Tampereen yliopisto

Aaro Pekuri

LAATUSTANDARDIEN VAIKUTUS PII-KIEKKOVALMISTAJAN VALMISTUS-PROSESSEIHIN

Kandidaatintyö
Johtamisen ja talouden tiedekunta
Tarkastaja: Jaakko Siltaloppi
Joulukuu 2023

TIIVISTELMÄ

Aaro Pekuri: Laatustandardien vaikutus piikiekkovalmistajan valmistusprosesseihin
The impact of quality standards to silicon wafer manufacturer's production processes
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tuotantotalous
Syyskuu 2023

Laatu on tärkeä osa kannattavaa liiketoimintaa. Laadun avulla taataan asiakkaan vaatimusten ja toiveiden täyttyminen sekä minimoidaan tuotekohtainen vaihtelu. Tuotteen laadun tuottaminen ja varmistaminen aiheuttavat tuottavalle organisaatiolle kustannuksia. Tietty laatutaso on ensin saavutettava tuotteen valmistusprosesseissa. Tämän jälkeen tuotetta on mitattava ja mitattua tietoa analysoitava, jotta varmistutaan siitä, että tuote on asiakkaan vaatimusten mukainen. Apuna laatutavoitteiden asettamisessa ja laadunvarmistamisessa ovat erilaiset standardit. Standardit ovat yleispäteviä vaatimus- ja ohjekokoelmia, joissa pyritään luomaan organisaatioille yhtenäiset tavoitteet, prosessit ja toimintatavat organisaation tavoitteen saavuttamiseksi. International Organization for Standardization (ISO) on kansallisten standardoimisjärjestöjen kansainvälinen liitto. Heidän ISO 9000 -standardikokoelmansa tarjoaa viitekehyksen organisaatioille laadunhallintaprosessien perustamiseen, toteuttamiseen, ylläpitämiseen ja jatkuvaan parantamiseen.

Tämän kandidaatintyön aihe on laatustandardien vaikutus yrityksen arvonluontiprosesseihin. Työn tutkimus keskittyy piikiekkovalmistajan arvonluontiprosessien ja laadun jaettuun kustannukseen. Työssä on kaksi tutkimuskysymystä: Mistä muodostuu laadun kustannus piikiekkovalmistajalle? Miten tätä tunnistettua kustannusta laskea vaikuttamatta tuotteen mitattuun laatuun negatiivisesti? Työn tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksena. Työhön valituissa artikkeleissa painotettiin artikkelin vertaisarviointia ja relevanssia työn tavoitteeseen sekä tutkimuskysymyksiin nähden. Aineistokokoelmia olivat ScienceDirect, Web of Science, Andor, Emerald ja SFS-online.

Laadun kustannus on erityisesti piikiekkovalmistajalle suuri, koska puolijohteilla on korkeat laatuvaatimukset. Täten piikiekkovalmistajan on pystyttävä erottumaan kilpailijoistaan esimerkiksi poikkeuksellisen hyvällä tuotteen suorituskyvyllä tai ominaisuuksilla. Tällöin valmistava yritys luo asiakkaalleen arvoa tarjoamalla suorituskyvyltään ja ominaisuuksiltaan parempia piikiekkovaihtoehtoja puolijohdekomponenttivalmistajan käyttöön. Suorituskyvyn ja ominaisuuksien parantamista auttaa toimiva laadunhallinta, sillä suorituskyky ja ominaisuudet ovat osa tuotteen laatua.

Laatustandardit helpottavat organisaation laadunhallintaprosesseja. ISO 9001:2015 ja ISO 14001:2015 laatu- ja ympäristöstandardeja noudattamalla yrityksellä on käytössään standardoitu laadunhallintajärjestelmän malli. Standardi antaa ohjeet ja vaatimukset laadunhallintajärjestelmän alustojen luomiseen, tavoitteiden asettamiseen ja mittaamiseen, vastuunjakoon ja roolitukseen sekä jatkuvaan parantamiseen. Standardin avulla organisaation jokainen taso sitoutuu laadun tuottamiseen ja varmistamiseen. Standardoiminen yhtenäistää ja tehostaa organisaation laadunhallinnan prosesseja ja kulttuuria alentaen yksittäisen tuotteen laatukustannuksia. Kun organisaatio on luonut laadunhallintajärjestelmät ja -prosessit standardien pohjalta ja omaksunut standardisoidut toimintatavat, se pystyy laskemaan tuotteen laadunvarmistamisen kustannuksia ja samaan aikaan parantamaan tuotteen laatua. Standardisointi tuo laatukustannussäästöjä toimialasta riippumatta, mutta differentioitumisstrategiaa noudattava piikiekkovalmistajalle tarkka standardisointi on liiketoiminnan kannalta erityisen olennaista, sillä he luovat kilpailuetua korkeammalla laadulla.

Avainsanat: Laatu, laatujohtaminen, laadun kustannus, standardi, piikiekko

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Kandidaatintyön aihe yhdisti kiinnostukseni puolijohdeteollisuuteen ja laatuun. Kiinnostus laatua kohtaan syntyi aikaisemmin opintojen aikana. Piikiekon valmistukseen olen saanut tutustua työkokemuksen kautta. Näiden kahden kiinnostuksen kohteen yhdistäminen kandidaatintyössä tuntui omalta ratkaisulta.

Haluan kiittää Jere Lehtistä asiantuntevista kommenteista ja sujuvasta ohjauksesta työn aikana sekä kurssin vetäjää Jaakko Siltaloppia onnistuneesta kurssista ja erittäin hyvästä palautteesta työn eri vaiheissa. Kiitos myös koko muulle kurssihenkilökunnalle, kirjaston väelle ja kanssaopiskelijoille tuesta ja palautteesta kurssin aikana.

Tampereella, 4.12.2023

Aaro Pekuri

SISÄLLYSLUETTELO

1.JOHDANTO 1
1.1 Työn tausta 1
1.2 Puolijohdeteknologian historiaa 2
1.3 Työn tavoite ja tutkimuskysymykset 3
1.4 Tutkimusmenetelmät 3
2.PIIKIEKKOVALMISTAJIEN VALMISTUSPROSESSIT 5
2.1 Kiteenkasvatus 5
2.2 Katkaisu ja pyöröhionta 6
2.3 Kiteen sahaus 7
2.4 Reunanpyöristys ja läppäys 9
3.LAATUSTANDARDIT PIIEKIEKON VALMISTUSPROSESSEISSA 12
3.1 Laadun analysointi 12
3.2 ISO-standardit 14
3.3 ISO 14001-standardi 18
4.LAATUSTANDARDIEN VAIKUTUS PIIKIEKON VALMISTUKSESSA 21
4.1 Laadun kustannus 22
5.PÄÄTELMÄT 25
LÄHTEET 27
LIITTEET 29

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ASQ	American Society for Quality on laatualan ammattilaisten kansainvälinen liitto.
Bow	Piikiekon kaarevuutta mittaava suure.
CZ-tekniikka	Czochralski-tekniikka, jota käytetään kiteenkasvatuksessa.
ISO	International Organization for Standardization on kansallisten standardoimisjärjestöjen kansainvälinen liitto.
SEMI	Semiconductor Equipment and Materials International on mikroelektroniikkateollisuuden kansainvälinen yhdistys.
SOX	Philadelphia Semiconductor Index on puolijohdeteollisuuden yrityksistä koostuva indeksi.
TTV	Total Thickness Variation. Piikiekon pinnan tasaisuutta mittaava suure
Warp	Ilmoittaa piikiekon korkeimman ja matalimman pisteen etäisyyden
°C	Celsiusaste
mm	millimetri
µm	mikrometri
mbar	millibaari
kg	kilogramma
W	watti

1. JOHDANTO

Luvussa käsitellään työn aihetta ja sen taustaa. Lisäksi kuvataan lyhyesti laadun merkitys puolijohdeteollisuudessa ja puolijohdekomponenttien historiaa. Tämän jälkeen esitellään työn aihe ja tutkimuskysymykset. Viimeiseksi kuvataan työn rakenne ja esitellään työssä käytetyt tutkimusmenetelmät sekä kerrotaan, millä perusteilla työn lähteinä käytettävät artikkelit ja kirjat ovat valikoituneet.

1.1 Työn tausta

Laatu on erittäin olennainen tekijä nykyajan markkinoilla (Sower, 2011). Voittoa tavoittelevan organisaation on pystyttävä tuottamaan tasaista ja korkeatasoista laatua asiakkaiden odotusten täyttämiseksi (Garvin, 1987; Sower, 2011; Luthra et al. 2021). Tämä pätee erityisesti elektroniikkateollisuuden komponentti- ja piikiekkovalmistajien kilpaillessa markkinoilla, sillä teknologian kehittyminen vaatii laitteissa käytetyiltä komponenteilta enemmän tehokkuutta ja laatua (Airaksinen, 2010; Rupp, 2018). Laadun avulla varmistetaan myös asiakkaiden turvallisuus, kun komponentit ja järjestelmät päätyvät lopulta yhtenä integroituna kokonaisuutena eli tuotteena loppuasiakkaan käyttöön (Kraft & White, 2013).

Puolijohdeteollisuuden on seurattava laatua erityisellä tarkkuudella, sillä puolijohdekomponentit toimivat osana elektronisia järjestelmiä, kuten antureita ja mittareita, joiden virheellinen toiminta voi aiheuttaa vaaratilanteita. Lisäksi vialliset anturit voivat aiheuttaa esimerkiksi autoteollisuudessa isoja takaisinkutsuja ja valtavia kustannuksia. Jos kustannusten syyksi paljastuu laatuvirhe piikiekkovalmistajan toimittamassa tuotteessa, valmistajan tuotteeseen tai brändiin yhdistetty laatuvaikutelma kärsii ja pahimmillaan tämä johtaa tilausten vähenemiseen, kun komponenttivalmistajat siirtyvät kilpailevien piikiekkovalmistajien asiakkaiksi. Lisäksi asiakkailla voi olla korvausvaatimuksia aiheutuneista kustannuksista. (Kraft & White, 2013)

Vaikka puolijohdemarkkinan kasvu on ollut voimakasta, se ei kuitenkaan ole kasvanut tasaista vauhtia. Markkinan ominaisuuksiin kuuluu vahva syklisyys (Lavdari, 2023, s. 25). Syklisyydellä tarkoitetaan tässä kontekstissa isoa kysynnän vaihtelua. Iso kysynnän vaihtelu aiheuttaa niin sanottua bullwhip-ilmiötä. Ilmiöllä tarkoitetaan kysyntämuutosten vaikutuksen voimistumista arvoketjussa liikuttaessa joko ylös- tai alaspäin (Bayraktar et

al., 2008). Puolijohdeteollisuus kärsii tästä ilmiöstä (Hwang & Lu, 2013). Suomen ainoa piikiekkovalmistaja on Okmetic. Liikevaihdolla mitattuna Okmetic on pieni toimija globaaleilla piikiekkomarkkinoilla 146 miljoonan euron liikevaihdollaan vuonna 2022 (Okmetic, 29.9.2023).

1.2 Puolijohdeteknologian historiaa

Puolijohdetransistorin keksivät vuonna 1947 William Bradford Shockley, John Bardeen ja Walter Houser Brattain (Lojek, 2007, s. 23). He saivat vuonna 1956 fysiikan Nobelpalkinnon puolijohteisiin liittyvästä tutkimuksesta ja transistoriefektin löytämisestä (The Nobel Foundation, 28.9.2023). Mikropiirin kehittäjänä puolestaan pidetään Robert Noycea ja Jack Kilbya, jotka kehittivät oman mikropiirinsä tammikuussa 1959 (Lojek, 2007, s. 147). Myöhemmin Robert Noycesta tuli toinen Intelin perustajista heinäkuussa 1968 (Intel, 28.9.2023). Intelin alaisuudessa puolijohdekomponenttien kehitys jatkui, ja tammikuussa 1971 Federico Faggin, Masatoshi Shima ja Stanley Mazor loivat Intel 4004 -mikroprosessorin osana Busicom 141-PF laskinta (Lojek, 2007, s. 361). Tästä alkoi mikroprosessorien kehittäminen, joka mahdollisti entistä korkeamman laskentatehon teknisille sovellutuksille (Rupp, 2018).

