

Endrik Koppel

**ROHS NÕUETELE MITTEVASTAVA TOOTE
JUURUTAMINE ROHS NÕUETELE
VASTAVASSE TOOTMISPROTSESSI
ETTEVÕTTE X NÄITEL**

LÕPUTÖÖ

Tehnoloogia ja ringmajanduse instituut
Tootmine ja tootmiskorraldus
Juhendaja: Kristo Kaljuvee, BSc, Anna Truver, MSc

Tallinn 2026

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, **Endrik Koppel**

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„RoHS nõuetele mittevastava toote juurutamine RoHS nõuetele vastavasse tootmisprotsessi ettevõtte X näitel“

- 1) reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada ja teha üldsusele kättesaadavaks Tallinna Tehnikakõrgkooli digiarhiivi DSpace kaudu;
- 2) reprodutseerimiseks pärast piirangu lõppu juhul, kui instituudi direktori korraldusega on kehtestatud lõputöö avaldamisele tähtajaline piirang.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi.

Autorideklaratsioon

Mina, **Endrik Koppel**

tõendan/tõendame, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja ja iseenda varasematele teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autori/te/le ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

(allkirjastatud digitaalselt)

Juhendajad **Kristo Kaljuvee ja Anna Truver**

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

(allkirjastatud digitaalselt)

Lõputöö on kaitsmisele lubatud instituudi direktori korraldusega.

SISUKORD

LÜHENDID JA MÕISTED.....	5
SISSEJUHATUS	7
1 ROHS TOOTMISE PÕHIMÕTTED, REGULATSIOONID JA KVALITEEDIRISKID	9
1.1 Direktiivid ja standardid	9
1.1.1 <i>Restriction of Hazardous Substances</i> (RoHS) direktiiv	9
1.1.2 REACH - Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals 10	
1.1.3 IPC standard (<i>Institute for Printed Circuits Standards</i>).....	10
1.2 Tooteanalüüsi põhimõtted	11
1.2.1 <i>Bill of Materials</i> ehk BOM-i analüüsi põhimõtted	11
1.2.2 Trükkplaadi analüüsi põhimõtted	12
1.3 RoHS tootmise kvaliteediriskid	12
1.3.1 Materjalidega seotud kvaliteediriskid	12
1.3.2 Protsessidega seotud kvaliteediriskid	13
1.3.3 Riskianalüüs.....	15
2 ETTEVÕTTE X TUTVUSTUS	18
2.1 Probleemi kirjeldus.....	18
2.2 Meetodid ja strateegia	18
2.3 Ettevõtte X tootmisprotsesside tutvustus	19
2.3.1 SMT (Surface Mount Technology) – Pindpaigaldustehnoloogia.....	19
2.3.2 Prehandling ehk komponentide ettevalmistus	20
2.3.3 Assembly ehk kooste.....	20
2.3.4 THT(<i>Through-Hole Technology</i>) ehk läbiaukude tehnoloogia	20
2.3.5 <i>Conformal Coating</i> ehk lakkimine.....	21
2.3.6 Kõrgpinge testimine ehk HVT	22
2.3.7 Funktsionaalne testimine ehk FCT	22
2.4 Toote Y tehnilised andmed	22
2.4.1 Toote Y vooskeem.....	23
3 TOOTE Y SOBIVUSE HINDAMINE ROHS TOOTMISEKS.....	25
3.1 <i>Bill of Materials</i> ehk BOM-i analüüs.....	25
3.1.1 Komponentide soovituslikud termoprofiilid	27
3.2 Trükkplaadi analüüs	28
3.2.1 Trükkplaadi vastavussertifikaadi analüüs	28
3.2.2 Trükkplaadi disaini analüüs	29
4 TOOTEMUUDATUSED KATSEPARTII TOOTMISEKS JA KATSEPARTII TOOTMINE	33
4.1 Tootemuudatused katsepartiiks.....	33
4.2 Katsepartii tootmine	34

4.2.1	SMT (Surface Mount Technology) – Pindpaigaldustehnoloogia.....	34
4.2.2	THT(Through-Hole Technology) ehk läbiaukude tehnoloogia	35
4.2.3	Testimine.....	37
4.2.4	Lakkimine	38
4.3	Tulemused ning järeldused	39
	KOKKUVÕTE	40
	SUMMARY.....	41
	VIIDATUD ALLIKAD.....	42
	LISA 1. THT KOMPONENTIDE MINIMAALSE SOOVITUSLIKU AVA SUURUSED	47
	LISA 2. THT KOMPONENTIDE VASTUPIDAVUS JOOTMISKUUMUSELE	48
	LISA 3. SMT KOMPONENTIDE VASTUPIDAVUS JOOTMISKUUMUSELE	49

LÜHENDID JA MÕISTED

RoHS	– <i>Restriction of Hazardous Substances</i> (ohtlike ainete kasutamise piirang elektroonikas)
REACH	– <i>Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals</i> (kemikaalide registreerimine, hindamine, autoriseerimine ja piiramine)
CE	– <i>Conformité Européenne</i> (märgis, mis kinnitab, et toode vastab Euroopa Liidu kehtestatud tervise-, ohutus- ja keskkonnakaitse nõuetele)
AC	– <i>Alternating Current</i> (vahelduvvool)
DC	– <i>Direct Current</i> (alalisvool)
XRF	– <i>X-Ray Fluorescence</i> (röntgenfluorestsentsanalüüs)
EMS	– <i>Electronics Manufacturing Services</i> (elektroonikatootmise teenused)
ERP	– <i>Enterprise Resource Planning</i> (integreeritud tarkvarasüsteem ettevõtte ressursside planeerimiseks)
PCB	– <i>Printed Circuit Board</i> (trükkplaat)
SMT	– <i>Surface Mount Technology</i> (pindpaigaldustehnoloogia)
SMA	– <i>Surface Mount Assembly</i> (pindpaigalduskomponentidega kokkupanek)
SMD	– <i>Surface Mount Device</i> (pindpaigalduskomponent)
AOI	– <i>Automated Optical Inspection</i> (automaatne optiline kontroll)
THT	– <i>Through-Hole Technology</i> (läbiaukude tehnoloogia)
HVT	– <i>High Voltage Test</i> (kõrgepinge test)
FCT	– <i>Functional Circuit Test</i> (funktsionaalne trükkplaadi test)
ICT	– <i>In-Circuit Test</i> (skeemitestimine)
IPC	– <i>Institute for Printed Circuits</i> (rahvusvaheline organisatsioon, mis haldab ja arendab elektroonikatööstuse standardeid)
BOM	– <i>Bill of Materials</i> (materjalide nimekiri)
AML	– <i>Approved Manufacturer List</i> (heakskiidetud tootjate nimekiri)
MPN	– <i>Manufacturer Part Number</i> (tootja osa number)
EOL	– <i>End of Life</i> (toote elutsükli lõpp)
COC	– <i>Certificate of Conformance</i> (vastavussertifikaat)
MPQ	– <i>Manufacturing Process Qualification</i> (tootmisprotsessi kvalifitseerimine)
UV	– ultraviolettkiirgus
FMEA	– <i>Failure Modes and Effects Analysis</i> (rikkeviiside ja -mõjude analüüs)
DPMO	– <i>Defects Per Million Opportunities</i> (vigade arv miljoni võimaluse kohta)
ROSE test	– <i>Resistivity of Solvent Extract</i> (kasutatakse elektroonikatööstuses ioonilise puhtuse hindamiseks)

Flux	- rübusti, mis eemaldab oksüdeerunud kihid metallpinnalt ja takistab uue oksiidikihi teket kuumutamise ajal, et tagada puhas ja tugev metall-metall ühendus
Dyne	- füüsikas jõu mõõtühik, mis kuulub CGS-süsteemi, 1 dyne on jõud, mis annab 1 grammi massile kiirenduse 1 cm/s^2
Pinnaenergia	- tahke pinna omadus, mis näitab selle energiat ja vedelike märgumisvõimet.
Stack-up	- trükkplaadi kihiline ülesehitus
Delaminatsioon	- kihtide eraldumine
Külm jootekoht	- Cold solder joint (tekkib, kui jootekoht ei kuumene piisavalt või jootematerjal ei märgu korralikult)
Ruuting	- töövoogude ja marsruutide määramine, kuidas toorikud, osad või tooted liiguvad läbi erinevate töötappide
Serialiseerimine	- protsessi, kus igale tootele, näiteks trükkplaadile, seadmele või komponendile omistatakse unikaalne identifikaator, tavaliselt seriaalkood
Tina sild	- <i>Solder bridging</i> (jootmise käigus tekkinud ühendust kahe lähestikku oleva padja või jala vahel sulanud tinaga)

SISSEJUHATUS

Kiire ühiskonna areng on suurendanud elektri- ja elektroonikaseadmete nõudlust, mis omakorda on kasvatanud nende tootmiskahte ja jäätmete hulka. Tootmise ja tarbimise laienemine on toonud esile vajaduse vähendada negatiivset mõju keskkonnale ning inimestele, kes puutuvad elektroonikaseadmetega kokku tootmise, kasutamise ja käitlemise käigus.

Keskkonna ja inimeste kaitseks on Euroopa Liit kehtestanud mitmeid direktiive ja õigusakte. Oluline regulatsioon, mis tagab elektri- ja elektroonikaseadmete ohutuse ja keskkonnasõbralikkuse, on RoHS direktiiv (*Restriction of Hazardous Substances*). See piirab ohtlike ainete, nagu raskmetallid, plastifikaatorid ja leegiaeglustid, kasutamist seadmetes. Direktiivi eesmärk on vähendada riske inimeste tervisele ja keskkonnale, lubades turule üksnes nõuetele vastavaid tooteid [1].

Käesolev töö käsitleb toote Y juurutamist uude tootmisprotsessi, mis eeldab protsessimuudatusi, materjalide kontrolli ja kvaliteediriskide maandamist. Analüüs hõlmab komponentide ja trükkplaadi disaini sobivuse hindamist, tootmisprotsessi riskide tuvastamist ning katsepartii valideerimist. Tulemused loovad aluse otsusele, kas juurutamine on võimalik ilma disaini muutmata, ning määratlevad vajalikud tegevused täieliku rakendamise jaoks.

Töö eesmärk on hinnata toote Y sobivust ettevõtte X tootmisprotsessi, mis vastab uutele kvaliteedi- ja ohutusnõuetele, ilma toote disaini muutmata. Selleks analüüsitakse komponentide ja trükkplaadi disaini vastavust, tuvastatakse üleminekuriskid ning valideeritakse protsess katsepartii tootmise kaudu. Saadud tulemused annavad usaldusväärse aluse otsuse tegemiseks, kas juurutamine on tehniliselt ja kvaliteetselt teostatav ning millised täiendavad tegevused on vajalikud.

Uurimisküsimused:

- Kas toote Y komponentide ja trükkplaadi disain vastavad uue tootmisprotsessi nõuetele?
- Millised riskid võivad tekkida üleminekul uuele tootmisprotsessile ja kuidas neid maandada?
- Kas katsepartii tulemused kinnitavad toote sobivust uue protsessi jaoks?
- Millised täiendavad tegevused on vajalikud enne täielikku juurutamist?

Esimene peatükk käsitleb teoreetilist tausta, sealhulgas tootmisprotsessi nõudeid ja standardeid. Teine peatükk keskendub toote analüüsile, tuues välja materjalide nimekirja ja trükkplaadi disaini sobivuse ning riskianalüüsi. Kolmas peatükk kirjeldab katsepartii

tootmist ja valideerimist, sealhulgas termoprofilide mõõtmist, kvaliteedikontrolli meetodeid ja tulemusi. Lõpus esitatakse kokkuvõtte ja soovitused edasiseks juurutamiseks.

1 ROHS TOOTMISE PÕHIMÕTTED, REGULATSIOONID JA KVALITEEDIRISKID

1.1 Direktiivid ja standardid

1.1.1 *Restriction of Hazardous Substances (RoHS) direktiiv*

Elektri- ja elektroonikaseadmete, nagu mobiiltelefonide, arvutite ja köögimasinate tootmine ja kasutamine märkimisväärselt kasvanud. Selle tulemusena tekib üha rohkem elektroonikajäätmeid. Kui neid seadmeid kasutatakse, kogutakse, töödeldakse või ära visatakse, võivad neist eralduda ohtlikud ained nagu plii, elavhõbe ja kaadmium. Need ained võivad põhjustada tõsiseid probleeme nii keskkonnale kui ka inimeste tervisele.

Ohtlike ainete kasutamise piiramiseks elektroonikaseadmetes on Euroopa Liit välja töötanud 2003. aastal õigusakti *Restriction of Hazardous Substances* ehk RoHS [1]. Selle õigusakti eesmärk on kaitsta inimeste tervist ning vähendada keskkonda sattuvate ohtlike ainete kogust [1]. Piirangute alla kuuluvad raskemetallid, plastifikaatorid ning leegiaeglustid. Nendele ainetele on määratud sisalduse piirmäärad kuni 0,1% või kuni 0,01% iga tootes oleva komponendi massi kohta [7].

Põhilised ained, millele on RoHS-iga piirmäära paika pandud on [7]:

- Plii - 0,1%;
- elavhõbe - 0,1%;
- kaadmium - 0,01%;
- kuuevalentne kroom - 0,1%;
- polübromeeritud bifenüülid - 0,1%;
- polübromeeritud difenüüleetriühendid - 0,1%;
- bis(2-etüülheksüül)ftalaat;
- butüülbensüülftalaat:
- dibutüülftalaat;
- diisobutüülftalaat.

RoHS direktiiv kehtib kõikidele elektri- ja elektroonikaseadmetele, mis töötavad pingel kuni 1000 V vahelduvvoolu (AC) või 1500 V alalisvoolu (DC). Erandina ei kohaldata seda teatud meditsiiniseadmetele, sõjaväearustusele ja päikesepaneelidele. Erandid on välja toodud direktiivi lisades Annex III ja Annex IV [7].

Tootmise nõuete hulka kuulub keelatud ainete vältimine materjalide valikul, tarnijate juhtimine vastavusdeklaratsioonide ja sertifikaatide kogumise kaudu ning ohtlike ainete tuvastamine, milleks kasutatakse sageli XRF-analüüsi. Lisaks peab tootja säilitama

tehnilised failid ja vastavusdeklaratsioonid vähemalt kümme aastat pärast toote turule laskmist. RoHS vastavus on kohustuslik osa CE-märgistuse nõuetest.

