



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Anton Karuluoto

Kokonaistehokkuuden (OEE) optimointi elintarviketeollisuuden tuotannossa

Tuotantolinjojen analyysi ja optimointi

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Diplomi-insinööri
Tuotantotalouden maisteriohjelma

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Anton Karuluoto		
Tutkielman nimi:	Kokonaistehokkuuden (OEE) optimointi elintarviketeollisuuden tuotannossa : Tuotantolinjojen analyysi ja optimointi		
Tutkinto:	Diplomi-insinööri		
Oppiaine:	Tuotantotalouden maisteriohjelma		
Työn ohjaaja:	Petri Helo		
Valmistumisvuosi:	2025	Sivumäärä:	76

TIIVISTELMÄ:

Tämän diplomityön aiheena on kokonaistehokkuuden (Overall Equipment Effectiveness, OEE) optimointi elintarviketeollisuuden tuotannossa. Työssä tarkastellaan kahden eri tehtaan tuotantolinjoja ja niiden OEE-tasoa sekä analysoidaan tehokkuuden vaihteluihin vaikuttavia tekijöitä. Tutkimusongelmana on, kuinka OEE:tä voidaan parantaa elintarvikkeiden tuotantolinjoilla. Elintarviketeollisuudessa OEE:n soveltaminen kohtaa erityishaasteita, kuten hygieniavaatimukset, tuotevaihdot ja raaka-aineiden vaihtelu. Tutkimus perustuu kahden tuotantolaitoksen dataan, josta Tehdas 1:n 24 kuukauden ajanjakso on ollut analyysin pääasiallinen lähde. Käytetty menetelmä yhdistää kvantitatiivisen ja kvalitatiivisen analyysin: OEE-arvot on laskettu tuotantodatan perusteella ja niitä on täydennetty haastatteluilla. OEE:n osa-alueista laatu jäi osin analyysin ulkopuolelle datan puutteellisuuden vuoksi. Keskeisiksi löydöksiä nousivat tuotantovolyymin, eräkokojen ja tuotevaihtojen vaikutus tehokkuuteen. Suuremmat eräkoot ja harvemmat vaihdot paransivat käytettävyyttä ja suorituskykyä. Laitteiden kulumisen ja kunnossapito puolestaan vaikuttivat suoraan suorituskykyyn. Operaattoreiden vaikutus oli vähäinen, mikä viittaa standardoitujen prosessien toimivuuteen. Tutkimuksen tuloksena ehdotetaan muun muassa tuotannon suunnittelun siirtymistä viikkotasolle sekä reaaliaikaisen OEE-seurantatyökalun käyttöönottoa. Näillä toimenpiteillä arvioidaan saavutettavan 10–20 prosenttiyksikön parannus OEE:ssä. Tulokset tukevat datalähtöisen päätöksenteon hyödyntämistä tuotannon optimoinnissa ja tarjoavat konkreettisia kehitysehdotuksia elintarviketeollisuuden käyttöön.

AVAINSANAT: kokonaistehokkuus (OEE), tuotannon optimointi, elintarviketeollisuus, data-analytiikka, häviöiden hallinta

UNIVERSITY OF VAASA**School of Technology and Innovations**

Author: Anton Karuluoto
Title of the thesis: Optimization of Overall Equipment Effectiveness (OEE) in Food Industry Production: Analysis and Optimization of Production Lines
Degree: Master of Science in Technology
Discipline: Master's Programme in Industrial Management
Supervisor: Petri Helo
Year: 2025 **Pages:** 76

ABSTRACT:

