



Samu Leinonen

Teollisuudessa käytettävien koteloinnilla suojattujen sähkö- ja kytkentäkaappien mekaniik- kasuunnitteluohje

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikan Insinööri

Insinöörityö

28.4.2025

Tiivistelmä

Tekijä: Samu Leinonen
Otsikko: Teollisuudessa käytettävien koteloinnilla suojattujen sähkö- ja kytkentäkaappien mekaniikkasuunnitteluohje
Sivumäärä: 42 sivua
Aika: 28.4.2025

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Konetekniikka
Ammatillinen pääaine: Koneensuunnittelu
Ohjaajat: Yliopettaja, Pekka Salonen
Department Manager of Mechanical Engineering, Laine Henri

Tässä insinööriyössä tutkittiin teollisuudessa käytettävien sähkö- ja kytkentäkaappien mekaniikkasuunnittelua ja erityisesti niihin liittyviä turvallisuusvaatimuksia. Työn tavoitteena oli luoda yksityiskohtainen suunnitteluohje, jonka avulla tehostetaan suunnittelutyötä.

Insinööriyössä selvitettiin käyttöympäristön ja olosuhteiden vaikutuksia, koteloinnin vaatimuksia, standardeja, eristemateriaaleja, virtajohtimia, jäähdytysmenetelmiä sekä lämmitystarvetta. Työ toteutettiin haastattelemalla Etteplanin asiantuntijoita sekä tutkimalla aiemmin tehtyjä projekteja sekä ajankohtaisia standardeja, joista kerättiin kaikista tärkeimmät näkökulmat yhteen ohjeeseen.

Lopputuloksena syntyi ohje, jossa käsitellyt asioita voidaan hyödyntää muistilistana sekä perehdytysmateriaalina. Ohje soveltuu kaikille teollisuuden koteloituille sähkölaitteille, joiden käyttöjännite on enintään 1500VDC tai 1000VAC.

Avainsanat: Lähtötiedot, Kotelointi, sähkökaappi, kytkentäkaappi, taajuusmuuttaja, eristyskoordinaatio, eristevälit, virtajohdin, jäähdytysjärjestelmä, lämmitystarve

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Samu Leinonen
Title: Mechanical Design Guide for Industrial Enclosed Electrical and Switchgear Cabinets
Number of Pages: 42 pages
Date: 26 April 2025

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Mechanical Engineering
Professional Major: Machine Design Engineering
Supervisors: Pekka Salonen, Senior Lecturer
Laine Henri, Department Manager of Mechanical Engineering

This Engineering thesis investigated the mechanical design of industrial electrical and switch gear cabinets, with particular focus on the safety requirements associated with them. The aim of this work was to create a detailed design guide to improve the efficiency of the design work.

The thesis covered the effects of the operating environment and conditions, enclosure requirements, standards, insulating materials, busbars, cooling methods and heating requirements. The work was carried out through interviews and research on existing projects and the latest standards, from which all the most important aspects of the design guide were collected.

As a result, a design guide was created in which the material can be used as a checklist and as teaching material. The guide is suitable for all industrial enclosed electrical equipment with an operating voltage up to 1500VDC or 1000VAC.

Keywords: Initial data, enclosure, electrical cabinet, switchgear cabinet, variable-frequency drive, insulation coordination, insulation clearances, busbar, cooling system, heating system

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Lähtötiedot	2
3	Kotelointi	3
3.1	IP-koodi ja kosketussuojaus EN-60529	4
3.1.1	IP-koodin muodostaminen	5
3.1.2	Esimerkkejä IP-koodin muodostamisesta	9
3.2	Sähkölaitteen aiheuttamat vaarat	10
3.3	Mekaaninen kestävyys ja oikosulunkestoisuus	11
4	Eristyskoordinaatio EN-IEC-60664-1	11
4.1	Eristysluokat (CTI)	11
4.2	Ylijänniteluokat (OVC)	12
4.3	Käyttökorkeuden korjauskertoimet	13
4.4	Saastetasot (PD)	14
4.5	Ilmavälit	14
4.6	Ryömintävälit	16
5	Eristemateriaalit	17
5.1	Polypropeeni (PP)	18
5.2	Polykarbonaatti (PC)	19
5.3	Nomex	20
5.4	Polyamidi	21
5.5	Eristemateriaalin paksuus	21
6	Virtajohtimet	22
6.1	Virtajohdinten materiaalit	22
6.1.1	Kupari	23
6.1.2	Alumiini	23
6.2	Virtajohdinten profiilit	24
6.2.1	Tasakisko	25
6.2.2	Pyöreä tanko	26

6.2.3	Kaapeli	26
6.3	Tukieristin	27
6.4	Virtajohtimien pintakäsittely	28
7	Jäähdytys	30
7.1	Ilmajäähdytys	31
7.1.1	Jäähdytyslementti	31
7.1.2	Jäähdytyslementin valmistaminen	32
7.2	Suljettu ilmajäähdytys (Lämmönvaihdin)	34
7.3	Nestejäähdytys	35
8	Lämmitys	36
9	Yhteenveto	37
	Lähteet	38

Lyhenteet

- IP: Ingress Protection. Koteloinnilla aikaansaatu suojaus.
- CTI: Comparative Tracking Index. Eristemateriaalin luokka sähköisiä pintapurkauksia vastaan.
- OVC: Over Voltage Category. Määrittää kuinka suuria ylijännitepiikkejä laitteen eristyksen tulee kestää.
- PD: Pollution Degree. Määrittää laitteen saastetason.
- BTU/h: British Thermal Unit per Hour. Lämpöyksikkö, joka kertoo jäähdytysjärjestelmän tehokkuuden.

1 Johdanto

Teollisuudessa käytettävät sähkö- ja kytkentäkaapit ovat olennainen osa automaatio- ja sähkönjakelujärjestelmiä. Näillä sähkö- ja kytkentäkaapeilla tarkoitetaan kaikkia sähkölaitteita, jotka ovat koteloinnilla suojattuja. Näihin kuuluvat myös esimerkiksi taajuusmuuttajat. Niiden luotettava ja turvallinen toiminta on elintärkeää prosessin toiminnan sekä ihmisten turvallisuuden kannalta. Tämän vuoksi suunnittelussa pitää huomioida useita asioita, joiden avulla saadaan varmistettua suunniteltujen laitteiden pitkäaikainen ja turvallinen käyttö.

Tämän insinööriyön tavoitteena on laatia yksityiskohtainen ohje sähkö- ja kytkentäkaappien suunnitteluun, jossa käsitellään mekaniikkasuunnittelussa huomioitavia keskeisiä näkökulmia. Tämän ohjeen avulla saadaan tehostettua suunnittelua, sillä nämä näkökulmat on koottu yhteen ohjeeseen. Ohjeen avulla saadaan myös tehostettua tarvittavaa perehdytystä, jos kyseessä on suunnittelija, jolla ei ole aikaisempaa kokemusta tämänkaltaisesta suunnittelusta.

Työssä käydään läpi käyttöympäristön ja olosuhteiden vaikutuksia, koteloinnin vaatimuksia, standardeja, eristemateriaaleja, virtajohtimia, jäähdytysmenetelmiä sekä lämmitystä. Työ on toteutettu haastattelemalla sekä tutkimalla tehtyjä projekteja, joista on kerätty tärkeimmät näkökulmat. Työ on rajattu teollisuudessa käytettäviin laitteisiin, joiden käyttöjännite on suurimmillaan 1500 VDC tai 1000 VAC. Työn rajaus perustuu toimeksiantajan tarpeisiin.

Insinööriyö on toteutettu toimeksiantona Etteplan Oyj:n Vantaan mekaniikkasuunnitteluosastolle. Vantaan osastolla toimii mekaniikkasuunnittelun lisäksi sähkö- ja automaatio-suunnittelu, joka mahdollistaa suurempien teollisuuden suunnitteluprojektien toteuttamisen saman katon alla.

Etteplan Oyj on suomalainen teknologiapalveluyritys, jonka pääalueita ovat ohjelmisto- ja sulautettujen järjestelmien ratkaisut, teollisuuden laite- ja laitossuunnittelu sekä tekninen dokumentointi. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Espoossa.

Yritys on perustettu vuonna 1983 neljän pienemmän suunnittelutoimiston yhdistymisen tuloksena. Yritys toimii kansainvälisesti ja palvelee teollisuuden johtavia yrityksiä. Yrityksellä on toimipisteitä Suomessa, Ruotsissa, Alankomaissa, Saksassa, Puolassa, Tanskassa ja Kiinassa.

2 Lähtötiedot

Lähtötiedot ovat suunnittelun kannalta keskeisiä tietoja, joiden perusteella määritellään kaikki laitteeseen liittyvät vaatimukset. Kattavien lähtötietojen avulla voidaan varmistaa, että suunniteltu laite täyttää kaikki sille asetetut tekniset ja toiminnalliset vaatimukset sekä on turvallinen käyttää sille tarkoitetuissa käyttöolosuhteissa.

Vaatimuksia laitteelle tulee muun muassa sen käyttöympäristöstä sekä käyttötarkoituksesta. Käyttöympäristö vaikuttaa muun muassa vaadittuun IP-luokkaan, eristeväleihin sekä jäähdytysmenetelmään. Esimerkiksi jos laite on määritetty käytettäväksi ulkotiloissa, täytyy laitteen IP-luokituksen olla soveltuva myös muun muassa vesisateelle. Korkeaa vesisuojausta voidaan tarvita myös sisätiloissa, jos paikkaa, johon laite asennetaan, pestään painepesurilla. Ympäristö vaikuttaa myös saastetasoon, jolla tarkoitetaan sähköä johtavan lian esiintymistä laitteen sisällä. Tämä vaikuttaa laitteessa vaadittaviin eristeväleihin.

Käyttötarkoitus vaikuttaa mm. laitteessa vaadittuun kosketussuojaukseen. Jos laite asennetaan teollisuustiloihin, joihin pääsee opastamattomia henkilöitä, on pääsy vaarallisiin jännitteellisiin osiin oltava estettynä kaikissa tapauksissa. Tämä toteutetaan käytännössä laitteen koteloinnilla, jonka ovi lukitaan avaimella tai työkalulla. Työkalulukituksella ovi tehdään esimerkiksi ruuvattavaksi tai erikoistyökalulla avattavaksi, jolloin avaaminen ei onnistu ilman työkaluja. Koteloinnissa ei saa olla suuria reikiä tai aukkoja, joista on mahdollisuus päästä käsiksi jännitteellisiin osiin. Tällöin puhutaan niin sanotusta sormisuojuksesta.

Näiden lisäksi on olemassa paljon lähtötietoja, jotka pitää ottaa huomioon. Näitä ovat esimerkiksi noudatettavat standardit, laitteen sähköiset ominaisuudet, testausvaatimukset, laitteen ulkomitat, ulkoiset sähkökytkennät, materiaalivaatimukset, asennustapa sekä laitteen jäähdytys- ja lämmitystarve (1).

Laitteille, jotka on määritetty toimivan erikoiskäyttöolosuhteissa tarvitsevat lisätarkastelua vaatimuksiin. Näitä olosuhteita ovat muun muassa olosuhteet, joissa laite altistuu vahvoille sähkö -tai magneettikentille, äärimmäisille ilmasto-olosuhteille, räjähdysvaaralle sekä voimakkaalle tärinälle. Voimakkaalle tärinälle altistuu laitteet, jotka asennetaan esimerkiksi laivoihin tai maanjäristysalueille. (2.)

3 Kotelointi

Koteloinnin tehtävänä on suojata laitteen sisällä olevia jännitteellisiä komponentteja ulkoisilta tekijöiltä. Näillä tarkoitetaan esimerkiksi olosuhteita, vieraita esineitä sekä ihmisten kosketusta. Kotelointi estää mahdolliset vahingot, jotka voisivat aiheutua esimerkiksi kosteudesta, pölystä, mekaanisista iskuista tai tahattomasta kosketuksesta jännitteellisiin osiin. Tämän lisäksi kotelointi parantaa laitteen luotettavuutta, sillä se suojaa myös sisällä olevia sähkökomponentteja korroosiolta ja kulumiselta.

Kotelointi valmistetaan usein teräksestä valmistetusta ohutlevystä, joka on kustannustehokas ja kestävä vaihtoehto mekaanisia rasituksia vastaan. Koteloinnin korroosionesto toteutetaan usein pulverimaalauksella, joka takaa pitkän suojan vaativammassakin olosuhteissa. Jos laite on osa suurempaa kokonaisuutta, ja asennetaan koteloinnin sisälle, voidaan materiaaleina käyttää myös muoveja (Kuva 1). (3.)



Kuva 1. Koteloinnin sisällä olevia koteloituja sähkölaitteita (3).