1.1.2 REACH - Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals

REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*) on Euroopa Liidu määrus, mille eesmärk on tagada inimeste tervise ja keskkonna kaitse kemikaalidega seotud riskide eest. Määrus jõustus 2007. aastal ning kohustab ettevõtteid registreerima kõik kemikaalid, mida nad toodavad või impordivad koguses üle ühe tonni aastas. Lisaks registreerimisele hõlmab REACH kemikaalide ohutuse hindamist, autoriseerimist ja piirangute kehtestamist. Kui aine kujutab endast suurt ohtu, võib selle kasutamine olla lubatud ainult eriloaga või täielikult keelatud [2].

REACH-i rakendamine mõjutab tootearendust ja materjalide valikut, kuna tootjad peavad tagama, et nende tooted ei sisalda keelatud aineid või et nende kasutamine on nõuetekohaselt autoriseeritud. Pikas perspektiivis soodustab määrus ohtlike ainete asendamist vähem ohtlike alternatiividega, mis on kooskõlas Euroopa Liidu keskkonna- ja tervisekaitse eesmärkidega [3].

1.1.3 IPC standard (*Institute for Printed Circuits Standards*)

IPC (*Global Electronics Association* eelneva nimega *Institute for Printed Circuits*) on rahvusvaheline organisatsioon, mis arendab ja haldab elektroonikatööstuse standardeid. IPC standardid on laialdaselt tunnustatud ja rakendatud kogu maailmas, tagades elektroonikatoodete kvaliteedi, töökindluse ja ühtsuse tootmisprotsessides.

IPC standardid hõlmavad kogu elektroonikatoodete elutsüklit alates disainist ja materjalide valikust kuni kokkupaneku, testimise ja lõppkontrollini. Need standardid aitavad tootjatel vähendada defekte, suurendada tootmise efektiivsust ja tagada vastavus rahvusvahelistele regulatsioonidele.

Olulisemad IPC standardid on IPC-A-600, IPC-A-610 ja IPC-J-STD-001. IPC-A-600 (*Acceptability of Printed Boards*) keskendub trükkplaatide visuaalsele hindamisele. IPC-A-610 (*Acceptability of Electronic Assemblies*) on kõige laialdasemalt kasutatav standard elektroonikakooste hindamiseks. Määratleb nõuded komponentide paigutusele, jootmise kvaliteedile, puhtusele ja märgistusele. Ning IPC-J-STD-001 määratleb nõuded jootmisprotsessidele ja materjalidele, mida kasutatakse elektroonikakoostes.

IPC standardid jagavad tooted kolme klassi:

- Klass 1 – üldised elektroonikatooted, kus peamine on funktsionaalsus.
- Klass 2 – teenindusele pühendatud elektroonikatooted, kus on oluline töökindlus ja pikem eluiga.
- Klass 3 – kõrge töökindlusega tooted, kus rike ei ole lubatud (nt meditsiiniseadmed, sõjatehnika).

1.2 Tooteanalüüsi põhimõtted

1.2.1 *Bill of Materials* ehk BOM-i analüüsi põhimõtted

Bill of Materials (BOM) analüüs on elektroonikatööstuses kriitiline protsess, mille eesmärk on tagada toote vastavus regulatiivsetele nõuetele, nagu RoHS ja REACH, ning vähendada tarneahela riske. BOM-i analüüs hõlmab järgmisi põhimõtteid:

1. Komponentide identifitseerimine ja klassifitseerimine - Kõik tootes kasutatavad komponendid tuvastatakse ja jaotatakse kategooriatesse (elektroonilised, mehaanilised, pakendimaterjalid). See võimaldab määrata, millistele komponentidele laienevad RoHS ja REACH nõuded [4].
2. Regulatiivsete nõuete kontroll - Kontrollitakse komponentide vastavust RoHS direktiivile, mis piirab ohtlike ainete sisaldust. Lisaks arvestatakse IPC standardite kvaliteedinõudeid [1].
3. Dokumentatsiooni valideerimine - Tarnijatelt kogutakse vastavusdeklaratsioonid (*Declaration of Conformity*) ja sertifikaadid (CoC), mis kinnitavad komponentide vastavust RoHS nõuetele. Vajadusel kasutatakse täiendavaid analüüsimeetodeid, testimist, keelatud ainete tuvastamiseks [5].
4. Riskide hindamine - BOM-i analüüsis hinnatakse riske, mis tulenevad:
 - Puudulikust dokumentatsioonist või teadmata RoHS staatusest.
 - Komponentide elutsükli lõppemisest (EOL) ja asendamise vajadusest.
 - Tarneahela läbipaistmatuses ja ristkontaminatsiooni ohust tootmisprotsessis [6].
5. Andmete haldus ja jälgitavus - BOM-i analüüs tugineb digitaalsele andmehaldusele, näiteks SiliconExpert platvormile, mis võimaldab jälgida komponentide elutsükli, vastavust ja riske. Platvorm pakub reaajas teavet RoHS ja REACH vastavuse, varude, hindade ja alternatiivide kohta [7].
6. Otsustusprotsessi toetamine - Analüüsi tulemusel määratletakse komponendid järgmiselt:
 - Vastavuses olevad komponendid.
 - Komponendid, mis vajavad asendamist või täiendavat kontrolli.
 - Komponendid, millele RoHS nõuded ei laiene (nt pakendimaterjalid) [8].

1.2.2 Trükkplaadi analüüsi põhimõtted

Trükkplaat (*Printed Circuit Board*) on elektroonikaseadmete keskne komponent, mis tagab elektriliste ühenduste ja mehhaanilise stabiilsuse. PCB analüüs RoHS tootmisprotsessi kontekstis keskendub vastavuse, töökindluse ja tootmisprotsessi sobivuse hindamisele.

Analüüsi põhimõtted hõlmavad:

1. Termilise vastupidavuse hindamine - RoHS tootmine toimub kõrgematel temperatuuridel tavaliselt 240–260 °C. PCB analüüsis kontrollitakse termilise stressi raportit, mis kinnitab plaadi vastupidavust korduvatele kuumutustsüklitele. Hindamise käigus jälgitakse delaminatsiooni, mullide, värvimuutuste ja jootemaskide koorumise puudumist.
2. Disaini sobivuse analüüs PCB disain peab tagama komponentide korrektse paigutuse ja jootmise kvaliteedi. Olulised parameetrid on:
 - Vase paksus ja jaotus: mõjutab soojusjuhtivust ja jootmise temperatuuri stabiilsust.
 - Avade mõõtmed ja tolerantsid: RoHS tootmises on soovitatav suurem kliirens komponentide jalgade ja avade vahel (0,05–0,10 mm), et tagada RoHS joodise optimaalne täituvus [9].
 - Kihtide ülesehitus (*stack-up*), mis määrab elektrilised ja termilised omadused.

PCB analüüs loob aluse otsusele, kas olemasolev disain sobib RoHS tootmisprotsessi ilma konstruktsiooni muutmata, ning määratleb vajalikud parandusmeetmed.

1.3 RoHS tootmise kvaliteediriskid

1.3.1 Materjalidega seotud kvaliteediriskid

RoHS tootmise materjalidega seotud kvaliteediriskid tulenevad keerukatest materjalikoostistest ja tarneahela läbipaistvusest. Suurimad ohud on peidetud keelatud ained, mis võivad esineda lisandites, pinnakatetes, liimides või polümeerides, kuigi põhitooraine vastab nõuetele. Väikesed detailid, nagu kaablisidemed, seibid ja kleebised, võivad samuti põhjustada probleeme, sest üks mittesobiv komponent võib muuta kogu toote mittevastavaks. Seega on oluline, et kõigil komponentidel, mida tootel kasutatakse, oleks olemas kehtiv RoHS deklaratsioon.

RoHS vastavatele materjalidele üleminekul on kriitiline vältida ristkontaminatsiooni mitte-RoHS materjalidega jooteprotsessides. Näiteks võivad pliid sisaldavad jootepastad või volained sattuda RoHS toodete jootmisprotsessi, mis rikub vastavusnõudeid. Selle

vältimiseks tuleb rakendada selgeid eraldusmeetmeid, nagu eraldi tööjaamad, tööriistade puhastusprotseduurid ja materjalide korrektne märgistamine.

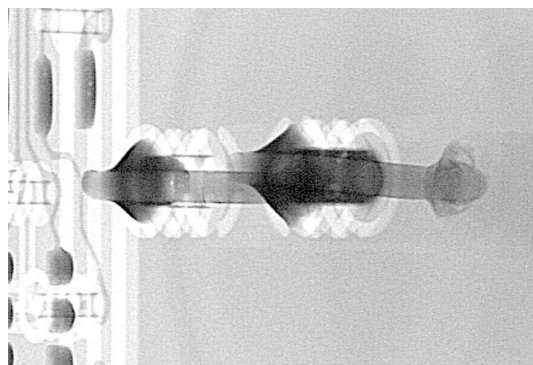
1.3.2 Protsessidega seotud kvaliteediriskid

RoHS tootmisel peamised kvaliteediriskid on seotud uute protsessimaterjalidega ja kõrgemate jootmistemperatuuridega. RoHS jootesulamid nõuavad oluliselt kõrgemat temperatuuri, tavaliselt 240–260 °C, mis on umbes 20–40 °C rohkem kui mitte RoHS jootmisel. Suurenenud temperatuur tõstab kuumakahjustuste riski (Joonis 1), sealhulgas trükkplaadi delaminatsiooni või kõverdumist, komponentide plastkorpuste sulamist või pragunemist, termilist stressi ning jootühenduste mehaanilise tugevuse vähenemist.



Joonis 1. Näide komponendi kuumakahjustusest [10]

Hea jootekvaliteedi saavutamine on RoHS tootmises märksa keerulisem kui mitte RoHS tootmisel. RoHS nõuetele vastav jootematerjal märgub halvemini, mis suurendab külmade jootühenduste (*cold solder joints*) riski. Lisaks võib sellise joodise kasutamine põhjustada ebapiisavat jootetäituvust, kuna joodis jahtub liiga kiiresti enne, kui saavutab vajaliku taseme (Joonis 2).



Joonis 2. Röntgenpilt läbiaukude tehnoloogia komponentidest [autori pilt]

RoHS nõuetele vastav joodis on rabedam ja vähem plastne, mis vähendab selle võimet taluda termilisi tsükleid ja mehaanilist pinget. Selle tulemusena võivad tekkida mikropraod mehaanilise koormuse ja vibratsiooni korral.

Lisaks ebapiisavale jootetäituvusele võib kõrgem temperatuur jootmisprotsessis põhjustada teise olulise probleemi, milleks on näiteks liigse tina kogunemise tootel. Ülemäärane tina võib kaasa tuua mitmeid kvaliteediriske, millest kõige levinumad on elektrilised lühised ja tina silla teket ehk *solder bridging* (Joonis 3). Need tekivad siis, kui tina ühendab lähestikku asuvad jootepunktid, luues soovimatu elektrilise ühenduse. Sellised defektid mõjutavad toote töökindlust ja võivad põhjustada tõsisid rikkeid lõppkasutuses.



Joonis 3. Tina sild (*solder bridging*) [10]

RoHS nõuetele vastavate sulamite kõrgemat temperatuuri ja kehvemat märgumist kompenseeritakse tavaliselt aktiivsema fluxi ehk räbusti või selle koguse suurendamisega, mis aitab eemaldada oksiide ja parandada märgumist. Aktiivsem flux on aga seotud riskiga, et jootmise järel jäävad pinnale jäägid (Joonis 4), mis võivad põhjustada korrosiooni, elektromigratsiooni või mõjutada kaitselaki nakkuvust. *No-clean* fluxi kasutamine aitab neid probleeme vähendada, kuid liigne fluxi kogus tähendab rohkem jääke jootmise järel. Need jäägid võivad samuti põhjustada kaitselaki mittenakkuvust, visuaalseid defekte ja harvadel juhtudel ioonilist saastust, mis koos niiskusega võib tekitada lekketeid või lühiseid. Lisaks võib liigne flux häirida ICT- ja funktsionaaltestide kontaktpindu ning suurendada masinate ja kandurite puhastusvajadust. Esteetiliselt võib fluxi liigne kogus jätta nähtavaid plekke, mis mõjutavad toote kvaliteedi hinnangut. Seetõttu on oluline valida õige flux ja kasutada seda õiges koguses.



Joonis 4. Fluxi jäägid jooteühendusel [10]

1.3.3 Riskianalüüs

Tabel (Tabel 1) esitab RoHS vastavuse tagamise seisukohalt olulised riskid, mis on jaotatud kaheks põhikategooriaks, milleks on materjalid ja protsessid. Iga riskikirje sisaldab järgmisi elemente:

- Risk – konkreetne probleem või oht, mis võib mõjutada vastavust.
- Tagajärg – võimalik mõju tootele või tootmisprotsessile, kui risk realiseerub.
- Tõenäosus – hinnang, kui sageli risk võib esineda (madal, keskmine, kõrge).
- Mõju – riskist tuleneva tagajärje raskusaste (madal, keskmine, kõrge).
- Riskitase – kombineeritud hinnang, mis arvestab tõenäosust ja mõju.
- Leevendusmeetmed – soovituslikud tegevused riski vähendamiseks või kõrvaldamiseks.

Materjalidega seotud riskid hõlmavad peidetud keelatud ainete esinemist, komponentide mittevastavust ja ristkontaminatsiooni jootmisprotsessides (Tabel 1). Need võivad viia toote mittevastavuseni, tootepartiide tagasilükkamiseni või vastavusnõuete rikkumiseni. Leevendusmeetmed keskenduvad tarneahela kontrollile ja sertifikaatide nõudmisele.

Protsessidega seotud riskid on peamiselt seotud RoHS jootmise eripäradega, nagu kõrgem jootmistemperatuur, halvem märgumine, liigne tina ning fluxi jäägid (Tabel 1). Need riskid võivad põhjustada kuumakahjustusi, elektrilisi rikkeid, lühiseid või korrosiooni. Leevendusmeetmed hõlmavad protsessi parameetrite optimeerimist, sobivate materjalide valikut ja visuaalset kontrolli.