The subject of this thesis is Optimization of Overall Equipment Effectiveness (OEE) in food processing industry. The study examines production lines at two factories, analyzing their OEE levels and identifying factors contributing to efficiency variations. The main research question is how OEE can be improved on food production lines. Applying OEE in the food industry presents specific challenges, such as hygiene requirements, product changeovers, and variability in raw materials. The research is based on data from two production facilities, with the primary analysis focusing on a 24-month period from Factory 1. The methodology combines quantitative and qualitative approaches: OEE values were calculated from production data and supplemented with interviews. The quality component of OEE was excluded due to lack of available data. Key findings highlight the impact of production volume, batch sizes, and product changeovers on efficiency. Larger batch sizes and fewer changeovers improved availability and performance. Equipment wear and maintenance had a direct effect on performance. The impact of operators was minimal, indicating the effectiveness of standardized processes. As a result of the study, it is proposed to move production planning to a weekly level and introduce a real-time OEE-monitoring tool. These measures are estimated to achieve a 10 to 20 % improvement in OEE. The results support the use of data-driven decision-making for production optimization and provide concrete development proposals for the food industry.

KEYWORDS: Overall Equipment Effectiveness, production optimization, food industry, data analytics, loss management

Sisällys

1	Johdanto	10
1.1	Tutkimuksen tausta ja merkitys	11
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset	11
1.3	Tutkimuksen rakenne	13
2	OEE ja prosessien parantamisen viitekehykset	15
2.1	OEE:n määritelmä ja keskeiset komponentit	15
2.2	OEE:n vaikutustekijät tuotantoympäristössä	18
2.3	Prosessien parantamisen viitekehykset	19
2.3.1	Lean Manufacturing	19
2.3.2	DMAIC – Six Sigma	20
2.3.3	Theory of Constraints (TOC)	21
2.3.4	TPM	22
2.4	OEE:n vertailu muihin suorituskykymittareihin	23
2.4.1	TEEP (Total Effective Equipment Performance)	23
2.4.2	Prosessisyklin tehokkuus (PCE, Process Cycle Efficiency)	23
2.4.3	MTBF ja MTTR (Mean Time Between Failures / Mean Time to Repair)	24
2.5	Elintarviketeollisuuden erityispiirteet	24
2.6	Yhteenveto kirjallisuudesta	25
3	Metodologia	27
3.1	Tutkimusmenetelmät	27
3.1.1	Aineiston kuvaus	27
3.1.2	Menetelmät	27
3.2	Tutkimuksen rajoitteet	28
4	OEE Analyysi – nykytila	29
4.1	Yleiskuvaus analysoiduista tuotantolinjoista	29
4.2	OEE-laskennan periaatteet ja rajoitukset	29
4.2.1	Käytettävyys	30

4.2.2	Suorituskyky	32
4.2.3	Laatu	35
4.3	Volyymin vaikutus tuotannon tehokkuuteen	36
4.3.1	Eräkoon vaikutus suorituskykyyn	40
4.4	Tuotevaihdot ja niiden merkitys	44
4.5	Operaattoreiden vaikutus	47
4.6	Tuotantotyökalun vaihto ja suorituskyky	48
4.7	Päivittäisten OEE-arvojen jakauma	51
4.8	OEE-lukujen kehitys 11/2022–10/2024	53
5	Tulokset	55
5.1	Keskeiset tekijät	55
5.2	Tuotannon suunnittelun optimointi	56
5.2.1	Tuotannosuunnittelun vaikutukset	60
5.3	Tuotantotyökalujen vaihdot	62
5.3.1	Linja 1 käytettävyyden lisääminen tuotantotyökalun vaihdoilla	64
5.4	OEE-seurantatyökalu	65
5.4.1	Työkalun tavoitteet ja käyttötarkoitus	65
5.4.2	Järjestelmän tekniset vaatimukset ja tarvittavat tietosisällöt	65
5.4.3	Keskeiset raportit ja visualisoinnit	66
5.4.4	Tekniset vaatimukset	68
5.4.5	Implementoinnin haasteet ja edellytykset	69
5.4.6	Odotetut hyödyt	69
5.5	Priorisointi ja toimenpidesuunnitelma	69
6	Johtopäätökset ja suositukset	71
6.1	Keskeiset löydökset	71
6.2	Vaikutukset toimintaan	71
6.3	Tutkimuksen rajoitteet	72
6.4	Jatkotoimenpiteet	72
6.4.1	Jatkotutkimukset	72
	Lähteet	74