3.1 IP-koodi ja kosketussuojaus EN-60529

IP-koodi on kansainvälinen järjestelmä, jolla määritellään koteloinnin tiiviys ulkoisia uhkia vastaan. IP-luokalla ilmaistaan koteloinnilla aikaansaatu suojausaste vaarallisten osien koskettamiselta, vieraiden esineiden, pölyn ja veden sisään tunkeutumiselta. Kosketussuojauksella tarkoitetaan suojausta, jolla estetään ihmisen pääsy kosketuksiin jännitteellisten osien kanssa.

Vaatus IP-luokalle tulee sen mm. käyttöympäristöstä ja käyttötarkoituksesta. IP-luokan tarkka määrittely on tärkeää, koska sillä voidaan säästää todella paljon kustannuksissa. Jos koteloinnista tehdään täysin vesitiivis, tarvitsee se monimutkaisempia ratkaisuja verrattuna pölytiiviseen kotelointiin, nostaten laitteen kokonaiskustannuksia huomattavasti. Kuitenkin riittämättömällä IP-luokalla voidaan aikaansaada laitteesta mahdollisesti hengenvaarallinen.

Koteloinnin suojauksesta ohjeistetaan myös standardissa SFS-EN 60204-1, joka koskee koneiden sähkölaitteistoja. Siinä kerrotaan, että jännitteiset osat on sijoitettava koteloiden sisälle, jotka toteuttavat IP2X- tai IPXXB-mukaisen suojauksen. Jos koteloiden yläpintoihin pääsee helposti käsiksi, tarvitaan yläpintojen kotelointiluokaksi vähintään IP4X tai IPXXD (kuva 2). (4.)

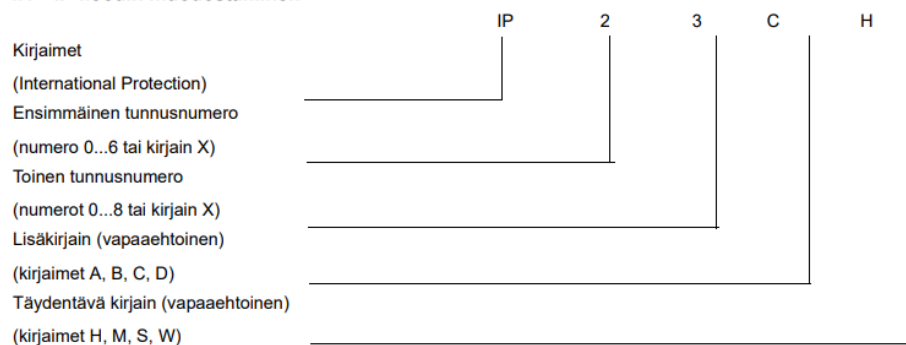


Kuva 2. IP45-luokiteltu sähkökaappi (5).

3.1.1 IP-koodin muodostaminen

IP-koodi muodostuu kirjaimista 'IP' sekä kahdesta numerosta ja tarvittavista lisäkirjaimista. Numeroiden ja kirjainten tehtävä on kertoa yksiselitteisesti koteloinnin suojausluokka ja sitä kautta sallittavat käyttöympäristöt (kuva 3).

4.1 IP-koodin muodostaminen



Kuva 3. IP-koodin muodostaminen (6).

Ensimmäisellä tunnusnumerolla kuvataan suojausta vieraiden esineiden ja pölyn sisäänpääsystä. Vierailta esineillä tarkoitetaan muun muassa ihmisen

raajoja, työkaluja sekä sähköä johtavia lankoja (kuva 4).

Koteloinnin kannalta tämä tarkoittaa sitä, ettei koteloinnissa saa olla liian suuria aukkoja tai reikiä, joista ihminen voisi päästä kosketuksiin jännitteisiin osiin. Standardissa on määritelty jokaiselle tunnusnumerolle oma koekoskettimensa, jossa halkaisija muuttuu suojausasteen kasvaessa. Käytännössä tästä koekoskettimesta saa katsottua suurimman sallitun reiän tai aukon halkaisijan koteloinnissa.

Esimerkiksi suojausasteella 2 eli sormisuojaus, saisi koteloinnissa olla suurimmillaan 12 mm reikä tai aukko. Jos reikä tai aukko on tätä suurempi, täytyisi reiästä olla 80 mm etäisyys jännitteisiin osiin.

Korkeammilla suojausasteilla koekosketin ei saa tunkeutua sisälle, joka puolestaan tarkoittaa sitä, että reikä tai aukko ei saa olla suurempi kuin ilmoitettu koekosketin.

Taulukko 1 Kotelointiluokan ensimmäinen tunnusnumero, suojaus vaarallisten osien koskettamiselta

Ensimmäinen tunnusnumero	Suojausominaisuus		Testausehdot, ks.
	Lyhyt kuvaus	Määritelmä	
0	Suojaamaton	–	–
1	Vaaralliset osat on suojattu nyrkillä koskettamiselta	Pallomaisella, halkaisijaltaan 50 mm etäisyyskoettimella on oltava riittävä etäisyys vaarallisiin osiin	12.2
2	Vaaralliset osat on suojattu sormella koskettamiselta	Nivelsormella, jonka halkaisija on 12 mm ja pituus 80 mm, on oltava riittävä etäisyys vaarallisiin osiin	12.2
3	Vaaralliset osat on suojattu työkalulla koskettamiselta	Halkaisijaltaan 2,5 mm etäisyyskoetin ei saa tunkeutua sisään	12.2
4	Vaaralliset osat on suojattu langalla koskettamiselta	Halkaisijaltaan 1,0 mm etäisyyskoetin ei saa tunkeutua sisään	12.2
5	Vaaralliset osat on suojattu langalla koskettamiselta	Halkaisijaltaan 1,0 mm etäisyyskoetin ei saa tunkeutua sisään	12.2
6	Vaaralliset osat on suojattu langalla koskettamiselta	Halkaisijaltaan 1,0 mm etäisyyskoetin ei saa tunkeutua sisään	12.2

HUOM. Ensimmäisillä tunnusnumeroilla 3, 4, 5 ja 6 vaarallisten osien suojaus toteutuu, jos riittävä etäisyys säilyy. Asianomaisten tuotekomiteoiden olisi kohdan 12.3 mukaisesti määriteltävä riittävä etäisyys.
 "Ei saa tunkeutua sisään" vaatimus on esitetty jo taulukossa 1, koska taulukossa 2 annetut vaatimukset ovat voimassa samanaikaisesti.

Kuva 4. Kotelointiluokan ensimmäinen tunnusnumero (6).

IP-luokan toisella tunnusnumerolla kuvataan suojausta vettä vastaan. Tämän numeron avulla määritellään koteloinnin sietokyky vettä vastaan. Standardissa on määritelty tunnusnumeroita esimerkiksi sateelle, vesisuihkulle, lyhytaikaiselle upotukselle sekä jatkuvalla upotukselle. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että

vesi ei saa aiheuttaa haittaa sisällä sijaitseviin sähkökomponentteihin. Tällöin veden kulkeminen koteloinnin sisälle pitää estää (kuva 5).

Esimerkiksi suojausluokalla 3, eli sadevesisuojaus, on määritelty niin, että enintään 60 asteen kulmassa satava vesi ei aiheuta haittaa laitteelle. Korkeimman suojausluokan laite voidaan upottaa kokonaan veteen pitkäaikaisesti siten, ettei koteloinnin sisälle pääse haitallista määrää vettä.

Taulukko 3 Kotelointiluokan toinen tunnusnumero, vesisuojaus

Toinen tunnusnumero	Kotelointiluokka		Testausehdot, ks.
	Lyhyt kuvaus	Määritelmä	
0	Suojaamaton	–	–
1	Suojattu pystysuoraan tippuvalta vedeltä	Pystysuoraan pisaroina tippuva vesi ei aiheuta haittaa	14.2.1
2	Suojattu pystysuoraan tippuvalta vedeltä, kun kotelointi on kallistettuna 15° asti	Pystysuoraan pisaroina tippuva vesi ei aiheuta haittaa, kun kotelointia kallistetaan enintään 15° mielivaltaiseen suuntaan pystyasentoon nähden	14.2.2
3	Suojattu satavalta vedeltä	Enintään 60° kulmassa satava vesi ei aiheuta haittaa	14.2.3
4	Suojattu roiskuvulta vedeltä	Kaikista suunnista roiskuva vesi ei aiheuta haittaa	14.2.4
5	Suojattu vesisuihkulta	Kaikista suunnista suuttimella ohjattu vesisuihku ei aiheuta haittaa	14.2.5
6	Suojattu voimakkaalta vesisuihkulta	Kaikista suunnista suuttimella ohjattu voimakas vesisuihku ei aiheuta haittaa	14.2.6
7	Suojattu lyhytaikaisen veteen upottamisen vaikutuksilta	Veteen lyhytaikaisesti upotettuun kotelointiin ei tunkeudu haitallisessa määrin vettä standardisoidussa vedenpaineessa ja upotusajassa	14.2.7
8	Suojattu jatkuvan veteen upottamisen vaikutuksilta	Valmistajan ja käyttäjän sopimissa olosuhteissa, mutta ankarammissa kuin numerolla 7, veteen upotettuun kotelointiin ei tunkeudu haitallisessa määrin vettä	14.2.8

Kuva 5. Kotelointiluokan toinen tunnusnumero (6).

Numeroiden perään tulevat lisäkirjaimet ovat vapaaehtoisia ja niitä tulee käyttää vain silloin, kun todellinen suojaus on parempi kuin suojausluokan kuvauksessa määritelty suojaus. Ensimmäisellä lisäkirjaimilla voidaan täydentää vaarallisten osien kosketussuojausta (kuva 6).

Taulukko 4 Kotelointiluokan lisäkirjain; vaarallisten osien suojaus koskettamiselta

Lisäkirjain	Suojausominaisuus		Testausehdot, ks.
	Lyhyt kuvaus	Määritelmä	
A	Suojattu nyrkillä koskettamiselta	Pallomaisella halkaisijaltaan 50 mm etäisyyskoettimella on oltava riittävä etäisyys vaarallisista osista	15.2
B	Suojattu sormella koskettamiselta	Halkaisijaltaan 12 mm ja pituudeltaan 80 mm olevalla nivelsormella on oltava riittävä etäisyys vaarallisista osista	15.2
C	Suojattu työkalulla koskettamiselta	Halkaisijaltaan 2,5 mm ja pituudeltaan 100 mm olevalla etäisyyskoettimella on oltava riittävä etäisyys vaarallisista osista	15.2
D	Suojattu langalla koskettamiselta	Halkaisijaltaan 1,0 mm ja pituudeltaan 100 mm olevalla etäisyyskoettimella on oltava riittävä etäisyys vaarallisista osista	15.2

Kuva 6. Kotelointiluokan ensimmäinen lisäkirjain (6).

Toisella lisäkirjaimella voidaan täydentää laitteen vesisuojausta sekä ilmoittaa onko kyseessä suurjännitelaitte (kuva 7).

Kirjain	Merkitys
H	Suurjännitelaitte ¹
M	Laitteen vesisuojaus on testattu laitteen liikuteltavien osien liikkeessä (esim. koneen roottorin pyöriessä)
S	Laitteen vesisuojaus on testattu laitteen liikuteltavien osien (esim. koneen roottorin) ollessa paikoillaan
W	Laitte on sopiva käytettäväksi erikseen määritellyissä sääolosuhteissa ja se on varustettu lisäominaisuudella tai käsittelyllä

¹ > 1 000 V AC tai > 1 500 V DC

Kuva 7. Kotelointiluokan toinen lisäkirjain (6).

Lisäkirjainten S ja M puuttuminen tarkoittaa sitä, että suojausluokka ei riipu siitä onko laite käynnissä vai ei. Laitteen testaaminen vain käynnissä voi riittää, jos laite selvästi täyttää vaatimukset tässä tilassa. (6.)

3.1.2 Esimerkkejä IP-koodin muodostamisesta

Tähän kappaleeseen on kerätty standardissa mainittuja esimerkkejä, jotka selventävät mitä IP-luokitus käytännössä tarkoittaa.

Esimerkiksi IP34-luokassa ensimmäinen tunnusnumero 3 tarkoittaa sitä, että kosketus vaarallisilta osilta on estetty käsiteltäessä työkaluja, jotka ovat halkaisijaltaan 2,5 mm tai sitä suurempia. Tunnusnumero 4 kertoo vesisuojauksen, joka tässä tapauksessa tarkoittaa sitä, että kaikista suunnista roiskuva vesi ei aiheuta haittaa koteloinnin sisällä olevaan laitteeseen (kuva 8).