Riskianalüüs on oluline osa tootmisprotsessi kvaliteedi ja vastavuse tagamisel. Selle eesmärk on tuvastada võimalikud ohud, hinnata nende tõenäosust ja mõju ning määrata riskitase, et rakendada sobivaid leevendusmeetmeid. Analüüs keskendub peamiselt

materjalidele ja protsessidele. Riskianalüüsi käigus hinnati tõenäosust, mõju ning riski taset skaalal 1-3.

Tõenäosus (P) - näitab, kui sageli risk võib realiseeruda:

- 1 – Madal, risk esineb harva või on ebatõenäoline.
- 2 – Keskmise, risk võib esineda aeg-ajalt.
- 3 – Kõrge, risk on tõenäoline ja korduv.

Mõju (I) - näitab, kui tõsised on tagajärjed, kui risk realiseerub:

- 1 – Madal, mõju on väike, ei põhjusta olulisi häireid.
- 2 – Keskmise, mõju on märgatav, võib põhjustada viivitusi või lisakulusid.
- 3 – Kõrge, mõju on kriitiline, põhjustab olulisi kvaliteediprobleeme.

Riskitase (R) - näitab riski üldist kriitilisust:

- 1 - Madal tase, risk on ebaoluline, vajab minimaalset jälgimist.
- 2 - Keskmise tase, risk on mõõdukas, vajab kontrolli ja ennetavaid meetmeid.
- 3 - Kõrge tase, risk on kriitiline, vajab koheseid leevendusmeetmeid.

Tabel 1 RoHS riskianalüüs

Kategooria	Risk	Tagajärg	P	I	R	Leevendusmeetmed
Materjalid	Peidetud keelatud ained	Toote mittevastavus RoHS nõuetele	2	3	3	Kehtivad RoHS deklaratsioonid, rangelt kontrollitud tarneahel
Materjalid	Mittevastavad komponendid	Tootepartiide tagasilükkamine, mainekahju	2	2	2	Kontrollida kõik komponendid, nõuda tarnijatelt sertifikaate
Materjalid	Ristkontaminatsioon jootmisprotsessides	Vastavusnõuete rikkumine	1	3	2	Eraldi tööjaamad, tööriistade puhastusprotseduurid, korrektne märgistamine
Protsessid	Kõrgem jootmistemperatuur (240–260 °C)	Kuumakahjustused,	2	3	3	Temperatuuri profiili optimeerimine,

Kategooria	Risk	Tagajärg	P	I	R	Leevendusmeetmed
		töökindluse vähenemine				komponentide kuumataluvuse kontroll
Protsessid	Halvem märgumine RoHS joodisel	Külmad jootühendused, elektrilised rikked	3	3	3	Õige jootematerjali ja fluxi valik, protsessi parameetrite täpne seadistus
Protsessid	Liigne tina (<i>solder bridging</i>)	Elektrilised lühised, soovimatud ühendused	2	3	3	Visuaalne kontroll, AOI, protsessi korrigeerimine
Protsessid	Fluxi jäägid	Korrosioon, elektromigratsioon, kaitselaki mittenakkuvus	2	2	3	<i>No-clean</i> fluxi kasutamine, õige koguse doseerimine, puhastusprotseduurid

2 ETTEVÖTTE X TUTVUSTUS

Ettevõtte X on elektroonikatootmise teenuseid (EMS ehk *Electronics Manufacturing Services*) pakkuv ettevõtte. Ettevõtte kuulub rahvusvahelisse X gruppi, mis on üks maailma juhtivaid tööstuselektronika tootjaid. Eestis asub grupi üks suurimaid tehaseid, mis tagab hea ligipääsu nii Kesk- kui ka Põhja-Euroopale. Lisaks tootmisele pakub ettevõtte X testimisteenuseid ning ulatuslikke inseneriteenuseid. Ettevõtte X on piirkonna üks olulisemaid ja suurimaid tööandjaid.

2.1 Probleemi kirjeldus

Elektroonikatööstuses on Euroopa Liidu RoHS direktiiviga kehtestatud piirangud ohtlike ainete kasutamisele elektri- ja elektroonikaseadmetes. Ettevõtte X tootmisprotsessid on kohandatud RoHS nõuetele, kuid kliendi toode Y on algselt disainitud mitte RoHS tootmiseks. Probleem seisneb selles, kuidas juurutada toode Y RoHS tootmisprotsessi ilma konstruktsiooni muutmata, tagades samal ajal vastavuse regulatiivsetele nõuetele ja kvaliteedistandarditele.

Peamised väljakutsed:

- Komponentide ja trükkplaadi disaini sobivuse hindamine RoHS tootmise jaoks.
- Riskide tuvastamine ja maandamine üleminekul kõrgematele jootmistemperatuuridele, mis mõjutavad jootekvaliteeti ja komponentide vastupidavust.
- Protsesside valideerimine katsepartii tootmise kaudu, et kinnitada toote töökindlus ja vastavus RoHS tootmisprotsessis.

Probleemi lahendamine eeldab BOM-i analüüsi, trükkplaadi disaini kontrolli, riskianalüüsi ning katsepartii tootmist koos termoprofiilide ja kvaliteedikontrolliga.

2.2 Meetodid ja strateegia

Uurimistöö metoodika tugineb kombineeritud lähenemisele, mis ühendab teoreetilise analüüsi ja praktilise valideerimise. Peamine eesmärk on hinnata toote Y juurutamise võimalikkust RoHS direktiivi nõuetele vastavasse tootmisprotsessi ilma toote disaini muutmata. Strateegia koosneb kolmest põhietapist, milleks on teoreetiline analüüs, toote analüüs ning katsepartii tootmine ja valideerimine.

Teoreetilises etapis uuritakse Euroopa Liidu regulatiivseid dokumente ja standardeid, et määratleda vastavusnõuded. Analüüs hõlmab endas RoHS direktiivi piirangute ja erandite kaardistamist, IPC standardite rakendamist jootekvaliteedi ja trükkplaadi disaini

hindamisel. Teoreetiline analüüs loob aluse praktiliste muudatuste kavandamiseks ja riskide tuvastamiseks.

Toote analüüsi etapis hinnatakse toote Y vastavust RoHS tootmisprotsessi nõuetele.

Analüüs hõlmab:

- BOM-i (*Bill of Materials*) kontrolli, et tuvastada keelatud ainete esinemise riskid.
- Komponentide ja trükkplaadi disaini sobivuse hindamist vastavalt IPC standarditele.
- Dokumentatsiooni ja vastavussertifikaatide kontrolli.
- Riskianalüüsi koostamist, mis käsitleb materjalide ja protsesside kvaliteediriske.

Analüüsi tulemused määravad, millised muudatused on vajalikud katsepartii tootmiseks.

Katsepartii tootmise ja valideerimise etapis rakendatakse teoreetilised teadmised praktikas, valmistades katsepartii RoHS tootmisprotsessis. Valideerimine hõlmab MPQ (*Manufacturing Process Qualification*) raporti koostamist, mis dokumenteerib protsesside stabiilsuse ja vastavuse.

Kombineeritud lähenemine võimaldab siduda regulatiivsed nõuded tootmise tegelikkusega, minimeerides riske ja tagades vastavuse ilma disaini muutmata.

2.3 Ettevõtte X tootmisprotsesside tutvustus

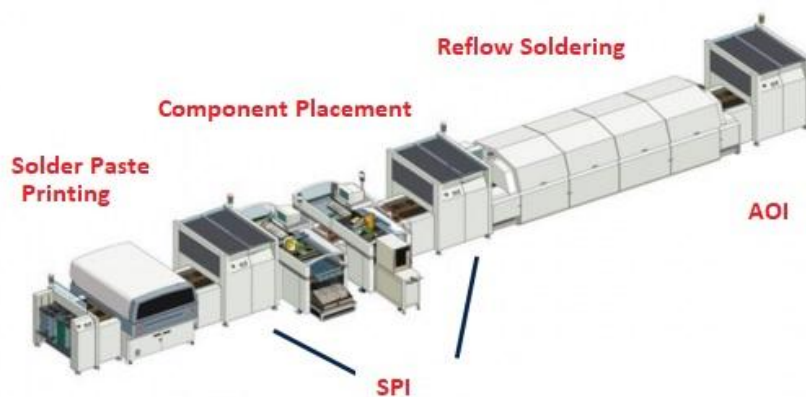
2.3.1 SMT (Surface Mount Technology) – Pindpaigaldustehnoloogia

SMT (*Surface-Mount Technology*) on tehnoloogia, kus trükkplaadi pinnale paigaldatakse elektroonikakomponendid [11]. SMT jaguneb omakorda erinevateks tootmisprotsessideks.

Esimene selline protsess on jootepasta pealekandmine ehk pasta printimine. Selles etapis kantakse šabloni abil trükkplaadile jootepasta, kuhu hiljem asetatakse komponendid [11]. Pärast pasta pealekandmist toimub 3D pasta kontroll, kus seade kontrollib trükkplaadile kantud pasta kogust, kuju ning asukohta. Kui jootepasta kontroll on läbitud, liigub toode konveieriga edasi komponentide paigaldamise, kus robotid asetavad SMD komponendid eelnevalt prinditud jootepasta peale [11].

Edasi liigub toode taassulatusjootmisesse ehk *reflow soldering*, kus ahjus kuumutatakse jootepasta sulamiseni ning toimub jootmine [11]. Viimase etapina on AOI (*Automated Optical Inspection*), kus seade kontrollib visuaalselt joote kvaliteeti [11].

Ettevõttes X on selliseid (Joonis 5) SMT tootmisliine 5 tükki.



Joonis 5. SMT liini näidis [12]

2.3.2 Prehandling ehk komponentide ettevalmistus

Prehandling ehk komponentide ettevalmistus on tootmisprotsessi oluline etapp, mille eesmärk on tagada komponentide sobivus järgnevateks töötlustoiminguteks. Selles faasis valmistatakse detailid ette vastavalt tehnilistele nõuetele ja tööjuhenditele, näiteks lõigatakse või painutatakse komponentide jalad, et need vastaksid kokkupaneku või jootmise tingimustele. Ettevalmistusprotsess aitab vältida hilisemaid kvaliteediprobleeme ning tagab sujuva ja tõhusa tootmisvoo.

2.3.3 Assembly ehk kooste

Koosteprotsess jaguneb üldiselt kaheks etapiks eelkoosteks ja lõppkoosteks. Eelkooste etapis valmistatakse ette väiksemad alamkoosteüksused, mis võivad hõlmata näiteks komponentide kinni katmist, juhtmete paigutamist või mehhaaniliste osade kokkupanekut. Selle eesmärk on lihtsustada ja kiirendada järgnevaid protsesse. Lõppkooste toimub tootmisprotsessi lõppfaasis, kus kõik eelnevalt ettevalmistatud osad ühendatakse vastavalt kliendi nõuetele terviklikuks tooteks.

2.3.4 THT (*Through-Hole Technology*) ehk läbiaukude tehnoloogia

THT (*Through-Hole Technology*) on elektroonikatootmises kasutatav tehnoloogia, mille puhul paigaldatakse komponendid trükkplaadile läbi sellel olevate avade. See meetod tagab tugeva mehhaanilise kinnituse ja usaldusväärse elektrilise ühenduse, mistõttu kasutatakse seda sageli toodetes, mis peavad taluma mehhaanilist pinget või vibratsiooni [13].

THT-protsess koosneb tavaliselt järgmistest etappidest:

- Rübusti annustamine (*fluxing*) – trükkplaadile kantakse rübusti, mis eemaldab oksüdeerunud kihid ja parandab joodise nakkuvust komponentide jalgadega [13].
- Eelsoojendus (*preheating*) – trükkplaat soojendatakse enne jootmist, et vältida termilisi šokke ja parandada jootmise kvaliteeti [13].
- Joodiselainega jootmine (*wave soldering*) – trükkplaat liigub konveieril läbi joodiselaine, mis jootab komponentide jalad trükkplaadi külge. Kasutatakse kahte lainet: *chiplaine* väiksemate komponentide jaoks ja pealaine suuremate ühenduste jaoks [13].
- Jahutamine (*cooling*) – pärast jootmist jahutatakse trükkplaat, et jooted saaksid taheneda ja stabiliseeruda [13].

Pärast jootmisprotsessi teostatakse visuaalne kvaliteedikontroll, mille eesmärk on veenduda, et kõik jooteühendused vastavad kehtestatud kvaliteedinõuetele ja IPC-A-610 standardile. See standard määratleb aktsepteeritavad jootekvaliteedi kriteeriumid ning aitab tagada toodete töökindluse ja vastavuse kliendi nõuetele.

2.3.5 Conformal Coating ehk lakkimine

Lakkimine on protsess, mille käigus kannan elektroonikaplaadile kaitsekihi, et tagada komponentide ja jootekohtade kaitse niiskuse, tolmu, kemikaalide ja muude keskkonnamõjude eest. Lakk kantakse peale erinevate meetoditega, näiteks pihustamise, kastmise või pintsliga [14].

Pärast laki pealekandmist toimub UV-kuivatamine, mis tagab laki kiire ja ühtlase kõvenemise. See vähendab tolmuosakeste kinnitumise riski ja võimaldab tootmisprotsessi kiiremat jätkumist. Seejärel kontrollin lakitud plaate UV-valguse all. Kuna enamik lakke sisaldavad fluorestseeruvaid aineid, on võimalik visuaalselt veenduda, et kogu vajalik pind on ühtlaselt kaetud.

Ettevõttes X kasutame nelja peamist lakkimise meetodit:

- Film Coating – lakikardinaga või -lehvikuga katmine, mis on väga kiire ja efektiivne. Materjalijoa laius jääb tavaliselt 6–12 mm vahele ning katmise kiirus on umbes 380 mm/s. Lakkimise kõrgus pinnast on 5–15 mm [14].
- Precision Jet Coating – nõelaga lakkimine ehk jettimine, kus lakitäpid kantakse pinnale väikeste löökide abil. Täpi suurus on umbes 3–4 mm, liikumiskiirus 100–150 mm/s, sõltuvalt sagedusest ja soovitud katvusest. Sobib hästi väikeste ja täpsust nõudvate alade katmiseks [14].

