



**Lämpösyklus osana kiihdytettyä elinikätestausta**

**Thermal cycling as a part of accelerated life testing**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2023

Lauri Tontti

Tarkastaja: TkT Tommi Kärkkäinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Lauri Tontti

### **Lämpösyklus osana kiihdytettyä elinikätestausta**

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2023

29 sivua, 3 kuvaa

Tarkastaja: TkT Tommi Kärkkäinen

Avainsanat: Kiihdytetty elinikätestaus, lämpösyklus, tuotteen elinikä, tuotteen vikaantuminen

Tuotteiden eliniän määrittäminen on tärkeää, jotta tuote voidaan saattaa myyntiin. Elinikä tulee usein määrittää rajallisessa ajassa. Kiihdytetty elinikätestaus on yleisesti käytetty tapa määrittää tuotteen elinikä lyhyessä ajassa. Lämpösyklus on yksi monista kiihdytetyn elinikätestauksen vaihtoehtoista.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, milloin lämpösyklus on hyvä tapa testata tuotteen elinikää. Lisäksi selvitettiin, mitä lämpösyklaustestin suunnittelussa tulee ottaa huomioon, ja miten elinikä saadaan määriteltyä testien perusteella. Tutkimuksessa tarkastellaan myös, tuotteiden elinikää sekä vikaantumista käsitteinä. Tutkimus on kirjallisuuskatsaus.

Lämpösyklus on perusteltu testausmenetelmä, jos tuote joutuu sietämään lämpötilojen vaihtelua kenttäolosuhteissa. Tällöin tuotteen vikaantuminen saadaan tapahtumaan samalla tavalla sekä testi- että kenttäolosuhteissa. Lämpösyklaustestin suunnitteluun liittyy testin parametrien valinta. Nämä valinnat vaikuttavat testin nopeuteen ja testitulosten ja tosielämän korrelointiin. Tuotteen todellinen elinikä saadaan mallinnettua testitulosten perusteella eri menetelmien kuten Weibull-analyysin ja mallien kuten Norris-Landzbergin mallin avulla.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Lauri Tontti

### **Thermal cycling as a part of accelerated life testing**

Bachelor's thesis

2023

29 pages, 3 figures

Examiners: PhD Tommi Kärkkäinen

Keywords: Accelerated life testing, thermal cycling, product life, product failure

To sell the product, it's important to be able to define the life of the product. Often the life must be defined in a given limited time. Accelerated life testing is commonly used method to define product's life in short period of time. Thermal cycling is one of many ways to perform an accelerated life testing.

The objective of this thesis was to find out when is the thermal cycling a reasonable way to test product's life. It was also investigated what factors should be considered while planning a thermal cycling test and how can the life be estimated from the test results. In this thesis definitions of product life and product failure are examined. This thesis is a literature review.

Thermal cycling is reasonable test method when the product goes through temperature changes on the field. Because of this the product's failure happens the same way in test and operational conditions. Planning thermal cycling test includes choosing parameters for the test. The parameters affect the length of the test and correlation between product's real life and the test life. Real life can then be estimated using different methods such as Weibull analysis, and various models such as Norris-Landzberg's model.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

$ALT$	kiihdytetty elinikätestaus
$\beta$	Weibull-muotoparametri
$\mu$	Weibull-skaalausparametri
$R(t)$	luotettavuusfunktio
$AF$	kiihtyvyyserroin
$t_{use}$	tuotteen elinikä kenttäolosuhteissa
$t_{test}$	tuotteen elinikä testiolosuhteissa
$\Delta T_{use}$	kenttäolosuhteiden lämpötilojen erotus
$\Delta T_{test}$	testauksessa käytettyjen lämpötilojen erotus
$m$	Coffin-Mansonin vakio
$f_{use}$	lämpösyklitaajuus kenttäolosuhteissa
$f_{test}$	lämpösyklitaajuus testiolosuhteissa
$E_a$	aktivointienergia
$k$	Boltzmannin vakio
$T_{max,use}$	maksimilämpötila kenttäolosuhteissa
$T_{max,test}$	maksimilämpötila testiolosuhteissa
$n$	Norris-Landzbergin mallin toinen parametri

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	6
1.1	Taustaa .....	6
1.2	Työn tavoitteet ja rajaus .....	8
2	Työssä käytetyt menetelmät .....	9
3	Tuotteen elinikä .....	10
3.1	Elinikä käsitteenä .....	10
3.1.1	Suunniteltu käyttöikä .....	10
3.1.2	Todellinen käyttöikä .....	11
3.2	Tuotteen vikaantuminen.....	12
3.3	Eliniän kokeellinen määrittäminen .....	12
3.4	Weibull-analyysi .....	13
4	Lämpösyklus.....	16
4.1	Mihin lämpösyklus sopii? .....	16
4.2	Lämpösyklustestin suunnittelu .....	17
4.2.1	Testin parametrien optimointi.....	18
4.2.2	Testissä käytettävä väliaine sekä laitteisto.....	19
5	Eliniän määrittäminen testituloksista .....	21
5.1	Eliniän määrittäminen kiihtyvyykertoimen avulla.....	21
5.2	Coffin-Mansonin malli.....	22
5.3	Norris-Landzbergin malli.....	23
6	Yhteenveto.....	25
	Lähdeluettelo .....	27

# 1 Johdanto

## 1.1 Taustaa

Nykyään löytyy lukuisia vaihtoehtoja lähes jokaiselle tuotetyypille. Esimerkiksi älylaitteita löytyy huomattavalle määrälle erilaisia kuluttajia monelta eri valmistajalta. Kuluttaja joutuu usein vaikean päätöksen eteen valitessaan näiden monien tuotteiden väliltä. Yksi erittäin suuri kuluttajan valintaan vaikuttava tekijä on valmistajan maine. Lisäksi muiden kokemukset kyseisen tuotteen toimivuudesta vaikuttavat vahvasti tuotteen valintaan. Yritysten on erittäin tärkeää vastata asiakkaiden odotuksiin, jotta luottamus yritystä kohtaan säilyy. Kaikista näistä syistä tuotteen tulee toimia sille määritellyn eliniän ajan. (Lone & Ahmed, 2021).

Mikäli tuote ei vastaa odotuksia, yrityksen maine kärsii. Tuotteen eliniän määrittäminen ennen myyntiä on siis oleellista. Lisäksi tuotteen testiaika on usein hyvin rajoittunut, jotta tuote saadaan mahdollisimman nopeasti myyntiin. Elinikätestausta ei voida yleensä toteuttaa normaaleissa tuotteen käyttöolosuhteissa, sillä muuten testaaminen vaatisi tuotteen eliniän pituisen testin. Esimerkiksi jos tuotteen tulee kestää normaaleissa käyttöolosuhteissa 10 vuotta, ei sitä voida testata 10 vuotta ja vasta sitten julkaista myyntiin. Tämän vuoksi eliniän määrittämiseen käytettävään testaukseen tarvitaan kiihdytettyä elinikätestausta. (Lone & Ahmed, 2021).

Kiihdytetty elinikätestaus, ALT (Accelerated Life Testing), on testausmenetelmä, jolla pyritään testityypistä riippuen arvioimaan joko testattavan tuotteen realistista elinikää tai tuotteen vikaantumismekanismeja. Vikaantumismekanismeja arvioidessa puhutaan kvalitatiivisesta kiihdytetystä elinikätestauksesta. Kun taas tarkastellaan tuotteen elinikää, puhutaan kvantitatiivisesta kiihdytetystä elinikätestauksesta. (Freels, ym. 2015).