Mikroprosessorien laskentateho on kasvanut erittäin paljon viimeisen 50-vuoden aikana. Aiemmin mainitun Intel 4004:n teho oli vain noin 0,5 W. Teho kuitenkin kaksinkertaistui jo viidessä vuodessa ja kasvoi tasaisesti ylittäen 10 W rajan 1990-luvulla. Kymmenen vuoden kuluttua teho oli kymmenkertaistunut. Vastaavasti yksittäisten transistoreiden määrä on kasvanut mikroprosessorien kehittyessä. Kun ensimmäisissä mikroprosessoreissa oli integroituna muutamia tuhansia transistoreita, nykyään esimerkiksi NVIDIAn GP100-mikroprosessori sisältää noin 15 miljardia transistoria. Määrä on noin kymmenkertaistunut joka kymmenes vuosi eli kasvu on ollut tasaisen eksponentiaalista. (Rupp, 2018)

Mikroprosessorien nopea kehittyminen loi pohjan puolijohdeteollisuuden ja piikiekkoteollisuuden nopealle kasvamiselle (Tredennick, 1995; Bagley, 2016). Mikroprosessorien laskentatehon kasvu on mahdollistanut entistä tehokkaampien ja monimutkaisempien antureiden, sensoreiden, analogia- ja muistipiirien sekä monien muiden puolijohdeteknologian sovellusten kehittämisen. Samalla puolijohdeteollisuuden luoma arvo on kasvanut (Bagley, 2016; Lavdari, 2023). Puolijohdeteollisuuden arvonnousu näkyy selvästi SOX-indeksissä (Philadelphia Semiconductor Index). Bagleyn (2016) artikkelista käy ilmi, että vuosina 2013–2016 SOX-indeksi pärjäsi S&P 500 -indeksiä paremmin kasvat-

taen arvoaan 58 %. Sen sijaan S&P 500 -indeksi kasvatti arvoaan 32 % eli 16 prosenttiyksikköä vähemmän (Bagley, 2016). Myös viimeisen vuoden aikana SOX-indeksi on ylittänyt markkinat. Vuoden aikana indeksi on kasvanut 45,74 % taloudellisesti epävarmoista ajoista huolimatta (Nasdaq 29.9.2023).

1.3 Työn tavoite ja tutkimuskysymykset

Tämän kandidaatintyön aiheena on tutkia laatustandardien vaikutusta piikiekkovalmistajan arvonluontiprosesseihin. Työn tutkimus keskittyy piikiekkovalmistajan arvonluontiprosessien ja laadun jaettuun kustannukseen. Työssä on kaksi tutkimuskysymystä:

- Mistä muodostuu laadun kustannus piikiekkovalmistajalle?
- Miten tätä tunnistettua kustannusta voi laskea vaikuttamatta tuotteen mitattuun laatuun negatiivisesti?

Tuotteen laadun tutkiminen puolijohdeteollisuuden arvoketjun alkupäässä on mielekästä, sillä arvoketjun alkupäässä tapahtuvat mahdolliset laatupoikkeamat siirtyvät arvoketjussa aina seuraavaan jalostusvaiheeseen. Mitä pidemmälle laatupoikkeama kulkee arvoketjussa, sitä suuremmat kustannukset se aiheuttaa, kun poikkeama huomataan (Sower, 2011). Jos laatupoikkeama voidaan jäljittää jonkun tietyn valmistajan tuotteeseen, voi valmistavalle yritykselle syntyä mainehaittaa. Lisäksi erityisesti anturiteknologiassa on tärkeää, että anturit toimivat oikealla tavalla. Viallinen anturi ajoneuvossa tai muussa lopputuotteessa voi aiheuttaa vaaratilanteita tuotteen käyttäjälle (Kraft & White, 2013). Näistä syistä laatu on erityisen tärkeä tekijä piikiekkovalmistajalle.

1.4 Tutkimusmenetelmät

Tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksena. Tietoa haettiin pääosin viidestä eri aineistokokoelmasta, jotka olivat ScienceDirect, Web of Science, Andor, Emerald ja SFS-online. Lisäksi yksittäisiä tietoja, kuten vuosilukuja tai määritelmiä haettiin organisaatioiden tai järjestöjen verkkosivuilta. Esimerkiksi laadun määrittelemisen tueksi käytettiin American Society for Qualityn laatusanakirjan määritelmää ja vuoden 1956 fysiikan Nobelpalkinnon voittaja haettiin The Nobel Foundationin kotisivuilta. Laadun määritelmä löytyy myös Sowerin (2011) ja Luthra et al. (2021) teoksista. Avainlähteinä työssä käytettiin vertaisarvioituja tieteellisiä artikkeleita.

Hakutuloksia seulottiin vertaisarvioinnin ja julkaisuvuoden perusteella. Jokaiselle aihealueelle etsittiin muutama olennainen avainlähde ja avainlähteen tueksi tai kritiikiksi etsittiin täydentävää kirjallisuutta. Avainlähteenä piikiekon valmistusprosesseissa toimii Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies (2010). Laadun kustannusten ja laadun johtamisen avainlähteitä ovat Sowerin (2011) Essentials of quality with cases and experiential exercises sekä Luthra et al. (2021) Total quality management (TQM). Nämä laatua käsitelevät teokset valikoituivat työhön, koska kummassakin käsitellään laatustandardeja sekä laajemmin laadun ja laatujohtamisen viitekehystä. Luthra et al. (2021) teoksessa katsottiin myös teoksen ajankohtaisuutta. Laatustandardien osalta työssä tarkastellaan International Organization for Standardizationin (ISO) standardeja ISO 9001:2015 ja ISO 14001:2015. Työ rakentuu edellä mainittujen lähteiden ympärille. Muut lähteet tukevat työn teoriaa ja analyysiä. Osa läheistä on saatavilla vain painettuina versioina.

***Taulukko 1**: Esimerkkejä työn kirjallisuushauista*

Tietolähde	Hakusana	Työssä käytettyjä lähteitä hakusanalla
Sciencedirect	”MEMS” and ”wafer”	Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies luvut 1, 2, 3, 5, 7 ja 16
Andor	”Total quality management”	Total quality management (TQM)
SFS online	”ISO 9001”	ISO 9001:2015. Quality management systems
SFS online	”ISO 14001”	ISO 14001:2015. Environmental management systems

2. PIIKIEKKOVALMISTAJIEN VALMISTUSPROSESSIT

Kiteenkasvatusprosessi on ensimmäinen piikiekkovalmistajan valmistusprosesseista, joka luo myös arvoa. Kaikki prosessit tähtäävät kohti kaikki laatuvaatimukset ja -standardit täyttävää virheetöntä lopputuotetta. Standardien lisäksi tuotteen laatuvaatimuksiin vaikuttavat asiakkaan asettamat laatuvaatimukset ja -toleranssit. Laaduntarkkailuprosesseilla varmistetaan tuotteen laatu ja estetään viallisen tuotteen päätyminen asiakkaalle. Viallisen tuotteen tai erän huomaaminen mahdollisimman aikaisessa vaiheessa tuotantoprosessia vähentää hylättyyn tuotteeseen tai erään uponneita kustannuksia (Sower, 2011). Tällöin enemmän resursseja ohjautuu arvoa tuottavaan toimintaan. Täten laadunvalvonta heti ensimmäisestä jalostusprosessista lähtien on tärkeää.

2.1 Kiteenkasvatus

Yksi piikiekkovalmistajan tärkeimmistä arvonluonti- ja valmistusprosesseista on kiteenkasvatus. Puolijohdeteollisuuden arvonluontiprosesseissa korostuu laatu heti tuotantoketjun alusta lähtien. Haapalinna ja Tilli (2010) kertovat piin ominaisuuksista ja eri piityypin kiteistä. Puolijohdekomponenttien raaka-aineena käytetään hyvin puhdasta piitä. Pääosin prosessissa käytettävä pii on joko N- tai P-tyyppiä ja seosaineina käytetään antimonia, fosforia, punaista fosforia, arseenia tai booria. Seosaineiden konsentraatiot ovat hyvin pieniä, ja pienempi seosainekonsentraatio tarkoittaa suurempaa resistiivisyyttä. Pii on ominaisuuksiltaan ihanteellinen materiaali puolijohdeteollisuuden käyttöön, koska sen resistiivisyysarvoa voidaan säätää douppaamalla puhdasta piitä seosaineilla. Pii on myös suhteellisen inertti normaalissa ilmanpaineessa ja lämpötilassa sekä elastinen huoneenlämmössä eikä siinä esiinny plastista eli pysyvää muodonmuutosta. Lisäksi materiaalilla on korkea murtolujuus (Haapalinna & Tilli 2010). Piin ihanteellisten mekaanisten ja kemiallisten ominaisuuksien lisäksi piistä voidaan suhteellisen helposti kasvattaa suuria erilliskiteisiä piioksideja (Haapanen & Tilli, 2010). Nämä ominaisuudet ovat tehneet piistä maailman johtavan puolijohdemateriaalin.

Anttila (2010) kuvaa kiteenkasvatusprosessia vaiheittain. Kiteenkasvatus tapahtuu kiteenkasvatusuunissa, jonka keskellä on sula piimassa, johon on seostettu haluttu määrä seosaineita. Suurimpien modernilla CZ-tekniikalla kasvatettujen kiteiden massat ovat lähes 500 kg. Tyypillisesti kiteen, jonka halkaisija on 200 mm, massa on 80 kg – 100 kg. Kiteenkasvatuksessa kide vedetään sulasta piimassasta upokkaan eli siemenkiteen

avulla upokasta ja piimassaa pyörittäen. Ainoa siemenkiteeksi kelpaava materiaali on piioksidi sen amorfisessa tilassa. Tämä johtuu siitä, että sula pii reagoi kaikkien tunnettujen materiaalien kanssa. (Anttila, 2010) Amorfinen materiaali tarkoittaa materiaalia, jonka atomi- tai molekyylijärjestys ei ole jaksollinen (Mikla & Mikla, 2010).

Kiteenkasvatuksen aikana sulatuskammioon johdetaan jatkuva inertti kaasuvirta. Aikaisemmin mainitun piisulan korkean reaktiivisuuden takia ainoa vaihtoehto kaasuvirran toteuttamiseen ovat jalokaasut. Tyypillisesti kaasuna käytetään argonia, koska se on edullisempi muihin jalokaasuihin verrattuna. Kasvatuskammio on voimakkaasti alipaineistettu normaalin kasvatuspaineen ollessa 15–50 mbar. Jalokaasuhuuhtelun tehtävänä on kuljettaa ei-toivotut kasvatuksesta höyrystyvät kaasut pois kasvatuskammiosta kontrolloidusti. Kiteenkasvatuksen voi jakaa karkeasti viiteen osaan: sulatukseen, kaulaan, kruunuun, runkoon ja häntään. Sulatusvaiheessa erittäin puhdas seostettu polypii lämmitetään lämpötilaan 1 420 °C, jolloin se sulaa. Kun sula on oikeassa lämpötilassa, siihen kastetaan siemenkide, jolloin sen pohja sulaa pois. Tämän jälkeen siemenkidettä vedetään hitaasti ylöspäin, jolloin uutta materiaalia muodostuu siemenkiteen loppupäähän noudattaen alkuperäistä kiderakennetta. Kaulavaiheen perusajatus on dislokaatioiden eli pistemäisten hilarakenteessa olevien virheiden kasvattaminen ulos varsinaisesta kiteestä. (Anttila, 2010)

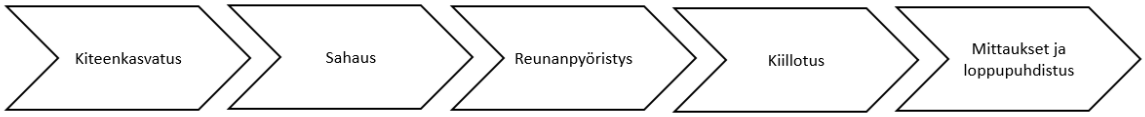
Kiteenkasvatusprosessi on piikiekkovalmistajan ensimmäinen arvonluontiprosessi, jossa puhtaasta polypiistä kasvatetaan erilliskiteinen piioksidi. Lopputuotteen kannalta jo ensimmäinen prosessivaihe on monella tapaa ratkaiseva, sillä esimerkiksi kiteen halkaisijan alikasvua eli liian pientä halkaisijaa ei luonnollisesti voi korjata myöhemmissä prosessin vaiheissa. Lisäksi esimerkiksi kiteen tyyppi (N- tai P-tyyppi), orientaatio (100-, 110- tai 111-kide) ja seosaineiden konsentraatiot, jotka ovat suoraan verrannollisia kiekkojen resistiivisyyksiin, on määritetty kasvatusprosessin aikana (Paloheimo, 2010). Eli lopputuotteen laadun kannalta kiteenkasvatuksen onnistuminen on erittäin oleellista.