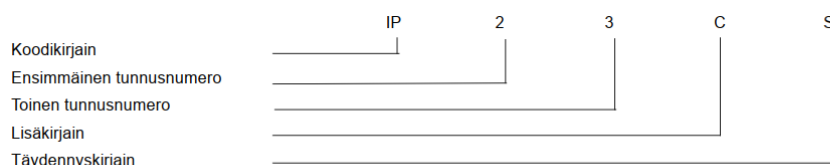


Kotelointi, joka on merkitty tällä tunnuksella (IP-koodi)

- (3) — suojaa ihmisiä vaarallisten osien koskettamiselta käsiteltäessä työkaluja, joiden halkaisija on 2,5 mm tai sitä suurempi
 - suojaa koteloinnin sisällä olevaa laitetta halkaisijaltaan 2,5 mm tai sitä suurempien vieraiden esineiden sisääntunkeutumiselta
- (4) — suojaa koteloinnin sisällä olevaa laitetta kaikista suunnista roiskuvan veden haitallisilta vaikutuksilta.

Kuva 8. Kotelointiluokkaesimerkki (6).

Toisena esimerkkinä IP23CS-luokassa ensimmäinen tunnusnumero 2 tarkoittaa sitä, että kosketus vaarallisiin osiin on estetty 12,5 mm tai suurempien vieraiden esineiden sisään tunkeutumiselta. Tunnusnumero 3 kertoo että satava vesi ei aiheuta haittaa laitteelle. Lisäkirjain C kertoo, että kotelointi suojaa ihmisiä vaarallisten osien koskettamiselta työkaluilla, jotka ovat enintään 100 mm pituisia ja halkaisijaltaan 2,5 mm tai sitä suurempi, sekä että työkalu saa tunkeutua kotelointiin koko pituudeltaan. Lisäkirjain S kertoo, että vesisuojaus on testattu laitteen kaikkien osien ollessa pysähdyksissä (kuva 9). (6.)



Kotelointi, joka on merkitty tällä tunnuksella (IP-koodi)

- (2) — suojaa ihmisiä koskettamasta sormella vaarallisia osia
 - suojaa koteloinnin sisällä olevaa laitetta halkaisijaltaan 12,5 mm tai sitä suurempien vieraiden esineiden sisääntunkeutumiselta
- (3) — suojaa koteloinnin sisällä olevaa laitetta satavan veden haitallisilta vaikutuksilta.
- (C) — suojaa ihmisiä vaarallisten osien koskettamiselta käsiteltäessä työkaluja, joiden pituus on enintään 100 mm ja halkaisija 2,5 mm tai sitä suurempi, (työkalu voi tunkeutua kotelointiin koko pituudeltaan)
- (S) — laitteen vesisuojaus on testattu laitteen kaikkien osien ollessa pysähdyksissä.

Kuva 9. Kotelointiluokkaesimerkki (6).

3.2 Sähkölaitteen aiheuttamat vaarat

Sähkölaitteen aiheuttamista vaaroista kerrotaan koneturvallisuusstandardeissa. Standardin päätavoitteena on antaa työkaluja suunnittelijalle, jotta laite olisi mahdollisimman turvallinen heti alusta alkaen. Koneen turvallisuus pitää suunnitella ja toteuttaa niin, että tarkoitetun käytön lisäksi otetaan huomioon myös odotettavissa oleva väärinkäyttö. Standardin mukaan odotettavasta väärinkäytöstä on otettava huomioon seuraavat käyttäytymistavat:

- Ennakoitavissa oleva käyttäytyminen, joka on seurausta normaalista huolimattomuudesta eikä tahallisesta koneen väärinkäytöstä
- Ihmisen refleksinomaisen käyttäytymisen virhetoiminnon, yllättävän tapahtuman tai vian sattuessa koneen käytön aikana
- Käyttäytyminen, joka on seurauksena tehtävän suorittamisesta ”pienimman vastuksen kautta”

Suunnittelun kannalta tämä tarkoittaa sitä, että ihmiselle ei saa koitua ylimääräistä vaaraa sähkölaitteesta, edes tahallisen väärinkäytön aikana. Standardin mukaan sähkölaitteista aiheutuvia vaaroja ovat mm. sähköisku, läpilyönti, valokaari ja tulipalo. (7.)

3.3 Mekaaninen kestävyys ja oikosulunkestoisuus

Koteloinnin pitää pystyä suojaamaan laitetta ulkopuolelta kohdistuvien mekaanisten iskujen osalta, mutta myös tarjota suojaa laitteen sisällä tapahtuvien oikosulkujen osalta. Tällöin laitteella pitää olla sopiva oikosulunkestoisuus. Laitteen oikosulunkestoisuudella tarkoitetaan sen kykyä sietää oikosulun aiheuttama ylikuormitus ilman vaurioita. Oikosulun aikana sähköpiirissä tapahtuu äkillinen ja suuri virta, joka aiheuttaa lämpölaajenemista ja mekaanista rasitusta. Mitä suuremmat oikosulunkestoisuusvaatimukset ovat, sitä tukevampi rakenne tarvitaan. Mekaanisella rasituksella tarkoitetaan mm. johdinten vääntymistä oikosulun seurauksena. (8.)

4 Eristyskoordinaatio EN-IEC-60664-1

Eristyskoordinaation avulla määritetään laitteessa vaadittavat eristevälit. Eristeväleillä tarkoitetaan ilma- ja ryömintävälejä, joiden avulla varmistetaan riittävät turvaetäisyydet. Turvaetäisyyksien avulla estetään laitteen oikosulut jännitteiden sekä koteloinnin välillä. Oikein mitoitettut eristevälit ovat keskeisiä laitteen sähköturvallisuuden kannalta, koska ne estävät myös vaarallisten jännitteiden pääsyn laitteen ulkopuolelle ja siten suojaavat käyttäjiä sähköiskuilta.

Eristevälit määritellään eristysluokan, ylijänniteluokan, käyttökorkeuden ja saastetason mukaan.

4.1 Eristysluokat (CTI)

Standardissa jaetaan eristeet materiaalin CTI-arvon mukaan (kuva 10). Luokka vaikuttaa ryömintävälien suuruuteen. CTI-arvo eli Comparative Tracking Index kuvaa eristemateriaalin kykyä vastustaa sähköisiä pintapurkauksia. Eristemateriaali, jolla on suurempi CTI-arvo, on vastustuskykyisempi pintavirtojen muodostumiselle, joka puolestaan pienentää vaaditun ryömintävälän suuruutta. Standardissa jaetaan eristemateriaalit neljään eri luokkaan CTI-arvon mukaan. (9;10.)

Table 9 – Insulating materials classification

Insulating material group	IEC ^a /CSA ^b	PLC ^c
Insulating material group I	CTI \geq 600	0
Insulating material group II	600 > CTI \geq 400	\leq 1
Insulating material group IIIa	400 > CTI \geq 175	\leq 3
Insulating material group IIIb	175 > CTI \geq 100	\leq 4
NOTE 1 CTI according to IEC 60112, CSA C22.2 No. 0.17 and CTI PLC according to UL 746A will give a comparable level of safety based on practice.		
NOTE 2 Some material or <i>component</i> datasheets can specify a proof tracking index (PTI) according to IEC 60112. The PTI according to IEC 60112 is considered equivalent to the CTI according to IEC 60112 for the purpose of this document.		
^a CTI (comparative tracking index) tested according to IEC 60112:2020, 6.2. ^b CTI (comparative tracking index) tested according to CSA C22.2 No. 0.17. ^c PLC (performance level category) according to UL 746A. The numeric PLC number (not the performance) shall be less than or equal to the value in the column.		

Kuva 10. CTI-luokat (10).

4.2 Ylijänniteluokat (OVC)

Ylijänniteluokan avulla määritetään, kuinka suuria ylijännitepiikkejä sähkölaitteen eristyksen tulee kestää. Ylijänniteluokkaa merkitään kirjaimin OVC, ja se vaikuttaa vaadittaviin eristeiden laatuun sekä ilma- ja ryömintäväleihin.

Ylijännitepiikki tarkoittaa äkillistä ja lyhytkestoista tapahtumaa, jonka vuoksi laitteen jännite nousee jopa moninkertaiseksi normaalin käyttöjännitteeseen verrattuna. Ylijännitepiikki voi syntyä esim. sähköverkon häiriöistä, ukkosesta tai staattisen sähkön purkautumisesta. Tämän seurauksena voi tapahtua eristeen pettäminen, joka aiheuttaa oikosulun ja pahimmillaan tekee laitteesta hengenvaarallisen.

Ylijänniteluokka määräytyy laitteen sijainnin mukaan sähköverkossa. Mitä lähempänä laite on voimalaitokselta tai suurjännitteisestä verkosta tulevaa jännitettä, sitä korkeampi ylijänniteluokka tarvitaan. Mitä suurempi ylijänniteluokka sekä käyttöjännite, sen suurempi jännitteenkesto vaaditaan.

Standardissa jaetaan ylijänniteluokat (OVC) neljään eri luokkaan ylijännitteen suuruuden mukaan. Näitä luokkia ovat:

- OVC I, Matala ylijännite: Näihin laitteisiin kuuluvat yleiselektroniikka.
- OVC II, Kohtalainen ylijännite: Näihin laitteisiin kuuluvat kodinkoneet ja sähkötyökalut
- OVC III, Korkea ylijännite: Näihin laitteisiin kuuluvat kiinteästi asennettujen laitteiden kytkimet.
- OVC IV, Erittäin korkea ylijännite: Näihin laitteisiin kuuluvat sähköverkkojen muuntajat, pääkytkimet sekä niiden suojalaitteet. (10;11.)

4.3 Käyttökorkeuden korjauskertoimet

Laitteen käyttökorkeuden kasvaessa yli 2000 metrin, ilman tiheys pienenee huomattavasti verrattuna merenpintaan. Tämä puolestaan heikentää ilman kykyä eristää sähköä, joka lisää läpilyönnin riskiä. Tämän vuoksi ilmapäliä täytyy suurentaa kuvan 11 mukaisesti. Tätä varten on luotu korjauskertoimet, joiden avulla saadaan suurennettua tarvittavat ilmapäliä käyttökorkeuden mukaan. (12.)

Altitude m	Normal barometric pressure kPa	Multiplication factor for clearances
2 000	80,0	1,00
3 000	70,0	1,14
4 000	62,0	1,29
5 000	54,0	1,48
6 000	47,0	1,70
7 000	41,0	1,95
8 000	35,5	2,25
9 000	30,5	2,62
10 000	26,5	3,02
15 000	12,0	6,67
20 000	5,5	14,50

Kuva 11. Käyttökorkeuden korjauskertoimet (10).

4.4 Saastetasot (PD)

Saastetason avulla määritetään, kuinka paljon johtavaa saastetta esiintyy laitteessa. Sitä merkitään kirjaimin PD, joka tarkoittaa englanniksi Pollution Degree. Tämä vaikuttaa laitteessa vaadittaviin ilma- ja ryömintäväleihin. Johtavalla saasteella tarkoitetaan ylimääräistä likaa, joka johtaa sähköä. Hyvänä esimerkkinä tästä on suolainen vesi, jota esiintyy esimerkiksi meriolosuhteissa.

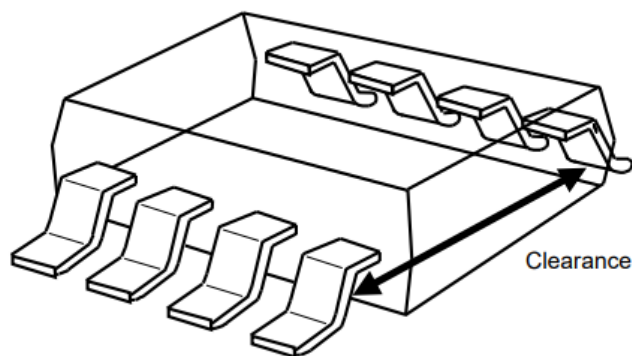
Saastetasoon vaikuttaa laitteen käyttöympäristö sekä koteloinnin tiivys eli IP-luokitus. Suuremmilla saastetasoilla tarvitaan suuremmat ilma- ja ryömintävälit laitteen turvallisuuden takaamiseksi. Paremmilla IP-luokituksilla voidaan estää johtavan saasteen päätyminen koteloinnin sisälle (kuva 12). (13.)

Pollution degree	Description
1	No pollution or only dry, non-conductive pollution occurs. The pollution has no influence.
2	Normally, only non-conductive pollution occurs. Occasionally, however, a temporary conductivity caused by condensation is to be expected. This (temporary) condensation may occur during periods of on-off load cycles of the <i>BDM/CDM/PDS</i> .
3	Conductive pollution or dry non-conductive pollution occurs which becomes conductive due to condensation which is to be expected.
4	The pollution generates persistent conductivity caused, for example by conductive dust or rain or snow.
NOTE Definition of the pollution degrees in Table 5 follows IEC 60664-1:2020, 4.5.2.	