- Geeliga katmine – kasutatakse vedeliku tammi loomiseks, kuna geel on viskoossem ja ei valgu laiali. See võimaldab moodustada barjääri keeluala ja lakitava ala vahele [14].
- Manuaalne lakkimine pintsliga – kõige vähem efektiivne, kuid hädavajalik keeruliste ja raskesti ligipääsetavate alade katmisel. Ühtlase tulemuse saavutamise nõuab kogenud töötajat [14].

2.3.6 Kõrgpinge testimine ehk HVT

Kõrgpinge testimine ehk HVT test on elektriohutuse kontrolli meetod, mida kasutatakse selleks, et veenduda toote isolatsiooni vastupidavuses. Testi käigus rakendatakse isolatsioonile oluliselt kõrgemat pinget kui tavapärane tööpinge, et kontrollida, kas isolatsioon suudab takistada voolu läbimist. Selle eesmärk on tuvastada võimalikud isolatsioonirikked, lekkevoolud ja muud ohud, mis võivad põhjustada elektrilööke või lühiseid [15].

Tavaliselt viiakse HVT test läbi vastavalt IEC 60060-1 või UL standarditele. Testi ajal rakendatakse pinget kindlaksmääratud aja jooksul ning jälgitakse lekkevoolu piirväärtusi. Kui isolatsioon peab pingele vastu ja voolu ei läbi, loetakse test edukaks. See test on kohustuslik paljudes tööstusharudes, kus ohutus on kriitilise tähtsusega. [15]

2.3.7 Funktsionaalne testimine ehk FCT

Funktsionaalne testimine on protsess, mille eesmärk on kontrollida, kas seade töötab vastavalt oma tehnilistele nõuetele ja kavandatud funktsioonidele. Test koosneb toitepinge ja voolutarbimise mõõtmist, signaalide ja kommunikatsiooniliidestest kontrollist ning kõigi funktsioonide käivitamist reaalses töötingimustes. Sageli kasutatakse automatiseeritud või poolautomatiseeritud testpinkide ja tarkvara kombinatsiooni, et tagada täpsus ja korduvus. Funktsionaalne testimine on kriitiline kvaliteedi ja töökindluse tagamiseks.

2.4 Toote Y tehnilised andmed

Toote Y puhul on tegemist tööstusliku juhtimissüsteemide kõrgpinge trafo mooduliga. Antud tooted on mõeldud kõrgpinge vaheldu voolu muundamiseks madalamaks pingeks, et toita tööstuslike juhtimisahelate jakoormuste nagu näiteks elektrimootorite toitesüsteeme.

Tehnilised andmed:

- IPC-A-610 klass 2;
- Trükkplaadi suurus: 233,35 x 160 mm;
- Trükkplaadi kihtide arv: 6;

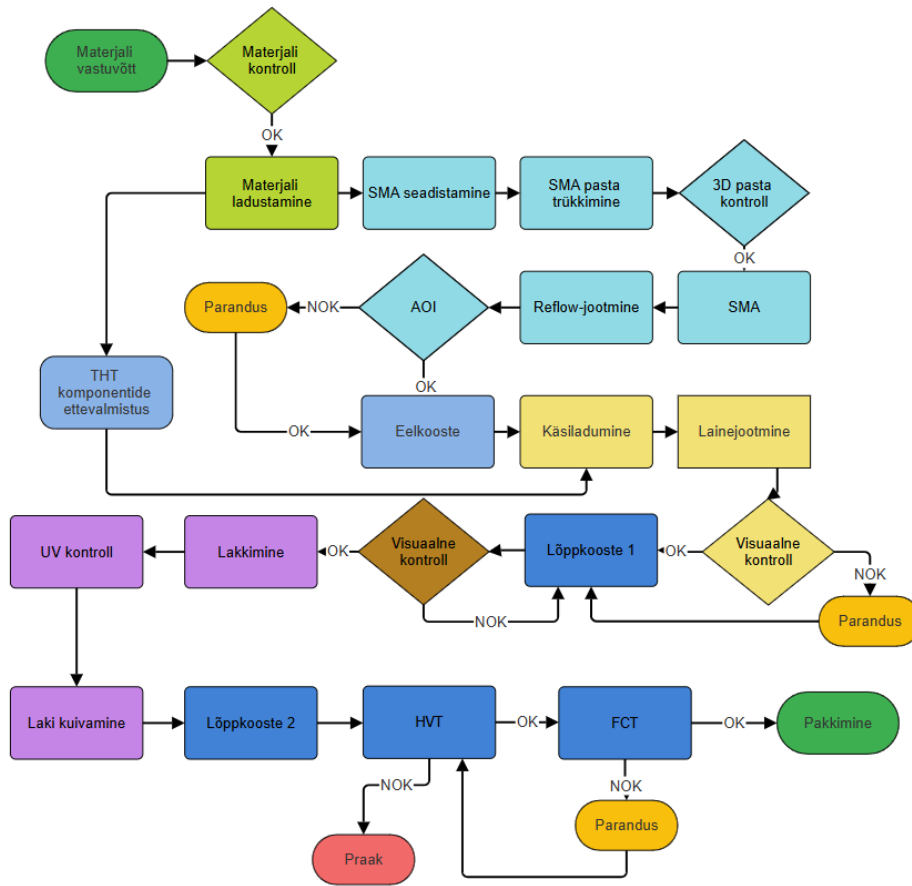
- Trükkplaadi paksus: 1,74 mm;
- SMA komponentide arv: 30;
- THT komponentide arv: 28;
- AML komponentide arv: 91.

2.4.1 Toote Y vooskeem

Toote Y vooskeem (Joonis 6) koosneb 23 põhilisest etapist, mis algavad materjali vastuvõttust ja lõpevad pakendamisega. Esimene etapp on materjalide vastuvõtt, mille käigus kontrollitakse vastavust ostutellimusele, tootja koodi õigsust ning pakendi seisukorda. Seejärel liiguvad materjalid kontrollietappi, kus teostatakse põhjalikum vastavuskontroll. Näiteks kliendispetsiifiliste materjalide puhul viiakse läbi ettenähtud mõõtmised vastavalt dokumentatsioonile. Pärast kontrolli ladustatakse materjalid vastavates laokohtades. Antud etappide puhul on tegemist üldiste ettevalmistus etappidega.

Tootmistellimus algab SMA seadistamisega, mis hõlmab materjalide komplekteerimist ja tootmisliini ettevalmistamist. Järgnevalt toimub tootmisprotsess vastavalt punktis 2.3.1 kirjeldatule. AOI poolt tuvastatud korrast tooted liiguvad edasi järgmisesse etappi, kuid vigased tooted suunatakse parandusse. Pärast SMT pooltoote valmimist liiguvad need eelkoostesse, kus toimub toote serialiseerimine ja ettevalmistus THT (*Through-Hole Technology*) etapiks. Paralleelselt toimub komponentide ettevalmistus THT jaoks. THT-protsess koosneb kolmest etapist, milleks on käsiladumine, kus asetatakse ettevalmistatud komponendid tootele, lainejootmine ning visuaalne kontroll. Korrektsed tooted liiguvad edasi „Lõppkooste 1“ etappi, kus toimub tootel olevate juhtmete ühendamine. Pärast juhtmete ühendamist teostatakse enne lakkimist visuaalne kontroll etapis „Lõppkooste 1“ tehtud tööle. Lakkimisele järgneb UV-kontroll, kus tehakse ka mõningaid väiksemaid parandusi ning lõpuks kuivamine. Pärast laki kuivamist liiguvad tooted tagasi

koosteosakonda, kus tehakse neile viimane kooste enne HVT ja FCT testimist. Testide edukal läbimisel liiguvad tooted väljastuslattu, kus need pakitakse ning saadetakse välja.



Joonis 6 Toote Y vooskeem ehk *flowchart*

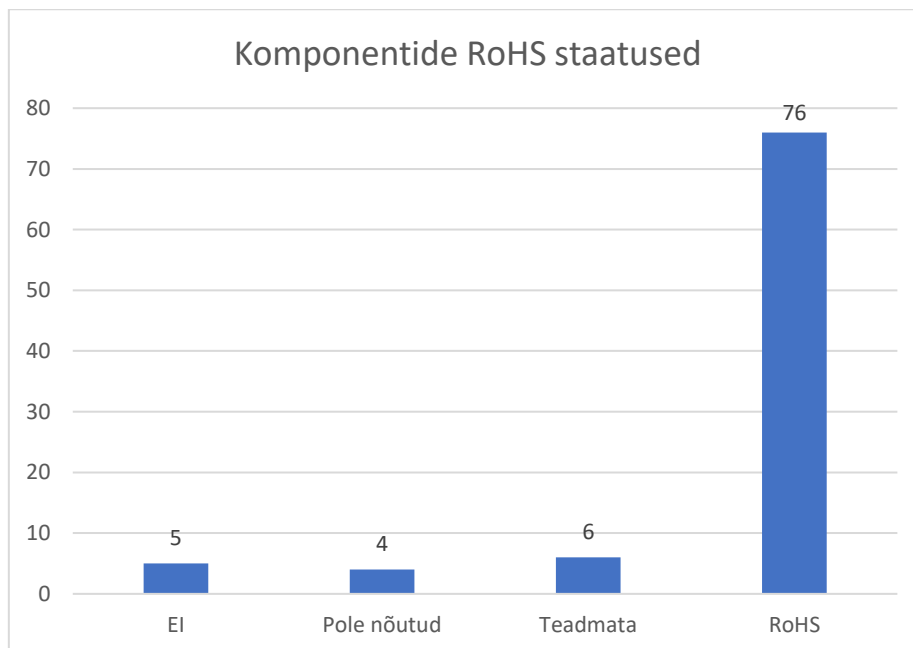
3 TOOTE Y SOBIVUSE HINDAMINE ROHS TOOTMISEKS

3.1 *Bill of Materials* ehk BOM-i analüüs

Analüüsitavate toodete tootestruktuur koosneb kokku 48 komponendi koodist. Antud koodidel on heakskiidetud tootjate nimekiri ehk AML (*Approved Manufacturer List*), kelle komponente ning materjale tohib antud toote tootmiseks kasutada. Toodete Y heakskiidetud tootjate nimekirja kuulub kokku 91 komponentide tootjate tootekoodi ehk MPN-i (*Manufacturer Part Number*).

Komponentide andmed pärinevad SiliconExpert platvormilt. SiliconExpert on tarkvaraplatvorm, mis võimaldab jälgida komponentide elutsüklit, vastavust ja riske [16]. Analüüsi tegemiseks võeti platvormilt välja kõigi tootel kasutatavate komponentide RoHS staatused.

Esmase analüüsi tulemusena selgus 76 MPN-i vastavus RoHS nõuetele. Viie MPN-i puhul selgus, et antud tootjate tootekoodid ei vasta RoHS nõuetele, kuue puhul oli RoHS staatus teadmata ning nelja puhul ei rakendunud neile RoHS nõuded (Joonis 7).



Joonis 7. Komponentide RoHS staatused

Täpsemal analüüsimise käigus selgus viiest mittevastavast MPN-i puhul kolmel juhul on tegemist trükkplaatidega. Kahel juhul on tegemist mitte aktiivsete tarnijatega ning nende osas tehakse ettepanek antud tarnijad AML nimekirjast eemaldada. Aktiivse trükkplaadi tarnija vastavusdeklaratsioon kontrolliti üle ning selgus, et tarnija vastab RoHS nõuetele. Ühe mittevastava MPN-i puhul on tegemist jootepastaga, mis asendatakse toote

muudatuse käigus RoHS nõuetele vastava jootepasta vastu. Teise „EI“ staatusega komponendi puhul oli tegemist mehaanilise komponendiga, mille andmelehe ülevaatamisel selgus ka antud MPN-i vastavus RoHS nõuetele.

Nelja komponendi, mille puhul oli märgitud „Pole nõutud“ on tegemist pakkematerjaliga. Pakkematerjalile RoHS nõuded ei laiene [17].

Komponendid, millel oli RoHS staatuseks märgitud „Teadmata“ on kokku kuus. Kahel MPN-i puhul on tegemist elektriliste juhtmetega, kus AML listis on märgitud juhtme tooriku kood. Antud juhtmeid tellitakse eelnevalt töödeldud kujul ning töödeldud kujul on juhtmed RoHS nõuetele vastavuses, mille kohta küsiti tootjalt vastavusdeklaratsioon. Tooriku MPN-id saaks AML-ist eemaldada või muuta nende RoHS staatus. Nelja MPN-i puhul on tegemist mehaaniliste komponentidega. Nendest kahel oli RoHS vastavuse informatsioon veebis olevatel andmelehtedel saadaval. Ühe puhul oli tegemist EOL (*End Of Life*) komponendiga ning selle puhul tehti ettepanek antud MPN AML listist eemaldada. Ühelt tootjalt oli vajadus üle küsida RoHS direktiivile vastavuse tõend. Antud tootja kinnitas vastavust (Joonis 8).

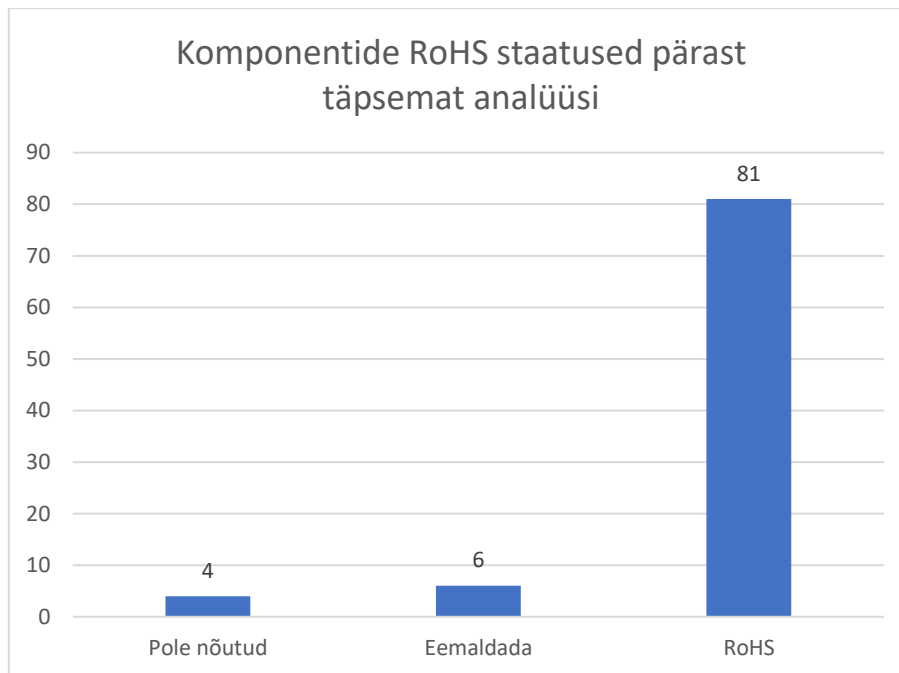
Certificate of Conformity – EU RoHS Declaration

Customer: 

This is to certify that all products supplied to the company mentioned above meet the requirements of EU RoHS Directive 2011/65/EU and 2015/863/EU - RoHS Directive Annex.