Kiihdytetty elinikätestaus voidaan toteuttaa kiihdyttämällä tuotteen käyttöä tai asettamalla tuote sen normaaleista olosuhteista poikkeaviin. Tuotteen kiihdytetty käyttäminen on yksinkertainen tapa testata tuotetta, kun osataan arvioida tuotteen käytön määrä kuluttajan käytössä. Jos esimerkiksi tuote on kytkin, jota käytetään normaalisti kymmenen kertaa päivässä, ja kytkimen tulee olla toimintakykyinen 10 vuoden käytön jälkeen, tulee kytkimen kestää 36 500 käyttötoimenpidettä. Kiihdytetty elinikätestaus voidaan toteuttaa esimerkiksi

käyttämällä kytkintä tuhat kertaa päivässä, jolloin testaaminen vie vain 36,5 vuorokautta. (Yang, 2005).

Tällainen testaaminen on mahdollista, mikäli nopea käyttö ei vaikuta tuotteen toimintaan. Kiihdytetty käyttäminen normaalioloissa ei kuitenkaan ole mahdollista, mikäli tuotteen on oltava jatkuvassa toiminnassa tietyssä tilassa tai tuotetta käytetään esimerkiksi vain kerran (Muhammad ym. 2020). Tällaisia tuotteita ei voida testata normaaleissa olosuhteissa kiihdytetysti, sillä tuotteen vikaantuminen ei perustu tiettyyn suoritettavaan toimenpiteeseen, joita sen tulee kestää tietty määrä. Esimerkkejä tällaisista tuotteista voivat olla kranaatti (kertakäyttöinen) ja digitaalinen lämpömittari (toiminnassa jatkuvasti).

Edellä esitettyjen tuotteiden kiihdytetty elinikätestaus vaatii olosuhteiden muuttamista siten, että tuotteeseen kohdistuu enemmän rasitusta. Suurempi rasitus johtaa tuotteen nopeampaan vikaantumiseen. Rasitustekijänä voi toimia esimerkiksi korkea lämpötila, värähtely tai jännite. Kyseisen tekijän valintaan vaikuttaa se, millä tavoin tuote vikaantuu. Jos tuotteen vikaantumiseen vaikuttaa ilmankosteus, yksi mahdollinen rasitustekijä voi testauksessa olla kosteus. (Mohammadian ym. 2009).

Kiihdytettyjä elinikätestauksia toteutetaan tuotteen mukaan hyvin monella eri tavalla. Yksi keskeinen tapa on lämpösyklus. Schützen ja Malessan (2007) mukaan lämpösyklusessa testattava tuote tai komponentti testataan vaihtelemalla lämpötilaa kahden lämpötilan välillä ja täten se on toimiva testausmenetelmä tuotteille, jotka joutuvat normaaleissa olosuhteissa alttiiksi lämpötilojen vaihtelulle.

Shokkitestaaminen ja tehosyklus ovat myös yleisiä testimetodeja. Shokkitestaaminen, kuten lämpösyklus, perustuu lämpötilojen muutokseen. Shokkitestaamisen ero lämpösyklusseen on nopeampi lämpötilojen muutos (de Vries ym. 2007). Fan, ym. (2005) mukaan shokkitestaaminen aiheuttaa tuotteen nopeamman vikaantumisen, mikä selittyy suuremmalla rasituksella. Tehosyklus taas tarkoittaa testiä, jossa testattavalle tuotteelle syötetään tehoa, jota katkotaan halutulla aikavälillä (Hosoya ym. 2020).

## 1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, milloin lämpösyklus on paras vaihtoehto eliniän määrittämiseen. Tarkastellaan tätä tuotteen vikaantumisen näkökulmasta. Lisäksi tutkitaan, mitä lämpösyklusin suunnittelussa ja toteutuksessa tulee ottaa huomioon ja miten suoritettua lämpösyklustestistä saadaan määriteltyä elinikä mahdollisimman realistisesti. Tutkimuksen alussa selvitetään, mitä elinikä ja vikaantuminen tarkoittavat käsitteinä, ja mitä tulee ottaa huomioon eliniän kokeellisessa määrittämisessä.



## 2 Työssä käytetyt menetelmät

Tämä kandidaatintyö toteutettiin kokonaisuudessaan kirjallisuustutkimuksena. Työ aloitettiin tutustumalla lämpösyklaukseen ja kiihdytettyyn elinikätestaukseen pintapuolisesti verkkolähteiden ja tieteellisten lähteiden avulla. Tällöin syntyi hyvä yleiskäsitys ja ymmärrys, mitä kyseisillä termeillä tarkoitetaan. Tämän jälkeen alkoi tutkimuskysymyksiä muokkaaminen ja alustavan työn rakenteen suunnittelu.

Ensin tutkittiin eliniän määrittämistä ja mitä kiihdytettyllä elinikätestauksella pyritään saavuttamaan. Tämän jälkeen etsittiin vastauksia tutkimuskysymyksiin lukuisten tieteellisten aineistojen, kuten kirjojen, artikkelien ja testausraporttien avulla. Selvitettiin, milloin lämpösyklaukseen on tarvittava testausmuoto. Tätä seurasi lämpösyklauksen suunnittelussa huomiioon otettavien asioiden tarkastelu. Lopuksi tutkittiin eliniän määrittämistä testien perusteella.

## 3 Tuotteen elinikä

Tuotteen elinikä ei ole täysin yksiselitteinen käsite. Joskus sillä tarkoitetaan puhekielessä aikaa tuotteen valmistumisesta siihen, että tuote kierrätetään. Joskus taas saatetaan puhua ajasta, jona tuotetta käytetään. Tässä luvussa esitetään kaksi eliniän käsitettä, suunniteltu käyttöikä ja todellinen käyttöikä. Tarkastellaan näiden eroa ja pohditaan, voiko näitä määrittää kokeellisesti kiihdytetyllä elinikätestauksella. Lisäksi esitetään, millaisia vikaantumismenetelmiä on olemassa ja tarkastellaan elinikätestausta Weibull-analyysin avulla.

### 3.1 Elinikä käsitteenä

#### 3.1.1 Suunniteltu käyttöikä

Suunnitellulla käyttöiällä tarkoitetaan sitä aikaa, jonka tuotteen oletetaan kestävän käytössä siihen saakka, kunnes se ei enää suunnittelijan mukaan toimi halutusti (Jayatilleka, 2018). Jayatillekan mukaan suunniteltu käyttöikä tulee olla tiedossa, kun halutaan kiihdytetyn elinikätestauksen avulla määrittää todellinen käyttöikä.

Suunniteltu käyttöikä ei ole kuluttajan päätettävissä, vaan se on suunnittelijan tuotteelle valitsema (Jayatilleka, 2018). Coxin ym. (2013) mukaan tämä tarkoittaa, että suunnittelija päättää, milloin tuote ei enää toimi halutulla tavalla. Voi siis olla, että tuote ei toimi täydellisesti vuosien käytön jälkeen, mutta suunniteltu käyttöikä ei silti ole tullut vielä vastaan. Esimerkiksi vain jokin tuotteen komponentti saattaa olla vioittunut, mutta tuote suorittaa silti suunnittelijan mukaan hänen sille asettamansa tehtävän. Jos kuluttaja käyttää tuotetta säästeliäämmin, kuin suunnittelija on odottanut, tuote saattaa vikaantua vasta suunnitellun käyttöiän jälkeen.