Kuvat

Kuva 1. Kokonaistehokkuuden (OEE) muodostuminen suunnitellusta tuotantoajasta: käytettävyyden, suorituskyvyn ja laadun menetykset.	16
Kuva 2. Esimerkki OEE-seurannasta Vorne XL -järjestelmässä (Vorne, ei pvm.)	17
Kuva 3. Pullonkaulan vaikutus tuotantovirtaan, mukailtu lähteestä: (Forte, 2016).....	21
Kuva 4. Päivittäisten suorituskykylukujen trendianalyysi neljällä tuotantolinjalla 24 kuukauden ajalta.	34
Kuva 5. Tuotantovaiheiden välillä esiintyvien volyyymien suhdeluku, kuvastaa prosessissa tapahtuvaa hukkaa.	36
Kuva 6. Tuotantomäärä päivätasolla suhteessa suorituskykyyn, linjoittain	37
Kuva 7. Tuotantomäärä päivätasolla suhteessa käytettävyyteen, linjoittain	38
Kuva 8. Tuotantomäärä päivätasolla suhteessa OEE-lukuun, linjoittain.....	39
Kuva 9. Tuotantolinjojen suorituskyvyn ja eräkoon suhde.....	40
Kuva 10. Tehdas 2 - Linja 1: Eräkoon ja ajonopeuden välinen suhde. Kuvaajassa havaitaan lievä positiivinen korrelaatio, mikä viittaa siihen, että suuremmat eräkoot johtavat keskimäärin korkeampaan ajonopeuteen.	42
Kuva 11. Tehdas 2 - Linja 2: Eräkoon ja ajonopeuden välinen suhde. Eräkoot ovat tällä linjalla pienempiä, eikä niiden ja nopeuden välillä havaita positiivista yhteyttä.	43
Kuva 12. Tehdas 2 - Linja 3: Eräkoon ja ajonopeuden välinen suhde. Kuvaaja osoittaa positiivista korrelaatiota, mikä tukee oletusta siitä, että pidemmät tuotantoerät parantavat tuotantolinjan nopeutta.	44
Kuva 13. Päivien lukumäärä keskimääräisen OEE-tason mukaan kaikilta tuotantolinjoilta sekä kumulatiivinen osuus. Suurin osa päivistä sijoittuu hyvälle (60–80 %) tasolle.	51
Kuva 14. Linjakohtaiset OEE-tasojen jakaumat.....	52
Kuva 15. Kokonaistehokkuuden (OEE) kehitys linjoittain ajanjaksolla 11/2022–10/2024	53
Kuva 16. Tuotantoerien jakauma viikolla 1 vuonna 2024. Viikon aikana tuotettiin yhteensä 38 erää.	57

Kuva 17. Yhdistetyt tuotantoerät viikolla 1 vuonna 2024. Yhdistämisen seurauksena erien määrä olisi vähentynyt 6 kappaleella, mikä parantaa tuotannon sujuvuutta ja tehokkuutta.	58
Kuva 18. Tuotteen 1307 suorituskyvyn jakauma eräkohtaisesti. Suorituskyvyt on järjestetty laskevaan järjestykseen, ja harmaa viiva kuvaa kolmatta kvartiilia (Q3), joka toimii tavoitetasona.	60
Kuva 19. Tuotteen 1307 suorituskykyjakauma ja tuotannosuunnittelun vaikutus. Yhdistämällä 1/5 eristä poistetaan tehottomimpia ajoja, jolloin keskiarvotaso nousee kolmannen kvartiilin (Q3) tasolle.	61
Kuva 20. Linja 1:n viikoittainen käyttöaika ja potentiaalinen lisääaika muiden tuotteiden valmistukseen.	64
Kuva 21. OEE:n taso, häviöt (%) ja häviöt tunneissa linjoittain sekä viikkokohtainen kehitys.	67
Kuva 22. OEE:n osa-alueet ja kehitys linjoittain sekä keskeiset tuotantomäärät huhtikuussa 2024.	68