2.2 Katkaisu ja pyöröhionta

Kuvassa 1 on esitetty piikiekkovalmistajan arvonluontiprosessit kiteenkasvatuksen jälkeen. Normaali CZ-tekniikalla kasvatettu kide on yli 2 metriä pitkä ja kiteestä saadaan yleensä tuhansia kiekkoja riippuen halutusta kiekon paksuudesta (Tilli, 2010). Kiteenkasvatuksen jälkeen kide asetetaan jäähtymään, kunnes sitä on turvallista käsitellä. Jäähtynyt kide siirtyy päidenkatkaisuun liitteen 1 prosessikaavion mukaisesti. Päidenkatkaisussa kiteen olka- ja häntäpää leikataan päidenkatkaisusahalla pois, jolloin jatkokäsiteltäväksi jää kiteen sylinterinmuotoinen vartalo-osa eli ”body” (Tilli, 2010). On myös

mahdollista, että kiteenkasvatuksessa on tapahtunut ei-toivottua kehitystä ja kiteeseen on tullut rakenteenmenetys, ylikasvua, alikasvua tai ei-toivottuja aineita on päässyt piisulan sekaan (Anttila, 2010; Paloheimo, 2010). Tällöin hylkyosuus voi olla reilusti normaalia pidempi ja täten kiteenkasvatuksen saanto on normaalia pienempi.

Päidenkatkaisuvaiheessa olan ja hännän katkaisemisen lisäksi sekä kiteen olka- että häntäpäästä otetaan näytekiekko analysoitavaksi (Tilli, 2010). Riippuen kiteen seosaineista ja seosainekonsentraatiosta kiteen resistiivisyys on erisuuri sen olkapäässä ja häntäpäässä (Anttila, 2010; Paloheimo, 2010; Tilli, 2010). Tätä päidenvälistä resistiivisyyseroa ja esimerkiksi happi- ja hiilikonsentraatioita voidaan mitata näistä näytteistä (Tilli, 2010). Päidenkatkaisun jälkeen kide siirtyy katkaisuvaiheeseen liitteen 1 mukaisesti. Kiteen sijainnista riippuvat resistiivisyysominaisuudet voivat vaikuttaa katkaistun pätkän pituuteen, koska asiakkaalla voi olla oma resistiivisyysikkuna, johon kidepätkän resistiivisyyden on sovittava (Tilli, 2010).



***Kuva 1**: Olennaisimmat jalostusprosessit* (Tilli, 2010, s. 72).

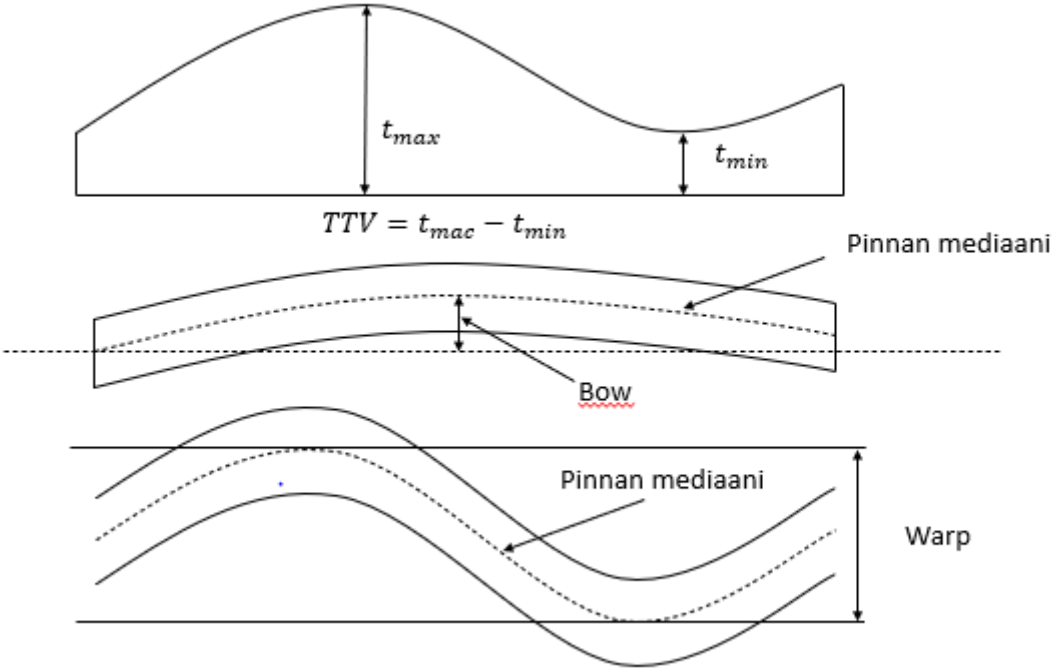
2.3 Kiteen sahaus

Seuraava prosessivaihe kiteenkasvatuksen jälkeen on kuvan 1 mukaisesti on sahaus. Sahauksessa likimain ympyrälieriön muotoinen kiteen pala sahataan kiekoiksi, joilla on tuotteelle haluttu vakiopaksuus (Tilli, 2010). Sahauksen voi suorittaa joko ID- tai lankasahausmenetelmää käyttämällä. Taulukkoon 1 on kerätty ID- ja lankasahauksen vahvuuksia ja heikkouksia keskinäisen vertailun näkökulmasta. Taulukon 1 perusteella lankasahaus sopii erityisen hyvin suuren volyymin kiekkotuotantoon, jossa kiekkoja tuotetaan suuria määriä kerralla. Menetelmä sopii myös paremmin ohuiden kiekkojen tuotantoon ja on tehokkaampi materiaalin käytön kannalta eli lankasahauksessa piin hukka on pienempää. Tämä johtuu siitä, että lankasahauksessa kiteen läpi kulkema lanka on ohuempaa, kuin id-sahan sahanterä ja täten lankasahauksessa tulee vähemmän materiaalihukkaa (Tilli, 2010). ID-sahaus sopii taulukon mukaan paremmin pienten joustavuutta vaativien erien käsittelyyn ja erien, jotka vaativat orientaation hallintaa sahausprosessin aikana.

***Taulukko 2**: ID- ja lankasahausmenetelmien keskinäiset erot* (Tilli, 2010, s. 73)

Vertailtava tuotannon ominaisuus	**ID- sahaus**	**Lankasahaus**
Tuotannon joustavuus pienillä eräkoolla	Erittäin hyvä	Erittäin huono
Ison volyymin tuotanto	Huono	Erittäin hyvä
Ohuen kiekon leikkauskyky	Huono	Erittäin hyvä
Kiekon warp/bow	Huono	Hyvä
Kiekon orientaatiokontrolli valmistuksen aikana	Hyvä	Huono
Piin hyödyntämisaste	Erittäin huono	Erittäin hyvä
Tuottavuus	Huono	Hyvä

Tillin (2010) mukaan sahaus aiheuttaa sahaustavasta riippumatta pintavaurioita kiekoille. Täten kiekot eivät ole asiakkaalle käyttökelpoisia sahauksen jälkeen. Asiakkaalle arvoa luova tasainen ja virheetön pinta muodostuu myöhemmin, kun kiekkoa käsitellään reunanpyöristys-, läppäys-, ja kiillotusvaiheissa. Sahaus on kuitenkin välttämätön ja tärkeä vaihe ja oikean sahausmetodin avulla esimerkiksi minimoidaan materiaalihukka tai maksimoidaan kiekkojen tuottavuus. (Tilli, 2010) Sahauksen jälkeen kiekoista mitataan warp, bow ja TTV (Total Thickness Variaton). Warp tarkoittaa kiekon korkeimman ja matalimman pisteen etäisyyttä ja bow kuvastaa kiekon kaarevuutta. TTV on kiekon korkeimman pisteen ja matalimman pisteen erotus (Airaksinen, 2010).



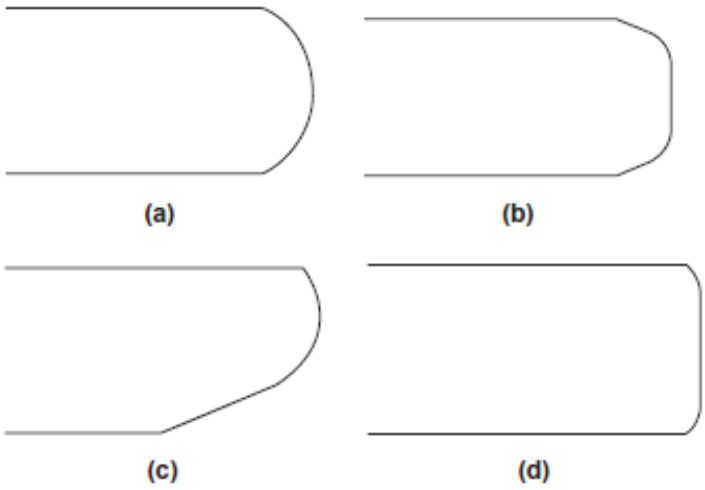
***Kuva 2**: TTV, bow ja warp* (Airaksinen, 2010)

Kuvassa 2 on havainnollistettu, mitä edellä mainitut suureet warp, bow ja TTV tarkoittavat käytännössä. Huomionarvoista on se, että jokaisella kolmelle suureelle on määritetty toleranssirajat alan standardeissa. SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International) MI-0307-standardin mukaan TTV-arvo saa olla enintään 10 µm ja warpin ja bowin täytyy SEMI MF657- ja SEMI MF534-standardien mukaan olla alle 40 µm (Tilli, 2010). Standardit antavat siis yksikäsitteiset ohjearvot, joihin valmistaja voi tukeutua omassa laadunhallinnassaan. On kuitenkin muistettava, että standardien antamat rajaarvot ovat vain suuntaa antavia ja monesti tuotannossa on pystyttävä paljon standardin suoritustasoa korkeampiin tuloksiin asiakkaiden tarpeiden ja vaatimusten täyttämiseksi (Tilli, 2010).

2.4 Reunanpyöristys ja läppäys

Sahauksen jälkeen kiekon reunat ovat terävät ja kiekon muoto on lievän elliptinen. Terävät reunat aiheuttavat sen, että kiekko särkyy helposti. Tätä varten SEMI M1-0307-standardi määrittelee profiilin piikiekon reunanpyöristykselle. Reunanpyöristyksessä kiekon terävä sivuprofiili hiotaan pyöreäksi timanttipyörän avulla. Prosessissa reunojen pyö-

ristämisen lisäksi kiekko hiotaan täysin pyöreäksi. Standardin mukainen profiili ei välttämättä ole ideaali, jos kiekkoa ohennetaan reunanpyöristyksen jälkeen. Tästä syystä tarvittaessa voidaan käyttää epäsymmetristä reunaprofiilia. (Tilli, 2010)



***Kuva 3**: Esimerkkejä erilaisista reunaprofiileista* (Tilli, 2010)

Seuraava prosessin vaihe on läppäys. Sen tarkoituksena on korjata id- tai lankasahauksen aiheuttamia pintavaurioita. Sahauksen jäljiltä esimerkiksi aikaisemmin mainitut pinnan tasaisuutta ja kiekon kaarevuutta kuvaavat warpin, bowin ja TTV:n arvot ovat liian korkeita. Läppäyksessä kiekot pyörivät kahden hyvin ohuen teräslevyn välissä ja materiaalia hiotaan pois noin 50–100 µm. Materiaalin poistamiseksi hiomislaikkojen väliin syötetään piikarbidiseosta, jossa terävät piikarbidihiukkaset hoitavat hiomisen. Prosessin avulla kiekon TTV-arvo saadaan laskettua noin 1 µm:n, kun se oli ennen läppäystä noin 10 µm. Tämä luo arvoa, sillä puolijohdeteollisuudessa jokaisen komponentin on oltava mahdollisimman samankaltainen ja tästä syystä piikiekkovalmistajan on pystyttävä tuottamaan tasalaatuisia kiekkoja. Jos kiekossa on suuria paksuuseroja kiekon sisällä, siitä leikatut komponentit eroavat toisistaan eivätkä ne välttämättä toimi halutulla tavalla. (Tilli, 2010)