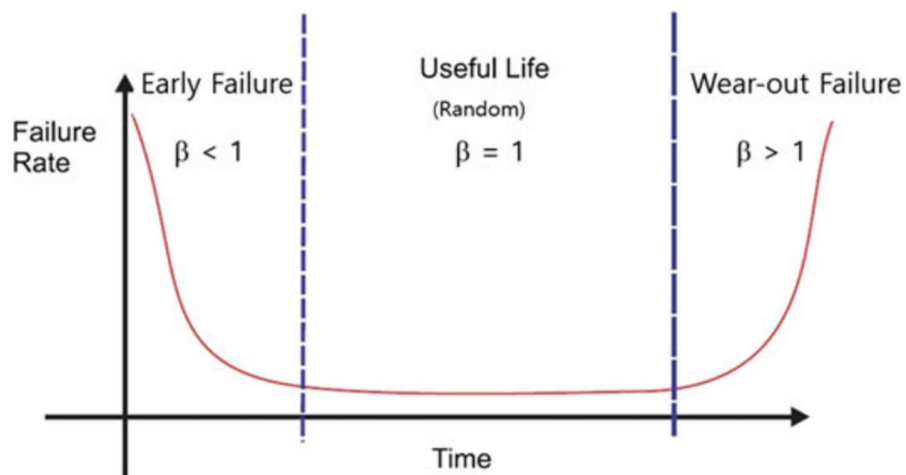
Vaikka suunniteltu käyttöikä on suunnittelijan valitsema, sen tulee kuitenkin perustua asiakkaiden odotuksiin. Jayatillekan (2018) mukaan markkinavoimat vaikuttavat vahvasti asiakkaiden odotuksiin koskien tuotteen elinikää. Cox ym. (2013) esittää, että esimerkiksi usein kotitalouksien laitteiden, kuten television, uunin ja jääkaapin, oletetaan kestävän noin

kymmenen vuotta. Cooperin (2004) suoritetun tutkimuksen mukaan valtaosa kuluttajista kokee tuotteen suunnitellun käyttöiän olevan tärkeä tietää ennen ostopäätöstä.

### 3.1.2 Todellinen käyttöikä

Jayatillekan (2018) mukaan todellisella käyttöiällä tarkoitetaan sitä aikaa, minkä tuote kestää käyttöönotosta vikaantumiseen. Se ei aina vastaa suunniteltua käyttöikää. Jayatilleka esittää, että todellinen käyttöikä tarkoittaa sitä aikaa, jonka tuote todellisuudessa kestää kuluttajan käytössä. Kiihdytetyn elinikätestauksen avulla voidaan määrittää todellisen käyttöiän todennäköisyys. Mikäli tuote ei selviä suunniteltuun käyttöikään suurella todennäköisyydellä, tulee tuotetta parannella, ennen sen myyntiin asettamista. Todelliselle käyttöiälle on myös käytössä eri termejä. Esimerkiksi Liu ym. (2016) puhuvat tuotteen jäljellä olevasta hyödyllisestä eliniästä (Remaining Useful Life).

Todellinen käyttöikä noudattaa usein Woon (2020) esittämää niin kutsuttua kylpyammekäyrää (kuva 1). Kylpyammekäyrä noudattaa vähintään kolmea Weibull-jakaumaa eli eräänlaista todennäköisyysjakaumaa (Bebbington ym. 2012).



Kuva 1. Kylpyammekäyrä (Woo, 2020).

Kuvassa (1) näkyvässä kylpyammeikäyrässä vaaka-akselilla on aika ja pystyakselilla tuotteen vikaantumistiheys. Kylpyammeikäyrä esittää, kuinka tuotteen eliniän alkuvaiheessa, eli sisäänajokaudessa (early failure), sekä loppuvaiheessa, eli kulumiskaudessa (wear-out failure), tuotteita vikaantuu paljon. Näiden vaiheiden välistä aluetta kutsutaan käyttökaudeksi (useful life). Käyttökauden aikana vikaantuminen on tasaisempaa ja vähäisempää, kun sisäänajovaiheessa sekä kulumiskaudessa. Kuvassa esiintyvä parametri  $\beta$  on Weibull-muoto-parametri. Sitä käsitellään tarkemmin luvussa 3.4.

### 3.2 Tuotteen vikaantuminen

Tuotteen vikaantuminen voi johtua useasta eri syystä. Ingmanin (2022) mukaan liiallinen rasitus sekä kuluminen ovat yleisimmät syyt tuotteen vikaantumiseen. Tuotteeseen kohdistuvalla liiallisella rasituksella tarkoitetaan rasitusta, joka on suurempi, kuin jota tuote on suunniteltu kestävänsä. Kuluminen taas tarkoittaa vikaantumista, joka tapahtuu väistämättä ajan kuluessa. Kuluminenkin johtuu tuotteeseen kohdistuvasta rasituksesta, mutta tämä rasitus ei ylitä tuotteen sietorajaa.

Losikin (2019) mukaan tuote voi lisäksi vikaantua heti eliniän alkuvaiheessa ilman liiallista rasitusta. Tällöin tuotteen laatu on huono ja tuotteen vikaantuminen tapahtuu sisäänajokaudella (kuva 1). Kulumistyyppin vikaantuminen tapahtuu usein kulumiskaudella (kuva 1). Tuote voi kulua usealla eri tavalla. Esimerkiksi voidaan puhua juotosliitosten väsymisestä useiden lämpölaajenemisprosessien seurauksena tai kannen halkeamisesta jatkuvan rasituksen seurauksena. Kuluminen on luonnollisesti se vikaantumistyyppi, joka halutaan tuotteelle tapahtuvan, sillä tällöin tuote kestää niin pitkään käytössä, kuin mahdollista. Mitä hitaammin kuluminen tapahtuu, sitä suurempi on tuotteen elinikä. (Woo, 2020).

### 3.3 Eliniän kokeellinen määrittäminen

Jotta tuotteen elinikä, eli todellinen käyttöikä, voidaan määrittää kokeellisesti, tulee sille suorittaa elinikätestaus. Elinikätestauksia on hyvin montaa eri tyyppiä ja ne voidaan luokitella edellä esitettyihin kvalitatiivisiin ja kvantitatiivisiin elinikätestauksiin. Elinikätestaukset voidaan jakaa myös niissä käytettävien rasitustekijöiden perusteella. Riippuen siis siitä,

käytetäänkö rasiustekijänä esimerkiksi lämpötilaa, tehoa tai värähtelyä, puhutaan eri testityypeistä.

Kiihdytettyä elinikätestausta suunnittelevan henkilön tulee osata valita sopiva tilastollinen teoria, testausmetodi sekä järkevä testaukseen tarvittava laitteisto. Lisäksi tulee tietää tai osata määrittellä tuotteen kenttäolosuhteet, rajoittavat olosuhteet, vikaantumistila, vikaantumismenetelmä, testijärjestelmät ja testille asetettu budjetti. (Chen, ym. 2018).

Kenttäolosuhteet tarkoittavat olosuhteita, joita tuote kokee sen normaalissa käytössä. Rajoittavilla olosuhteilla taas tarkoitetaan olosuhteita, joita tuote ei ole suunniteltu kestävänsä. Vikaantumistila tarkoittaa sitä, miten tuotteen vikaantuminen näkyy. Tuotteen vikaantumistila voi esimerkiksi olla katkennut liitos komponenttien välillä. Vikaantumismenetelmä tarkoittaa sitä, miten tuote vikaantuu. Esimerkiksi tuote saattaa vikaantua korroosion tai lämpölaajenemisen vaikutuksesta. Testijärjestelmät tarkoittavat testaamiseen tarvittavia laitteistoja.

Suoritetun testin lisäksi tulee testituloksia osata analysoida erilaisten mallien avulla. Tuotteen eliniän määrittäminen kokeellisesti on siis haastava prosessi, joka vaatii monen muutujan tuntemista ja huomioon ottamista.

