, Method A	Ilmoittaa käämin vetolujuuden eri lämpötiloissa
Sidoslujuus	IEC 61033, Method B	Missä lämpötilassa pinnoite saavuttaa kriittisen 22 N sidoslujuuden
Kovuus(Shore-D)	ISO 868, DIN 53505	Ilmoittaa huoneenlämpötilassa pinnoitteen kovuuden
Veden imeytyminen	ISO 62, Method 1	Veden imeytyminen % 96 tunnin altistamisen jälkeen
Lämmönjohtokyky	DIN 51046	W/mK
Lämmönjohtokyky	VDE0304	W/mK
Ryömyvirrankestävyys, Comparative Trackin Index	IEC 60112	Pinnoitteen pintavirtakestoisuus CTI kertoo kuinka monta voltia pinnoite kestää ennen kuin mittauselektrodien välille muodostuu sähköä johtava kanava
Sähköinenlujuus	IEC 60243- 1	Volttimäärä jolla läpilyönti tapahtuu. Ilmoitetaan kV/mm (eristeen paksuus)
Suhteellinen permittiivisyys	IEC 60250	Kuvaa eristeen permeabiliteettiä suhteessa tyhjiön permeabiliteettiin
Dielektrinen häviökerroin	IEC 60250	Kuvaa eristemuovin lämpiämistä sähkökentässä erilaisissa olosuhteissa
Ominaisvastus	IEC 60093	Ilmaisee muovipinnoitteen sähköneristyskyvyn erilaisissa olosuhteissa
Kemikaalikestävyys	ISO 175	Muovin kestävyys erilaisia kemikaaleja vastaan

Beck Electrical Insulation GmbH

Electrical Insulation System

Impregnating Resin

Dobeckan® FT 2015/60 EK

excellent mechanical properties, intrinsically viscous

Product Information

12/2005



ALTANA
Electrical Insulation

Beck Electrical Insulation GmbH
Grossmannstrasse 105
20539 Hamburg
Germany

phone: 0049-40-78946-0
fax: 0049-40-78946-349
sales@beckinsulation.com
www.beckinsulation.com

Product description

Dobeckan® FT 2015/60 EK is a one-component electric insulating impregnating resin which is easy to process for a wide range of impregnating applications throughout the electrical engineering industry.

Dobeckan® FT 2015/60 EK is also available in an intrinsically viscous version with reduced drip losses.

As base resin an unsaturated polyesterimide is used which is distinguished by very good thermal endurance in the cured state.

Since base resins are frequently solid or very highly viscous they are therefore dissolved in reactive thinners. In this case, vinyl toluene is used as the reactive thinner which reacts on account of its reactive double linkage with the resultant cured material.

Polymerisation is initiated by the effect of heat and proceeds as a rapid chain-reaction until a three-dimensionally cross-linked, duroplastic cured material is produced.

Areas of application

Preferred applications for Dobeckan® FT 2015/60 EK impregnating resin are:

- traction motors
- norm motors all sizes
- large special machines

Properties of cured resin

The hard cured material has very good mechanical and dielectric properties.

The high bonding strength of windings impregnated with Dobeckan® FT 2015/60 EK even at high temperature should be stressed in particular. The cured material also displays good resistance to solvents and their vapours, oil and other chemicals.

Owing to its high temperature index of 200-220 (according to UL = Underwriters Laboratories, USA), Dobeckan® FT 2015/60 EK can be used for machines in thermal class 200.

Under file no. E 73 288 the product has been registered with UL

Viscosity

Various limiting factors, such as the plant construction, size of objects, or different wire diameters, for example, maybe require the reduction of viscosity of Dobeckan® FT 2015/60 EK. This adjustment can simply execute by adding vinyltoluene.

Processing methods

Dobeckan® FT 2015/60 EK is processed according to all impregnating methods conventional in electrical engineering and transformer construction, such as dipping or flooding.

Owing to the low steam pressure of the vinyl toluene, impregnation under vacuum or vacuum pressure and dip-rolling of preheated components is possible.

With a resin throughput of >15% per week Dobeckan® FT 2015/60 EK can also be processed practically without restriction at 23°C.