Kuviot

Kuvio 1. Käytettävyyden kehitys tehtaalla 1 ajanjaksolla 11/2022-10/2024.	31
Kuvio 2. Käytettävyyden kehitys linjalla 3.	32
Kuvio 3. Esimerkki nopeuden kehityksestä käynnistysvaiheessa kahden tunnin tuotantoajossa.	45
Kuvio 4. Esimerkki nopeuden kehityksestä käynnistysvaiheessa ja sen vaikutuksesta kuuden tunnin tuotantoajossa.	46
Kuvio 5. Suorituskyvyn kehitys tuotantotyökalun käyntiajan kasvaessa. Kaikki linjat 24 kuukauden ajanjaksolta.	50
Kuvio 6. Tuotantotyökalun vaihtamisen nettovaikutus ja suorituskyky käyntiajan funktiona.	63

Taulukot

Taulukko 1. Linjojen eräkokojen ja suorituskyvyn väliset korrelaatiokertoimet ja p-arvot	41
Taulukko 2. Keskiarvot operaattoreiden suorituskyky- ja keskinopeusluvuista tarkasteluajanjaksolta.....	47
Taulukko 3. Tuotantotyökalujen käyttötunnit linjoittain ennen vaihtoa	49
Taulukko 4. Tuotannosuunnittelun mukauttamisen arvioidut vaikutukset 52 viikon ajalta.	59
Taulukko 5. Tuotannosuunnittelun kehittämistoimenpiteiden vaikutus viikkotason kapasiteettiin. Vaikutukset on esitetty sekä prosentteina että muunnettuna tunneiksi ja työvuoroiksi, jotka kuvaavat vapautuvaa kapasiteettia tuotannossa.....	62

Lyhenteet

OEE	Kokonaistehokkuus (<i>Overall Equipment Effectiveness</i>)
TPM	Tuottava kunnossapito (<i>Total Productive Maintenance</i>)
SMED	Single Minute Exchange of Die
DMAIC	Define-Measure-Analyze-Improve-Control
TOC	Rajoiteteoria (<i>Theory of Constraints</i>)
MTBF	Keskimääräinen vikaväli (<i>Mean Time Between Failures</i>)
MTTR	Keskimääräinen korjausaika (<i>Mean Time To Repair</i>)
PCE	Prosessisyklin tehokkuus (<i>Process Cycle Efficiency</i>)
TEEP	Laitteiden kokonaistehokkuus (<i>Total Effective Equipment Performance</i>)
IoT	Esineiden internet (<i>Internet of Things</i>)
ERP	Toiminnanohjausjärjestelmä (<i>Enterprise Resource Planning</i>)
MES	Tuotannonohjausjärjestelmä (<i>Manufacturing Execution System</i>)
CIP	Cleaning in place

1 Johdanto

Tuotannon tehokkuuden parantaminen on teollisuusyrityksille keskeinen keino vahvistaa kilpailukykyä ja kannattavuutta. Yksi yleisesti käytössä oleva mittari tuotantotehokkuuden arviointiin on kokonaistehokkuus (Overall Equipment Effectiveness, OEE), joka kuvaa kuinka tehokkaasti tuotantolaitteistoa hyödynnetään suhteessa sen täyteen potentiaaliin (Hansen, 2002; Nakajima, 1988). OEE mittaa yhtäaikaisesti tuotantolaitteiston käytettävyyttä, suorituskykyä ja laatua, eli toisin sanoen se ilmaisee suunnitellusta tuotantoajasta sen osuuden, joka on todellisuudessa tuottavaa aikaa. Tämän mittarin avulla voidaan luokitella erilaisia tuotannon häviöitä ja tunnistaa prosessin parannuskohteita (Aman ym., 2017). OEE onkin laajalti hyväksytty ja käytetty suorituskyvyn mittari valmistavassa teollisuudessa. Sen merkitys ei ole ajan myötä vähentynyt, vaan pysynyt relevanttina nykypäivään saakka.