### 3.4 Weibull-analyysi

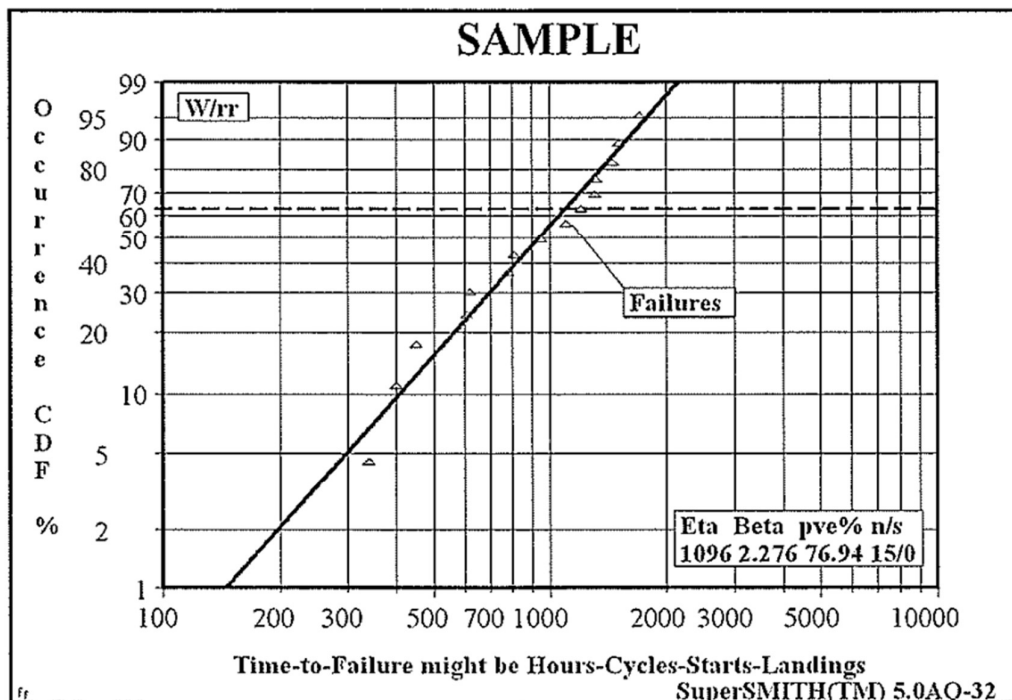
Weibull-analyysi kertoo testattavasta tuotteesta ja testin onnistumisesta paljon. Weibull-analyysillä saadaan selvitettyä mm. millä kylpyammekäyrän (kuva 1) alueella tuotteen vikaantuminen tapahtuu. Lisäksi voidaan testin perusteella muodostaa tuotteelle luotettavuusfunktio.

Woo (2020) mainitsee, että kiihdytetyn elinikätestauksen aikana ei tarvitse saada määriteltyä jokaisen yksittäisen tuotteen elinikää kiihdytetyissä olosuhteissa. Esimerkiksi Weibull-analyysi antaa silti luotettavia tuloksia. O'Connorin ja Kleynerin (2012) mukaan Weibull-analyysi on yleisimmin käytetty analyysimenetelmä tuotteiden elinikää tarkasteltaessa. Woo mainitsee vielä, että muitakin menetelmiä käytetään laajasti, mutta suuri osa niistä perustuu Weibullin menetelmään.

Weibull-analyysi on yleisesti käytetty analyysimenetelmä kiihdytetyn elinikätestauksen yhteydessä. Tämä johtuu siitä, että Weibull-analyysi ei vaadi montaa testattavaa tuotetta. Toinen Weibull-analyysin hyöty on sen tuottama yksinkertainen kuvaaja. (Abernethy, 2004).

Weibull-analyysi tuottaa kaksi parametria, joiden avulla voidaan arvioida tuotteen elinikää. Nämä parametrit ovat  $\beta$  eli niin kutsuttu muotoparametri (engl. shape parameter) ja  $\mu$  eli niin kutsuttu skaalausparametri (engl. scale parameter). Weibull-analyysi toteutetaan tarkastelemalla testissä vikaantuneita tuotteita siten, että kuvaajan (kuva 2) vaakakselilla on aika tai suoritettujen syklien lukumäärä logaritmisena asteikkona, ja pystyakselilla on vikaantuneiden tuotteiden kumulatiivinen prosenttiosuus kaikista tuotteista. (Abernethy, 2004).

Woon (2020) mukaan Weibull-analyysin voi toteuttaa myös ilman kuvaajaa, esimerkiksi MLE-metodia, eli suurimman uskottavuuden menetelmää, käyttäen.



Kuva 2. Tyypillinen Weibull-kuvaaja (Abernethy, 2004).

Weibull-analyysistä saadaan suoran kulmakerroin  $\beta$ , joka kertoo, missä kohtaa kylpyamme-käyrää (kuva 1) tuote sijaitsee kyseisillä testin parametreilla. Jos kulmakerroin on pienempi kuin 1, on kyseessä sisäänajokauden vikaantuminen. Jos kulmakerroin on 1, on kyseessä käyttökauden vikaantuminen. Jos taas kulmakerroin on suurempi kuin 1, on kyseessä kulumiskauden vikaantuminen. Mikäli suoran kulmakerroin on alle 1, voidaan päätellä, että tuotteeseen testissä kohdistunut rasitus oli liian suuri, sillä tuote vikaantuu jo sisäänajokaudella. (Abernethy, 2004).

Weibull-analyysistä saadaan myös määriteltyä tuotteen karakteristinen elinikä eli skaalausparametri  $\mu$ . Karakteristinen elinikä on se aika, milloin tuotteista on vikaantunut 63,2 %. Weibullin skaalaus- ja muotoparametrien avulla voidaan muodostaa Weibullin luotettavuusfunktio

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\mu}\right)^\beta}, \quad (4)$$

jossa  $t$  on aika, jossa tuote ei vielä todennäköisyydellä  $R(t)$  vikaannu. (Abernethy, 2004). Luotettavuusfunktion, yhtälö (4), avulla voidaan määrittää tuotteen eliniän todennäköisyys millä tahansa ajanhetkellä, jolloin kiihdytetyn elinikätestauksen tavoite on saavutettu.

Weibull-analyysi ei kuitenkaan aina tuota yksinkertaista suoran kuvaajaa. Syitä tälle voi olla monta. O'Connor ja Kleyner (2012) esittää, että Weibull-analyysi on hyväksi todettu tapa, kun testattava tuote voi vikaantua vain kerran. Eli jos testattavan tuotteen vikaantuminen kyseisessä testissä ei ole täysin yksiselitteistä, ei Weibull-kuvaaja anna yksinkertaista tulosta. Tällä tarkoitetaan sitä, että saman testin aikana tuotteita vikaantuu monilla eri vikaantumismenetelmillä. Abernethyn (2004) mukaan tämä näkyy Weibull-kuvaajassa erikoisena kuvaajan kääntyilynä tai terävinä kulmina. Tällainen tulos kertoo, että testijärjestelyssä on puutteita.

## 4 Lämpösyklus

Lämpösyklus on kiihdytetyn elinikätestauksen muoto, jossa tuotetta testataan kahden lämpötilan välillä. Lämpösyklusin määritelmään kuuluu, että rasitustekijänä on lämpötila ja että tuote altistuu testissä lämpötilan vaihtelulle. Shokkitestaus on muuten samanlainen, mutta shokkitestaamisen lämpötilan muutosnopeus on suurempi kuin lämpösyklusin. De Vriesin (2007) mukaan shokkitestaamisen ja lämpösyklusin raja ei ole yksiselitteisesti määritelty.

Tässä luvussa selitetään milloin lämpösyklusta tulee käyttää kiihdytetyn elinikätestauksen metodina. Lisäksi kerrotaan, mitä lämpösyklusin suunnittelussa tulee ottaa huomioon.

### 4.1 Mihin lämpösyklus sopii?

Kuten mainittu, kiihdytettyjä elinikätestauksia on monia erilaisia. Lämpösyklus on vain yksi monista vaihtoehdoista, kun suunnitellaan kiihdytettyä elinikätestausta. Sun ym. (2016) mukaan lämpösyklus on järkevä tapa suorittaa elinikätestaus, kun tuote joutuu kenttäolosuhteissa sietämään lämpötilojen vaihteluita. Tämä on loogista, sillä tällöin tuotteen vikaantumisen saadaan mallinnettua vastaamaan todellisuutta.

Sun ym. (2016) mainitsee vielä, että kun päävikaantumismenetelmä on liitosten väsyminen lämpötilan vaihtelun vaikutuksesta, on lämpösyklus perusteltu testimenetelmä. Mikäli tuotetta testataan esimerkiksi vain korkealla lämpötilalla, saattaa siihen kohdistuva rasitus aiheuttaa eri vikaantumista, mikä ei välttämättä korreloi kenttäolosuhteisiin millään tavalla.