Joonis 8. Mehaanika komponendi RoHS vastavuse tõend

Pärast täpsemat analüüsi selgus, et 91-st tootja tootekoodist 81 vastavad RoHS nõuetele, 6 tuleb AML-ist eemaldada ning neljale RoHS nõuded ei laiene (Joonis 9). Puuduva või vale RoHS staatusega komponentide puhul edastati informatsioon süsteemi haldurile andmete uuendamise vajadusest.



Joonis 9. Komponentide RoHS staatused pärast täpsemat analüüsi

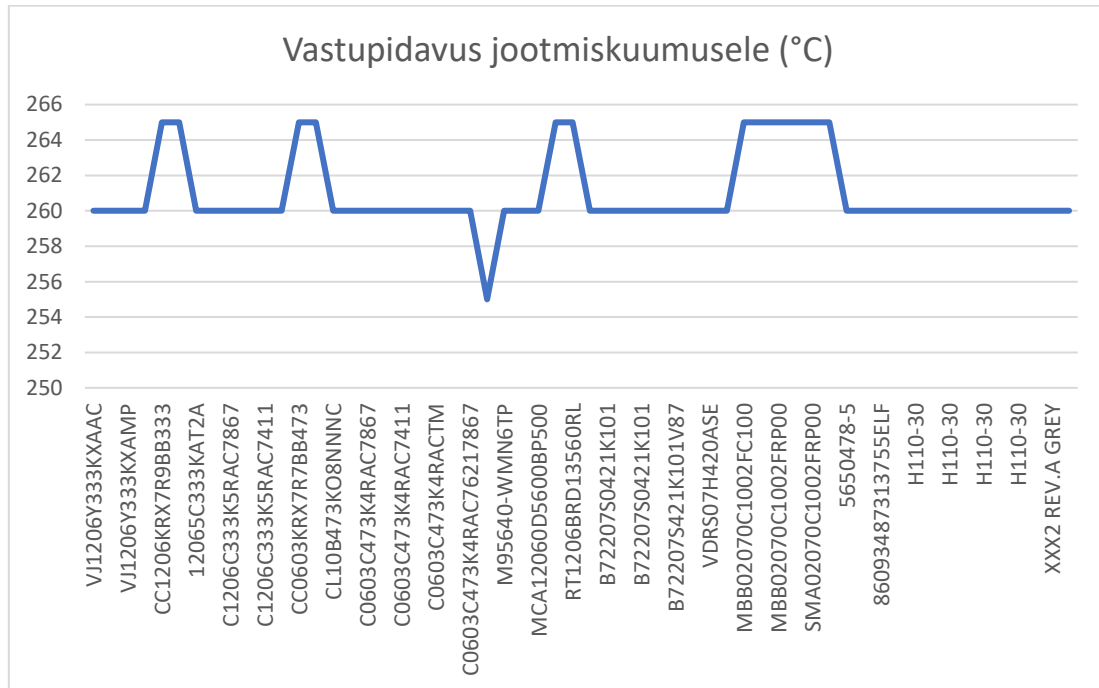
3.1.1 Komponentide soovituslikud termoprofiilid

Vältimaks kvaliteedi riske ning tagamaks optimaalset jootmistemperatuuri analüüsiti kasutatavate komponentide vastupidavust jootmise kuumusele. Erinevad elektroonikakomponendid, nagu varistorid, takistid, diodid ja pistikud, omavad spetsiifilisi jootmisparameetreid, mis on määratud tootjate poolt. Nende parameetrite järgimine on kriitilise tähtsusega, et vältida termilisi kahjustusi, säilitada komponentide elektrilised omadused ning tagada lõpp-toote töökindlus. Analüüsi käigus koondati iga komponendi maksimaalne vastupidavus jootmiskuumusele ja selle aeg. Andmed pärinevad komponentide andmelehtedelt.

Analüüsi teostamiseks võeti kõigi 91 komponendi tootele lisamise etapid, et selgeks teha milliste puhul on oluline jälgida soovituslikku termoprofiili jootmisel. 91-st komponendist 58 juhul oli tegemist SMT või THT komponentidega, millel kontrolliti vastupidavust maksimaalsele jootmiskuumusele ehk *Resistance to Soldering Heat*. Vastavalt IEC 60068-2-20 standardile, näitab parameeter, kui hästi komponent talub jootmisprotsessi kuumust ilma kahjustusi saamata. See on oluline, sest jootmisel kasutatakse kõrgeid temperatuure, mis võivad mõjutada komponendi korpust, klemmide tugevust ja sisemist konstruktsiooni [18].

Analüüsi käigus selgus, et kõikidel 28 *Through-Hole Technology* komponentide vastupidavus jootmiskuumusele jääb vahemikku 260-265°C. Kontroll teostati 28-le komponendile. *Surface Mount Technology* komponentide puhul teostati analüüs 30-le

komponendile. Ühe kondensaatori puhul jäi antud temperatuur 255°C juurde, mille puhul on tegemist SMT komponendiga, kus jootmistemperatuur jääb tavaliselt all 255°C, seega loeti antud komponent sobivaks. Ülejäänud 29 komponendi temperatuur jäi vahemikku 260-265°C (Joonis 10).



Joonis 10. Komponentide vastupidavus jootmiskuumusele

3.2 Trükkplaadi analüüs

Trükkplaat ehk PCB (*Printed Circuit Board*) on üks olulisemaid osasid elektroonikaseadmes. Trükkplaadi põhifunktsioonid on hoida komponente paigal ja ühendada komponente juhtivate radade kaudu. Trükkplaat koosneb tavaliselt substraadist, vasekihtidest, joodismaskist ning siiditrükist. Substraat on tavaliselt klaaskiust materjalist ning mille ülesanne on anda plaadile jäikus. Vasekihid juhivad elektri ja moodustab ühendusi. Joodismask kaitseb substraati ning vasekihte väliste keskkonna tegurite eest. Siiditrükki kasutatakse trükkplaadi markeerimiseks.

3.2.1 Trükkplaadi vastavussertifikaadi analüüs

Trükkplaadi vastavussertifikaadist kontrolliti vastavust RoHS direktiivile. Antud analüüsi käigus kontrolliti ainult ühe tootja vastavussertifikaati ehk CoC-d (Joonis 11), kuna tegemist on kliendi poolt vaikumisi valitud tootjaga.

RoHS Declaration

Dear Customers:

[REDACTED] hereby certifies that all products are RoHS Compliant and fulfills the definition and restrictions defined under Directive 2011/65/EU with amendment 2015/863/EU of the European Parliament and of the Council on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (EEE) – recast.

Joonis 11. Trükkplaadi RoHS vastavusdeklaratsioon CoC-st

Trükkplaadi CoC analüüsi käigus lisaks RoHS vastavusele, kontrolliti ka CoC-s olevat trükkplaadi tootja poolt teostatavat termilise stressi raportit (*Thermal stress report*). Testimise käigus anti trükkplaadile 287,5 kuni 288,5 kraadi kuuma 10 sekundit. Testi teostati 3 korda. Testi ajal hinnati värvimuutust PCB pinnal, kaitsekihi pinnal kortside esinemist, PCB kihtide eraldumist, õhumulle või gaasilisi moodustisi PCB pinnal või kihtide vahel, valgete täppide teket klaaskiudstruktuuris, kontrolliti PCB nurki tuvastamaks kahjustusi, hinnati joodismaski kinnitumist, galvaniseeritud kihtide terviklikkust, komponentide jootepunktide ühenduste lahti tulekut või tõusmist PCB pinnalt ning vaigu taandumist. Vastavussertifikaadis olid testi tulemused korras (Tabel 2).

Tabel 2. Trükkplaadi tootja termilise stressi analüüsi tulemused

Kontrollitav sisu	Tulemus
Värvimuutus	Ei
Kortsud	Ei
Delaminatsioon	Ei
Mullid	Ei
Valged täpid	Ei
Pragu nurgas	Ei
Jootemask koorub	Ei
Kattepragu	Ei
Taandumine	Ei

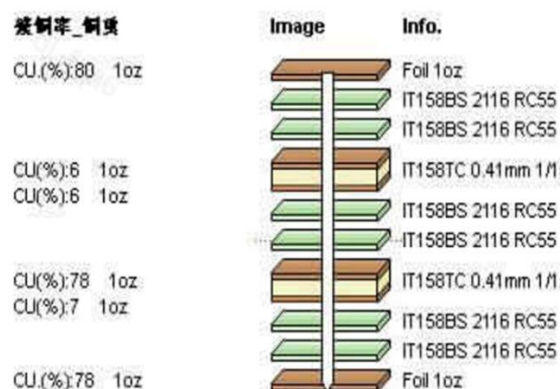
3.2.2 Trükkplaadi disaini analüüs

Trükkplaadi ehk PCB analüüsi eesmärk oli välja selgitada toote sobivus RoHS tootmiseks ning tuvastada potentsiaalseid riske. Analüüs oli jagatud kaheks põhiliseks osaks, kus üks osa oli trükkplaadi kihtides olevate vase alade ja koguse hindamine. Teine osa koosnes komponentide ja trükkplaadi sobivuse hindamisest. Analüüsimiseks kasutati toote Y

trükkplaadi tootmiseks vajalike tootmisdokumentatsiooni ehk *Gerber* dokumente ning trükkplaadi spetsifikatsiooni.

Vasel on erinevad rollid trükkplaadi struktuuris. Üheks rolliks on elektrijuhtimine, kus vasest moodustatud juhtrajad kannavad elektri signaale ning toidet komponentide vahel. Vase oluline roll on ka tootel soojuse juhtimine, et vältida komponentide ülekuumenemist. Vask trükkplaadis annab ka sellele tema mehaanilise tugevuse. Trükkplaadi kihtides oleva vase hindamine on oluline, kuna ühelt poolt on vask vajalik toote toimimiseks, kuid teiselt poolt mõjutab vase kogus näiteks jooteprotsesside toimimist. Suured vase alad vajavad suuremat energiat saavutamaks sobilikku temperatuuri jootmiseks. Kui vask ei ole piisavat temperatuuri saavutanud, hakkab see trükkplaadi avas kapillaarsuse toimele liikuvat tina maha jahutama, mistõttu on oht, et vajalikku jootetäituvust ei saavutata. Liiga kõrge soojendus temperatuur kahjustab omakorda toodet, seega õige temperatuuri valik THT etapis on väga oluline.

Vase kihtide analüüsimiseks toote X puhul kasutati trükkplaadi spetsifikatsioonist tulenevat *stack-up* dokumenti, ehk trükkplaadi kihilise ülesehituse dokumenti (Joonis 12). Esimene punkt mida analüüsi ajal vaadati oli vase paksus kihis, mida mõõdetakse untsi ruutjala kohta. Dokumendist selgub, et antud tootel on vase paksus 1 oz/ft² ehk ~35 µm, mis on levinuim vase paksus mida kasutatakse üldise elektroonika ning juhtimisahelate tootmisel [19]. Lisaks annab antud *stack-up* dokument hea ülevaate vase jaotusest kihiti. Toote Y puhul selgub, et esimene kiht, neljas kiht ja kuues kiht koosnevad vastavalt 80%, 78% ja 78% ning teine kiht, kolmas kiht ja viies kiht vastavalt 6%, 6% ja 7% vasest. Antud tulemustest võib järeldada, et kuigi esimene, neljas ja kuues kiht koosnevad suuresti vasest, ei ole tegemist eriti suurte vasealadega ning toodet on võimalik toota tavapärase protsessi järgi.



Joonis 12. Trükkplaadi kihiline ülesehitus

Disaini analüüsi alla kuulus ka komponentide ja PCB avade sobivuse analüüsimine. Analüüsi tegemiseks võeti välja kõikide komponentide jala paksused ning hinnati nende

sobivust vastavale trükkplaadi avale (Joonis 13). Trükkplaadi avade analüüsimine on oluline, kuna pliivaba tina kasutamine mõjutab tootmisel märgumist ja jootetäidet, mis omakord nõuab suuremaid avasid PCB-l, et tina paremini oma vajaliku taseme saavutaks [20]. Analüüsimiseks kasutati toote disaini omaniku soovitus trükkplaadi avade ja komponendi jalgade vahelise kliirensi osas. Soovituse kohaselt peab trükkplaadi ava olema 0,05–0,10 mm suurem kui maksimaalne võimalik komponendi jala läbimõõt. Antud soovituste järgi on minimaalne trükkplaadi ava ning komponendi jala kliirens 0,05 mm, mida arvestati ka analüüsi tehes.

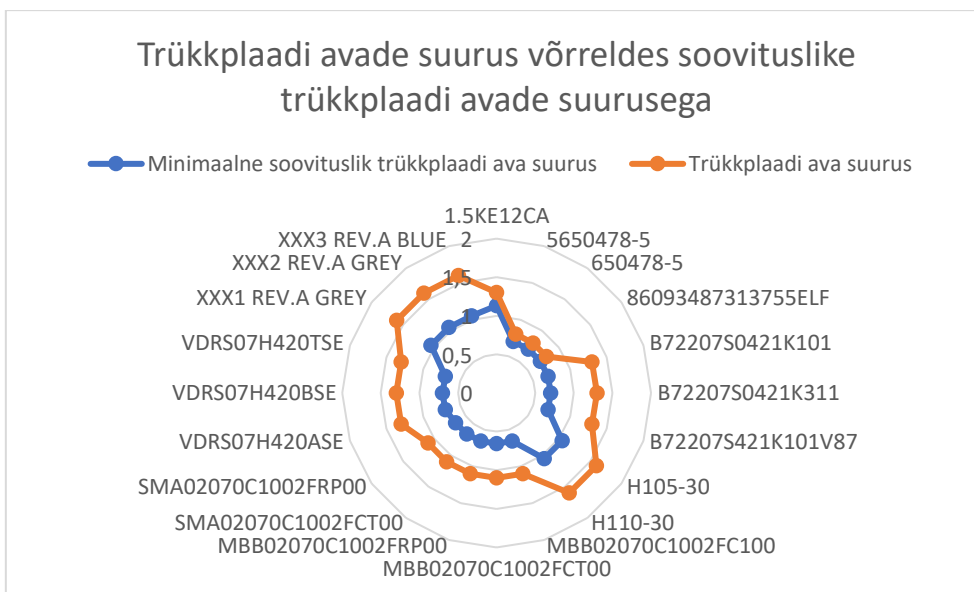
Analüüsi jaoks koguti kõigi THT-komponentide jalgade läbimõõdud koos arvestatavate tolerantsidega. Kokku oli THT komponente 28. Analüüsi tegemiseks oli oluline vaadelda maksimaalselt jala läbimõõtu ning trükkplaadi ava suurust, et arvestada minimaalse soovitusliku kliirensiga tina jooteavas ülesse tõusmisega.