Teollisuuden digitalisaatio (Industry 4.0) tarjoaa uusia mahdollisuuksia OEE:n optimointiin. Esimerkiksi IoT-tekniikat, reaaliaikaiset tietojärjestelmät sekä big data -analytiikka mahdollistavat entistä tehokkaamman tiedon keruun ja analysoinnin tuotantoprosesseista, mikä puolestaan tehostaa päätöksentekoa ja ennakoivaa kunnossapitoa (Belaud ym., 2019; Mrugalska & Wyrwicka, 2017). Lean-tuotannon periaatteiden yhdistäminen digitaalisiin työkaluihin auttaa organisaatioita poistamaan hukkan lähteitä, parantamaan tuotannon virtausta ja lisäämään tuotannon joustavuutta (Mrugalska & Wyrwicka, 2017).

Kokonaistehokkuuden parantamisesta seuraa yrityksille monia konkreettisia hyötyjä. OEE:n optimointi voi johtaa merkittäviin kustannussäästöihin vähentyneiden seisonta-aikojen ja materiaalihävikin kautta. Lisäksi parantunut tehokkuus auttaa yrityksiä saavuttamaan paremman toimitusvarmuuden ja reagoitakyvyn kysynnän vaihteluihin. Tehokkuuden lisääntyminen tukee myös ympäristövaikutusten vähentämistä esimerkiksi energiankulutuksen pienentyessä ja raaka-aineiden hyödyntämisen parantuessa (Belaud ym., 2019; Mrugalska & Wyrwicka, 2017).

1.1 Tutkimuksen tausta ja merkitys

Elintarviketeollisuuden tuotantotehokkuuden optimointi on yhteiskunnallisesti merkittävä tavoite, sillä pienetkin parannukset tehokkuudessa voivat kerryttää huomattavia taloudellisia hyötyjä suuren volyymin toimialalla (Cusiatado Palomino ym., 2024). Alan kilpailu on kovaa ja katteet usein matalia, joten ylimääräisten tuotantohäviöiden karsiminen suoraan vahvistaa yritysten taloudellista suorituskykyä. Tutkimukset osoittavat, että alhainen tuottavuus johtaa merkittäviin taloudellisiin menetyksiin ja on kehityksen este, kun taas prosessien tehostaminen lisää tuottavuutta ja vähentää hukkaa. OEE:n systemaattisella parantamisella yritys voi lisätä tuotannon hyötysuhdetta ilman mittavia pääomainvestointeja. Käytännössä tuotetaan enemmän myyntikelpoista tuotetta samalla tai vähemmällä panoksella. Tämä puolestaan parantaa kustannustehokkuutta, mahdollistaa paremman reagoinnin kysynnän vaihteluihin ja parantaa toimitusvarmuutta. Kokonaisuutena tehokkuuden optimointi datan ja analytiikan avulla edistää elintarviketeollisuuden kilpailukykyä: se auttaa yrityksiä pysymään kehityksen kärjessä, hyödyntämään resurssinsa täysimääräisesti ja vastaamaan nykyisiin kestävyiden ja kustannustehokkuuden haasteisiin.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Tämä diplomityö keskittyy kokonaistehokkuuden optimointiin elintarviketeollisuuden tuotannossa data-analytiikan keinoin. Tuotantolinjojen OEE-arvoja analysoidaan systemaattisesti olemassa olevien tuotantodatan pohjalta, jotta saadaan kattava kuva nykytilan tehokkuudesta ja kyetään tunnistamaan merkittävimmät tuotantohäviöiden lähteet. OEE toimii tällöin eräänlaisena diagnostiikkatyökaluna, joka paljastaa missä osa-alueilla (käytettävyys, suorituskyky vai laatu) on eniten parantamisen varaa.