Läppäyksen jälkeinen kiekon pinta on huomattavasti tasaisempi kuin sahauksen jälkeinen pinta, mutta pintaa pitää yhä kiillottaa, jotta pinnan tasaisuus vastaa sille asetettujen standardien ja asiakkaiden vaatimuksia. Samalla tuotanto siirtyy puhdastiloihin. Tilli (2010) kuvailee kiillotusprosessin olevan läppäyksen kaltainen prosessin vaihe, jossa kiekkoja edelleen hiotaan kahden hiomalaikan välissä. Aluksi hiomiseen käytetään aggressiivista piikarbidiseosta, joka poistaa kiekosta materiaalia noin 1 µm/min tai enem-

män. Seuraavaksi hiontalaikkojen väliin syötetään paljon alhaisemman piikarbidikonsentraation hiontaseosta, jonka materiaalin poistonopeus on huomattavasti alhaisempi ja tällä tavalla tuotetaan erityisen tasainen pinta, jonka mitattu karkeus on 0,1 nm luokkaa. Kiillotettu piikiekko puhdistetaan kemiallisesti, koska kiillotuksesta kiekkoon jää piikarbidiliuosjäämiä. (Tilli, 2010)

Tämän jälkeen kuvan 1 mukaisesti kiekolle suoritetaan viimeiset dimensionaaliset mittaukset ja loppupuhdistus. Kiekko tarkastetaan vielä visuaalisesti pintavirheiden tai ylimääräisten partikkeleiden varalta (Tilli, 2010). Tarkemmin määritettynä kiekolta tarkistetaan pintakerroksen paksuus, pinnan karheus, mahdolliset pintavauriot, kiekon kaarevuus, kidevirheet, kiekon heijastusindeksit, absorptiokerroin ja kiekon huokoisuus (Airaksinen, 2010). Pintakerroksilla tarkoitetaan erilaisten kiekkojen, kuten EPI- tai SOI-kiekkojen pintakerroksia, jotka eroavat toisistaan valmistusmetodin, käytettyjen materiaalien ja ominaisuuksien kannalta (Mäkinen, 2010).

Asiakkaalle muodostuu arvoa, kun tilattu kiekko on virheetön ja ominaisuuksiltaan muita valmistajia parempi tuote, josta asiakas voi jatkojalostaa kiekkoa ja tuottaa kilpailukykyisempiä puolijohdekomponentteja. Virheettömän tuotteen onnistumisen kannalta kriittisin vaihe on kiteenkasvatus, sillä esimerkiksi kidevirheitä tai vääriä seosainekonsentraatioita ei voi korjata tai muuttaa jälkikäteen (Anttila, 2010). Asiakkaan kannalta tärkeää on pinnan virheettömyys ja oikea pintakerros. Kiekkoerät eivät täten saa sekoittua keskenään. Laatua valvotaan prosessin mittaamalla kiekon tasomaisuutta ja kaarevuutta monissa prosessin eri vaiheissa (Airaksinen, 2010; Anttila, 2010). Laadunvalvonnan onnistuminen on asiakkaan odotusten kannalta olennaista ja täten organisaatiolla on oltava toimiva laadunhallintajärjestelmä. Tämän laadunhallintajärjestelmän luomisessa, hallitsemisessa ja parantamisessa auttavat laatustandardit (ISO, 2015a; ISO, 2015b).

3. LAATUSTANDARDIT PIIEKIEKON VALMISTUSPROSESSEISSA

Ennen piikiekon arvonluontiprosesseissa vaikuttavien laatustandardien määrittämistä on määriteltävä laatu ja standardi. Laadun määrittely on osoittautunut kirjallisuudessa haastavaksi ja laadulle on useita määritelmiä. Laatu filosofisena ideana on tunnettu jo ennen ajanlaskun alkua (Sower, 2011, s. 6). Walter Shewhart (1931) määritteli laadun objektiivisen ja subjektiivisen ulottuvuuden kautta. Objektiivinen laatu on ihmisestä riippumaton puolueeton todellisuus laatua ja subjektiivinen laatu on se, mitä ajattelemme, tunnemme ja aistimme objektiivisen todellisuuden pohjalta (Shewhart, 1931). Tämä oli ensimmäinen modernin aikakauden määritelmä laadulle (Sower, 2011, s. 6). Tämän pohjalta Juran (1970) määritteli laadun tuotteen käyttökelpoisuuden mittarina käyttäjälle. Nämä määritelmät ovat kuitenkin epämääräisiä ja epätarkkoja, eivätkä täten sovi tämän tekstin laadun määritelmiksi. Tässä työssä laadun määritelmänä käytetään ASQ:n (American Society for Quality) määritelmää laadulle teknisessä kontekstissa. Määritelmässä laadulla on kaksi merkitystä: Se on tuotteen tai palvelun ominaispiirteet, jotka liittyvät tuotteen tai palvelun kykyyn tyydyttää käyttäjän tarpeita ja toisaalta se on tuote tai palvelu, jossa ei ole puutteita (ASQ, 27.10.2023). Tämä määritelmä yhdistää laadun ja tarpeiden täyttämisen sekä tuotteen puutteet ja määrittelee laadun yksiselitteisesti.

3.1 Laadun analysointi

Laadun määritteleminen ei yksin riitä laadun tehokkaaseen analysoimiseen, vaan laatu on jaettava osiin. Garvin (1987) jakaa laadun kahdeksaan eri ulottuvuuteen, jotka ovat lueteltuina taulukossa 1. Tämä jako on laajasti hyväksytty, koska sen on katsottu kuvaavan tarkasti useimpien tuotteiden laadun tasoa valitussa ulottuvuudessa (Sower, 2011, s. 7). Ulottuvuuksien tarkoituksena on jakaa laatu hallittaviin osiin laadun analysoinnin helpottamiseksi. Kahdeksan eri ulottuvuuden suhteellinen tärkeys tuotteen kannalta vaihtelee paljon riippuen tuotteen käyttötarkoituksesta. Lisäksi laadun eri ulottuvuudet voivat olla ristiriidassa keskenään, jolloin yhden ulottuvuuden kehittäminen heikentää toista ulottuvuutta.

***Taulukko 3**: Laadun kahdeksan ulottuvuutta* (Garvin, 1987,)

Ulottuvuus	Kuvaus	Esimerkki piikiekko
Suorituskyky	Tuotteen päätoiminnallisuudet.	Piikiekon resistiivisyys
Ominaisuudet	Ominaisuudet, jotka tukevat perustoimintoja.	SOI-kiekon (Sulfate on insulator) erityisominaisuudet.
Luotettavuus	Todennäköisyys tuotteen toimintahäiriölle jollain tietyllä aikavälillä.	Piikiekosta valmistettujen komponenttien hajoamistodennäköisyys.
Vaatimustenmukaisuus	Tuotteen muotoilun ja toiminnallisuuksien vastaavuus voimassa oleviin standardeihin verrattuna.	Tuotteen halkaisija, orientaatio ja pinnan tasaisuus ovat vaatimusten mukaisia.
Kestävyys	Tuotteen odotettu elinkaari.	Aika tuotteen tekniseen vanhentumiseen.
Huollettavuus	Huoltamisen nopeus ja helppous sekä huoltotoimenpiteen tekijän pätevyys ja kohteliaisuus.	Takuuehdot, asiakaspalvelun ja korvaavien tuotteiden saatavuus.
Esteettisyys	Miltä tuote näyttää, tuntuu, kuulostaa tai tuoksuu.	Tasainen kiiltävä pinta, pyöristetyt reunat, vakiohalkaisija ja -paksuus.
Koettu laatu	Maine ja muut epäsuorat laadun mittarit.	Valmistajasta tuleva laatuvaikutelma ja brändi; markkinointi.

Taulukossa 2 on esimerkkejä piikiekon ominaisuuksista sovitettuna Garvinin (1987) laadun kahdeksaan ulottuvuuteen. Piikiekon suorituskyvyn kannalta on olennaista, miten puolijohteen raaka-aineena toimiva piikiekko johtaa sähköä (Haapalinna & Tilli, 2010). Ominaisuuksista taulukkoon on valittu piikiekon pintakerros. SOI-kiekoissa pintakerros muodostetaan hiomalla kahden toisiinsa kiinnitetyn kiekon yläkiekko lähes kokonaan pois, jolloin kiekon päälle jää hyvin ohut piisulfaattikerros (Mäkinen, 2010). Täten kiekko eroaa paksuudeltaan ja suorituskyvyltään muista kiekoista. Luotettavuus ilmenee piikiekoissa siinä, kuinka usein piikiekoista valmistettu komponentti hajoaa käytössä tai ei toimi halutulla tavalla. Vaatimuksenmukaisuuden määrittävät piikiekolle asetetut toleranssirajat, jotka muodostuvat alan standardeista ja valmistajan sekä asiakkaan vaatimuksista (Tilli, 2010). Esimerkiksi kiekon warp-, bow ja TTV-arvot kuvastavat piikiekon vaatimuksenmukaisuutta.

Kestävyys on Garvinin (1987) mukaan aika, joka kuluu tuotteen tekniseen vanhentumiseen. Piikiekosta tehtyjen puolijohdekomponenttien osalta tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että uusi piikiekon valmistustekniikka pintakerroksen osalta mahdollistaa kiekolle paremmat pinnanlaadun ominaisuudet ja siten siitä jalostetuilla komponenteilla on myös paremmat ominaisuudet (Mäkinen, 2010). Tällöin vanhat komponentit korvautuvat teknologiassa uusilla, suorituskykyisemmillä komponenteilla. Huollettavuutta on hieman vaikeampi soveltaa Garvinin (1987) kahdeksaan laadun ulottuvuuteen, koska piikiekkoa ei tuotteena huolleta toimittamisen jälkeen, vaan se toimii raaka-aineena asiakkaan puolijohdekomponenttien valmistuksessa. Piikiekkovalmistajan ja siltä tilaavan komponenttivalmistajan kohdalla kyse on enemmän asiakaspalvelun laadukkuudesta ja korvaavien tuotteiden saatavuudesta, jos toimitettu erä ei vastaa asiakkaan odotuksia. Esteettisyydessä piikiekon näkökulmasta on kyse sen visuaalisesti havaittavasta virheettömyydestä. Onnistuneesti sahattu, pyöristetty ja kiillotettu kiekko on täydellisen pyöreä, sillä on vakiopaksuus jokaisesta kiekon pisteestä mitattuna ja sen pinnankarheus on hyvin pieni (Tilli, 2010). Täten visuaalisesti tarkasteltuna tuote näyttää laadukkaalta ja luo asiakkaalle mielikuvaa laadukkaasta valmistusprosessista ja onnistuneesta tuotteesta.