Kuva 12. Saastetasot ja niiden kuvaukset (10).

4.5 Ilmavälit

Ilmaväli on lyhyin suora etäisyys ilmaitse kahden johtavan osan välillä (kuva 13). Tämä on keskeinen tekijä sähkölaitteiden turvallisuuden kannalta, koska sillä estetään läpilyönnit ja mahdolliset oikosulut. Ilmavälit määritellään käyttöjännitteen, ylijännitteen ja saastetason mukaan. Annettuja lukuarvoja tulee aina käsitellä minimilukuarvoina, sillä toteutuneet välit voivat vaihdella muun muassa valmistustoleranssien vuoksi. (14, s. 2.)



Kuva 13. Ilmavälin mittausesimerkki (14).

Ilmaväli perustuu kuivan ilman kykyyn eristää läpilyöntejä. Läpilyönti tapahtuu silloin kun jännitteen suuruus ylittää ilman läpilyöntilujuuden, jolloin kahden johtavan osan välille muodostuu sähkövirtaus valokaaren muodossa. Läpilyöntilujuutta kutsutaan myös dielektriseksi lujuudeksi. Läpilyöntilujuudet löytyvät taulukoista ilmalle sekä useimmille eristemateriaaleille. Vaadittu ilmaväli kasvaa jännitteen sekä saastetason kasvaessa kuvan 14 mukaisesti. (15.)

Column 1	2	3	4	5	6	7
<i>Impulse withstand voltage</i> ^d (from Table 6 or Table 7)	<i>Temporary overvoltage</i> ^f (crest value) ^h (from Table 6 or Table 7)	<i>Working voltage</i> ^f (recurring peak) ^a	Minimum <i>clearance</i> in air up to 2 000 m above sea level			
V	V	V	mm			
			Pollution degree			
			1	2	3	4
N/A	≤ 110	≤ 88	0,01	0,2 ^{b c}	0,8 ^c	1,6 ^c
N/A	225	180	0,01			
330	330 ^e	260 ^e	0,01			
500	500 ^e	400 ^e	0,04			
800	710 ^e	560 ^e	0,10			
1 500	1 270 ^e	1 010 ^e	0,5	0,5		
2 500	2 220 ^e	2 000 ^e	1,5	1,5	1,5	
4 000	3 430 ^e	3 090 ^e	3,0			
6 000	4 890 ^e	4 410 ^e	5,5			
8 000	6 060 ^e	5 460 ^e	8,0			
12 000	9 500 ^e	8 550 ^e	14			
20 000	15 000	13 500	25			
40 000	32 300	29 000	60			
60 000	45 700	41 100	90			
75 000	59 700 ^g	53 700 ^g	120			
95 000	78 800 ^g	70 900 ^g	160			
125 000	107 000 ^g	96 000 ^g	220			
145 000	130 000 ^g	117 000 ^g	270			

Kuva 14. EN60664-1 taulukoidut ilmavälit (10).

4.6 Ryömintävälit

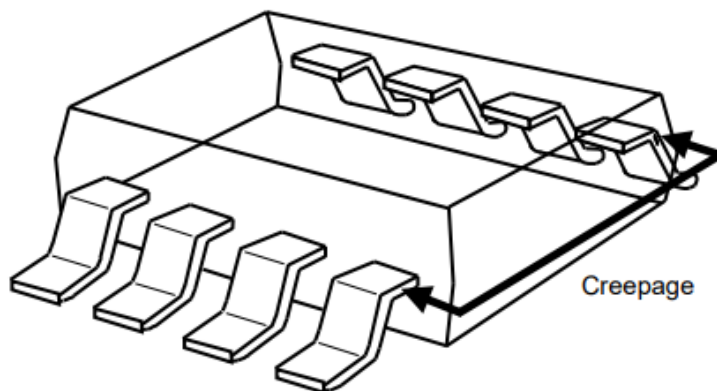
Ryömintäväli on matka, jonka jännite kulkee eristeen pinnalla saavuttaakseen toisen johtavan osan (kuva 16). Tämä on keskeinen tekijä sähkölaitteiden suunnittelussa, koska sillä estetään pintavirtojen muodostuminen. Pintavirrat voivat aiheuttaa oikosulkuja. Oikosulut voivat vaurioittaa laitetta ja tehdä siitä hengenvaarallisen. Ryömintävälän suuruuteen vaikuttaa käyttöjännite, eristysluokka sekä saastetaso (kuva 15). Annettuja lukuarvoja tulee käsitellä minimilukuarvoina, jotta välit varmasti toteutuvat valmistustoleransseista huolimatta. (14, s. 2.)

Table 10 – Creepage distances

Column 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Working voltage (RMS)	PWBs ^a		Other insulators								
	Pollution degree		Pollution degree								
	1	2	1	2				3			
	b	c	b	Insulating material group				Insulating material group			
V	mm	mm	mm	I	II	IIIa	IIIb	I	II	IIIa	IIIb
≤ 2	0,025	0,04	0,056	0,35	0,35	0,35	0,87	0,87	0,87		
5	0,025	0,04	0,065	0,37	0,37	0,37	0,92	0,92	0,92		
10	0,025	0,04	0,08	0,40	0,40	0,40	1,0	1,0	1,0		
25	0,025	0,04	0,125	0,50	0,50	0,50	1,25	1,25	1,25		
32	0,025	0,04	0,14	0,53	0,53	0,53	1,3	1,3	1,3		
40	0,025	0,04	0,16	0,56	0,80	1,1	1,4	1,6	1,8		
50	0,025	0,04	0,18	0,60	0,85	1,20	1,5	1,7	1,9		
63	0,04	0,063	0,20	0,63	0,90	1,25	1,6	1,8	2,0		
80	0,063	0,10	0,22	0,67	0,95	1,3	1,7	1,9	2,1		
100	0,10	0,16	0,25	0,71	1,0	1,4	1,8	2,0	2,2		
125	0,16	0,25	0,28	0,75	1,05	1,5	1,9	2,1	2,4		
160	0,25	0,40	0,32	0,80	1,1	1,6	2,0	2,2	2,5		
200	0,40	0,63	0,42	1,0	1,4	2,0	2,5	2,8	3,2		
250	0,56	1,0	0,56	1,25	1,8	2,5	3,2	3,6	4,0		
320	0,75	1,6	0,75	1,6	2,2	3,2	4,0	4,5	5,0		
400	1,0	2,0	1,0	2,0	2,8	4,0	5,0	5,6	6,3		
500	1,3	2,5	1,3	2,5	3,6	5,0	6,3	7,1	8,0		
630	1,8	3,2	1,8	3,2	4,5	6,3	8,0	9,0	10,0		
800	2,4	4,0	2,4	4,0	5,6	8,0	10,0	11	12,5		^e
1 000	3,2	5,0	3,2	5,0	7,1	10,0	12,5	14	16		
1 250	4,2	6,3	4,2	6,3	9	12,5	16	18	20		
1 600	^f	^g	5,6	8,0	11	16	20	22	25		
2 000			7,5	10,0	14	20	25	28	32		
2 500			10,0	12,5	18	25	32	36	40		
3 200			12,5	16	22	32	40	45	50		
4 000			16	20	28	40	50	56	63		
5 000			20	25	36	50	63	71	80		
6 300			25	32	45	63	80	90	100		
8 000			32	40	56	81	100	110	125		
10 000			40	50	71	100	125	140	160		
12 500			50	63	90	125	^d	^d	^d		
16 000			63	80	110	150					
20 000			80	100	140	200					
25 000			100	125	180	250					
32 000			125	160	220	320					

Interpolation is permitted.

Kuva 15. EN60664-1 taulukoidut ryömintävälit (11).



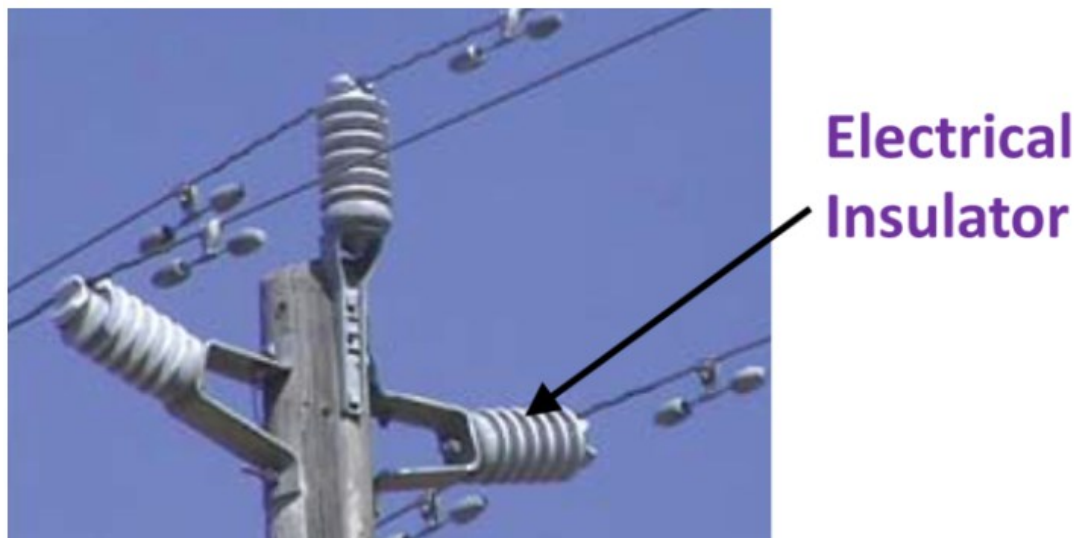
Kuva 16. Ryömintävälän mittausesimerkki (14).

5 Eristemateriaalit

Sähköeriste (kuva 17) tarkoittaa ainetta, jossa elektronit kulkevat huonosti. Tällöin puhutaan, että aineella on suuri resistiivisyys ja siten pieni sähkönjohtavuus. Sähköeristeitä on saatavilla useista eri materiaaleista. Eristeiltä vaaditaan ensisijaisesti erinomaista läpilyöntilujuutta, mutta usein muitakin ominaisuuksia, kuten mekaanista kestävyyttä, palonkestävyyttä, kemiallista kestävyyttä sekä helppoa muokattavuutta.

Eristemateriaalin valintaan vaikuttaa sille asetetut tekniset vaatimukset. Näitä vaatimuksia ovat mm. jännite, lämpötila, saastetaso sekä CTI-luokka. Eristemateriaali vaikuttaa tarvittaviin eristeväliden suuruuteen. Jos eriste on sopimaton sille asetettuun paikkaan, voi tapahtua eristeen pettäminen. Eristeen pettämisellä tarkoitetaan läpilyöntiä eli sitä, että jännite pääsee kulkemaan eristeen läpi aiheuttaen oikosulun. Tämän vuoksi on tärkeää huomioida mahdolliset ylijännitetapahtumat, koska silloin jännite kasvaa moninkertaisesti tavallisen käyttöjännitteen verran. (16.)

Tässä kappaleessa perehdytään muutamien yleisien eristemateriaalien ominaisuuksiin, kauppanimiin sekä saataviin paksuuksiin.



Kuva 17. Sähköpylvään sähköeriste (16).

5.1 Polypropeeni (PP)

Polypropeeni on laajasti käytetty osakiteinen termoplastinen polymeeri, jota valmistetaan propeenista. Se on yksi maailman käytetyimmistä muoveista, jota käytetään useissa eri sovelluksissa. Sähköeristeenä polypropeenilla on useita vahvuuksia, kuten kemiallinen kestävyys, erinomainen läpilyöntilujuus ja materiaalin helppo taivuttaminen. Materiaalia voidaan taivuttaa useasti ilman että se murtuu. (17.)

Polypropeenipohjaisena sähköeristettä on saatavilla kauppanimellä Formex GK (kuva 18). Formexin GK-sarja omaa erinomaisen läpilyöntilujuuden, palonkestävyyden ja helpon muokattavuuden. Näiden ansiosta se sopii paikkoihin, joissa lämpötilat ovat suuria ja missä levyn taivutus on tarpeen.

Eristettä on saatavilla eri paksuisina, joista ohuin on GK-5 jonka paksuus on 0.005 tuumaa eli 0.127 millimetriä, ja paksuin GK-62 jonka paksuus on 0.062 tuumaa eli 1.5748 millimetriä. (18) Vastaavilla ominaisuuksilla olevaa eristettä on saatavilla myös kaupallisella nimellä Duravolta.