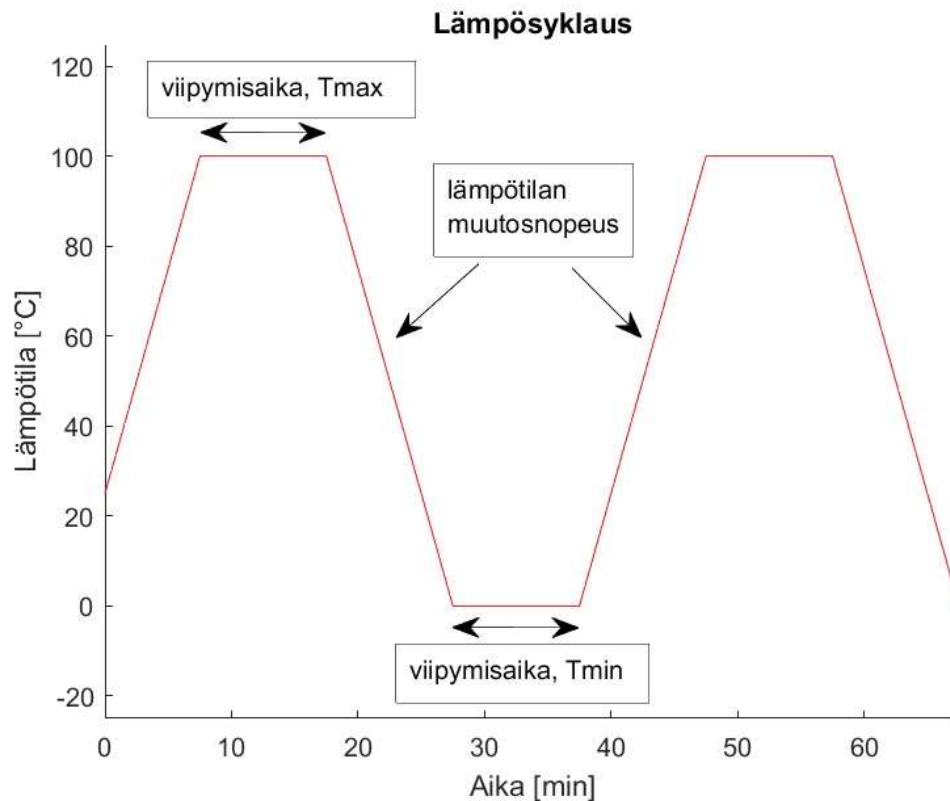
Rahim ym. (2007) mukaan lämpösyklus kiihdyttää monia eri vikaantumismekanismeja. Näitä ovat mm. juotosliitosten väsyminen, kotelon halkeilu, liitosjohtimen katkeaminen eri kohdissa ja johtimen irtoaminen. Rahim esittää, että mikäli tuotteen tunnettu vikaantumismenetelmä on jokin näistä, on lämpösyklustesti järkevä testausmetodi.



## 4.2 Lämpösyklaustestin suunnittelu

Kiihdytetyn elinikätestin suunnittelu on vaativa prosessi, jossa tulee ottaa huomioon monia asioita. Lämpösyklaustesti ei ole poikkeus. Sellaisen suunnittelussa tulee valita syklin korkein lämpötila, matalin lämpötila, lämpötilan muutosnopeus sekä tuotteen viipymisaika ääriämpötiloissa (Cui, 2005). Kaikki nämä tekijät vaikuttavat tuotteeseen kohdistuneeseen rasitukseen.

Kuva 3 havainnollistaa yhden Zhoun ym. (2016) suorittaman lämpösyklaustestin etenemistä, kun valittu maksimilämpötila on  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , minimilämpötila on  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , viipymisaika molemmille lämpötiloille on 10 minuuttia ja lämpötilan muutosnopeus on  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  molempiin suuntiin. Testi suoritettiin eräänlaisen integroidun piirin kotelon juotosliitoksille.



Kuva 3. Havainnollistava kuva Zhoun ym. (2016) suorittamasta lämpösyklaustestistä.

Kuva 3 esittää, kuinka tuotteeseen kohdistuva lämpötila muuttuu ajan funktiona. Lämpötila siirtyy vuorotellen minimi- ja maksimilämpötilan välillä tietyllä muutosnopeudella. Kun haluttu lämpötila saavutetaan, pysyy tuote kyseisessä lämpötilassa viipymisajan verran. Tämän jälkeen siirrytään toiseen haluttuun lämpötilaan valitulla muutosnopeudella.

#### 4.2.1 Testin parametrien optimointi

Testin suurin ja pienin lämpötila tulee valita siten, että kyseisillä lämpötiloilla tuotteen vikaantuminen tapahtuu samalla tavalla kuin normaaleissa olosuhteissa (Cui, 2005). Jos esimerkiksi tuote vikaantuu normaalisti pintaliitosten väsymisen takia, ja 150 °C lämpötilassa tuote vikaantuu muusta syystä, on 150 °C lämpötila liikaa testilämpötilaksi.

Näiden lämpötilojen optimointi perustuu usein siihen, mitä tuotteesta ja sen kenttälämpötiloista sekä ääriämpötiloista tiedetään, ja millaisia aikaisempia hyväksi havaittuja testejä vastaavalle tuotteelle on suoritettu. Esimerkiksi Richards ym. (2016) perusteli lämpösyklauksessa käytettävät lämpötilat kyseisen tuotteen kenttälämpötiloilla. Tässä tapauksessa maksimilämpötilana käytettiin siis samaa lämpötilaa, mitä tuote normaaleissa olosuhteissa saattaa joutua kestämään. Zhou ym. (2020) taas perustelivat maksimilämpötilan valinnan testattavan lämpösulkupinnoitteen tunnettujen ominaisuuksien avulla.

Mitä suurempi on maksimilämpötila ja mitä pienempi on minimilämpötila, sitä suurempi rasitus testattavaan tuotteeseen kohdistuu. Mitä suurempi rasitus tuotteeseen kohdistuu, sitä lyhyempi on tuotteen vikaantumiseen vaadittu aika. Täten siis testaukseen vaadittava aika lyhenee. Näiden lämpötilojen optimointi on siis hyvin tärkeää.

Testin suunnittelijan tulee myös tarkkaan valita lämpötilan muutosnopeus sekä maksimi- ja minimilämpötilojen viipymisajat. Muutosnopeus sekä viipymisaika vaikuttavat oleellisesti tuotteeseen kohdistuvaan rasitukseen. Mitä suuremmat ne ovat, sitä suurempaa rasitusta tuotteeseen kohdistuu (Cui, 2005). Näitä ei voida suurentaa loputtomiin, kuten ei ääriämpötilojakaan, sillä vikaantumismenetelmän tulee jälleen pysyä samana kuin kenttäolosuhteissa.

Gharaibeh (2022) esitti tavan optimoida sekä viipymisajat että lämpötilan muutosnopeuden. Hän käytti ensin niin kutsuttua elementtimenetelmää (FEM, Finite Element Method), jota myös Fan ym. (2005) käyttivät tarkastellessaan viipymisaikojen ja lämpötilan

muutosnopeuden vaikutuksia lyijyvapaisiin juotoksiin. Lisäksi Gharaibeh käytti RMS-menetelmää (Response Surface Methodology), joka on Changin ym. (2013) laajasti eri aloilla käytetty optimointiin tarkoitettu menetelmä. Elementtimenetelmän sekä RMS-menetelmän avulla Gharaibeh sai siis määriteltyä optimaaliset minimi- sekä maksimiarvot viipymisajoille sekä lämpötilan muutosnopeudelle.