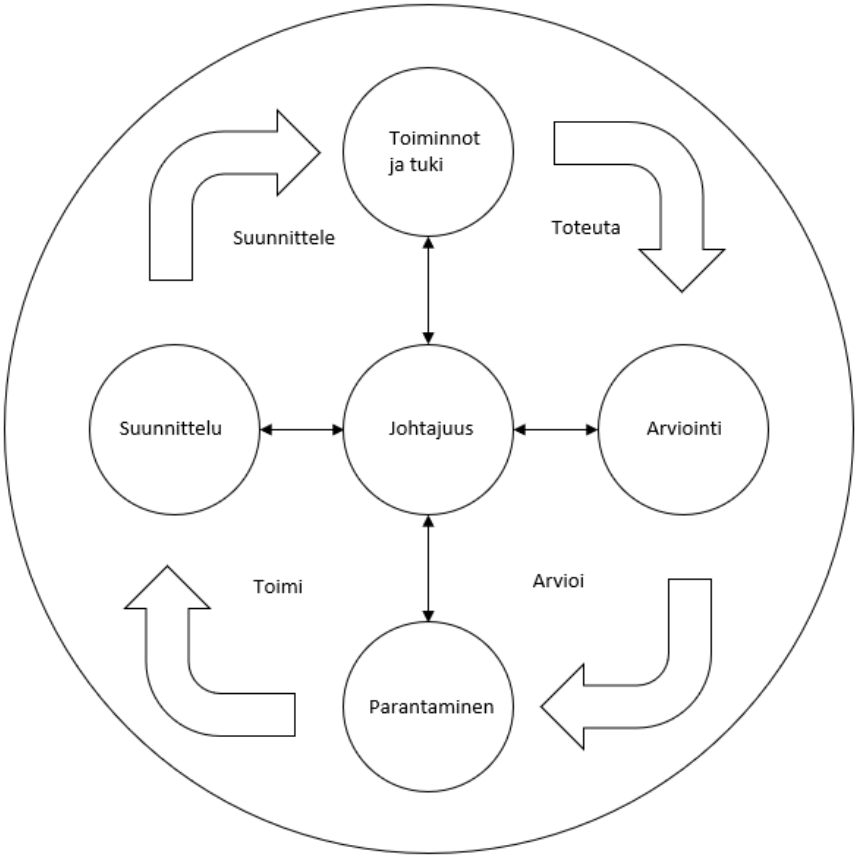
3.2 ISO-standardit

Tässä alaluvussa käsitellään lyhyesti ISO 9001-standardin sisältöä ja vaatimuksia organisaatioille. Kuten aikaisemmin on tullut ilmi, laadunvalvontaa on useissa eri prosessivaiheissa ja sen onnistuminen on lopputuotteen kannalta tärkeää (Airaksinen, 2010; Anttila, 2010). International Organization for Standardization (ISO) on kansallisten standardisoimisjärjestöjen maailmanlaajuinen liitto (ISO, 2015a; ISO, 2015b). ISO 9001:2015-

standardi (ISO, 2015a) tunnetaan standardina laadunhallintajärjestelmille (Quality Management Systems, QMS). Se kuuluu ISO 9000-standardiperheeseen, joka tarjoaa viitekehyksen organisaatioille laadunhallintaprosessien perustamiseen, toteuttamiseen, ylläpitämiseen ja jatkuvaan parantamiseen. ISO 9001 asettaa kriteerit laadunhallintajärjestelmille ja sitä käyttävät eri toimialojen organisaatiot osoittamaan sitoutumisensa laatuun ja kykynsä toimittaa jatkuvasti tuotteita ja palveluita, jotka vastaavat asiakas- ja sääntelyvaatimuksia. Standardin vaatimukset ovat yleispäteviä ja ne on tarkoitettu soveltumaan kaikille organisaatioille niiden organisaatiotyypistä, organisaation koosta tai liiketoiminnasta riippumatta (ISO, 2015a).

ISO 9001:2015 -standardi (ISO, 2015a) linjaa, että organisaation on määritettävä ulkoiset ja sisäiset tekijät, jotka olennaisesti vaikuttavat sen kykyyn saavuttaa laadunhallintajärjestelmältä vaaditut tulokset. Lisäksi organisaation on määritettävä laadunhallintajärjestelmän kannalta olennaiset sidosryhmät ja näiden sidosryhmien laadunhallintajärjestelmän kannalta olennaiset vaatimukset. Organisaation on myös seurattava ja analysoitava tietoa sidosryhmien olennaisia vaatimuksista. (ISO, 2015a) Tämä on olennaista, koska sidosryhmien vaatimukset ja vaikutus yrityksen laadunhallintajärjestelmään saattavat muuttua, jolloin sidosryhmän asemaa osana laadunhallintajärjestelmää on arvioitava uudestaan.

ISO 9001:2015 -standardi (ISO, 2015a) vaatii organisaatiolta myös dokumentoitua tietoa laadunhallintajärjestelmän soveltamisalasta ja laadunhallintajärjestelmän toimintaa tukevista toiminnoista. Tätä dokumentoitua tietoa tulee myös säilyttää, jotta voidaan luottaa prosessien suunnitelmien mukaiseen toteuttamiseen. Kokonaisuudessa yritykseltä vaaditaan laadunhallintajärjestelmää, joka sisältää vaadittavat prosessit ja niiden väliset vaikutukset. Käytännössä tämä tarkoittaa, että organisaation on määritettävä prosessien lähtötiedot ja odotetut tulokset, prosessien järjestys ja vuorovaikutussuhteet, tarvittavat suorituskyvyn mittarit. Lisäksi on määritettävä resurssit, vastuut, valtuudet liittyen laadunhallinnan prosesseihin ja arvioitava riskejä standardin vaatimusten mukaisesti. Organisaatio sitoutuu myös jatkuvasti parantamaan laadunhallinnan prosesseja ja koko järjestelmää (ISO, 2015a). Jatkuvaan parantamiseen soveltuu esimerkiksi PDCA-malli, joka on mallinnettu kuvassa 2.



Kuva 4 *PDCA-malli (ISO, 2015a)*

Johtamisen osalta standardi edellyttää ylimmän johdon sitoutumista laadunhallintajärjestelmän suhteen. Ylimmän johdon on kannettava vastuu laadunhallintajärjestelmän vaikuttavuudesta sekä varmistettava laatutavoitteiden asettaminen. Tavoitteiden on oltava linjassa organisaation toimintaympäristön ja strategian kanssa. Ylin johto vastaa myös järjestelmän liittämisestä organisaation liiketoimintaprosesseihin, resurssien saatavuudesta, haluttujen tulosten varmistamisesta ja parantamisen edistämisestä. ISO 9001:2015 standardi painottaa myös ylimmän johdon johtajuutta asiakaskeskeisyyden varmistamisessa ja organisaation laatupolitiikan varmistamisessa. Ylin johto jakaa myös laadunhallintajärjestelmään liittyvät roolit, vastuut ja valtuudet sekä valvoo haluttujen tulosten toteutumista. (ISO, 2015a)

Suunnittelussa tulee ottaa huomioon riskien ja mahdollisuuksien käsittely. Tällä tarkoitetaan laadunhallintajärjestelmän arviointia, jotta voidaan taata laadunhallintajärjestelmän kyvykkyys saavuttaa haluttuja tuloksia. Arvioinnin avulla voidaan vahvistaa toivottuja vaikutuksia ja vähentää tai kokonaan estää ei-toivottuja vaikutuksia kuvan 2 mukaisesti.

Laadunhallintajärjestelmän toiminnoille ja prosesseille on asetettava tarvittavat laatutavoitteet. Laatutavoitteille on asetettu ehtoja, jotka ovat yhdenmukaisuus laatupolitiikan kanssa, mitattavuus, asiaankuuluvuus, olennaisuus tuotteen vaatimuksenmukaisuuden tai asiakastyytyväisyyden kannalta, seurattavuus, viestittävyys ja päivitettävyys. (ISO, 2015a)

ISO 9001-standardi määrittää kriteerit myös toiminnan suunnittelulle ja ohjaukselle, suorituskyvyn arvioinnille ja jatkuvalle parantamiselle. Organisaation on määritettävä tuotteiden valmistusprosesseille ja hyväksymisprosesseille laatuvaatimukset ja määritettävä resurssit, jotta varmistutaan tuotteiden vaatimuksenmukaisuuden saavuttaminen. Lisäksi dokumentoitua tietoa on ylläpidettävä ja säilytettävä, jotta voidaan luottaa siihen, että prosessit ovat toteutettu suunnitellusti. Lisäksi voidaan tarvittaessa osoittaa, että tuotteet ovat niille asetettujen vaatimusten mukaisia. Lisäksi standardista löytyy tarkat kuvaukset asiakasviestinnän sisältämiin vähittäisvaatimuksiin ja toiminnan suunnitteluun. Lisäksi organisaation on merkattava tuotteet tai tuote-erät vaatimuksenmukaisuuden varmistamisen kannalta ja kaikista tuotteista on tunnistettava tila-, seuranta- ja mittausvaatimukset. On varmistettava resurssien saatavuus ja oikeanlaisen infrastruktuurin käyttö sekä pätevien henkilöiden valinta. Tarvittaessa valitun henkilön pätevyys pitää pystyä toteamaan. (ISO, 2015a)

Suorituskyvyn arvioinnissa on tärkeää määrittää, mitä prosessissa täytyy mitata ja seurata. Oikean menetelmän valinta on olennaista kiitettävien tulosten aikaansaamiseksi mittauksilla. Organisaation täytyy arvioida laadunhallintajärjestelmänsä suorituskykyä ja vaikuttavuutta valmistusprosesseissa. Lisäksi standardi kehottaa organisaatiota seuraamaan sitä, kuinka hyvin heidän asiakkaidensa tarpeet ja odotukset täyttyvät. Asiakkaiden tyytyväisyyttä voi seurata esimerkiksi kyselyiden, tuotteeseen tai palveluun liittyvän palautteen, asiakastapaamisten, markkinaosuusanalyysien tai takuuvaateiden avulla. Tiedon mittaamisen lisäksi organisaation on analysoitava tätä kerättyä tietoa. Heidän täytyy arvioida tuotteiden vaatimuksenmukaisuuden lisäksi asiakastyytyväisyyttä, laadunhallintajärjestelmän suorituskykyä, suunnittelun toteuttamista, riskien ja mahdollisuuksien käsittelyn vaikuttavuutta, ulkoisten toimittajien suorituskykyä ja laadunhallintajärjestelmän muutos- tai parantamistarpeita. Tämä onnistuu esimerkiksi sisäisen auditoinnin avulla, johon standardi antaa omat ohjeet. Organisaation johto on sitoutunut katselmuksiin, jossa analysoidaan laadunhallintajärjestelmän dataa ja tekemään siitä johtopäätöksiä parantamismahdollisuuksista, laadunhallintajärjestelmän muutostarpeista ja resurssitarpeista. Johdon katselmukset ja niiden johtopäätökset on dokumentoitava. (ISO, 2015a)

Organisaatiossa on määritettävä parantamiskohteet ja toteutettava tarvittavat toimenpiteet, jota varmistetaan asiakkaan vaatimusten täyttymisestä ja lisätään asiakastyytyväisyyttä. Jos prosesseissa tai tuotteissa havaitaan poikkeama, organisaation on reagoitava poikkeamaan ja tilanteen mukaan ryhdyttävä toimiin tilanteen hallitsemiseksi ja hallitsemiseksi. Jos poikkeava tuote on esimerkiksi päätynyt asiakkaalle, organisaation on käsiteltävä poikkeamasta aiheutuvia seuraamuksia. Lisäksi on arvioitava lisätoimenpiteiden tarvetta, joilla poistetaan poikkeamaan johtaneet syyt ja varmistutaan siitä, että poikkeama ei toistu. Laadunhallintajärjestelmää on tarvittaessa muutettava ja päivitettävä riskianalyysiä tarpeen mukaan. Organisaation on säilytettävä dokumentoitua tietoa poikkeaman luonteesta ja korjaavista toimenpiteistä sekä näiden toimenpiteiden tuloksista. Organisaation on arvioitava ja parannettava laadunhallintajärjestelmää, jotta varmistutaan sen soveltuvuudesta ja vaikuttavuudesta. (ISO, 2015a)