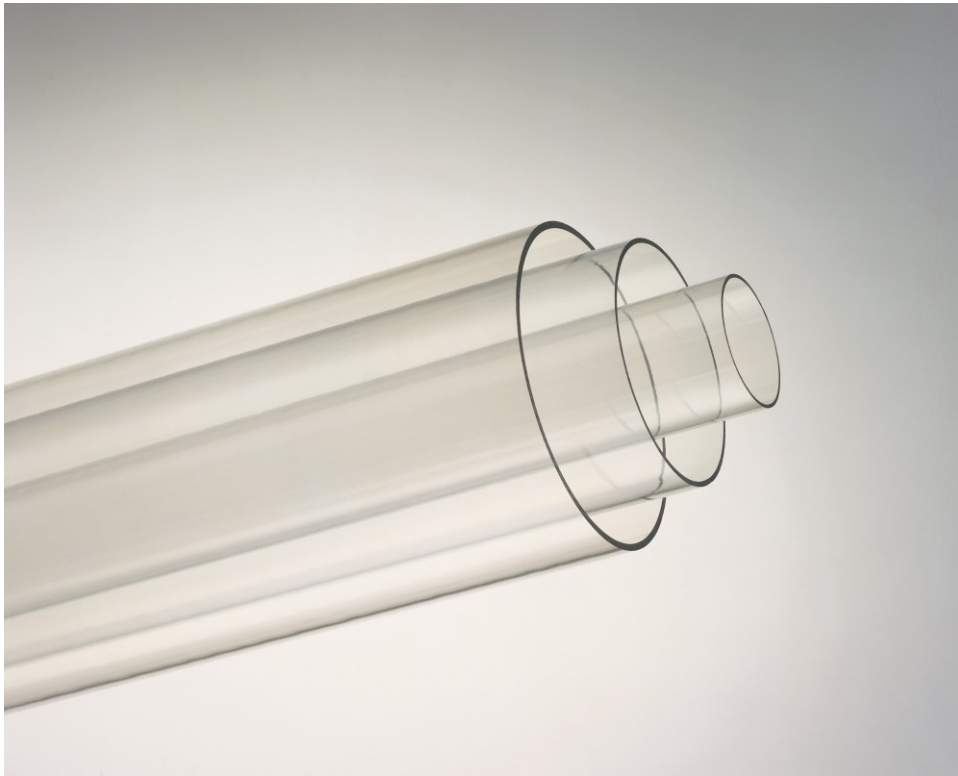


Kuva 18. Formex-sähköeristeitä (17).

5.2 Polykarbonaatti (PC)

Polykarbonaatit ovat yksi termoplastisten polymeerien ryhmä, jonka merkittävimpiä ominaisuuksia ovat erinomainen läpilyöntilujuus, helppo muokattavuus ja iskunkestävyys. Polykarbonaattia voidaan taivuttaa yli 90-asteen kulmiin ja se ei vaurioidu porattaessa. Sitä käytetään muun muassa suojalasien linsseissä, puhelimen näytöissä sekä CD-levyissä. Polykarbonaateilla on heikko kemiallinen kestävyys, jonka vuoksi se ei sovi kohteisiin, joissa se on altis liuottimille. (19.)

Polykarbonaattipohjaisena sähköeristettä on saatavilla kauppanimellä Lexan FR (kuva 19). Lexan FR-sarja omaa erinomaisen läpilyöntilujuuden, palonkestävyyden, helpon työstettävyyden sekä läpinäkyvyyden. Näiden ansiosta se sopii paikkoihin, joissa vaaditaan erinomaisen läpilyöntilujuuden lisäksi iskun- ja palonkestävyyttä, helppoa työstettävyyttä sekä jyrkkiä taivutuksia. Eristettä on saatavilla 0.25 mm – 1 mm paksuuksilla. (20.)



Kuva 19. Polykarbonaattirulla (19).

5.3 Nomex

Nomex on kaupp nimi materiaalille, joka on palonkestävä synteettinen kuitu. Sitä käytetään laajalti palonkestävyyttä vaativissa kohteissa kuten muun muassa palomiesten sekä hävittäjä lentäjien varusteissa. Materiaali kestää jopa 430-asteen lämpötilat. Materiaalin merkittävimpiä ominaisuuksia palonkestävyyden lisäksi on erinomainen läpilyöntilujuus sekä mekaaninen kestävyys. Näiden ansiosta se sopii paikkoihin, joissa vaaditaan erinomaista läpilyöntilujuutta ja palonkestävyyttä. Eristettä on saatavilla 0.05 mm – 0.76 mm paksuuksilla. (21.)

5.4 Polyamidi

Polyamidi on nylonpohjainen polymeeri, jota käytetään laajalti useissa sovelluksissa kuten matoissa, köysissä sekä 3D-tulostuksissa. 3D-tulostukseen polyamidia on saatavilla useina eri laatuina. Esimerkiksi PA2210 FR on paloluokiteltu materiaali, jolla on hyvän läpilyöntilujuuden lisäksi hyvät mekaaniset ominaisuudet. Näiden ansiosta siitä voi valmistaa tukevia mekaanisia sähköeristeitä tai rakenteita, jotka ovat palonkestäviä. Paloluokituksen UL94 V-0 saavuttamiseen pitää materiaalinpaksuuden olla vähintään 3mm. (22.)

5.5 Eristemateriaalin paksuus

Eristemateriaalin tarvittavaa paksuutta voidaan arvioida siihen kohdistuvan jännitteen sekä eristeen läpilyöntilujuuden avulla. Todellisuudessa kuitenkin vaadittuun paksuuteen vaikuttaa monia asioita kuten muun muassa käyttöympäristö, saastetaso ja ylijännitteet.

Eristemateriaalin läpilyöntilujuus on usein ilmoitettu yksikössä V/mm, joka tarkoittaa volttia millimetriä kohden. Tämän avulla voidaan arvioida tarvittavaa eristeen paksuutta. Esimerkiksi eristeellä, jonka läpilyöntilujuus on 500V/mm, tarvitaan 1 mm paksuinen eriste eristämään 500V jännite. (23.)

Lopullisen paksuuden arvioiminen vaatii kuitenkin tarkemman tarkastelun, jotta voidaan varmistua sen olevan sopiva sille tarkoitettuun kohteeseen. Turvallisuuden kannalta katsottuna, mahdollisimman paksu eriste on aina parempi. Kuitenkin paksummat eristeet ovat kalliimpia ja nostavat laitteen loppukustannuksia.

6 Virtajohtimet

Virtajohtimet (kuva 20) ovat sähkövirran kuljettamiseen käytettäviä metallisia johtimia. Virtajohtimen oikea valinta on kriittistä, jotta saadaan kuljetettua virtaa mahdollisimman paljon ilman suuria häviöitä. Tässä kappaleessa käsitellään virtajohtimien valintaan liittyviä kriteereitä kuten materiaaleja, profiileja sekä pintakäsittelyjä.



Kuva 20. Kuparista valmistettuja virtajohtimia (24).

6.1 Virtajohtimien materiaalit

Virtajohtimien materiaaleina käytetään usein kuparia tai alumiinia. Kupari omaa paremman kyvyn johtaa sähköä sekä on helppo työstää, mutta on kalliimpaa kuin alumiini. Alumiinia on vaikeampi työstää ja johtaa huonommin sähköä kuin kupari, mutta se on kustannustehokkaampi sen edullisen hintansa vuoksi. Virtajohtimen materiaalin kannalta tärkeimpiä ominaisuuksia ovat sähkönjohtavuus, mekaaniset ominaisuudet, korroosionkesto sekä kustannustehokkuus. (25.)

6.1.1 Kupari

Kupari on ominaisuuksiltaan loistava ja yleinen materiaalivalinta virtajohtimelle. Se tarjoaa erinomaisen sähkönjohtavuuden, mekaanisen kestävyuden sekä korroosionkeston. Kuparia on helppo työstää ja taivuttaa ilman vaurioitumista, joten siitä saa tehtyä monimutkaisempiakin virtajohtimia. Kupari on kallista ja painavaa, jonka vuoksi usein alumiini on myös houkutteleva vaihtoehto varsinkin suurissa virtajohtimissa. Kuparia ei tarvitse seostaa vaan usein käytetäänkin raakaa kuparia. (25.)

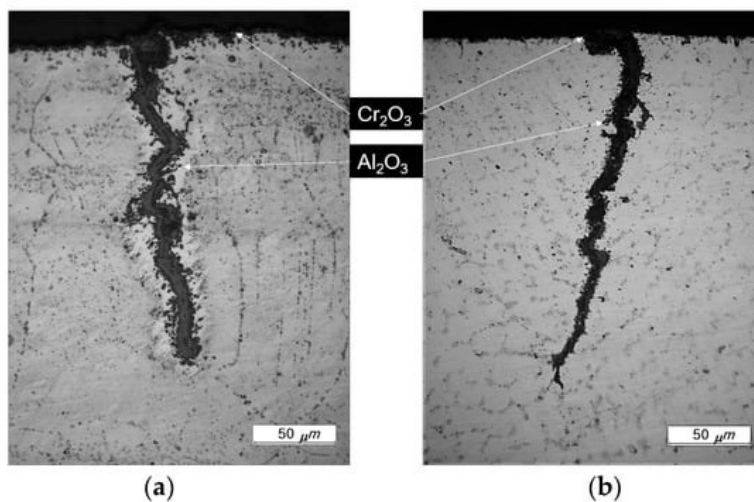
6.1.2 Alumiini

Alumiinista valmistettu virtajohdin (kuva 21) on ominaisuuksiltaan hieman huonompi kupariin verrattuna. Sen sähkönjohtavuus on n. 60 % huonompi, mutta on kevyempi ja edullisempi vaihtoehto (25). Johtuen huonommasta sähkönjohtavuudesta, alumiininen virtajohdin tarvitsee suuremman poikkipinta-alan verrattuna kupariin. Alumiini hapettuu helposti, joten se vaatii lähtökohtaisesti aina pintakäsittelyn. Sitä ei pysty taivuttamaan yhtä helposti kuin kuparia ilman että se halkeilee, jonka vuoksi se ei sovellu monimutkaisempiin virtajohtimiin. Jos alumiinia altistetaan pitkiä aikoja korkeille lämpötiloille, tapahtuu virumista.



Kuva 21. Alumiinista valmistettuja virtajohtimia (26).

Materiaalin virumisella (kuva 22) tarkoitetaan pysyvää muodonmuutosta kuormituksen tai korkean lämpötilan vaikutuksesta (27). Virtajohtimen kannalta viruminen ei ole hyväksyttävää, koska pahimmillaan siitä seuraa muun muassa eristävien riittämättömyyttä sekä liitosten löystymistä, jotka puolestaan uhkaavat sähkölaitteen turvallisuutta ja huonontavat hyötysuhdetta. Alumiinin virumista voidaan vähentää käyttämällä erilaisia alumiiniseoksia kuten esimerkiksi 6061-T6 ja 6101, joilla on paremmat ominaisuudet mekaanisia rasituksia vastaan (28). Liitoskohdissa voidaan käyttää jousikuormitteisia puristusliittimiä, jotka kompensoivat alumiinin virumista (29).



Kuva 22. Viruminen mikroskoopilla kuvattuna (30).

6.2 Virtajohdinten profiilit

Virtajohtimia on saatavilla erilaisissa profiileissa, kuten esimerkiksi tasakiskoina, pyöreinä tankoina sekä laminoituina. Näistä yleisimmin käytetty on tasakisko. Profiilin valintaan vaikuttavat valittu materiaali, kuljetettavan sähkövirran suuruus, tarvittava poikkipinta-ala, lämmönhallintaominaisuudet, mekaaniset ominaisuudet sekä haluttu hyötysuhde.

Virtajohtimen poikkipinta-ala määritellään kuljetettavan sähkövirran suuruuden avulla. Suuremmilla sähkövirroilla tarvitaan suuremmat poikkipinta-alat, jottei virtajohdin ylikuumene. (31.)

6.2.1 Tasakisko

Tasakisko (kuva 23) tarkoittaa levymäistä johdinta, jonka suurimpina etuina ovat sen kompakti koko, suurempi poikkipinta-ala, kompakti koko sekä hyvät jäähdytysominaisuudet. Levymäisen rakenteensa vuoksi ne soveltuvat yksinkertaisempiin sovelluksiin, joissa ei tarvita monimutkaisia taivutuksia. Yksinkertaisen rakenteensa vuoksi tasakiskot ovat helposti ja edullisesti valmistettavia komponentteja, joilla on hyvä saatavuus. Tasakiskoja voidaan valmistaa alumiinista ja kuparista.

Monimutkaisemmissa rakenteissa tasakisko tarvitsee useampia liitoskohtia, joita kutsutaan myös kontaktipinnoiksi. Jokaisesta kontaktipinnasta aiheutuu oma tehohäviönsä ja niiden minimoiminen on todella tärkeää hyötysuhteen ja laitteen lämmönhallinnan kannalta. Levymäisen muotonsa vuoksi tasakiskolla on hyvät lämpöominaisuudet. Tasakisko sopii siis kohteisiin, joissa tarvitaan kompaktia kokoa, suurta virrankuljetuskapasiteettia sekä hyviä lämpöominaisuuksia. (31.)