Kvantitatiivisessa kiihdytetyssä elinikätestauksessa, jossa pyritään määrittämään tuotteen elinikä, tarvitaan nimenomaan näitä optimoituja maksimiarvoja. Suurimmilla mahdollisilla viipymisajoilla ja lämpötilan muutosnopeudella testi saadaan toteutettua mahdollisimman tehokkaasti ja lyhytkestoisesti.

Aiemmin esitetty Weibull-analyysi kertoo, missä kohtaa kylpyammekäyrää (kuva 1) vikaantuminen tapahtuu. Mikäli vikaantuminen tapahtuu sisäänajokaudella, voidaan päätellä, että testiolosuhteissa tuotteisiin kohdistunut rasitus on ollut liian suurta. Tällöin testin parametrit eivät ole olleet tuotteelle optimaaliset.

#### 4.2.2 Testissä käytettävä väliaine sekä laitteisto

Testin suunnittelussa tulee testin parametrien lisäksi valita sopiva väliaine sekä testilaitteisto. Väliaineena voi toimia esimerkiksi ilma, jokin muu kaasuseos tai jokin neste (Schütze & Malessa, 2007). Jos lämpösyklitesti suoritetaan sääkaapissa, voidaan testi suorittaa eri ilmankosteudella kuin normaali ilmankosteus. Changin ym. (2019) mukaan ilmankosteutta säätämällä voidaan tuotteesta riippuen tuotteen kenttäolosuhteet ja siten kenttäolosuhteissa tapahtuva vikaantuminen mallintaa realistisemmin.

Esimerkiksi Richards ym. (2016) suorittivat sulkupinnoitteelle lämpösyklitestin, jossa väliaineena toimi vesihöyry, sillä kyseistä sulkupinnoitetta käytetään höyryturbiineissa. Zhou ym. (2020) taas käyttivät lämpösulkupinnoitteen testaamiseen väliaineena maakaasuhappi-seosta. Zhou ym. (2017) käyttivät testattavien lämpösulkupinnoitteiden jäähdyttämiseen huoneenlämpöistä vettä.

Usein lämpösyklitesti suoritetaan yksikammioisella sääkaapilla. Kammion lämpötilaa säädellään minimi- ja maksimilämpötilan välillä halutulla nopeudella (Gui ym. 2015). Kak-sikammioista kaappia tarvitaan, jos halutaan suorittaa shokkitestaamista.

Shokkitestauksessa testattavaa tuotetta siirretään kahden kammion välillä. Toinen kammioiden on maksimilämpötilalla ja toinen minimilämpötilalla (Chen ym. 2011). Tällöin tuotteen lämpötila saadaan muuttumaan nopeammin verrattuna yksikammioiseen.

## 5 Eliniän määrittäminen testituloksista

Lämpösyklitestaus loppuu, kun kaikki, tai haluttu osa näytteistä ovat vikaantuneet, tai kun testiaika loppuu. Eliniän analysointiin testituloksista on useita menetelmiä. Yksittäisen näytteen vikaantumisen ajanhetki on tärkeä, kun halutaan määrittää tuotteen elinikä kenttäolosuhteissa. Tässä kohtaa tarvitaan jokin malli, jonka avulla saadaan määriteltyä kiihtyvyysskerroin. (O'Connor & Kleyner, 2012).

Seuraavaksi esitetään, mitä tarkoitetaan edellä mainitulla kiihtyvyysskerroimella, ja miten se voidaan määrittää Coffin-Mansonin ja Norris-Landzbergin mallien avulla.

### 5.1 Eliniän määrittäminen kiihtyvyysskerroimen avulla

Kiihtyvyysskerroimen avulla voidaan määrittää elinikä, kun tiedetään aika, jonka näyte kesti testauksessa. Kiihtyvyysskerroin yksinkertaisesti kertoo, kuinka monta kertaa kauemmin tuote kestää todellisissa käyttöolosuhteissa. Se on siis testiajan ja todellisen käyttöajan suhde

$$AF = \frac{t_{use}}{t_{test}}, \quad (1)$$

jossa  $AF$  on kiihtyvyysskerroin (Acceleration Factor),  $t_{use}$  on tuotteen elinikä kenttäolosuhteissa ja  $t_{test}$  on tuotteen elinikä testiolosuhteissa. (Woo, 2020).

Tuotteen elinikä testiolosuhteissa tarkoittaa sitä aikaa, jonka tuote kestää vikaantumatta kiihdytetyissä testiolosuhteissa. Kun tuotteen vikaantumismekanismi tunnetaan, voidaan tuotteen elinikä testiolosuhteissa määrittää olevan se aika, jolloin tuotteiden vikaantumisia on tapahtunut suunniteltu määrä. Voi olla, että halutaan tarkastella aikaa, jolloin puolet tuotteista on vikaantunut, tai esimerkiksi aikaa, jolloin 90 % tuotteista on vikaantunut. (Woo, 2020).

Jotta saadaan dataa testauksen aikana vikaantuneista tuotteista, tulee tuotteita tarkastella aktiivisesti. Esimerkiksi Saarinen ja Frisk (2013) mittasivat jännitettä testattavien tuotteiden yli 20 sekunnin välein ja täten saivat tietoa tuotteen vikaantumisista hyvin tarkasti. Li ym. (2016) taas ottivat näytteen kromatografiseen tarkasteluun jokaisen suoritettun syklin jälkeen.

Kiihtyvyysskerroin voidaan määrittää eri mallien avulla. Käytetyltä mallilta saadun kiihtyvyysskerroimen sekä testiajan perusteella voidaan määrittää tuotteen elinikä kenttäolosuhteissa. Mikäli käytetty malli, mallin parametrit sekä testiolosuhteet ovat valittu järkevästi, saadaan realistinen kuva todellisuudesta.

## 5.2 Coffin-Mansonin malli

Yksi usein käytetty malli, jolla voidaan laskea kiihtyvyysskerroin, on nimeltään Coffin-Mansonin malli

$$AF = \left( \frac{\Delta T_{test}}{\Delta T_{use}} \right)^m, \quad (2)$$

jossa  $\Delta T_{test}$  on testauksessa käytettyjen lämpötilojen erotus,  $\Delta T_{use}$  on tuotteen kenttäolosuhteiden suurimman ja pienimmän lämpötilan erotus ja  $m$  on Coffin-Mansonin vakio.

Coffin-Mansonin vakio tulee määrittää simulaatioiden avulla, kokeellisesti tai se tulee tietää etukäteen perustuen aiempiin suoritettuihin mittauksiin. Esimerkiksi Sun ym. (2006) käytti erään lyijyvapaan liitoksen Coffin-Mansonin vakion määrittämiseen simuloitua elementtimenetelmää. De Vries ym. (2007) taas käytti aikaisemmissa tutkimuksissa määriteltyä vakiota.

Blish (1997) esittää konferenssiasiakirjassaan, että Coffin-Mansonin vakio on välillä 1–3, kun väsyminen tapahtuu sitkeälle metallille. Kun taas metallina on integroiduissa piireissä käytetty metalli, intermetalli, on Coffin-Mansonin vakio välillä 3–5. Mikäli tuotteen hajoaminen tapahtuu haurasmurtuman takia, edellä mainittu vakio on välillä 6–8.

Fan, ym. (2005) esittää, että eliniän määrittämiseen Coffin-Mansonin mallin mukaan liittyy suuri haaste. Tämä haaste on tietää, kuinka hyvin tietyt materiaalit ja tuotteiden mittasuhteet vaikuttavat mallin skaalattavuuteen ja sen realistisuuteen.