Metalliseeritud avad			Mitte-metalliseeritud avad		
Sümbol	Kogus	Mõõt mm	Sümbol	Kogus	Mõõt mm
▽	83	0,8	⊕	2	2,8
△	60	1,0	⊖	7	3,3
◇	24	1,1			
+	60	1,3			
○	120	1,6			

Joonis 13. Kliendi PCB spetsifikatsioon

Analüüsi jaoks koostati tabel (Lisa 1), kus olid esitatud järgmised andmed nagu MPN, komponent, jala paksus ja tolerants, maksimaalne jala paksus, minimaalne soovituslik trükkplaadi ava suurus, tegelik ava suurus ning hinnang. Analüüsi käigus jaotati komponendid nelja kategooriasse vastavalt maksimaalsele jala suurusele: 0,606 mm, 0,65 mm, 1,05 mm ja 1,13 mm.

Viie komponendi puhul, mille maksimaalne jala paksus oli 0,606 mm, oli trükkplaadi ava suurus 1,1 mm. Komponentide puhul, mille maksimaalne jala paksus oli 0,65 mm, oli ava suurus 0,8 mm. Ava suurusega 1,3 mm puhul oli ühel komponendil maksimaalne jala suurus 1,07 mm ning kaheksal komponendil 0,65 mm. Trükkplaadi ava suurusega 1,6 mm korral oli kõigi 11 komponendi maksimaalne jala suurus 1 mm. Antud maksimaalse võimaliku komponendi jala paksuse põhjal arvutati minimaalne soovituslik trükkplaadi ava suurus kasutades trükkplaadi ava ning komponendi jala vahelise 0,05 mm kliirensiga.



Joonis 14 Trükkplaadi avade suurus võrreldes soovituslike trükkplaadi avade suurusega

Analüüsist selgus, et kõigi komponentide jalad ning trükkplaadi avade vaheline kliirens on piisav RoHS nõuetele vastavaks tootmiseks.

4 TOOTEMUUDATUSED KATSEPARTII TOOTMISEKS JA KATSEPARTII TOOTMINE

4.1 Tootemuudatused katsepartiiks

Ettevõttes X on toote muudatuste tegemiseks olemas vastav protsess ehk ECO protsess. Katsepartii tootmiseks oli vajalik teha antud tootele uus test tootekoodid, kuna neid tooteid käsitleti kui uusi tooteid. Katsepartii tootmiseks oli vaja kolme uut koodi, üks kood pooltootele ja kaks koodi lõpptootele. Antud kaks lõpptoodet baseeruvad ühel pooltootel. Täpsemad tegevused ning tegevuste sooritamise aeg kirjeldatud tabelis (Tabel 3).

Tabel 3. Plaanitavad tegevused ning ajakava

Tegevus	Aeg
RoHS staatuse muudatus (ERP)	Enne tootmist
Ruutingu muudatus	Enne tootmist
Šabloonide ja raamide pesu	Enne tootmist
Protsessi materjalide muudatus	Enne tootmist
Kontrollplaani, vooskeemi ning FMEA uuendamine	Enne tootmist
SMT termilise profiili võtmine	Tootmise ajal
THT termilise profiili võtmine	Tootmise ajal
Röntgen kontroll jootekohtadele	Pärast tootmist
Tootmisaegade mõõtmine	Tootmise ajal
Protsesside valideerimise raport	Pärast tootmist

RoHS staatuse muudatus tähendas ERP süsteemis vastavate parameetrite muudatust ning toote kirjelduse muutust lisades sellele „RoHS“, mis annab tootmisele esmase sisendi, et tegemist on RoHS direktiivile vastava tootega. Ruutingu muudatus hõlmas endas toote viimist THT-s mitte-RoHS tootmisliinilt üle RoHS tootmisliini peale, lisaks tootmisliinide muudatusele, oli vajalik ka BOM-is vahetada protsessi materjalid RoHS materjali vastu. Antud muudatused käivitasid vajaduse teha uuendused kontrollplaanis (Control Plan), vooskeemis (Flowchart) ning rikkeviiside ja -mõjude analüüsi ehk FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*). Enne tootmist oli vajalik ka teha SMT ning THT šabloonide ja raamide pesu, et eemaldada mitte-RoHS tootmise jäägid. Pesu teostasid vastava väljaõppe saanud inimesed.

Tootmise käigus teostati THT- ja SMT-protsesside termiliste profiilide mõõtmine. Need profiilid on vajalikud jootmisprotsessi kvaliteedi ja töökindluse tagamiseks. Lisaks viidi läbi uute tootmisaegade mõõtmine.

Pärast tootmist teostatud tegevusteks oli protsesside valideerimise MPQ raporti (*Manufacturing Process Qualification*) koostamine. Raport sisaldab kõiki tootmisetappides kasutatud seadmeid, materjale ning töövõttes, millega saavutati raportis kajastatud tulemused. Lisaks sisaldab raport röntgenpilte jootekohtadest, et kinnitada jootekvaliteeti.

4.2 Katsepartii tootmine

Katsepartii tootmiseks valis tooted klient. Valituks osutusid kaks toodet, mille ainus tehnoloogiline erinevus on lõppkoostes lisatava ühendusterminali värvus. Seetõttu käsitletakse neid tooteid lõputöös samaväärsetena. Katsepartii suurus oli 60 toodet.

Katsepartii tootmise eesmärk oli tootmisprotsesside valideerimine ja MPQ (*Manufacturing Process Qualification*) raporti koostamine. MPQ raporti eesmärk oli kinnitada toote disaini sobivust RoHS nõuetele vastavas protsessis ning tuvastada võimalikud kvaliteediriskid tootmisprotsessides. Raporti peamine fookus oli suunatud jootmisprotsessidele, toote testimisele ja visuaalsele kvaliteedile.

Katsepartii tooteid kasutas klient valideerimiseks vastavalt standarditele ja oma sisemistele nõuetele. Hindamise käigus kontrolliti koostekvaliteeti, lakkimist, oksüdatsiooni, lenduvate orgaaniliste ühendite sisaldust ning toote funktsionaalsust ja vastupidavust.

4.2.1 SMT (Surface Mount Technology) – Pindpaigaldustehnoloogia

SMT protsessi põhilisi muudatusi olid jootepasta vahetus ning termilise profiili muudatus (Tabel 4). Jootevastana kasutati Inventec Ecorel FREE 305-6D33 eelneva Almit SRC Solder Paste Sn62 (Ag2) HM1-RMA V14L asemel. Termilise profiili muutused olid tingitud jootevastava vahetusest, kuna kasutatud jootevastava vajab kõrgemat temperatuuri sulamiseks. Ecorel FREE 305-6D33 vajab sulamiseks temperatuuri 217 kraadi [21] ning Sn62 (Ag2) HM1-RMA V14L 179-182 kraadi [22]. Maksimaalne temperatuur oli RoHS tootmise ajal 250,5 kraadi, mis on 10,3 kraadi suurem võrreldes mitte RoHS tootmisega. Uuest termilisest profiilist selgub, et tooted viibivad rohkem aega üle 217 kraadi juures, RoHS puhul 56 sekundit ja mitte RoHS 44,5. Lisaks on uue profiili järgi muutunud ka konveieri liikumiskiirus 10 cm/min kohta kiiremaks.

Tabel 4. RoHS protsessi ja mitte-RoHS protsessi võrdlus (SMT)

Parameeter	Mitte-RoHS	RoHS	Muutus RoHS-is	Mõõtühik
Maksimaalne temperatuur	240,2	250,5	+10,3	°C
Konveieri kiirus	110	120	+10	cm/min
Aeg üle (>217°C)	44,5	56	+11,5	sek

Antud protsessi edukust mõõdeti põhiliselt kahe KPI järgi. Üheks nendest on DPMO ehk *Defects Per Million Opportunities* ehk vigade arv miljoni võimaluse kohta, mida kasutatakse SMT komponentide ladumisel. Teine oluline KPI on FPMO *Failures Per Million Opportunities*, mida jälgitakse AOI-s. Antud katsepartii tootmisel oli DPMO 0 ning FPMO 107, mis tulenes üldisest AOI programmi peenhäälestamisest.

4.2.2 THT(Through-Hole Technology) ehk läbiaukude tehnoloogia

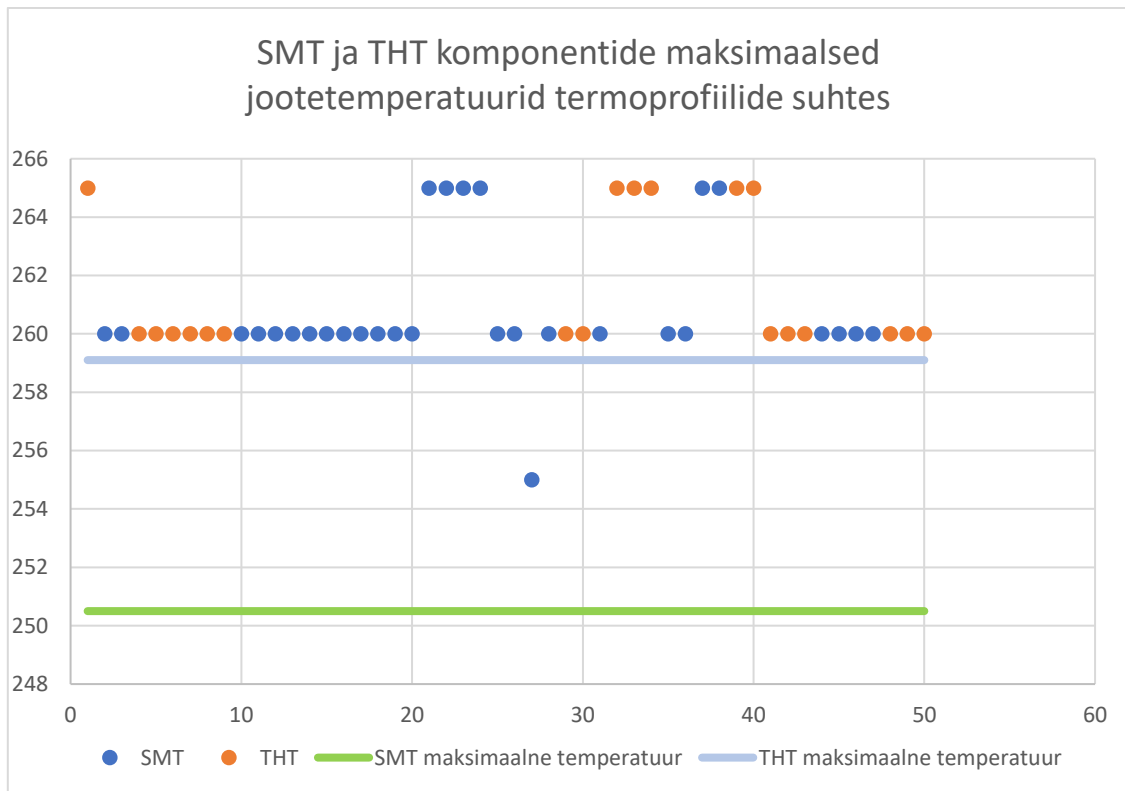
THT protsessis toimus võrreldes mitte-RoHS toodetega rohkem muudatusi. Üheks suurimaks muudatuseks oli tootmisliini ning sulami vahetus. Uus sulam mida kasutati oli SAC305 Sn63Pb37 asemel. Tulenevalt uuest sulamist, muutus ka toote termiline profiil (Tabel 5). Toote eelsoojendus aeg suurenes 8,7 sekundi võrra võrreldes mitte RoHS tootmisega. Eelsoojenduse maksimaalne temperatuur suurenes 9,6 kraadi võrra, trükkplaadi alumise poole maksimaalne temperatuur suurenes 10,7 kraadi võrra. Trükkplaadi pealmise poole temperatuur vähenes 7,4 kraadi. Lisaks kiirenes konveieri kiirus 10 cm/min.