Kuva 23. Tasakisko (32).

6.2.2 Pyöreä tanko

Pyöreä tanko (kuva 24) on sylinterimäinen johdin, jonka suurimpina etuina on sen hyvät taivutusmahdollisuudet sekä mekaaninen kestävyys. Pyöreää tankoa voidaan taivuttaa monimutkaisiin muotoihin, jonka vuoksi monimutkaisissa rakenteissa vältetään useilta kontaktipinnoilta. Tämän avulla voidaan parantaa hyötysuhdetta huomattavasti. Pyöreä tanko on kuitenkin huomattavasti haastavampi ja kalliimpi valmistaa. Pyöreä tanko vaatii myös enemmän tilaa, jolloin se voi aiheuttaa haasteita eristeväliä kanssa. (31.)



Kuva 24. Pyöreä tanko (33).

6.2.3 Kaapeli

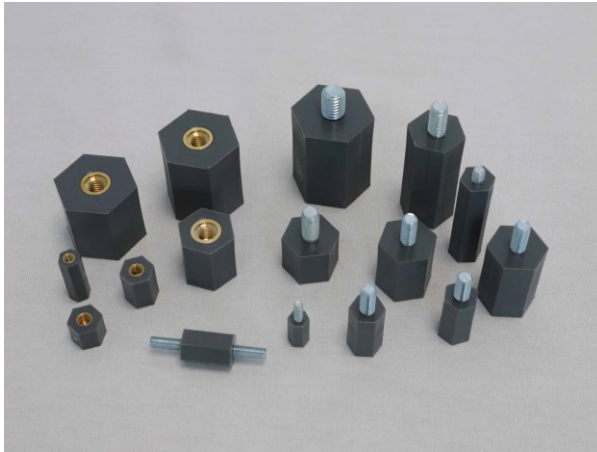
Kaapelia ei lasketa samankaltaiseksi virtajohtimeksi kuin esimerkiksi tasakis-koa. Tästä huolimatta kaapelin käyttäminen voi olla hyvä tilapäinen ratkaisu virtajohtimelle. Kaapeli on edullista ja sitä on saatavilla useissa eri poikkipinta-aloissa. Kaapeli on valmiiksi päällystetty eristeellä, jonka vuoksi se soveltuu myös ahtaampiin tiloihin. Koska kaapeli ei ole jäykkää, se ei sovellu kohteisiin, joissa laite on altis tärinöille. Tämä johtuu siitä, että kaapeli pääsee heilumaan vapaasti ja mahdollisesti rikkoo laitteen sisällä olevia komponentteja. Koska sähkö- ja kytkentäkaappeihin tulevat ulkoiset kytkennät ovat usein toteutettu kaapeleilla, niitä käytetään usein yhdessä virtajohtimien kanssa (kuva 25). (34.)



Kuva 25. Kaapelit liitettynä virtajohtimiin (35).

6.3 Tukieristin

Virtajohtimien luotettava kiinnitys on elintärkeää laitteen toiminnan ja turvallisuuden takaamiseksi. Luotettavan kiinnityksen avulla varmistetaan riittävät eristevälit myös tärinän, mekaanisten rasitusten ja lämpölaajenemisen vaikutuksista huolimatta. Virtajohtimien kiinnitykseen käytetään tukieristimiä, jotka ovat eristettyjä mekaanisia komponentteja, joilla saadaan suoritettua johtimen kiinnitys sekä eristys samanaikaisesti. Tukieristimet ovat usein valmistettu polyamidista tai nylonista. Niitä on saatavilla uros- ja naaraskierteillä, jonka ansiosta ne voidaan kiinnittää monipuolisesti (kuva 26).



Kuva 26. Tukieristimiä tasakiskoille (36).

6.4 Virtajohtimien pintakäsittely

Virtajohtimen pintakäsittelyllä voidaan parantaa sen sähköisiä sekä mekaanisia ominaisuuksia, kuten korroosionkestävyyttä ja sähkönjohtavuutta. Lähtökohtaisesti alumiinista valmistettu virtajohdin tarvitsee aina pintakäsittelyn, koska se hapettuu helposti. Tämä johtuu alumiinin ominaisuuksista. Hapettuminen on ongelma varsinkin kontaktipinnoissa, koska se heikentää sähkönjohtavuutta merkittävästi aiheuttaen ylimääräisiä tehohäviöitä.

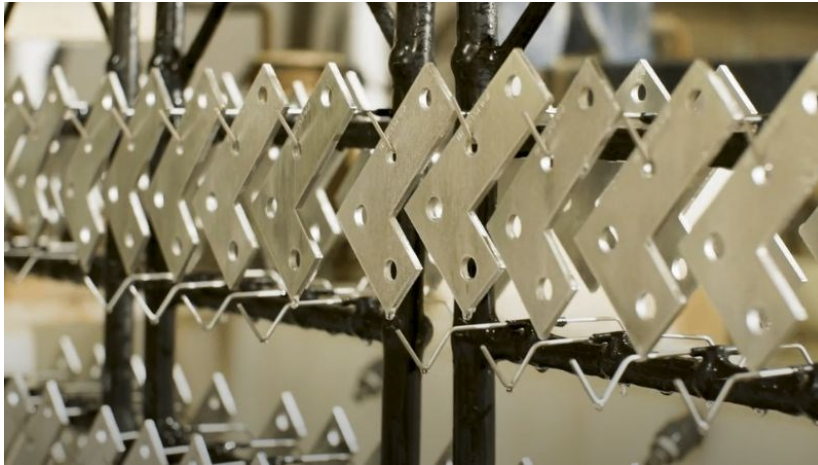
Kuparista valmistettua virtajohdinta voidaan käyttää myös ilman pintakäsittelyä, mutta usein ne pinnoitetaan sähköisten ominaisuuksien parantamiseksi ja kontaktipintojen pitkäaikaisen toimivuuden varmistamiseksi. (37.)

Virtajohtimille voidaan tehdä erilaisia pintakäsittelyitä, kuten esimerkiksi hopeointi ja tinaus. Näissä molemmissa johdin käsitellään elektrolyyttisessä prosessissa ripustus- ja rumpukäsittelyinä.

Hopeointi (kuva 27) parantaa johtimen korroosionkestävyyttä, sähkönjohtavuutta sekä mekaanisia ominaisuuksia. Tämä käsittely voidaan tehdä alumiinille ja kuparille.

Alumiinin hopeoinnissa tarvitaan ensin aluspinnoite. Aluspinnoitteena voidaan

käyttää muun muassa kuparointia. Hopeointi voidaan tehdä kaikille alumiinin seoksille. (38.)



Kuva 27. Virtajohtimen hopeointi ripustuskäsittelynä (39).

Tinauksella (kuva 28) saadaan parannettua johtimen korroosionkestävyyttä, juotettavuutta sekä alennettua ylimenovastusta. Ylimenovastuksella tarkoitetaan kontaktipintojen välistä vastusta. Tinaus voidaan tehdä myös alumiinille ja kuparille. (40.)



Kuva 28. Tinattuja virtajohtimia (41).

Hopeinnilla saadaan aikaan paremmat sähköiset- ja mekaaniset ominaisuudet verrattuna tinaukseen. Hopeointi on kuitenkin paljon kalliimpaa kuin tinaus, jonka vuoksi tinaus voi olla parempi vaihtoehto varsinkin suurien virtajohtimien

kanssa. Hopeointi voidaan kuitenkin tehdä vain virtajohtimen kontaktipinnoille, joka voi olla houkutteleva vaihtoehto suurien virtajohdinten kanssa. Tällöin johdin on altis korroosiolle pinnoittamattomilta alueilta.

7 Jäähdytys

Sähkökomponenteista syntyy lämpöä käytön aikana, joka vaikuttaa suorituskykyyn, lyhentää käyttöikää ja pahimmillaan voi johtaa komponenttien rikkoutumiseen. Tämän vuoksi sopivan jäähdytysmenetelmän valitseminen on elintärkeää laitteen pitkän ja luotettavan käyttöiän takaamiseksi. Menetelmän valintaan vaikuttavat käyttöympäristö, vaadittu IP-luokitus ja käyttöjännite. Suuremmilla käyttöjännitteillä syntyy enemmän lämpöä, jolloin tarvitaan tehokkaampia jäähdytysmenetelmiä. Usein käytettäviä jäähdytysmenetelmiä ovat ilma- ja nestejäähdytys.

Jäähdytysjärjestelmässä on tärkeää huomioida kaikki koteloinnin sisällä olevat komponentit. Saman koteloinnin sisällä on usein komponentteja jotka tuottavat paljon lämpöä, sekä komponentteja jotka eivät siedä sitä. Tässä tapauksessa voidaan tarvita erillisiä ilmanohjaimia tai lisätarkastelua komponenttien sijaintiin.

Koteloinnin sallittu suurin sisäilmanlämpötila määritellään sen sisällä olevien komponenttien perusteella. Jokaiselle komponentille on yleensä määritelty sille sopiva lämpötila-alue komponentin valmistajan toimesta. Suurin sisäilmanlämpötila määritetään komponenteilla, joilla on alhaisin lämpötilankesto. Tällä saadaan varmistettua sopiva lämpötila-alue kaikille komponenteille. (34.)

Tarvittavaan jäähdytysjärjestelmän tehoon vaikuttaa muun muassa laitteen ympäristön lämpötila, komponenttien lukumäärä, komponenttien tehohäviöt sekä koteloinnin sisämitat. Tarvittavaa tehoa voidaan arvioida komponenttien tehohäviöiden avulla, joita kutsutaan myös lämpökuormaksi.

On olemassa peukalosääntö, jonka perusteella 746 W lämpökuormaan tarvitaan 75 BTU/h:n (British Thermal Unit Per Hour) jäähdytysteho. Tämä sääntö pätee ilmastoiduille sekä nestejäähdytetyille koteloinneille. (42.)

7.1 Ilmajäähdytys

Ilmajäähdytys on kustannustehokas ja yksinkertainen jäähdytysmenetelmä, joka perustuu lämmön siirtämiseen ilmapinnan avulla. Ilmajäähdytysmenetelmät voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan, joita ovat passiivinen- ja aktiivinen ilmajäähdytys sekä suljettu ilmajäähdytys.

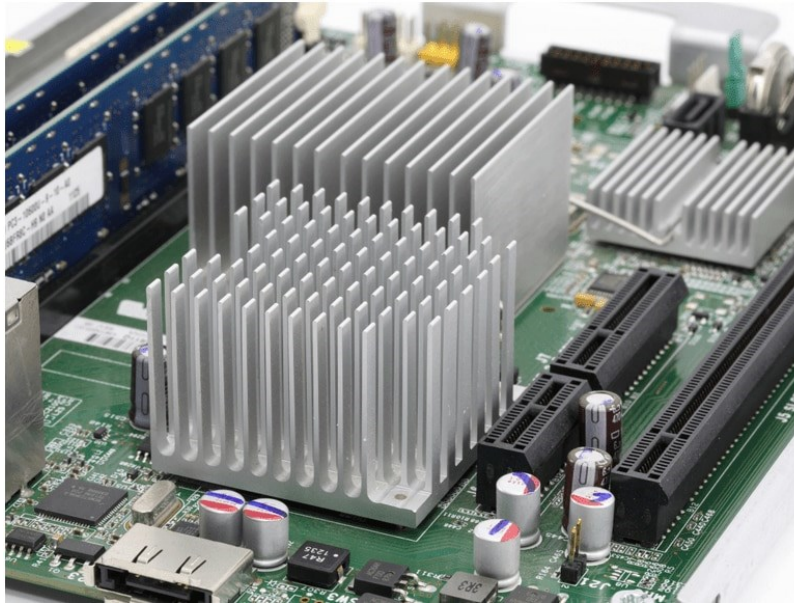
Passiivisella ilmajäähdytyksellä tarkoitetaan luonnollista konvektiota, joka perustuu kuuman ilman kohoamiseen, jonka ansiosta tilalle virtaa viileämpää ilmaa. Tässä menetelmässä ei siis ole erillistä puhallinta. Se on edullinen ja huoltovapaa ratkaisu, joka sopii kohteisiin, joissa ei vaadita tehokasta jäähdytystä tai joissa esiintyvät pienet jännitteet ja siten pienet lämpöhäviöt.