### 5.3 Norris-Landzbergin malli

Toinen malli, jota usein käytetään lämpösyklitestauksessa eliniän määrittämiseen, on nimeltään Norris-Landzbergin malli

$$AF = \left(\frac{f_{test}}{f_{use}}\right)^n \cdot \left(\frac{\Delta T_{test}}{\Delta T_{use}}\right)^m \cdot \left(e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{max,use}} - \frac{1}{T_{max,test}}\right)}\right) \quad (3)$$

jossa  $f_{test}$  on lämpösyklitaajuus testiolosuhteissa,  $f_{use}$  on lämpösyklitaajuus normaaleissa käyttöolosuhteissa,  $E_a$  on aktivaatioenergia,  $k$  on Boltzmannin vakio,  $T_{max,use}$  on maksimilämpötila normaaleissa käyttöolosuhteissa,  $T_{max,test}$  on maksimilämpötila testiolosuhteissa ja  $n$  on vakio (Chung ym. 2010).

Aktivaatioenergia tarkoittaa sitä energiaa, mikä vaaditaan, että reaktio tapahtuu (Aguila ym. 2018). Aktivaatioenergia kyseiselle vikaantumiselle tulee olla tiedossa aikaisempien testien perusteella, tai se tulee määrittää itse. Esimerkiksi Cui (2005) määrittä erälle kotelolle aktivaatioenergian suorittamalla sille ensin lämpösyklaustestin ja korreloimalla testidatan Norris-Landzbergin mallin kanssa.

Sun ym. (2016) mukaan Norris-Landzbergin malli on yleisimmin käytetty malli lämpösyklauksessa. Se on muunneltu malli edellä esitetystä Coffin-Manson mallista ja se ottaa huomioon syklitaajuuden ja aktivaatioenergian (Xiaojun ym. 2021). Syklitaajuus tarkoittaa, kuinka usein syklit suoritetaan. Zhu ym. (2021) mainitsee vielä, että edellä mainittujen lisäksi Norris-Landzbergin malli, toisin kuin Coffin-Mansonin malli, ottaa huomioon myös maksimilämpötilan.

Kuten Coffin-Mansonin vakio, Norris-Landzbergin yhtälössä esiintyvä vakio  $n$  voidaan määrittää kokeellisesti, simuloitusti tai käyttäen aikaisemmin saatua arvoa, mikäli

testattavalle tuotteelle sellainen löytyy. Esimerkiksi Ahmad ym. (2009) määrittivät molemmat yhtälössä esiintyvät vakiot testaamalla lyijyvapaita liitoksia kenttäolosuhteissa. Testitulosten perusteella he arvioivat juotoksiin kohdistuvia rasituksia ja sitä kautta määrittivät sopivat vakiot.



## 6 Yhteenveto

Kiihdytetty elinikätestaus tarkoittaa testausta, jossa tuotteen elinikä pyritään määrittämään nopeuttamalla tuotteen vikaantumista. Tuotteita ei voida testata normaaleissa olosuhteissa, sillä se vaatisi tuotteesta riippuen jopa monien vuosien testausta. Tuotteet tulee saattaa myyntiin hyvinkin lyhyessä ajassa. Tästä syystä kiihdytetty elinikätestaus on tärkeä osa monien tuotteiden valmistusprosessia. Kiihdytettyjä elinikätestauksia on hyvin monia eri tyyppisiä, lämpösyklus on yksi näistä.

Tämän työn tavoitteena oli tutkia lämpösykluseseen osana kiihdytettyä elinikätestausta. Tavoitteena oli selvittää, milloin lämpösyklus on hyvä tapa toteuttaa elinikätestausta, mitä lämpösyklusitestin suunnittelussa tulee ottaa huomioon, ja miten elinikä saadaan määriteltyä testituloksista. Lisäksi selvitettiin, mitä elinikä tarkoittaa käsitteenä, ja tutkittiin tuotteiden vikaantumisiin. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jossa aineistoina toimi kirjojen ja artikkelien lisäksi suoritettut ja raportoidut lämpösyklusitestit.

Aluksi tarkasteltiin elinikää käsitteenä. Tarkasteltiin, miten todellinen käyttöikä ja suunniteltu käyttöikä eroavat toisistaan, ja pohdittiin, kumpi on oleellinen kiihdytetyn elinikätestauksen kannalta. Lisäksi selvitettiin, millaisia vikaantumismenetelmiä tuotteilla on, ja miksi vikaantumisten tunteminen on oleellista kiihdytetyssä elinikätestauksessa. Tutkittiin myös Weibull-analyysin merkitystä osana kiihdytettyä elinikätestausta.

Tämän jälkeen määriteltiin, mitä tarkoittaa lämpösyklus. Tässä luvussa selvitettiin myös, milloin lämpösyklus on hyvä tapa määrittää tuotteiden elinikää ja mitä lämpösyklusitestin suunnittelussa tulee ottaa huomioon. Lämpösyklus on usein järkevä tapa toteuttaa kiihdytetty elinikätestaus, kun testattava tuote kohtaa kenttäolosuhteissa lämpötilan vaihteluita. Täten tuotteen vikaantuminen saadaan tapahtumaan todellisessa käytössä vikaantumista vastaavaksi. Tuotteen vikaantumisella on siis hyvin suuri vaikutus testimenetelmän valintaan. Lämpösyklusitestin tekijän tulee osata valita testin parametrit perustellusti. Näiden parametrien optimointi on tärkeää, jotta testiaika saadaan mahdollisimman lyhyeksi, mutta tulokset korreloivat kuitenkin todellisen maailman kanssa.

Lopuksi tarkasteltiin, miten elinikä määritellään testien perusteella. Eliniän määrittäminen testituloksista onnistuu, kun tuotteiden vikaantumisaikat saadaan otettua ylös. Tarvitaan jokin

malli, esimerkiksi Norris-Lanzbergin malli, josta saadaan määritettyä kiihtyvyysskerroin. Kiihtyvyysskerroin kertoo testiolosuhteissa olevan tuotteen eliniän suhteen kenttäolosuhteissa olevaan tuotteen elinikään. Eliniän määrittäminen kenttäolosuhteissa on juuri kvantitatiivisen elinikätestauksen tavoite.

Tutkimus vastasi onnistuneesti sille asetettuihin tutkimuskysymyksiin. Tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, joten uutta dataa aiheeseen liittyen ei tuotettu. Aiheesta on kirjoitettu suomeksi hyvin vähän. Tästä syystä on syytä suhtautua kriittisesti joihinkin määritelmiin ja suomennoksiin.

## Lähdeluettelo

- Abernethy, R. B. (2004). *The New Weibull Handbook: Reliability and Statistical Analysis for Predicting Life, Safety, Supportability, Risk, Cost and Warranty Claims*. Dr. Robert B. Abernethy.
- Aguila, B., Sun, Q., Wang, X., O'Rourke, E., Al-Enizi, A. M., Nafady, A. & Ma, S. (2018). *Lower Activation Energy for Catalytic Reactions through Host–Guest Cooperation within Metal–Organic Frameworks*. *Angewandte Chemie (International Ed.) Angew Chem Int Ed Engl*, 57(32), 10107–10111.
- Ahmad, M., Xie, W., Kuo-Chuan, L., Xue, J. & Towne, D. (2009). *Parametric Acceleration Transforms for Lead-Free Solder Joint Reliability Under Thermal Cycling Conditions*. *IEEE*, 682–691.
- Bebbington, M., Lai, C., Wellington, M. & Zitikis, R. (2012). *The discrete additive Weibull distribution: A bathtub-shaped hazard for discontinuous failure data*. *Reliability Engineering & System Safety*, 106, 37–44.
- Blish, R. C. (1997). *Temperature Cycling and Thermal Shock Failure Rate Modeling*. *IEEE*, 110–117.
- Chang, K.-H., Hong, L. J. & Wan, H. (2013). *Stochastic Trust-Region Response-Surface Method (STRONG)-A New Response-Surface Framework for Simulation Optimization*. *INFORMS Journal on Computing*, 25(2), 230–243.
- Chang, Y., Liu, J., Li, R., Zhao, J., Qin, Y., Zhang, J., Yin, Y. & Li, X. (2019). *Effect of humidity and thermal cycling on the catalyst layer structural changes in polymer electrolyte membrane fuel cells*. *Energy Conversion and Management*, 189, 24–32.
- Chen, W., Gao, L., Pan, J., Qian, P. & He, Q. (2018). *Design of Accelerated Life Test Plans—Overview and Prospect*. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 31(1), 10–24.
- Chen, Z., Zhang, Q., Jiao, F., Chen, R., Wang, K., Chen, M. & Liu, S. (2012). *Study on the Reliability of Application-Specific LED Package by Thermal Shock Testing, Failure Analysis, and Fluid-Solid Coupling Thermo-Mechanical Simulation*. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 2(7), 1135–1142.
- Chung, K.-J., Yang, L., Wang, B.-Y. & Wu, C.-C. (2010). *The Investigation of Modified Norris-Landzberg Acceleration Models for Reliability Assessment of Ball Grid Array Packages*. *IEEE*, 1–4.
- Cooper, T. (2004). *Inadequate Life? Evidence of Consumer Attitudes to Product Obsolescence*. *Journal of Consumer Policy*, 27(4), 421–449.
- Cox, J., Griffith, S., Giorgi, S. & King, G. (2013). *Consumer understanding of product lifetimes*. *Resources, Conservation and Recycling*, 79, 21–29.
- Cui, H. (2005). *Accelerated Temperature Cycle Test and Coffin-Manson Model for Electronic Packaging*. *IEEE*, 556–560.