Tabel 5 RoHS protsessi ja mitte-RoHS protsessi võrdlus (THT)

Parameeter	Mitte RoHS	RoHS	Muutus RoHS-is	Mõõtühik
Eelsoojenduse aeg	97,4	106,1	+8,7	sek
Maksimaalne temperatuur eelsoojendusel	127,1	136,7	+9,6	°C
Laine kokkupuuteaeg	4,7	4,2	-0,5	sek
Maksimaalne temperatuur trükkplaadi all	248,4	259,1	+10,7	°C
Maksimaalne temperatuur trükkplaadi peal	201	193,6	-7,4	°C
Konveieri kiirus	150	140	-10	cm/min
Tina temperatuur masinas	261	261	0	°C

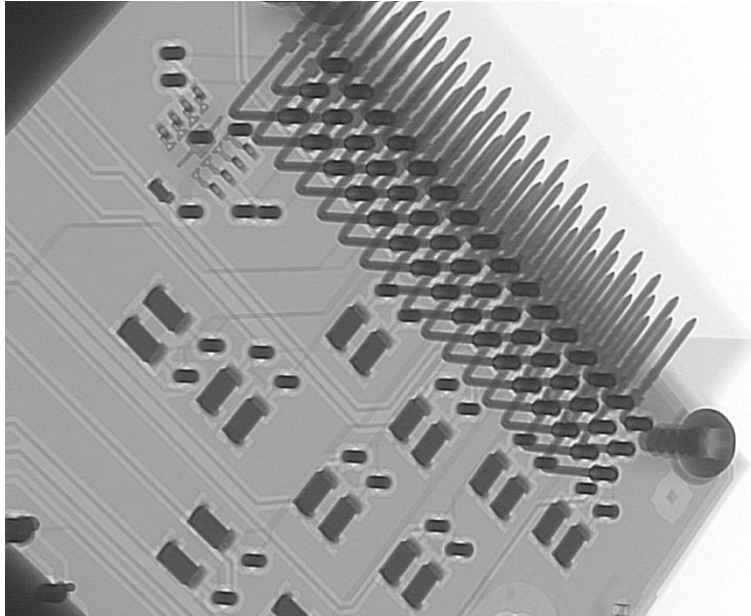
Pärast SMT ja THT termoprofiilide analüüsi hinnati komponentide vastavust protsessides rakendatavatele temperatuuridele (Joonis 15). 58 komponendist 57 puhul oli maksimaalne

lubatud jootetemperatuur kõrgem kui protsessides kasutatav temperatuur (Lisa 2 ja Lisa 3). Üks komponent, mille maksimaalne jootetemperatuur oli 255 °C, osutus SMT-komponendiks. Kontrollides selle komponendi asukohta tootel selgus, et see paikneb plaadi pealmisel poolel, kus THT-protsessi käigus oli temperatuur 193,6 °C. Seetõttu võib komponenti lugeda sobivaks, kuna protsessis rakendatav temperatuur ei ületa komponendi maksimaalset jootetemperatuuri.



Joonis 15. SMT ja THT komponentide maksimaalsed jootetemperatuurid termoprofiilide suhtes

THT protsessi edukust mõõdetakse DPMO-ga ehk vigade arv miljoni võimaluse kohta, mis oli antud tootmise puhul 0. Lisaks teostati pisteline röntgen kontroll kontrollimaks jootetäituvust. Kontroll teostati 10% toodetest ja 100% positsioonidele. Jootetäituvuse visuaalse kontrolli tulemusena vigu ei tuvastatud (Joonis 16).

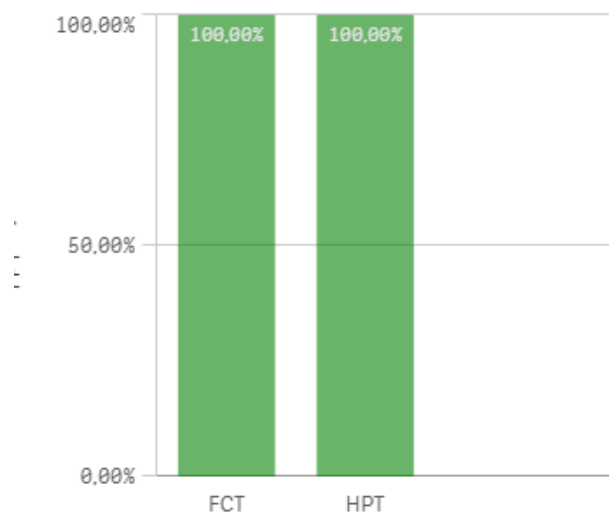


Joonis 16. Toote Y röntgen pilt [autori pilt]

4.2.3 Testimine

Toote testimine koosnes kahest testi etapist, kus esimene oli funktsionaalne test ehk FCT ning teine kõrgepinge testimine ehk HVT. Funktsionaalse testimise käigus kontrolliti, et toode töötab vastavalt tehnilistele nõuetele ja funktsioonidele. Funktsionaaltesti teostati 60-le tootele, kus kõik 60 toodet läbides testi esimesel korral, andes FPY 100% (Joonis 17).

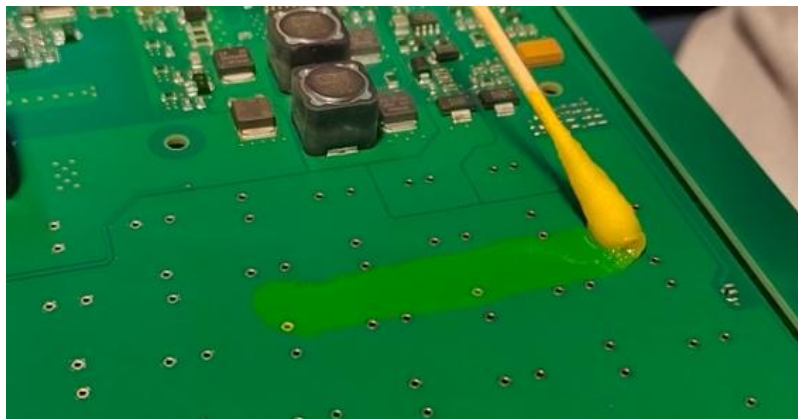
Kõrgepinge testi, ehk HVT käigus kontrolliti toodete vastupidavust kõrgemale elektrilisele pingele, kus kõigi 60 toode isolatsioon pidas sellele vastu, andes FPY 100% (Joonis 17).



Joonis 17. Kuvatõmmis toodete Y FCT ja HVT tulemustest

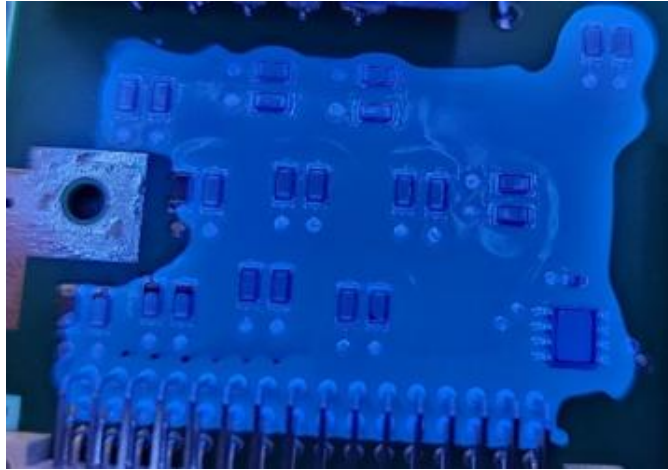
4.2.4 Lakkimine

Katsepartii tootmise ajal ning enne tootele lakikihi peale kandmist teostati kolmele trükkplaadile pinnaenergia mõõtmiseks Dyne test (Joonis 18). Dyne testis kasutatakse Dyne vedelikke, mis on erineva pinnaenergia väärtusega ning need kantakse trükkplaadi pinnale. Kui vedelik märgab pinda ühtlaselt on tegemist vähemalt sama suure väärtusega kui antud vedelikul mida pinnale kanti. Kui vedelik koguneb tilkadeks on pinnaenergia madalam. Antud trükkplaadil jäid kõik mõõdetud Dyne väärtused vahemikku 30-34 mN/m. IPC-CH-65B – *Guidelines for Cleaning of Printed Boards and Assemblies* standardi järgi loetakse piisavaks tulemuseks ≥ 38 mN/m. Antud madal tulemus võib viidata toote määrdumisele või mitte sobivale jootemaskile. Järgmise tootmise ajal on vajalik teostada nakkuvuse test vastavalt standardile ASTM D3359-23. Lisaks nakkuvuse testile on vajalik teha ka ROSE test, ehk ioonilise puhtuse hindamise test.



Joonis 18. Dyne testimine [autori pilt]

Toodete valideerimiseks kasutati akrüüllakki Peters SL 1307 FLZ/184, mis on parem oma nakkumisomaduste pärast ning mehaaniliselt vastupidavam. Lakkimiseks kasutati *film coating* ehk lakikardinaga või -lehtvikuga katmise meetodit (Joonis 19). Kaitselaki kihi paksus oli vahemikus 45-55 μm . Vastavalt kliendi spetsifikatsioonile on nõutud lakikihi paksus 30-130 μm , saadud tulemus vastab kliendi spetsifikatsioonile.



Joonis 19. Lakitud PCB [autori pilt]

4.3 Tulemused ning järeldused

Katsepartii tootmise tulemused näitasid, et toote disain ja tootmisprotsessid sobivad RoHS nõuetele vastavaks tootmiseks ilma konstruktsiooni muutmata. Analüüs kinnitas, et kriitilised riskid, nagu komponentide termiline vastupidavus, jootekvaliteet ja protsesside stabiilsus, on kontrollitavad ning vastavad standarditele. Funktsionaalsed ja kõrgepinge testid andsid 100% positiivse tulemuse, mis tõendab toote töökindlust RoHS tootmisprotsessis.

Siiski tuvastati mõned parendusvajadused, mis tuleb enne täielikku juurutamist lahendada. Need puudutavad eelkõige dokumentatsiooni täpsustamist ja täiendavaid kvaliteediteste, et tagada pikaajaline vastavus ja protsessi usaldusvärsus.

Järgnevad tegevused:

- AML uuendus - eemaldada kuue mittevastava komponendi tootjakoodid ja kinnitada lõplik RoHS vastavus.
- Pinnaenergia ja nakkuvuse kontroll - teostada nakkuvuse test vastavalt ASTM D3359-23 standardile ning ROSE test ioonilise puhtuse hindamiseks.
- Dokumentatsiooni täiendamine - uuendada PAPP (*Production Part Approval Process*) dokumentatsioon ja MPQ raport lõpliku valideerimise jaoks.
- RoHS vastavuse lõplik valideerimine - kinnitada toote ja protsessi vastavus kliendi ning regulatiivsetele nõuetele enne seeriatootmise alustamist.

KOKKUVÕTE

RoHS nõuetele vastav tootmine on elektroonikatööstuses kriitilise tähtsusega, kuna see piirab ohtlike ainete kasutamist ja tagab toodete vastavuse keskkonna- ja ohutusstandarditele. Üleminek mitte-RoHS tootelt RoHS tootmisprotsessile on keerukas, mis hõlmab materjalide, komponentide ja protsesside põhjalikku analüüsi.

Käesolevas lõputöös käsitleti mitte-RoHS toote Y juurutamist RoHS nõuetele vastavasse tootmisprotsessi ettevõtte X näitel. Töö eesmärk oli hinnata toote sobivust uuele protsessile ilma toote disaini muutmata, tuvastada üleminekuriskid ja valideerida tootmisprotsess katsepartii tootmise kaudu.

Analüüsi käigus kontrolliti komponentide ja trükkplaadi disaini vastavust, teostati BOM-i analüüs RoHS ja REACH nõuete osas ning koostati riskianalüüs materjalide ja protsesside kvaliteediriskide kohta. Katsepartii tootmise käigus mõõdeti SMT ja THT termoprofiile, hinnati jootekvaliteeti ning viidi läbi funktsionaalsed ja kõrgepinge testid.

Uurimistöo vastas peamistele küsimustele:

- Kas toote Y disain sobib RoHS tootmiseks?
- Millised riskid kaasnevad üleminekul ja kuidas neid maandada?
- Kas katsepartii tulemused kinnitavad protsessi stabiilsust?

Katsepartii tulemused näitasid, et toote disain ja protsessid sobivad RoHS tootmiseks, toote funktsionaalsed testid andsid 100% positiivse tulemuse. Siiski tuvastati parendusvajadusi, mis puudutavad dokumentatsiooni täpsustamist ja täiendavaid kvaliteediteste (näiteks nakkuvuse ja iroonilise puhtuse kontroll).

Täiendavad tegevused:

- AML nimekirja uuendamine ja mittevastavate komponentide eemaldamine.
- Täiendavate testide läbiviimine vastavalt standarditele.
- Dokumentatsiooni (MPQ ja PAPP) täiendamine enne seeriatootmist.

Töö tulemused annavad usaldusväärse aluse otsusele, et juurutamine on tehniliselt ja kvaliteetselt teostatav.

SUMMARY

RoHS-compliant manufacturing is critical in the electronics industry as it restricts the usage of hazardous substances and ensures product compliance with environmental and safety standards. Transitioning from a non-RoHS product to RoHS-compliant production process is complex, involving a thorough analysis of materials, components, and processes.

This thesis focused on implementing a non-RoHS product (Product Y) into a RoHS-compliant manufacturing process at Company X. The objective was to assess the product's suitability for the new process without altering its design, identify transition risks, and validate the process through a pilot batch.

The analysis included verifying component and PCB design compliance, conducting a BOM review for RoHS and REACH requirements, and preparing a risk analysis for material and process-related quality risks. During the pilot batch, SMT and THT thermal profiles were measured, soldering quality was evaluated, and functional and high-voltage tests were performed.

The research addressed key questions:

- Does Product Y's design meet RoHS manufacturing requirements?
- What risks arise during the transition, and how can they be mitigated?
- Do pilot batch results confirm process stability?

Pilot batch results demonstrated that the product design and processes are suitable for RoHS manufacturing, with functional and safety tests achieving a 100% pass rate. However, improvement areas were identified, including documentation accuracy and additional quality tests (such as adhesion and ionic cleanliness checks).

Additional actions:

- Update the AML list and remove non-compliant components.
- Perform additional tests in accordance with standards.
- Complete documentation (MPQ and PAPP) before mass production.

The results provide a reliable basis for concluding that implementation is technically and qualitatively feasible.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] European Commission, „Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment (RoHS)“.
- [2] European Union, „REGULATION (EC) No 1907/2006 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL,“ 01 09 2025. [Võrgumaterjal]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2006/1907/2025-09-01>. [Kasutatud 15 11 2025].
- [3] ECHA, „Mis on REACH-määrus,“ European Chemicals Agency, [Võrgumaterjal]. Available: <https://echa.europa.eu/et/regulations/reach/understanding-reach>. [Kasutatud 15 11 2025].
- [4] ComplianceXL, „BOM Checks and RCDs: Navigating Compliance Regulations,“ ComplianceXL, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.compliancexl.com/bom-checks-and-rcds-navigating-compliance-regulations/>. [Kasutatud 25 10 2025].
- [5] Intertek, „RoHS Technical File Documentation Services,“ Intertek, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.intertek.com/assuris/restricted-substances/regulatory/rohs-technical-file-documentation/>. [Kasutatud 26 10 2025].
- [6] Z. Peterson, „What Is BOM Management? A Practical Guide to Avoiding Costly Part Mismatches,“ Altium, 16 10 2025. [Võrgumaterjal]. Available: <https://resources.altium.com/p/bom-management-practical-guide>. [Kasutatud 25 10 2025].
- [7] SiliconExpert, „BOM Management Software that Simplifies Electronic Component Sourcing & Reduces Risk,“ SiliconExpert, 25 10 2025. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.siliconexpert.com/bom-management/>.
- [8] AIChipLink, „Electronics BOM Management Best Practices: A Pro’s Guide for Electronics Manufacturers,“ AIChipLink, 24 04 2025. [Võrgumaterjal]. Available: https://aichiplink.com/blog/Electronics-BOM-Management-Best-Practices-A-Pro-s-Guide-for-Electronics-Manufacturers_276. [Kasutatud 25 10 2025].