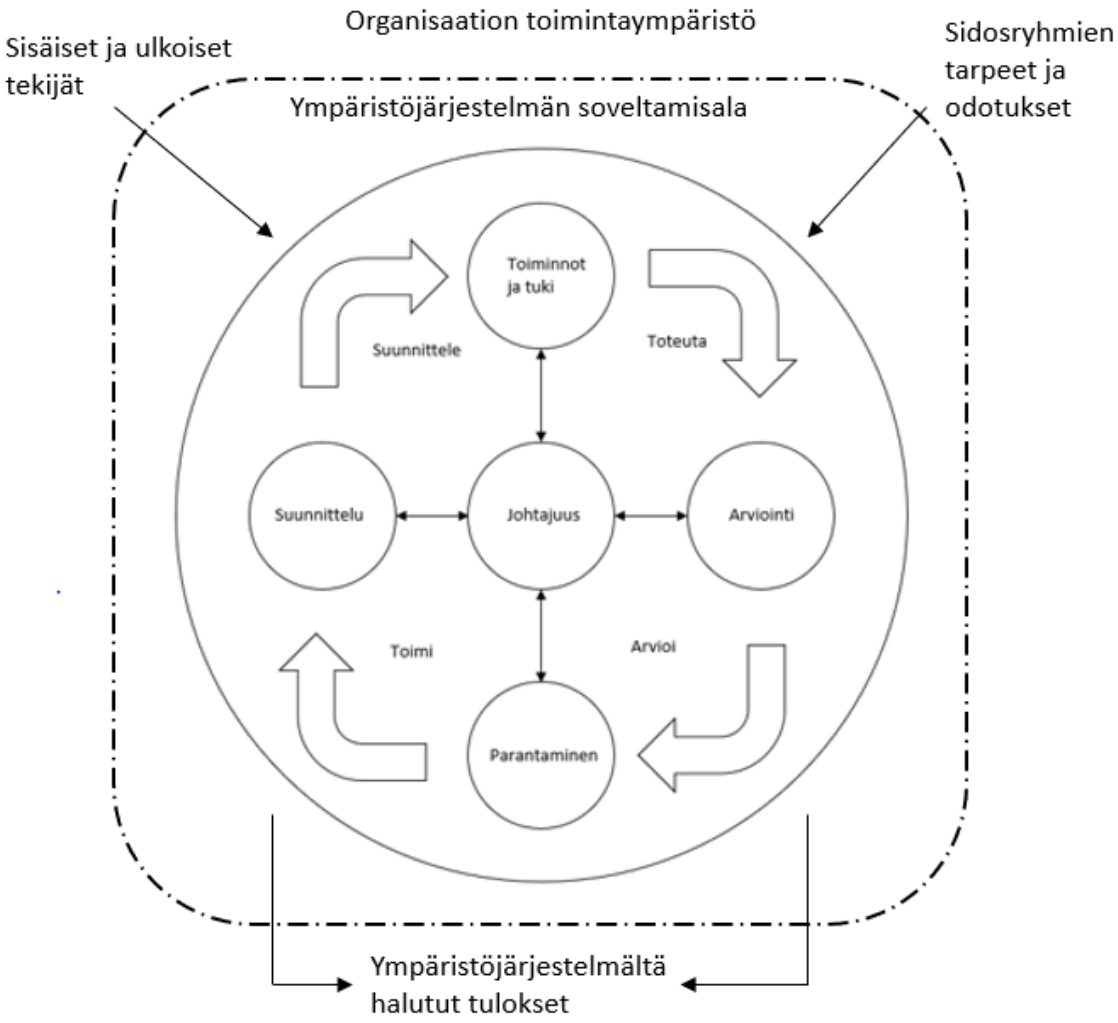
3.3 ISO 14001-standardi

ISO 14001 on maailmanlaajuisesti tunnustettu standardi ympäristöhallintajärjestelmille (Environmental Management Systems, EMS). Se kuuluu ISO 14000 -standardiperheeseen ja tarjoaa viitekehyksen organisaatioille ympäristövastuunsa järjestelmälliseen ja tehokkaaseen hallintaan, ympäristövaikutusten vähentämiseen ja sitoutumiseen ympäristön kestävyyteen. ISO 14001 -standardi on suunniteltu auttamaan organisaatioita hallitsemaan ympäristövastuitaan järjestelmällisellä ja tehokkaalla tavalla, vähentämään ympäristövaikutustaan ja osoittamaan sitoutumisensa ympäristön kannalta kestävään toimintaan. (ISO, 2015b)

ISO (2015b) -standardin mukaan ympäristöstandardille on tarvetta, koska kestävään kehitykseen, läpinäkyvyyteen ja vastuullisuuteen kohdistuvat yhteiskunnan ja asiakkaiden odotukset ovat kasvaneet. Tähän taustalla ovat lainsäädännön tiukkeneminen, saastumisen aiheuttamat haitat, resurssien tehoton käyttö, vääränlainen jätteiden käsittely, ekosysteemin heikkeneminen, biodiversiteetin katoaminen ja ilmastonmuutos (ISO, 2015b). Kuten aikaisemmasta prosessikuvauksesta käy ilmi, piikiekon valmistaminen kuluttaa paljon energiaa ja tuottaa esimerkiksi piikarbidijätettä ja kemikaalijätettä (Tillli, 2010). Täten piikiekkovalmistajan näkökulmasta ympäristöstandardi on oleellinen.

Kuten ISO 9001-laatustandardi, myös ISO 14001- ympäristöjärjestelmästandardi pyrkii sitouttamaan kaikki organisaation tasot ympäristöjärjestelmän suunnittelemisen, toteuttamisen ja arvioinnin taakse. Organisaatio voi hyödyntää mahdollisuuksiaan ympäristölle haitallisten vaikutusten estämiseksi tai lieventämiseksi. Ylin johto voi arvioida riskejä ja mahdollisuuksia organisaatioon vaikuttavasti yhdistämällä ympäristöasioiden hallintaa

organisaation liiketoimintaprosesseihin, päätöksentekoon ja strategiaan. Standardia noudattamalla organisaatio voi osoittaa sidosryhmilleen, että sillä on käytössä toimiva ympäristöjärjestelmä. (ISO, 2015b)



***Kuva 5**: PDCA-malli osana ympäristöjärjestelmän soveltamisalaa* (ISO, 2015b)

Kuten ISO 9001-standardi, myös ISO 14001-standardi perustuu jatkuvan parantamisen PDCA-sykliin. Suunnittelussa asetetaan tavoitteet ja luodaan prosessit organisaation ympäristöstrategian mukaisten tulosten saavuttamiseksi. Seuraavaksi prosessit toteutetaan eli otetaan käyttöön. Ympäristöjärjestelmän tuloksia seurataan ja mitataan ja niitä verrataan yrityksen ympäristöstrategiassa asetettuihin tavoitteisiin. Kun huomataan puutteita tai parantamiskohteita, ryhdytään toimiin ympäristöjärjestelmän parantamiseksi. (ISO, 2015b)

Organisaation toimintaympäristön kannalta olennaista on tunnistaa ne sisäiset ja ulkoiset tekijät, jotka vaikuttavat sen kykyyn saavuttaa ympäristöjärjestelmälle asetettuja tuloksia

(ISO, 2015b). Ympäristöstandardissa on samankaltaisuuksia ISO 9001- laatustandardiin, sillä kummatkin perustuvat jatkuvan parantamisen PDCA-mallille ja painottavat riskien ja mahdollisuuksien tunnistamista sekä organisaation ylimmän johdon sitoutumista standardien mukaiseen toimintaan. ISO 14001-standardi vaatii organisaation määrittävän ympäristön kannalta olennaisimmat sidosryhmät ja näiden sidosryhmien tarpeet ja odotukset (ISO, 2015b).

Ylimmältä johdolta standardi olettaa vastuun ottamista ympäristöjärjestelmän vaikuttavuudesta sekä sitoutumista sen suhteen. Johdon on varmistuttava siitä, että ympäristötavoitteet ovat yhdenmukaisia organisaation strategian ja toimintaympäristön kanssa. Ympäristöjärjestelmän vaatimukset tulee yhdistää liiketoimintaprosesseihin. Lisäksi johto vastaa resursseista, tuloksista ja jatkuvasta parantamisesta. Organisaation ympäristöpolitiikan on oltava saatavilla sidosryhmille ja dokumentoitua tietoa siitä tulee ylläpitää. Ympäristöpolitiikan on oltava koko organisaation tiedossa. (ISO 2015b)

Suunnittelussa on määritettävä riskit ja mahdollisuudet, jotka liittyvät ympäristöjärjestelmän ympäristönäkökulmiin. Järjestelmän suunnittelussa tulee taata, että ympäristöjärjestelmä voi saavuttaa halutut tulokset. estää epätoivottuja vaikutuksia, joihin sisältyy ulkoisten ympäristöolosuhteiden vaikutus organisaatioon sekä saada aikaiseksi jatkuvaa parantamista. Lisäksi riskeistä ja mahdollisuuksista on ylläpidettävä dokumentoitua tietoa. Organisaatio asettaa itselleen ympäristönäkökohdat, joita se voi hallita ja joihin on mahdollisuus vaikuttaa sekä niihin liittyvät ympäristövaikutukset. Lisäksi asetetaan sitovat velvoitteet liittyen ympäristönäkökohtiin ja määritetään, miten nämä sitovat velvoitteet vaikuttavat organisaatioon. Sitovat velvoitteet on otettava huomioon ympäristöjärjestelmän kaikissa jatkuvan parantamisen prosessivaiheissa. (ISO, 2015b)

ISO 14001 (2015b) mukaan organisaation ympäristötavoitteiden on oltava yhdenmukaisia määritetyn ympäristöpolitiikan kanssa. Lisäksi niiden on oltava mahdollisuuksien mukaan mitattavissa, seurattavissa ja viestitettävissä (ISO 14001). Dokumentoinnin kannalta vaatimukset ovat hyvin samankaltaisia ISO 9001 kanssa (ISO, 2015a). Elinkaarinäkökulman mukaisesti organisaation on laadittava toimivat hallintakeinot, joilla varmistutaan tuotteiden ympäristövaikutuksista kaikissa elinkaaren vaiheissa (ISO, 2015b). Suorituskyvyn arvioinnin osalta vaatimukset ovat hyvin saman kaltaisia tai tismalleen samoja, kuin laadunhallintajärjestelmän kanssa (ISO, 2015a; ISO 2015b). Erona on, että mitattavana kohteena on ympäristöjärjestelmä laadunhallintajärjestelmän sijaan. Sama koskee johdon katselmusta, sisäisiä auditointeja ja jatkuvaa parantamista. Eli ISO 9001- ja ISO 14001-standardit täydentävät toisiaan, mutta niissä esiintyy myös päällekkäisyyttä.

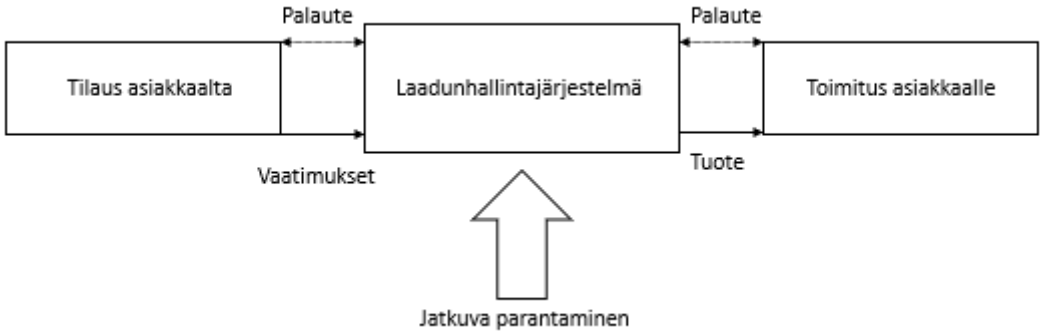
4. LAATUSTANDARDIEN VAIKUTUS PIIKIEKON VALMISTUKSESSA

On huomattu, että piikiekon valmistamisessa laadulla ja sen varmistamisella on suuri merkitys lopputuotteen kannalta (Airaksinen, 2010; Anttila, 2010; Tilli, 2010). Lisäksi on tutustuttu laatustandardien vaatimuksiin laadunhallintajärjestelmän suunnittelun, toteuttamisen, arvioinnin ja parantamisen osalta. On tärkeä huomata ero SEMI -standardien ja ISO-standardien välillä. Tilli (2010) käsittelee eri SEMI-standardien asettamia vaatimuksia lopputuotteen mitatuille ominaisuuksille, kuten aikaisemmin mainituille warpille, bowille ja TTV:lle. Nämä standardoidut arvot koskevat tuotteen dimensionaalisia, fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia. Niillä varmistetaan tuotteiden vaatimuksenmukaisuus asiakkaalle (Tilli, 2010). ISO-standardit puolestaan luovat viitekehyksen esimerkiksi laadunhallintajärjestelmän tai ympäristöjärjestelmän suunnitteluun, toteuttamiseen, analysointiin ja parantamiseen (ISO, 2015a; ISO, 2015b). ISO-standardit ovat tarkoitettu organisaatioille riippumatta niiden liiketoiminnasta, kohdemarkkinasta tai tuotteesta (ISO, 2015a).