Losses of vinyl toluene occurring during impregnation under vacuum should be replaced regularly to ensure uniform viscosity.

Since the resin is a highly reactive system, the temperature of the resin during storage and processing should not exceed 25°C.

The resin is to be protected from light.

Before relatively long rest periods the temperature of the impregnating resin in the impregnating and storage container should advantageously be cooled down to 10 – 20°C.

Properties of resin as supplied

Properties	Value	Unit
Storage time at 23 °C	≥4	Months
Appearance	trübe/turbid, bräunlich/brownish	-
Viscosity at 23 °C, Beck-test V 18 following DIN 53019	-	mPa·s
Flow time at 23 °C, Beck-test V 22 following ISO 2431	40 ±3 ; 6 mm	s; cup
Density at 23 °C , Beck-test S 11 following ISO 2811 part 2	1,06 ± 2	g/cm ³

Gelling time and curing conditions

Temperature	100	120	130	140	150	160	°C
Gel time, Beck-test H 17b	63 ± 15	-	-	-	-	-	min
Curing	-	-	4	2	1	-	h

Mechanical properties in cured condition

Test criterion	Condition	Value	Unit
Conditions in thick layer, Beck-test M 1 following IEC 60464 part 2	Upper side	S2	-
	Under side	U1	-
	Interior	I 1.1	-
Bond strength, Beck-test M 2 following IEC 61033, method A (twisted coil test)	23 °C	> 150	N
	155 °C	> 60	
	180 °C	> 50	

Temperature index

Test criterion	Limiting value	TI
Proof voltage, Beck-test M 15 following IEC 60172 (Twisted Pair)	1000 V	208
Bond strength, Beck-test M 16 following IEC 60290 (Helical Coil)	22 N	222