- [9] Altium, „5 Tips for Specifying PCB Hole Size Tolerance,” Altium, 27 10 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://resources.altium.com/p/5-tips-for-specifying-pcb-hole-size-tolerance>. [Kasutatud 24 08 2025].
- [10] Sisemine allikas, „OOB register,” Ettevõtte X, 2025.
- [11] GeeksforGeeks, „Surface Mount Technology,” GeeksforGeeks, 23 July 2025. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/electronics-engineering/surface-mount-technology/>. [Kasutatud 29 10 2025].
- [12] A. Chen, „What is an SMT Line? SMT Assembly Line and Manufacturing Process,” PCBasic, 3 6 2025. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.pcbasic.com/blog/smt_production_line.html. [Kasutatud 11 9 2025].
- [13] Sisemine allikas, *Lainejootmisprotsessi käsiraamat*, Ettevõtte X, 2016.
- [14] Sisemine allikas, *Lakkimise käsiraamat*, Ettevõtte X, 2025.
- [15] UL Solutions, „The Dielectric Voltage Withstand Test,” [Võrgumaterjal]. Available: https://code-authorities.ul.com/wp-content/uploads/sites/40/2015/02/UL_WP_Final_The-Dielectric-Voltage-Withstand-Test_v5_HR.pdf. [Kasutatud 29 10 2025].
- [16] SiliconExpert, „About Us,” SiliconExpert, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.siliconexpert.com/about/>. [Kasutatud 25 11 2025].
- [17] Nefab, „RoHS – What is It, and How Does it Affect Your Packaging Solution?,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.nefab.com/news-insights/2016/rohs-impact-on-packaging-solutions/>. [Kasutatud 12 11 2025].
- [18] International Electrotechnical Commission, „IEC 60068-2-20: Environmental testing – Part 2-20: Tests – Test T: Soldering,” 03 2021. [Võrgumaterjal]. Available: https://webstore.iec.ch/en/iec_catalog/product/preview/?id=L3B1Yi9wZGYvcHJldmllidy9pbmZvX2llyzYwMDY4LTIitMjB7ZWQ2LjB9Yi5wZGY=. [Kasutatud 23 12 2025].
- [19] SQ Shuoqiang Electronics, „PCB Copper Thickness Guide: Standards, Specs & Selection,” 09 07 2025. [Võrgumaterjal]. Available: <https://sqpcb.com/pcb-copper-thickness/>. [Kasutatud 15 09 2025].

- [20] PCBWay, „Suitable Temperature Curve of Lead-free Solder,“ PCBWay, 03 01 2019. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.pcbway.com/blog/Engineering_Technical/Suitable_Temperature_Curve_of_Lead_free_Solder.html. [Kasutatud 17 09 2025].
- [21] Inventec Performance Chemicals, „ECOREL™ FREE 305-16LVD,“ 19 10 2025. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.inventec.dehon.com/wp-content/uploads/2021/04/PDS-Ecorel-Free-305-16LVD-EN.pdf>. [Kasutatud 19 10 2025].
- [22] Almit Ltd, „Specification for Sn62 (Ag2) HM1 RMA V14L Solder paste,“ 7 1 2003. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.almit.com/dloads/Specs/paste/spec_sn62%20v14l_9.5.pdf. [Kasutatud 19 10 2025].
- [23] TDK, „SIOV metal oxide varistors,“ 03 2018. [Võrgumaterjal]. Available: https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/protection/voltage/lead-disk-varistor/data_sheet/70/db/var/siov_lead_standard.pdf. [Kasutatud 01 11 2025].
- [24] Vishay, „VDR Metal Oxide Varistors Standard,“ 01 01 2025. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.vishay.com/docs/29081/vdrs.pdf>. [Kasutatud 01 11 2025].
- [25] Vishay, „Professional Metal Film Leaded Resistors,“ 08 02 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://4donline.ihs.com/images/VipMasterIC/IC/VISH/VISH-S-A0005972005/VISH-S-A0005972005-1.pdf?hkey=6D3A4C79FDBF58556ACFDE234799DDF0>. [Kasutatud 01 11 2025].
- [26] Littelfuse, „TVS Diodes,“ 30 10 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://4donline.ihs.com/images/VipMasterIC/IC/LFSI/LFSI-S-A0011484030/LFSI-S-A0011484030-1.pdf?hkey=6D3A4C79FDBF58556ACFDE234799DDF0>. [Kasutatud 01 11 2025].
- [27] TE Connectivity, „Soldering and Cleaning Eurocard Connectors,“ 28 12 2011. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchtrv&DocNm=408->

6784&DocType=Specification%20Or%20Standard&DocLang=English&DocFormat=pdf&PartCntxt=650478-5. [Kasutatud 01 11 2025].

- [28] Sisemine dokument, *Current XXX specification*, 2024.
- [29] Vishay, „Recommended Reflow Profile,” 13 06 2010. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.vishay.com/docs/31090/smsolder.pdf>. [Kasutatud 01 11 2025].
- [30] Yageo, „Surface-Mount Ceramic Multilayer Capacitors,” 19 11 2024. [Vörgumaterjal]. Available: https://www.yageogroup.com/content/datasheet/asset/file/UPY-GPHC_X7R_6_3V-TO-250V. [Kasutatud 01 11 2025].
- [31] Kyocera, „X7R Dielectric General Specifications,” 12 01 2021. [Vörgumaterjal]. Available: <https://4donline.ihs.com/images/VipMasterIC/IC/AVXC/AVXC-S-A0013335498/AVXC-S-A0014059611-1.pdf?hkey=6D3A4C79FDBF58556ACFDE234799DDF0>. [Kasutatud 01 11 2025].
- [32] Yageo, „Surface Mount Multilayer Ceramic Chip Capacitors (SMD MLCCs),” 20 02 2025. [Vörgumaterjal]. Available: https://www.yageogroup.com/content/datasheet/asset/file/KEM_C1002_X7R_SMD. [Kasutatud 01 11 2025].
- [33] ST, „M95640-W M95640-R M95640-DF,” 15 06 2023. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/m95640-w.pdf>. [Kasutatud 25 10 2025].
- [34] Panasonic Industry, „Metal Film (Thin Film) Chip Resistors,” 30 06 2023. [Vörgumaterjal]. Available: <https://industrial.panasonic.com/cdbs/ww-data/pdf/RDM0000/AOA0000C307.pdf>. [Kasutatud 25 10 2025].
- [35] Inventec Performance Chemicals, „ECOREL™ FREE 305-16LVD,” 19 10 2025. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.inventec.dehon.com/wp-content/uploads/2021/04/PDS-Ecorel-Free-305-16LVD-EN.pdf>. [Kasutatud 19 10 2025].
- [36] European Union, „ Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment,” European Parliament, 1 1 2025.

[Võrgumaterjal]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1584116022829&uri=CELEX:02011L0065-20200301>.
[Kasutatud 20 9 2025].

[37] European Union, „CE-märgis,” European Union, 20 11 2025. [Võrgumaterjal]. Available: https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/labels-markings/ce-marking/index_et.htm. [Kasutatud 28 11 2025].

[38] Tarbijakaitse ja Tehnilise Järelevalve Amet, „CE-märgis,” Tarbijakaitse ja Tehnilise Järelevalve Amet, 11 01 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ttja.ee/ariklient/ohutus/ce-margis>. [Kasutatud 28 11 2025].

LISA 1. THT KOMPONENTIDE MINIMAALSE SOOVITUSLIKU AVA SUURUSED

MPN	Komponendi jala paksus (mm)	Tolerants (mm)	Maksimaalne jala paksus (mm)	Minimaalne soovituslik ava suurus	PCB ava suurus	Hinnang
B72207S0421K101	0,6	0,05	0,65	0,7	1,3	Korras
B72207S0421K311	0,6	0,05	0,65	0,7	1,3	Korras
B72207S0421K101	0,6	0,05	0,65	0,7	1,3	Korras
B72207S0421K311	0,6	0,05	0,65	0,7	1,3	Korras
B72207S421K101V87	0,6	0,05	0,65	0,7	1,3	Korras
VDRS07H420TSE	0,6	0,05	0,65	0,7	1,3	Korras
VDRS07H420ASE	0,6	0,05	0,65	0,7	1,3	Korras
VDRS07H420BSE	0,6	0,05	0,65	0,7	1,3	Korras
MBB02070C1002FC100	0,6	0,006	0,606	0,656	1,1	Korras
MBB02070C1002FCT00	0,6	0,006	0,606	0,656	1,1	Korras
MBB02070C1002FRP00	0,6	0,006	0,606	0,656	1,1	Korras
SMA02070C1002FCT00	0,6	0,006	0,606	0,656	1,1	Korras
SMA02070C1002FRP00	0,6	0,006	0,606	0,656	1,1	Korras
1.5KE12CA	0,96-1,07	-	1,07	1,13	1,3	Korras
5650478-5	0,6	0,05	0,65	0,7	0,8	Korras
650478-5	0,6	0,05	0,65	0,7	0,8	Korras
86093487313755ELF	0,6	0,05	0,65	0,7	0,8	Korras
H105-30	0,8	0,2	1	1,05	1,6	Korras
H110-30	0,8	0,2	1	1,05	1,6	Korras
H105-30	0,8	0,2	1	1,05	1,6	Korras
H110-30	0,8	0,2	1	1,05	1,6	Korras
H105-30	0,8	0,2	1	1,05	1,6	Korras
H110-30	0,8	0,2	1	1,05	1,6	Korras
H105-30	0,8	0,2	1	1,05	1,6	Korras
H110-30	0,8	0,2	1	1,05	1,6	Korras
XXX1 REV.A GREY	0,8	0,2	1	1,05	1,6	Korras
XXX2 REV.A GREY	0,8	0,2	1	1,05	1,6	Korras
XXX3 REV.A BLUE	0,8	0,2	1	1,05	1,6	Korras

LISA 2. THT KOMPONENTIDE VASTUPIDAVUS JOOTMISKUUMUSELE

MPN	Komponendi tüüp	Vastupidavus jootmiskuumusele (°C)	Aeg (s)	Allikas
B72207S0421K101	THT	260	10	[23]
B72207S0421K311	THT	260	10	[23]
B72207S0421K101	THT	260	10	[23]
B72207S0421K311	THT	260	10	[23]
B72207S421K101V87	THT	260	10	[23]
VDRS07H420TSE	THT	260	10	[24]
VDRS07H420ASE	THT	260	10	[24]
VDRS07H420BSE	THT	260	10	[24]
MBB02070C1002FC100	THT	265	11	[25]
MBB02070C1002FCT00	THT	265	11	[25]
MBB02070C1002FRP00	THT	265	11	[25]
SMA02070C1002FCT00	THT	265	11	[25]
SMA02070C1002FRP00	THT	265	11	[25]
1.5KE12CA	THT	265	10	[26]
5650478-5	THT	260	-	[27]
650478-5	THT	260	-	[27]
86093487313755ELF	THT	260	-	[27]
H105-30	THT	260	-	[28]
H110-30	THT	260	-	[28]
H105-30	THT	260	-	[28]
H110-30	THT	260	-	[28]
H105-30	THT	260	-	[28]
H110-30	THT	260	-	[28]
H105-30	THT	260	-	[28]
H110-30	THT	260	-	[28]
XXX1 REV.A GREY	THT	260	-	[28]
XXX2 REV.A GREY	THT	260	-	[28]
XXX3 REV.A BLUE	THT	260	-	[28]

LISA 3. SMT KOMPONENTIDE VASTUPIDAVUS JOOTMISKUUMUSELE

MPN	Komponendi tüüp	Vastupidavus jootmiskuumusele (°C)	Aeg (s)	Allikas
VJ1206Y333KXAAC	SMD	260 °C	40	[29]
VJ1206Y333KXAMC	SMD	260 °C	40	[29]
VJ1206Y333KXAMP	SMD	260 °C	40	[29]
VJ1206Y333KXAAP	SMD	260 °C	40	[29]
CC1206KRX7R9BB333	SMD	265°C	10,5	[30]
CC1206KPX7R9BB333	SMD	265°C	10,5	[30]
12065C333KAT2A	SMD	260 °C	60	[31]
12065C333KAT4A	SMD	260 °C	60	[31]
C1206C333K5RAC7867	SMD	260 °C	30	[32]
C1206C333K5RACTU	SMD	260 °C	30	[32]
C1206C333K5RAC7411	SMD	260 °C	30	[32]
C1206C333K5RAC7800	SMD	260 °C	30	[32]
CC0603KRX7R7BB473	SMD	265°C	10,5	[30]
CC0603KPX7R7BB473	SMD	265°C	10,5	[30]
CL10B473K08NNNC	SMD	260 °C	60	-
CL10B473K08NNND	SMD	260 °C	60	-
C0603C473K4RAC7867	SMD	260 °C	30	[32]
C0603C473K4RACTU	SMD	260 °C	30	[32]
C0603C473K4RAC7411	SMD	260 °C	30	[32]
C0603C473K4RAC7040	SMD	260 °C	30	[32]
C0603C473K4RACTM	SMD	260 °C	30	[32]
C0603C473K4RAC7013	SMD	260 °C	30	[32]
C0603C473K4RAC76217867	SMD	260 °C	30	[32]
CM105X7R473K16AT	SMD	255°C	10	[32]
M95640-WMN6TP	SMD	260 °C	40	[33]
MCA12060D5600BP100	SMD	260 °C	40	[29]
MCA12060D5600BP500	SMD	260 °C	40	[29]
RT1206BRD07560RL	SMD	265°C	10,5	[30]
RT1206BRD13560RL	SMD	265°C	10,5	[30]
ERA8AEB561V	SMD	260 °C	10	[34]