Luthra et al. (2021) mukaan asiakas saa odottamansa arvon vain, jos valmistusoperaatio suoritetaan siten, että se heijastelee standardien mukaisia ominaisuuksia tuotteessa. Toisaalta asiakas pettyy varmasti, jos toimitettu tuote ei ole yrityksen lupausten mukainen ja laatua ei ole varmistettu. Täten asiakkaan odotusten täyttäminen laadunvalvonnan kannalta on erittäin tärkeää. (Luthra et al., 2021) Tämä on myös lähellä ASQ:n laadun määritelmän ensimmäistä osaa, joka on tuotteen tai palvelun ominaispiirteet, jotka liittyvät tuotteen tai palvelun kykyyn tyydyttää käyttäjän tarpeita (Sower, 2011; ASQ, 27.10.2023). Laatustandardit tukevat tätä ajatusta. Standardien tuottama laadunhallinnan yhdenmukaisuus tuottaa standardien tuoman arvon organisaatiolle (Luthra et al., 2021).

ISO 9000-standardiperhe rohkaisee organisaatiota prosessijohtoiseen laatujohtamiseen (Sower, 2011, s. 110). Prosessi on esitettynä kuvassa 6. Jatkuva parantaminen perustuu asiakkaiden palautteesta saatuun tietoon tuotteiden laadusta. Erityisesti palauteen ollessa negatiivista, PDCA-syklin mukaisesti laadunhallintajärjestelmän osalta on ryhdyttävä korjaaviin toimenpiteisiin (ISO, 2015a). Lisäksi kuvasta 6 nähdään, että laadunhallintajärjestelmän omistava organisaatio voi antaa palautetta asiakkaalle sen tilaukselle asettamista vaatimuksista. Tämä on myös standardien mukaista viestintää (ISO, 2015a; ISO, 2015b). Piikiekkovalmistajan kontekstissa tämä voisi tarkoittaa esimerkiksi sitä, että

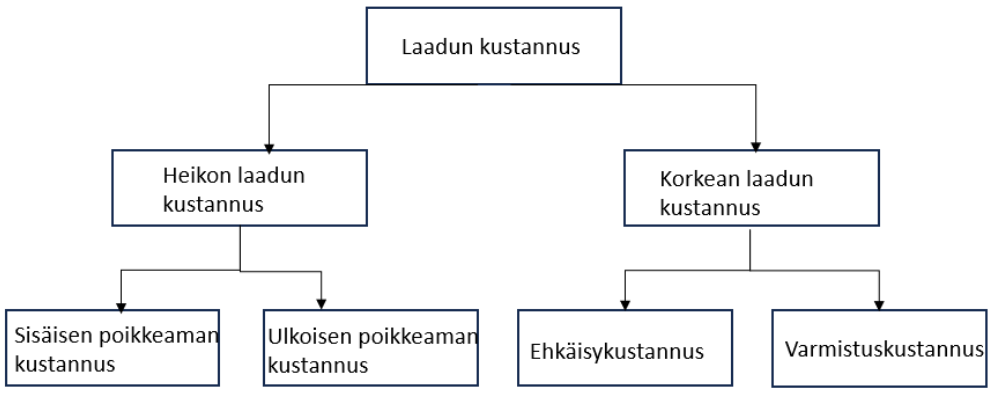
asiakkaalle voidaan ehdottaa tiukempien toleranssirajojen asettamista, jos prosessi pystyy tuottamaan selvästi korkeampaa laatua, mitä asiakas vaatii. Toisaalta liian tiukoista rajoista on hyvä ilmoittaa asiakkaalle ja pyytää tarkennusta tiettyjen toleranssien, esimerkiksi warpin tai bowin, on oltava niin tiukoissa rajoissa. Tämä on tärkeää, koska tarpeettoman korkea laatu aiheuttaa turhia kustannuksia (Luthra et al., 2021).



***Kuva 6**: Prosessijohtoinen laadunhallintajärjestelmä* (Sower, 2011, s. 110)

4.1 Laadun kustannus

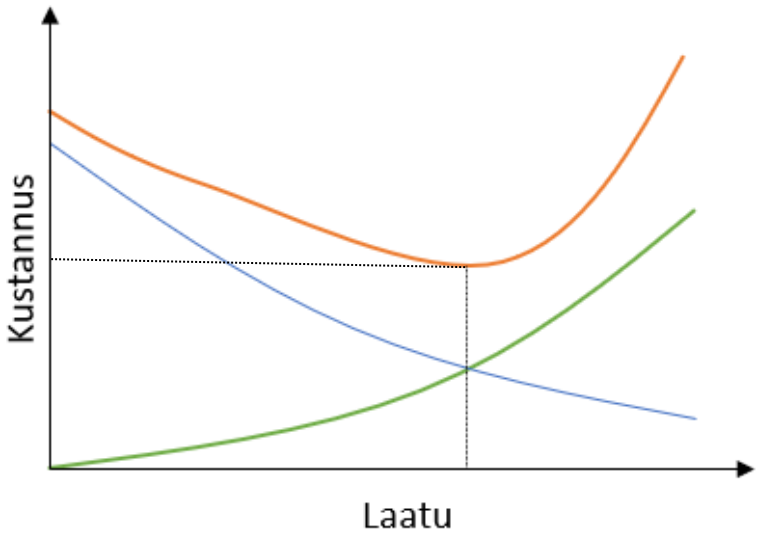
Työn ensimmäinen tutkimuskysymys koski laadun kustannuksen muodostumista. Piikiekkovalmistajan laadun kustannus muodostuu neljästä osasta: Ehkäisykustannuksesta, varmistuskustannuksista, sisäisten poikkeamien kustannuksista ja ulkoisten poikkeamien kustannuksista (Sower, 2011; Luthar et al., 2021). Laadun kustannusten jakautuminen neljään osaan on esitetty kuvassa 7.



***Kuva 7**: Laadun kustannusten jakautuminen* (Sower, 2011; Luthar et al., 2021)

Kuvan 7 perusteella sekä heikko laatu että korkea laatu tuottavat kustannuksia. Korkean laadun kustannukset aiheutuvat korkean laadun tuottamisesta tai heikon laadun seuraamuksista. Ehkäisykustannuksilla pyritään aktiivisesti estämään viallisten tuotteiden valmistus (Sower, 2011). Sowerin (2011) listaa keinoja ehkäistä laatuvirheitä. Tällaisia keinoja ovat esimerkiksi markkinatutkimukset, asiakaskyselyt, tuotekehitys, toimittajapalautteet ja -arviot, auditoinnit ja laadunhallinnan suunnittelu. Laatustandardi tukee näitä tavoitteita laadunhallintajärjestelmälle annettujen vaatimusten avulla (ISO, 2015a). Laadun ylläpitämisen kustannukset muodostuvat mittauskustannuksista, mittaustyöstä, tarkastuksista, laatuauditoinneista, laboratoriokokeista ja mittausdatan analysoinnista (Sower, 2011; Luthra et al., 2021). Nämä toimenpiteet ovat osa piikiekkovalmistajan laadunvarmistusprosesseja (Airaksinen, 2010). Täten ne soveltuvat kuvaamaan myös piikiekkovalmistajan korkean laadun kustannuksia.

Toinen kustannuksia aiheuttava osa on heikon laadun kustannukset, joka jakautuu kuvan 7 mukaisesti sisäisiin ja ulkoisiin poikkeamakustannuksiin. Eniten kustannuksia aiheuttaa, jos poikkeavaa tuotetta päätyy asiakkaalle asti, jolloin puhutaan ulkoisista poikkeamakustannuksista (Luthra et al., 2021). Tämä näkyy myös kuvassa 8, jossa on kuvattu laadun kokonaiskustannus ja sen jakautuminen heikon ja korkean laadun kustannuksiin. Kuvassa punaisella on laadun kokonaiskustannus, sinisellä heikon laadun kustannus ja vihreällä korkean laadunkustannus. Huomataan, että alhaisella laadulla heikon laadun kustannukset ovat korkeat eli käytännössä ulkoiset poikkeamat, kuten asiakasreklamaatiot, sisäiset selvitykset, tuotteiden palautukset, takuuvaatimukset, asiakkaiden menetykset ja myyntitappiot ovat hyvin korkeita (Sower, 2011; Luthra et al., 2021). Lisäksi sisäiset heikon laadun kustannukset, kuten hylkäyskustannukset, materiaalitappiot, uudelleenprosessointi, lisätyön aiheuttamat kustannukset ja vika-analyysikustannukset ovat korkeita (Sower, 2011, s. 313).



***Kuva 8**: Laadun kustannus (Luthra et al., 2021, s. 111)*

Laadun kasvaessa kuvan 8 mukaisesti laadun kokonaiskustannukset laskevat, mikä johtuu heikon laadun kustannusten voimakkaasta laskusta. Samalla sivun ensimmäisessä kappaleessa mainitut korkean laadun kustannukset kasvavat. Jos organisaatio pyrkii tarpeettoman korkeaan laatuun, kuvan 8 mukaisesti laadun kokonaiskustannukset nousevat hyvin paljon, vaikka laatu kasvaa kustannuksiin nähden vähän. Kuvassa on merkittynä korkean laadun kustannusten ja heikon laadun kustannusten leikkauspiste, joka on myös pienin kokonaiskustannusten arvopiste. Tähän pisteeseen organisaation tulee pyrkiä, jotta laadun kokonaiskustannukset ovat mahdollisimman matalat laadun ollessa kiitettävällä tasolla. (Luthra et al., 2021)

Työn toinen tutkimuskysymys liittyi laadun kustannuksen ja mitattavan laadun yhteyteen. Kuvan 8 mukaisesti laadun kustannukseen voi vaikuttaa laskematta tuotteen mitattua laatua. Luthra et al. (2021) mukaan tähän on myös liiketoiminnallisessa mielessä järkevää vaikuttaa. Laadun kustannus koostuu neljästä osasta kuvan 7 mukaisesti ja niiden keskinäinen suhde on kuvattuna kuvassa 8. Heikon laadun kustannusten laskeminen nostaa Korkean laadun tuottamiseen kuluneita kustannuksia. Liian korkeaan laatuun pyrkiminen ei ole liiketoiminnallisessa mielessä järkevää, koska se aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia. Sen sijaan esimerkiksi piikiekkoja valmistavan organisaation tulee löytää kuvan 8 mukaisesti tasapainopiste heikon laadun aiheuttamien kustannusten ja korkean laadun tuottamiseen kuluvien kustannusten välillä.

5. PÄÄTELMÄT

Laatustandardit vaikuttavat positiivisesti piikiekkovalmistajan valmistusprosesseihin. Työn perusteella standardit yhtenäistävät organisaation laadunhallintaprosesseja ja tarjoavat selkeän viitekehyksen yrityksen laatujohtamiseen ja -hallintaan. Tämä kehittää organisaation valmistusprosessien suorituskykyä ja alentaa laadun kokonaiskustannuksia. Yhtenäistetyillä ja standardisoidulla laadunhallintajärjestelmillä varmistetaan tuotteen laatu tehokkaammin, kuin ilman standardisointia. Tämä alentaa myös laadusta koituneita kustannuksia, koska toimintamallit ovat yhtenäisiä ja vastuunjaot selkeitä. Resursointi on ylimmän johdon vastuulla niin laadunhallintajärjestelmän kuin ympäristöjärjestelmän kannalta. Ylin johto vastaa myös siitä, että järjestelmät pääsevät niille asetettuihin tavoitteisiin. Dokumentointivaatimusten ansiosta organisaatiolla on tallessa tietoa, joka näyttää laadunhallinta- ja ympäristöjärjestelmien tulokset. ISO 9001-sertifioidun laadunhallintajärjestelmän avulla piikiekkovalmistaja pystyy optimoimaan organisaation laadunhallinnan prosessit ja täten löytämään korkeaa laatua tuottavan ja kustannustehokkaan tavan johtaa laatua.

Ympäristöstandardin avulla piikiekkovalmistaja voi vastata tuotannon ympäristöhaittojen haasteeseen ja vähentää toiminnan ympäristövaikutusta. Ympäristöjärjestelmän käyttöönotto luo piikiekkovalmistajalle säästöjä, kun se välttyy liiallisten ympäristövaikutuksen mahdollisesti aiheuttamilta sanktioilta. Sen avulla piikiekkovalmistajan jätteen määrä todennäköisesti vähenee, jolloin jätteenkäsittelykustannukset pienevät. Standardin mukaisen ympäristöjärjestelmän avulla piikiekkovalmistaja pystyy käyttämään materiaalia tehokkaammin esimerkiksi piin uusiokäytöllä valmistusprosesseissa. Ympäristöstandardin dokumentoituja vaikutuksia voi käyttää hyödyksi yrityksen markkinoinnissa ja ympäristöjärjestelmän avulla voidaan korostaa yrityksen vastuullisuutta ja kestävää liiketoimintaa.