Aktiivisella ilmajäähdytyksellä tarkoitetaan pakotettua konvektiota, jossa puhalletaan puhaltimen avulla ilmapirta koteloinnin läpi. Tämän ansiosta komponenteissa syntyvä lämpö saadaan siirrettyä ilmapinnan avulla pois laitteesta. Se on tehokkaampi kuin passiivinen ilmajäähdytys, mutta tarvitsee erillisen puhaltimen. Aktiivinen ilmajäähdytys sopii kohteisiin, joissa on suuremmat jännitteet ja siten suuremmat lämpöhäviöt. (43.)

7.1.1 Jäähdytyslementti

Jäähdytyslementin (kuva 29) avulla saadaan tehokkaasti johdettua lämpöä pois sähkökomponenteista ilmapinnan mukana. Sen toimintaperiaate perustuu komponentin pinta-alan kasvattamiseen, mikä puolestaan tehostaa lämmön siirtymistä ilmapirtaan. Aktiivisessa ilmajäähdytyksessä jäähdytyslementin ripojen läpi puhalletaan ilmaa, jäähdyttäen jäähdytyslementtiä ja siten sähkökomponenttia. Passiivisessa ilmajäähdytyksessä ripojen ilmapirta syntyy lämpimän

ilman noustessa ylöspäin. Jäähdytyslementtejä käytetään laajasti elektronikkassa mm. prosessorien jäähdytykseen. Jäähdytyslementin tehoon vaikuttavat materiaali, profiili sekä valittu jäähdytysmenetelmä. (44.)



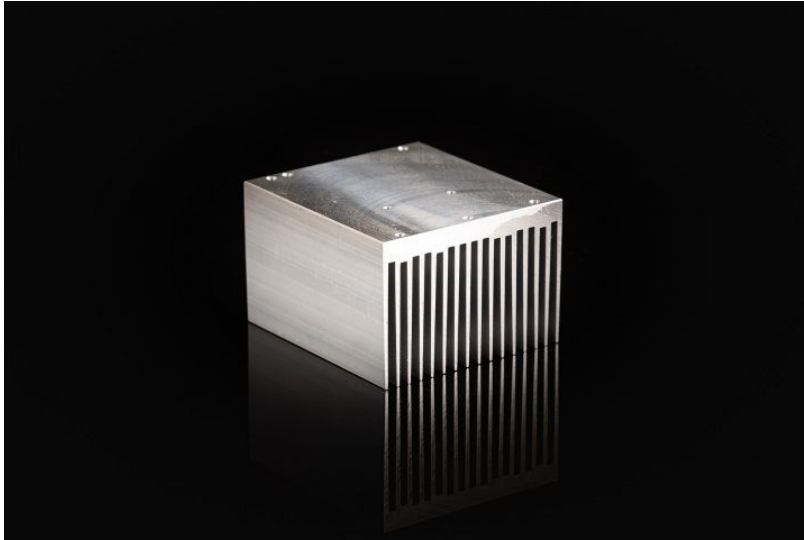
Kuva 29. Prosessorin jäähdytyslementtejä (44).

Jäähdytyslementin materiaaleina käytetään usein alumiiniseoksia sekä kuparia, johtuen niiden erinomaisista lämpöominaisuuksista. Tärkeitä ominaisuuksia ovat materiaalin lämpökapasiteetti sekä sen kyky johtaa lämpöä. Alumiiniseostuksista 6061 ja 6063 ovat hyviä vaihtoehtoja (45). Kuparin lämmönjohtavuus on parempi alumiiniin verrattuna, mutta se on paljon tiheämpää, painavampaa ja kalliimpaa. (46.)

7.1.2 Jäähdytyslementin valmistaminen

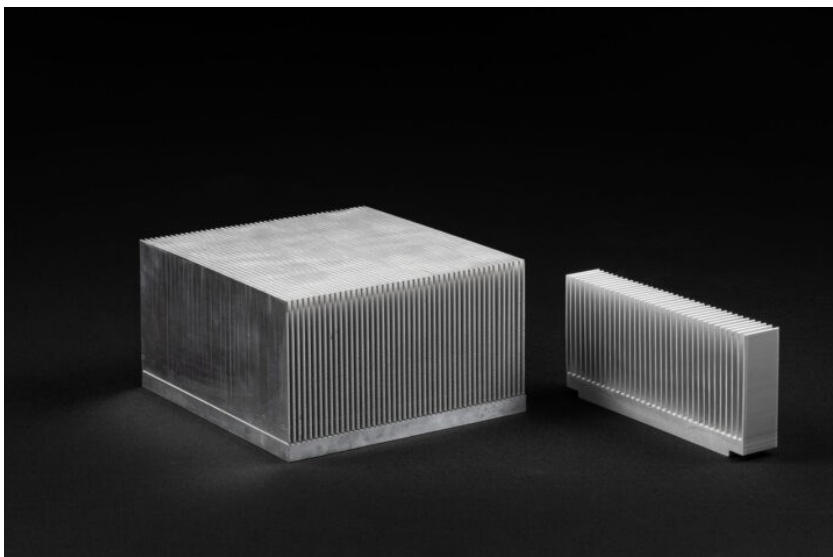
Jäähdytyslementtejä valmistetaan muun muassa suulakepuristamalla tai höylämällä. Valmistustavan valinta riippuu valmistusmäärästä sekä halutusta jäähdytyslementin profiilista.

Suulakepuristus tarkoittaa lämpömuovausprosessia, jossa sulatettu materiaali puristetaan muotin läpi, jolloin saavutetaan haluttu profiili (kuva 30). Suulakepuristus vaatii aina erillisen muotin, jonka vuoksi tämä menetelmä sopii suuremmille valmistusmäärille. Muotin teknisten vaatimusten vuoksi elementin ripojen korkeus ja tiheys ovat rajoitettuja. (47.)



Kuva 30. Suulakepuristamalla valmistettu jäähdytyslementti (47).

Höyläämisellä tarkoitetaan menetelmää, jossa alumiiniaihiosta nostetaan rivat ylös höyläämällä. Tällä menetelmällä on mahdollista valmistaa pienempiä elementtejä, joissa on tiheästi ripoja, nostaen elementin jäähdytystehoa (kuva 31). Tämä menetelmä ei vaadi erillistä muottia, joten tällä menetelmällä voidaan valmistaa kustannustehokkaasti erikoisempia profiileita. Höyläämistä kutsutaan myös skiving-tekniologiaksi. (48.)



Kuva 31. Höylämällä valmistettuja jäähdytyslementtejä (48).

Jäähdytyslementtiin kiinniruvattavat komponentit siirtävät kosketuksen kautta lämpöä elementtiin. Tämän vuoksi jäähdytyslementin pinnan täytyy olla geometrisesti tasomainen sekä sillä on oltava mahdollisimman pieni pinnankarheus. Näillä varmistetaan, että komponentit saavat mahdollisimman suuren kosketuspinta-alan. Tämän avulla komponentit siirtävät mahdollisimman paljon lämpöä jäähdytyslementtiin.

7.2 Suljettu ilmajäähdytys (Lämmönvaihdin)

Suljettu ilmajäähdytys tarkoittaa menetelmää, jossa laitteen sisä- ja ulkoilma ovat erillään toisistaan (kuva 32). Suljetun ilmajäähdytyksen avulla voidaan käyttää ilmajäähdytystä kohteissa, joissa on suuri saastetaso, ilman että saaste pääsee koteloinnin sisälle. Tämä menetelmä ei tarvitse suuria ilmankulkuaukkoja, vaan käyttää jäähdytykseen lämmönvaihdinta. Tämän vuoksi tätä menetelmää voidaan käyttää kohteissa, joissa vaaditaan korkeampia IP-luokituksia. Tämän vuoksi se on houkutteleva vaihtoehto nestejäähdytykselle sen kustannustehokkuutensa vuoksi. (49.)



Kuva 32. Suljetun ilmajäähdytyksen periaatekuva (50).

7.3 Nestejäähdytys

Nestejäähdytys on ilmajäähdytystä tehokkaampi vaihtoehto, joka sopii erinomaisen jäähdytystehokkuutensa vuoksi vaativampiin sovelluksiin, joissa tarvitaan korkeat IP-luokitukset sekä korkeat käyttöjännitteet. Nestejäähdytyksessä ilmaa ei puhalleta laitteen koteloinnin läpi, minkä ansiosta voidaan koteloinnista tehdä täysin tiivis. Nestejäähdytys on myös hiljaisempi vaihtoehto, koska se ei vaadi erillistä puhallinta.

Parempi jäähdytystehokkuus johtuu jäähdytysnesteen korkeammasta lämpökapasiteetista, joka mahdollistaa suuren lämmön siirtämisen pienemmällä virtauksella. Jäähdytysnesteenä käytetään usein veden ja glykolin sekoitusta. Tällä sekoituksella saadaan hyödynnettyä veden suurta lämpökapasiteettia ja alennettua sen matalaa jäätymispistettä glykolin avulla.

Nestejäähdytys on kalliimpi vaihtoehto ilmajäähdytykselle, koska se tarvitsee aina monimutkaisemman jäähdytysjärjestelmän, joka pumppaa nestettä putkia pitkin laitteen läpi lämmönvaihtimen kautta, joka poistaa lämpöä nesteestä.

Tällaisen järjestelmän alkuinvestointi on huomattavasti kalliimpi, mutta voi olla kustannustehokkaampi pitkällä aikavälillä sen energiatehokkuuden vuoksi. Poistettua lämpöä voidaan myös ottaa talteen ja siten hyödyntää muissa kohteissa, jonka ansiosta energiatehokkuus parantuu entisestään. (51.)

8 Lämmitys

Laitteen lämmitys voi olla tarpeen, jos sitä on tarkoitus käyttää kylmissä tai kosteissa olosuhteissa. Esimerkiksi taajuusmuuttajissa käytettävät tehoelektronikkakomponentit ovat herkkiä kylmille ja kosteille olosuhteille, eivätkä siten toimi kunnolla. Lämmittämisen avulla saadaan elektroniikka esilämmitettyä ja ylimääräinen kosteus haihdutettua, jonka avulla vältetään kylmäkäynnistyksestä aiheutuvat haitat. Lämmitysominaisuuden avulla saadaan myös esilämmitettyä sähkömoottori, johon taajuusmuuttaja on kytketty.

Taajuusmuuttajia lämmitysominaisuudella käytetään varsinkin tuulivoimaloissa, koska tuuliturbiinin sisällä esiintyy usein paljon kondensoitunutta vettä sekä suuria lämpötilanvaihteluita. Kondensoitunut vesi tulee ongelmaksi varsinkin silloin kun moottoria käytetään tyhjäkäynnillä alhaisen sähkökysynnän vuoksi öisin, jolloin lämpötilat ovat alhaisimmillaan. Tällöin kondensoitunut vesi voi kerääntyä laitteiden kotelointien sisälle ja aiheuttaa pahimmillaan laitteiden oikosulkuja ja vikaantumisia. (52;53.)

Lämmitysominaisuus moottorille voidaan toteuttaa taajuusmuuttajissa käytännössä niin, että syötetään pientä tasajännitettä lämmitettävän moottorin käämeihin, joka synnyttää lämpöä. Tämän vuoksi erillisiä lämmitysvastuksia ei tarvita. (53.)

9 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä tutkittiin teollisuudessa käytettävien sähkö- ja kytkentäkaappien mekaniikkasuunnittelua ja erityisesti niihin liittyviä turvallisuusvaatimuksia. Työn tavoitteena oli laatia yksityiskohtainen suunnitteluohje, jonka avulla tehostetaan suunnittelijoiden perehdytystä. Tämä tukee turvallisten sekä vaatimustenmukaisten laitteiden toteuttamista. Työssä käsiteltiin erityisesti ympäristön ja olosuhteiden vaikutuksia vaatimukseen, kuten IP-luokitukseen, eristyskoordinaatioon, eristeen valintaan, jäähdytykseen sekä lämmitystarpeeseen.

Lopputuloksena syntyi ohje, joka kattaa kaikki keskeiset suunnitteluperiaatteet tehostaen suunnittelutyötä. Tässä työssä käsitellyjä asioita voidaan hyödyntää muistilistana sekä perehdytysmateriaalina. Ohje soveltuu kaikille teollisuuden koteloituille sähkölaitteille, joiden käyttöjännite on enintään 1500 VDC tai 1000 VAC. Haastetta työn tekemisessä aiheutui sähkölaitesuunnitteluun liittyvistä monimutkaisista vaatimuksista sekä standardeista. Lisähaasteena oli saada työ tiivistettyä mahdollisimman pieneksi, jotta sitä voitaisiin käyttää mahdollisimman tehokkaasti.

Tutkimuksen aikana kävi ilmi lähtötietojen tärkeys. On todella tärkeää määritellä laitteelle mahdollisimman kattavat lähtötiedot, jotta voidaan suunnitella laite, joka pysyy turvallisena sille tarkoitetuissa käyttöolosuhteissa. Laitteen käyttöolosuhteiden avulla määritellään koteloinnin vaatimukset, ylijänniteluokat, saastetasot, eristevälit, eristemateriaalit, jäähdytysmenetelmä sekä lämmitystarve.