- de Vries, J. W. C., Jansen, M. Y. & van Driel, W. D. (2007). *On the difference between thermal cycling and thermal shock testing for board level reliability of soldered interconnections*. *Microelectronics and Reliability*, 47(2), 444–449.
- Fan, X., Raiser, G. & Vasudevan, V. S. (2005). *Effects of Dwell Time and Ramp Rate on Lead-Free Solder Joints in FCBGA Packages*. *IEEE*, 901–906.
- Freels, J. K., Pignatiello, J. J., Warr, R. L. & Hill, R. R. (2015). *Bridging the Gap between Quantitative and Qualitative Accelerated Life Tests: Bridging the Gap in Accelerated Life Tests*. *Quality and Reliability Engineering International*, 31(5), 789–800.
- Gagg, C. R. & Lewis, P. R. (2007). *Wear as a product failure mechanism – Overview and case studies*. *Engineering Failure Analysis*, 14(8), 1618–1640.
- Gharaibeh, M. A. (2022). *Optimization of Dwell and Ramp Times for SAC305 Solder Thermal Cycling Fatigue Life for Testing and Real-Life Applications*. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 22(1), 276–285.
- Gui, X., Luo, X., Wang, X. & Liu, S. (2015). *Computational fluid dynamic (CFD) investigation of thermal uniformity in a thermal cycling based calibration chamber for MEMS*. *Heat and Mass Transfer*, 51(12), 1705–1715.
- Hosoya, K., Kariya, Y., Sugimoto, H. & Takahashi, K. (2020). *Fatigue Crack Networks in the Die-Attach Joint of a Power Semiconductor Module During Power Cycling Testing and Effects of Test Parameters on the Joint Fatigue Life*. *Journal of Electronic Materials*, 49(10), 6175–6186.
- Ingman, J. M. (2022). *Evaluation of Failure Mechanisms in Electronics using X-Ray Imaging*. Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT.
- Jayatilleka, S. (2018). *Performance Verification Throughout the Product Life Cycle using Accelerated Life Testing*. *IEEE*, 1–6.
- Li, W. W., Spix, L., de Reus, S. C. A., Meekes, H., Kramer, H. J. M., Vlieg, E. & ter Horst, J. H. (2016). *Deracemization of a Racemic Compound via Its Conglomerate-Forming Salt Using Temperature Cycling*. *Crystal Growth & Design*, 16(9), 5563–5570.
- Liu, L., Li, X., Jiang, T. & Sun, F. (2016). *Utilizing Accelerated Degradation and Field Data for Life Prediction of Highly Reliable Products: Accelerated Degradation Testing and Life Prediction*. *Quality and Reliability Engineering International*, 32(7), 2281–2297.
- Lone, S. A. & Ahmed, A. (2021). *Design and Analysis of Accelerated Life Testing and its Application Under Rebate Warranty: Accelerated Life Testing*. *Sankhya. Series. A*, 83(1), 393–407.
- Losik, L. (2009). *Eliminating Product Infant Mortality Failures using Prognostic Analysis*. *IEEE*, 1.
- Mohammadian, M. S., Hossein, A.-K., Daoud, C. A. & Mutel, B. (2009). *A contribution to accelerated testing implementation*. *Safety, Reliability and Risk Analysis*, CRC Press, 1077–1084.

- Muhammad, N., Fang, Z., Shah, S. Y. & Haider, D. (2020). *Reliability and Remaining Life Assessment of an Electronic Fuze Using Accelerated Life Testing*. *Micromachines* (Basel), 11(3), 272.
- O'Connor, P. D. T. & Kleyner, A. (2012). *Practical Reliability Engineering*. Wiley.
- Rahim, M. K., Roberts, J., Suhling, J. C., Jaeger, R. C. & Lall, P. (2007). *Continuous in-Situ Die Stress Measurements during Thermal Cycling Accelerated Life Testing*. *IEEE*, 1478–1489.
- Richards, B. T., Young, K. A., de Francqueville, F., Sehr, S., Begley, M. R. & Wadley, H. N. G. (2016). *Response of ytterbium disilicate–silicon environmental barrier coatings to thermal cycling in water vapor*. *Acta Materialia*, 106, 1–14.
- Saarinen, K. & Frisk, L. (2013). *Reliability Testing and Modeling of Anisotropic Conductive Adhesive Joints Under Temperature Cycling Test*. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 3(9), 1512–1523.
- Schütze, M. & Malessa, M. (2007). *Standardisation of Thermal Cycling Exposure Testing*. Burlington, Elsevier Science.
- Sun, F. Q., Liu, J. C., Cao, Z. Q., Li, X. Y. & Jiang, T. M. (2016). *Modified Norris–Lanzberg Model and Optimum Design of Temperature Cycling Alt*. *Strength of Materials*, 48(1), 135–145.
- Sun, P., Andersson, C., Wei, X., Cheng, Z., Shangguan, D. & Liu, J. (2006). *Coffin–Manson constant determination for a Sn–8Zn–3Bi lead-free solder joint*. *Soldering & Surface Mount Technology*, 18(2), 4–11.
- Woo, S. (2020). *Reliability Design of Mechanical Systems A Guide for Mechanical and Civil Engineers*. Springer Singapore.
- Yang, G. (2005). *Accelerated life tests at higher usage rates*. *IEEE Transactions on Reliability*, 54(1), 53–57.
- Zhou, D., Mack, D. E., Bakan, E., Mauer, G., Sebold, D., Guillon, O. & Vaßen, R. (2020). *Thermal cycling performances of multilayered yttria-stabilized zirconia/gadolinium zirconate thermal barrier coatings*. *Journal of the American Ceramic Society*, 103(3), 2048–2061.
- Zhou, F., Wang, Y., Cui, Z., Wang, L., Gou, J., Zhang, Q. & Wang, C. (2017). *Thermal cycling behavior of nanostructured 8YSZ, SZ/8YSZ and 8CSZ/8YSZ thermal barrier coatings fabricated by atmospheric plasma spraying*. *Ceramics International*, 43(5), 4102–4111.
- Zhou, Q., Zhou, B., Lee, T. & Bieler, T. (2016). *Microstructural Evolution of SAC305 Solder Joints in Wafer Level Chip-Scale Packaging (WLCSP) with Continuous and Interrupted Accelerated Thermal Cycling*. *Journal of Electronic Materials*, 45(6), 3013–3024.
- Zhu, X., Liu, K., He, M. & Balakrishnan, N. (2021). *Reliability estimation for one-shot devices under cyclic accelerated life-testing*. *Reliability Engineering & System Safety*, 212, 107595–.