Asiakasarvoa voi luoda monella tavalla. Laatustandardien avulla voidaan tuottaa aikaisempaa tasaisempaa ja korkeampaa laatua, joka näkyy tuotteen laadullisten ulottuvuuksien parantumisena. Tämä luo tuotetta raaka-aineena käyttävälle asiakkaalle arvoa. Laadukkaampi, kestävämpi ja suorituskykyisempi tuote on asiakkaalle arvokkaampi, sillä se nostaa myös asiakkaan tuottaman jatkojalostetun komponentin laatua ja suorituskykyä. Piikiekkovalmistajan on erotuttava kilpailijoistaan laadukkaammilla ja suorituskykyisemmillä piikiekoilla. Laadun standardisoinnin avulla tämä on mahdollista ja standardi-

sointi alentaa myös laadun aiheuttamia kustannuksia ja pitkällä aikavälillä. Lyhyellä aikavälillä uuteen järjestelmään tehdyt investoinnit voivat tuoda lisäkustannuksia, joihin ylimmän johdon on varattava riittävästi resursseja.

Piikiekkovalmistajan laatukustannukset koostuvat laatuvirheiden ennaltaehkäisyn kustannuksista, laadun ylläpitämisen kustannuksista sekä sisäisistä ja ulkoisista poikkeamakustannuksista. Jos piikiekkovalmistajan laadunhallinta on heikkoa, sisäisten ja ulkoisten poikkeamien kustannukset ovat erittäin suuret. Laadunhallintajärjestelmää parantamalla poikkeamakustannuksia saadaan laskettua ja tavoitteena on löytää tasapainotila korkean laadun tuottamiseen kuluvista kustannuksista ja heikon laadun aiheuttamista kustannuksista. Tasapainopisteessä laadun kokonaiskustannukset ovat kaikkein alhaisimmat laadun ollessa riittävän korkea. Tähän pisteeseen piikiekkovalmistajan on pyrittävä, jotta se voi tarjota asiakkailleen korkeaa laatua hallituilla kustannuksilla. Laatustandardien avulla organisaation kyvykkyys laadunhallinnan osalta kasvaa ja tämä helpottaa laadun kokonaiskustannusten hallintaa. Piikiekkovalmistajan ei kannata pyrkiä tarpeettoman korkeaan laatuun, koska tämä aiheuttaa ylimääräisiä laatukustannuksia ilman merkittävää hyötyä.

Piikiekkovalmistajan liiketoimintaympäristössä vaikuttaa ISO-standardien lisäksi muita standardeja, kuten SEMI-standardeja. Työn painopiste oli kahdessa ISO-standardissa, ISO 9001- ja ISO 14001-standardissa. Jatkotutkimuksessa muiden kuin ISO 9001- ja ISO 14001-standardien vaikutusta pitäisi tutkia tarkemmin. Esimerkkejä standardeista lisätutkimukseen ovat ISO 9004 -standardi, IAFT 16494 -standardi ja SEMI-standardit. Haasteena tutkimuksessa on standardien saatavuus, sillä edellä mainituista standardeista vain ISO 9004 on saatavilla avoimista lähteistä. Lisätutkimuksen kannalta mielekästä olisi myös selvittää, miten esimerkiksi ISO- ja SEMI-standardit toimivat organisaatiossa rinnakkain ja miten niiden ehdottamia toimintatapoja yhdistetään organisaation sisällä. Lisäksi voisi tutkia, ovatko standardit ristiriidassa keskenään ja milloin mitäkin standardia on noudatettava ensisijaisesti.

LÄHTEET

Airaksinen, V. Chapter Sixteen - Silicon Wafer and Thin Film Measurements. Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies. William Andrew Publishing, pp. 289–298, ISBN 9780815515944. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1594-4.00016-4

Anttila, O. (2010). Chapter Two - Czochralski Growth of Silicon Crystals. Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies. William Andrew Publishing, pp. 19–36, ISBN 9780815515944. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1594-4.00002-4

American Society for Quality [ASQ]. Quality Glossary. Quality. Saatavissa (viitattu 27.10.2023): https://asq.org/quality-resources/quality-glossary/q

Bagley, B. (2016). Semiconductor Financing Recent Trends. 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). Saatavissa: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7520764

Bayraktar, E., Kohb, S.C., Gunasekaranc, A., Sarid, K. & Tatoglu, E. (2008). The role of forecasting on bullwhip effect for E-SCM applications, International Journal of Production Economics, vol. 113, pp. 193–204, ISSN 0925-5273. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.03.024

Crosby, P. (1979). Quality is Free. New York, McGraw-Hill.

Garvin, D. (1987). Competing on the Eight Dimensions of Quality. Harvard Business Review. 65(6), pp. 101–109.

Haapalinna, A. & Tilli, M. (2010). Chapter One - Properties of Silicon. Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies. William Andrew Publishing, pp. 3–17, ISBN 9780815515944. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1594-4.00001-2

Hwang, B.-N. & Lu, T. (2013). Key success factor analysis for e-SCM project implementation and a case study in semiconductor manufacturers. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 43(8), 657–683. Saatavissa: https://doi.org/10.1108/IJPDLM-03-2012-0062

Intel. Intel's Founding. Intel Corporation. Saatavissa (viitattu 28.9.2023): https://www.intel.com/content/www/us/en/history/virtual-vault/articles/intels-founding.html

International Organization for Standardization [ISO]. (2015a). ISO 9001:2015. Quality management systems. Requirements, ISO. Saatavissa: https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN-ISO/ID2/9/394310.html.stx#

International Organization for Standardization [ISO]. (2015b). ISO 14001:2015. Environmental management systems. Requirements with guidance for use, ISO. Saatavissa: https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID2/1/394293.html.stx#

Juran, J. (1970). Consumerism and Product Quality. Quality Progress 3(7). Sam Houston state University, Huntsville. pp. 18.

Kraft, Michael., & White, N. M. (2013). MEMS for automotive and aerospace applications. Woodhead Publishing Limited.

Lavdari, F. (2023). TSMC: A PEST Analysis of Semiconductor Market. Journal of Geography, Politics and Society, 13(1), 22–29. Saatavissa: https://doi.org/10.26881/jpgs.2023.1.03

Lojek, B. (2007). History of Semiconductor Engineering (1st ed. 2007.). Springer Berlin Heidelberg. Saatavissa: https://doi.org/10.1007/978-3-540-34258-8

Luthra, S., Garg, D., Agarwal, A., & Mangla, S. K. (2021). Total quality management (TQM): principles, methods, and applications. CRC Press. Saatavissa: https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1201/9781003053156

Meyer, D. (2010). Chapter Six - Epi Wafers: Preparation and Properties. Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies. William Andrew Publishing, pp. 89–106, ISBN 9780815515944. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1594-4.00006-1

Mikla, V, I & Mikla, V, V. (2010). 2 - Thermally Stimulated Depolarization Currents in Amorphous Chalcogenides. Trap Level Spectroscopy in Amorphous Semiconductors. Elsevier, pp. 21–35. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384715-7.00002-4

Mäkinen, J. (2010). Chapter Seven - Thick-Film SOI Wafers: Preparation and Properties. Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies. William Andrew Publishing, pp. 107–136, ISBN 9780815515944. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1594-4.00007-3

Nasdaq. PHLX Semiconducot SOX. Saatavissa (viitattu 29.9.2023): https://indexes.nasdaqomx.com/index/History/SOX

Okmetic. Vastuullisuusraportti 2022 Okmetic. Saatavissa (viitattu 29.9.2023): https://www.okmetic.com/wp-content/uploads/2023/05/Okmetic-Vastuullisuusraportti-2022-2.pdf

Okmetic. High Resistivity wafers. Okmetic. Saatavissa (viitattu 30.9.2023): https://www.okmetic.com/silicon-wafers/rfsi-wafers-high-resistivity-line-for-rf/high-resistivity-wafers/

Paloheimo, J. (2010). Chapter Three – Properties of Silicon Crystal. Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies. William Andrew Publishing, pp. 37–57, ISBN 9780815515944. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1594-4.00003-6

Rupp, K. (2018). 42 Years of Microprocessor Trend Data. Saatavissa (viitattu 28.9.2023): https://www.karlrupp.net/2018/02/42-years-of-microprocessor-trend-data/

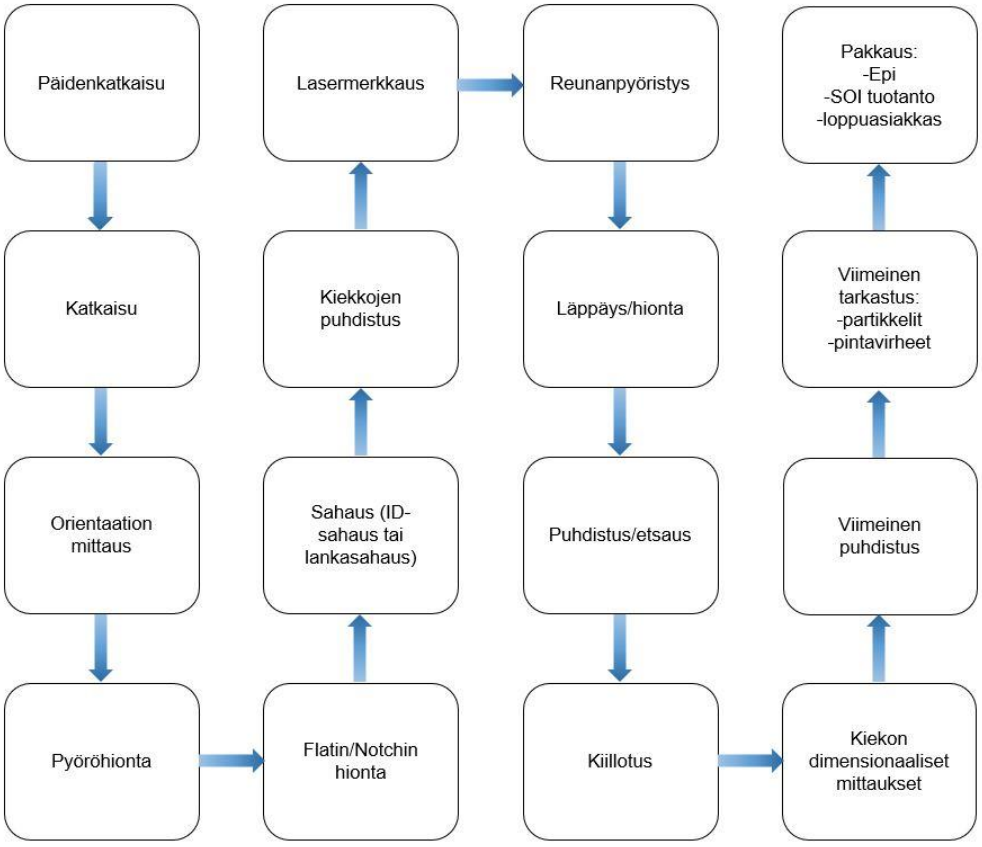
Shewhart, W. (1939). Statistical Method from the Standpoint of Quality Control. Washington, D.C. Graduate School of the Department of Agriculture.

Sower, V, E. (2011). Essentials of quality with cases and experiential exercises. John Wiley & Sons, Inc. Sam Houston State University, Huntsville.

The Nobel Foundation. The Nobel Prize in Physics 1956. Nobel Prize Outreach AB 2023. Saatavissa (viitattu 28.9.2023): https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1956/summary/

Tilli, M. (2010). Chapter Five - Silicon Wafers: Preparation and Properties. Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies. William Andrew Publishing, pp. 71–88, ISBN 9780815515944. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1594-4.00005-X

Tredennick, N. (1995). Technology and Business: Forces Driving Microprocessor Evolution. Proceedings of the IEEE, vol. 83(12), pp. 1641–1652. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/5.476080

LIITTEET

***Liite 1**: Piikiekon valmistusprosessit kiteenkasvatuksen jälkeen* (Tilli, 2010, s. 72)