Lähteet

- 1 Laine, Henri. 2025. Department Manager of Mechanical Engineering, Etteplan, Vantaa. Haastattelu 7.2.2025.
- 2 EN60068-1:2014. Standard for Environmental Testing, Standard atmospheric conditions. ISO – International Organization for Standardization.
- 3 What is Electrical Enclosure? 2022. Verkkoaineisto. Doho Electric. <<https://dohoelectric.com/what-is-electrical-enclosure/>>. Luettu 28.2.2025
- 4 EN60204-1:2018. Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteisto. ISO – International Organization for Standardization. Luettu 28.2.2025
- 5 KDMFAB IP45 Enclosures. Verkkoaineisto. KDM Fabrication. < [IP45 Enclosure - KDM Fabrication](#) >. Luettu 28.2.2025
- 6 EN60529/A2:2013. Degrees of protection provided by Enclosures (IP Code). ISO – International Organization for Standardization.
- 7 SFS-EN ISO 12100:2010. Koneturvallisuus. Yleiset suunnitteluperiaatteet, riskin arviointi ja riskin pienentäminen. Suomen Standardisoimisliitto.
- 8 SFS-EN IEC 61439-1:2022. Pienjännitekeskukset. Osa 1: Yleisvaatimukset. Suomen Standardisoimisliitto.
- 9 Tech, Lars. 2025. Comparative Tracking Index (CTI). Verkkoaineisto. Dr. Dietrich Mueller GmbH. < <https://www.mueller-ahlhorn.com/en/comparative-tracking-index-cti/> >. Luettu 7.3.2025
- 10 SFS-EN IEC 60664-1:2020. Insulation coordination for equipment within low-voltage supply systems – Part 1: Principles, requirements and tests. Suomen Standardisoimisliitto.
- 11 Roberts, Steve. 2021. Overvoltage Categories in Power Supply Systems. Verkkoaineisto. EE Power. <<https://eepower.com/technical-articles/over-voltage-categories-in-power-supply-systems/#>>. Luettu 14.3.2025
- 12 Khan, Sohaib Rehman. 2023. Altitude corrections for external insulation design. Verkkoaineisto. <[Altitude corrections for external insulation design](#)>. Luettu 21.3.2025

- 13 Pollution degree rating for electrical equipment. 2024. Verkkoaineisto. NI. <<https://www.ni.com/en/support/documentation/supplemental/22/pollution-degree-rating-for-electrical-equipment.html>>. Päivitetty 10.7.2024. Luettu 21.3.2025
- 14 Gao, Chen. 2023. Circuit Board Insulation Design According to IEC60664 for Motor Drive Application. Verkkoaineisto. Texas Instruments. <https://www.ti.com/lit/wp/sluaar5/slu-aar5.pdf?ts=1744800017420&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.bing.com%252F>. Luettu 21.3.2025
- 15 Ilman dielektrinen lujuus. 2021. Verkkoaineisto. Trend Repository. <<https://trendrep.net/fi/ilman-dielektrinen-lujuus/>>. Luettu 21.3.2025
- 16 What is electrical insulator? Definition, Types & Properties. 2024. Verkkoaineisto. How Electrical. <<https://howelectrical.com/electrical-insulator/>>. Luettu 28.3.2025
- 17 Muovitetopankki. PP – Polypropeeni. Verkkoaineisto. VINK Finland OY. <https://www.vink.fi/pp_muovi>. Luettu 28.3.2025
- 18 Formex GK. Verkkoaineisto. ITW Formex. <[Formex GK | Flame Retardant & Electrical Insulation Sheets](#)>. Luettu 28.3.2025
- 19 Muovitetopankki. PC – Polykarbonaatti. Verkkoaineisto. VINK Finland OY. <[Polykarbonaatti | Vink Finland Oy](#)>. Luettu 28.3.2025
- 20 Lexan FR60 Film. Product datasheet. 2020. Verkkoaineisto. Sabic. <<https://ff.sabic.eu/uploads/resources/1603093536-84502715-LEXAN-FR60-FILM-DATASHEET-2020.pdf>>. Luettu 28.3.2025
- 21 Nomex. Verkkoaineisto. ScienceDirect. <[Nomex - an overview | ScienceDirect Topics](#)>. Luettu 28.3.2025
- 22 Materiaalit 3D-tulostuksessa. Verkkoaineisto. 3D-Formtech. <<https://3dformtech.fi/materiaalit/>>. Luettu 28.3.2025
- 23 Dielectric Strength of Insulating Materials. Verkkoaineisto. Engineering Toolbox. <[Dielectric Strength of Insulating Materials](#)>. Luettu 28.3.2025
- 24 Edwards, Milly. 2021. What is a busbar? Verkkoaineisto. IIF. <[What is a busbar? Which is best copper or aluminium?](#)>. Luettu 4.4.2025
- 25 Chen, Jony. 2023. Copper vs Aluminum busbars. Which Is Right for Your Project? Verkkoaineisto. Mic Pressed. <<https://www.micpressed.com/copper-vs-aluminum-busbars-which-right-for-your-project/>>. Luettu 4.4.2025

- 26 Aluminium Bus Bar for Alternate Voltage Applications. Verkkoaineisto. EMS-Industrial. < [Aluminum Bus Bar Fabrication & Supplier - EMS Industrial](#)>. Luettu 4.4.2025
- 27 Jormalainen, Antti. 2021. Teräsmateriaalien viruminen ja sen laskentamenetelmät. Kandidaatintyö. LUT-yliopisto, Teknillinen Yliopisto. Lutpub-tietokanta.
- 28 Creep Deformation in Aluminum Alloys. 2025. Verkkoaineisto. EMK. <[Creep Deformation in Aluminum Alloys: Causes, Consequences, and Solutions - Elka Mehr Kimiya](#)>. Luettu 4.4.2025
- 29 Lindberg, Jarmo. 2019. Al- ja Cu-johtimien päättäminen ja liittäminen liitäntäalustaan. Verkkoaineisto. Sonepar. <<https://shop.sonepar.fi/fi-fi/static/uutishuone-ajankohtaisia-uutisia/uutishuone-blogit/al-ja-cu-johtimet-liitos>>. Luettu 4.4.2025
- 30 Dewa, Rando & Park, Jeong & Kim, Seon & Lee, Sang. 2018. High-Temperature Creep-Fatigue Behavior of Alloy 617. Verkkoaineisto. Department of Mechanical Desing Engineering. Pukyong National University. < [High-Temperature Creep-Fatigue Behavior of Alloy 617](#)>. Luettu 4.4.2025
- 31 Why Busbar is Rectangular: An In-Depth Guide. 2025. Verkkoaineisto. Busbar Machine. < <https://busbarmachine.org/why-busbar-is-rectangular/#:~:text=While%20rectangular%20bus%20reigns%20supreme%20for%20typical%20usage%2C,3%20Applications%20requiring%20many%20bends%20or%20special%20shaping>>. Luettu 4.4.2025
- 32 Virtakiskot levy- ja lattakuparista. Verkkoaineisto. Leden Group. < [Virtakiskot levy- ja lattakuparista - Leden Group](#)>. Luettu 4.4.2025
- 33 Round Copper Bar Busbar for sf6 F Unit 10kv Inflatable Cabinet. Verkkoaineisto. GTELEC. <[Round Copper Bar Busbar for Sf6 F Unit 10kv Inflatable Cabinet - Round Copper Bar and Inflatable Cabinet Copper Busbar](#)>. Luettu 4.4.2025
- 34 Laine, Henri. 2025. Department Manager of Mechanical Engineering. Etteplan, Vantaa. Haastattelu 11.4.2025.
- 35 Rako, Paul. 2020. What's the difference between busbars and cables? Verkkoaineisto. Electronic Design. < [What's the Difference Between Busbars and Cables? Advantages and Disadvantages | Electronic Design](#) >. Luettu 4.4.2025
- 36 Support insulators. Verkkoaineisto. Heatterm. < [Support insulators - Heatterm Oy](#) >. Luettu 4.4.2025

- 37 Guide to different coating options for copper busbars. 2024. Verkkoaineisto. FPIConn. <<https://fpiconn.com/a-complete-guide-to-different-coating-for-copper-busbars/>>. Luettu 4.4.2025
- 38 Hopeointi. Verkkoaineisto. Mecapinta. <<https://www.mecapinta.fi/fi/palvelut/hopeointi/>>. Luettu 4.4.2025
- 39 Jason. 2024. Busbar plating: Why Do You Need Plated Busbars? Verkkoaineisto. Tulingmetal. <<https://www.tulingmetal.com/busbar-plating/>>. Luettu 4.4.2025
- 40 Tinaus. Verkkoaineisto. Mecapinta. <<https://www.mecapinta.fi/fi/palvelut/tinaus/>>. Luettu 4.4.2025
- 41 Tin Plated Copper Busbar. Verkkoaineisto. Adinath Enterprises. <[Tin Plated Copper Busbar – adinathenterprises.com](https://adinathenterprises.com/tin-plated-copper-busbar)>. Luettu 4.4.2025
- 42 LaPorta, Jon. 2022. Active and Passive Cooling Methods: A Simple Way to Calculate Cooling Requirements. Verkkoaineisto. Pfannenberg USA. <<https://www.pfannenbergusa.com/active-and-passive-cooling-methods-a-simple-way-to-calculate-cooling-requirements/>>. Luettu 11.4.2025
- 43 Szemanski, Michelle. 2019. Cooling Electrical Enclosures: Two Ways to Keep Your Cool. Verkkoaineisto. Panelshop. <[Cooling Electrical Enclosures: Two Ways to Keep Your Cool](https://panelshop.com/cooling-electrical-enclosures-two-ways-to-keep-your-cool)>. Luettu 11.4.2025
- 44 What are heat sinks? How heat sinks work & popular types. 2024. Verkkoaineisto. Arrow. <[The Ultimate Guide to Heat Sinks: Everything You Need to Know | Arrow.com](https://arrow.com/ultimate-guide-to-heat-sinks)>. Luettu 11.4.2025
- 45 Best Aluminum Alloys for heat transfer. Verkkoaineisto. Clinton Aluminum. <<https://clintonaluminum.com/best-aluminum-alloys-for-heat-transfer/>>. Luettu 11.4.2025
- 46 Hrnjicevic, Ismar. 2024. What Is a Heatsink, and How Does It Work? Verkkoaineisto. How to geek. <<https://www.howtogeek.com/what-is-a-heatsink/>>. Luettu 11.4.2025
- 47 Suulakepuristus. Verkkoaineisto. Purso AluCool. <[Pursottamalla tehdyt elementit - Purso AluCool](https://pursoalucool.com/pursottamalla-tehdyt-elementit-purso-alucool)>. Luettu 11.4.2025
- 48 Skiving-teknologia. Verkkoaineisto. Purso AluCool. <[Skiving-teknologialla suurta jäähdytystehoa - Purso AluCool](https://pursoalucool.com/skiving-teknologialla-suurta-jaahdytystehoa-purso-alucool)>. Luettu 11.4.2025

- 49 Villa, Herb. 2020. IT Enclosure Climate Control: Closed Loop Cooling for Rack and Row Solutions. Verkkoaineisto. Rittal. < [IT Enclosure Climate Control: Closed Loop Cooling for Rack and Row Solutions](#)>. Luettu 17.4.2025
- 50 Cooling with Closed Loop Cooling Units. 2015. Verkkoaineisto. Pfannenberg USA. < [The Technology of Cooling: Cooling with Closed Loop Cooling Units - Pfannenberg USA](#)>. Luettu 17.4.2025
- 51 Liquid cooling for electronics enclosures. 2014. Verkkoaineisto. DesignSolutions. < [Liquid cooling for electronics enclosures - Design Solutions](#)>. Luettu 17.4.2025
- 52 Motor Heating Using the VFD to pre-heat the motor. Verkkoaineisto. 2022. ABB Drives. < [Technical Note 074 Motor heating.pdf](#) >. Luettu 17.4.2025
- 53 Troskie, Benjamin. Most common reasons for wind turbine failures. Verkkoaineisto. Cotes. < <https://www.cotes.com/blog/most-common-reasons-for-wind-turbine-failures> >. Luettu 17.4.2025
- 54 VFD “Motor Pre-heat function”. Verkkoaineisto. Gozuk. < <http://www.vfds.in/vfd-motor-pre-heat-function-220813.html#:~:text=This%20function%20produces%20a%20low%20level%20DC%20Current,is%20the%20same%20function%20of%20motor%20space%20heaters.>>. Luettu 17.4.2025