Dielectrical properties in cured condition

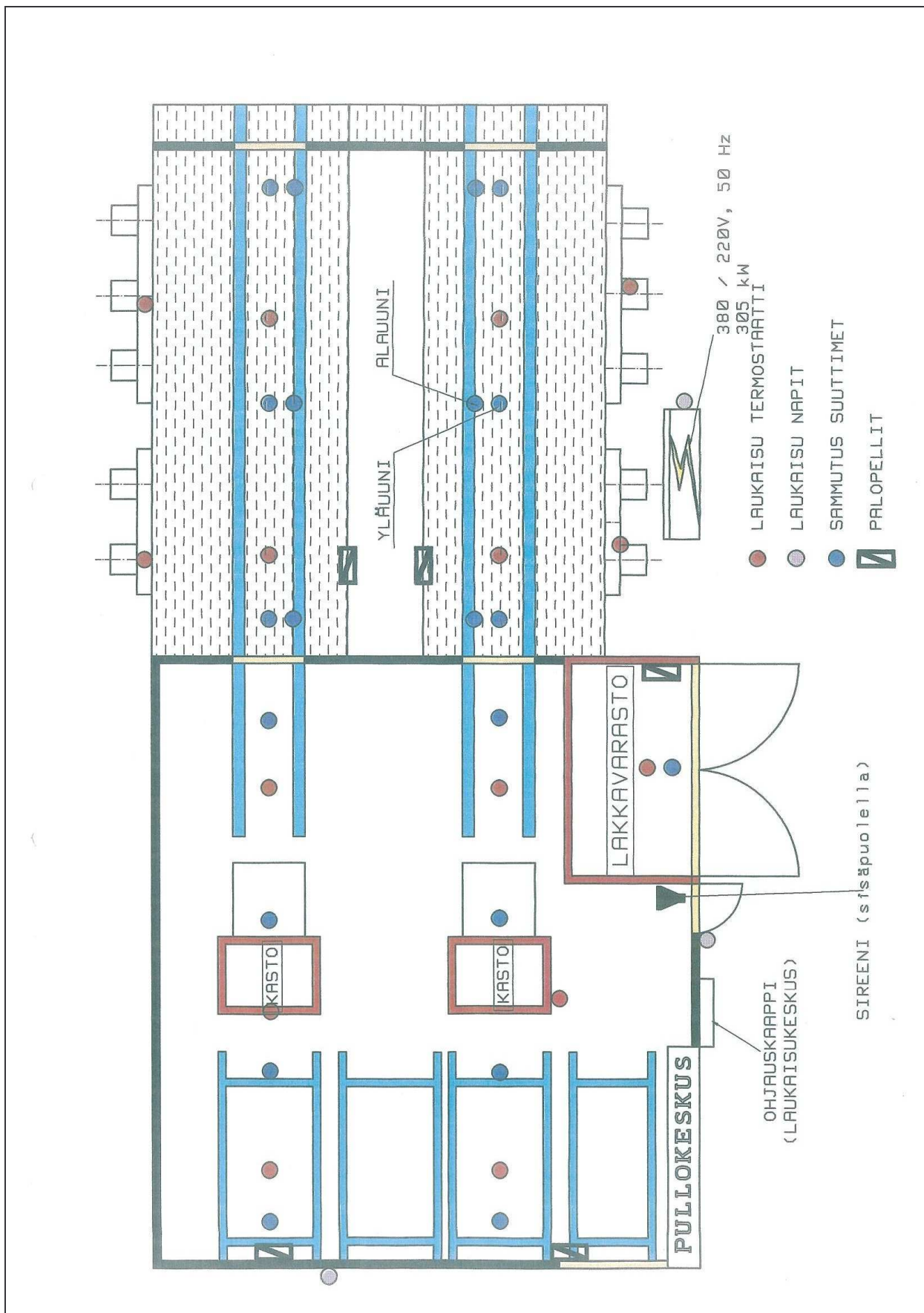
Test criterion	Condition	Value	Unit
Volume resistivity after water immersion, Beck-test M 5 following IEC 60464 part 2	Initial value	10 ¹⁷	Ω·cm
	7 d storage	10 ¹⁵	
Volume resistivity at elevated temperature, Beck-test M 13 following IEC 60464 part 2	155 °C	10 ¹¹	Ω·cm
	180 °C	-	
Electrical strenght after water immersion, Beck-test M 6b following IEC 60464 part 2	Initial value	> 100	kV/mm
	24 h storage	> 80	
Electrical strenght at elevated temperature, Beck-test M 6a following IEC 60464 part 2	155 °C	-	kV/mm
		> 60	
Temperature at relative permittivity tanδ=0,1 Beck-test M 3b following IEC 60290	50 Hz, 1 V	ca. 60	°C
	1 kHz, 1 V	ca. 80	
	10 kHz, 1 V	ca. 70	

Resistance to chemicals

Test criterion	Condition	Result, Value	Unit
Resistance to vapour of solvents after 7 d storage, Beck-test M 7 following IEC 60464 part 2	Aceton	beständig/passed	-
	Xylene	beständig/passed	
	Methyl alcohol	beständig/passed	
	Hexane	beständig/passed	
	Carbon bisulphide	beständig/passed	
Water absorption, Beck-test M 9 following ISO 62	24 h at 23 °C	< 10	mg
	0,5 h at 100 °C	< 10	
Resistance to liquids after 7 d storage, Beck-test M 10 following ISO 175	Ammonia 10 %	-	mg
	Acetic acid 5 %	< 50	
	Sodium hydroxide 1 %	-	
	Hydrochloric acid 10 %	< 20	
	Sulfuric acid 30 %	< 20	
	Iso-Octane	< 5	
	Toluol	< 50	
	Esso Univolt T 56	< 5	
	Midel 7131	< 5	
	Solution of detergent	< 200	

Our advice in application technology given verbally, in writing and by testing corresponds to the best of our knowledge and belief, but is intended as information given without oblige, also with respect to any protective rights held by third parties. It does not relieve you from your own responsibility to check the products for their suitability to the purposes and processes intended. The application, usage and processing of the products are beyond our reasonable control and will completely fall into your scope of responsibility. Should there nevertheless be a case of liability from our side, this will be limited to any damage to the value of the merchandise delivered by us. Naturally, we assume responsibility for the unobjectionable quality of our products, as defined in our General Terms and Conditions.

LIITE 3 Hartsaamon periaatekuva



LIITE 4 Valokuvia muuntajista