Tutkimuksen konkreettisena tavoitteena on myös asettaa vaatimukset Power BI - pohjaiselle seurantajärjestelmälle OEE-luvun ja sen osa-alueiden reaaliaikaiseen tarkasteluun. Tämä tarkoittaa käytännössä interaktiivista raportointinäköymää, joka

visualisoi jatkuvasti päivittyvät OEE-mittarit ja niiden osa-alueet. Reaaliaikainen ja helposti ymmärrettävä visualisointi tukee päätöksentekoa tuomalla esiin suorituskyvyn vaihtelut ja häiriöt heti niiden ilmetessä. Tällainen järjestelmä toimii johtamisen työkaluna. Se mahdollistaa vertailun eri tuotantolinjojen välillä, auttaa priorisoimaan kehitystoimia ja seuraamaan parannusten vaikutuksia ajassa. Kirjallisuuden mukaan OEE-datan systemaattisella hyödyntämisellä voidaan saavuttaa huomattavia parannuksia tuotantotoiminnassa. Muun muassa tuottavuuden nousua, parempaa laatua, lyhyempiä läpimenoaikoja, korkeampaa saantoa ja kustannussäästöjä on raportoitu organisaatioissa, jotka seuraavat ja analysoivat OEE:tä johdonmukaisesti. Tämä tarkoittaa, että pelkkä OEE:n mittaaminen ei riitä, vaan sen pohjalta on tärkeää toteuttaa jatkuvan parantamisen toimenpiteitä.

Tutkimusta ohjaavat seuraavat pääkysymykset:

1. Mitkä ovat keskeiset syyt OEE:n vaihteluihin tuotantolinjoilla?
2. Mitä menetelmiä voidaan hyödyntää OEE:n parantamisessa?
3. Millä tavoin tuotannon tehokkuuden parannuksia voidaan seurata ja mitata järjestelmällisesti?

Tämä tutkimus keskittyy kahteen eri tuotantolaitokseen, joissa analysoidaan tuotannon kokonaistehokkuutta (OEE) ja sen optimointimahdollisuuksia. Tarkasteltavat tuotantolaitokset eroavat jonkin verran prosesseiltaan ja toimintaympäristöiltään, mikä otetaan huomioon analyysissä.

Tutkimuksen pääasiallinen analyysi perustuu Tehdas 1:n tuotantodataan, jota on tarkasteltu 24 kuukauden ajalta. Tehdas 2:ssa datan kerääminen on aloitettu diplomityön alkaessa, joten tarkastelu kohdistuu niihin kuukausiin, joiden aikana dataa ehtii kertyä riittävästi vertailtavaksi.

Tutkimuksessa keskitytään tuotantodataan perustuvaan analyysiin ja OEE:n kehittämismahdollisuuksien tunnistamiseen. Laatuanalyysi perustuu saatavilla olevaan

tuotantodataan, mutta laatukerroin ei sisälly täysin OEE-laskentaan johtuen datan puutteellisuudesta laadun osalta.

Tutkimuksen ulkopuolelle jäävät laitteistojen fyysiset muutokset, investointiehdotukset ja tuotantoprosessien laaja uudelleenorganisointi. Lisäksi tutkimus keskittyy tuotannon tehokkuuden optimointiin, eikä käsittele raaka-ainehankintaa, logistiikkaa tai jakelua laajemmin.

OEE:n seurantaan kehitetään prototyyppi analyysityökalusta (esim. Power BI), mutta sen varsinainen käyttöönotto ja laajamittainen implementointi jäävät tutkimuksen ulkopuolelle. Lisäksi tutkimuksessa ei tarkastella yksittäisten työntekijöiden suorituskykyä tai organisaatiokulttuurin vaikutusta tuotannon tehokkuuteen, vaan analyysi perustuu pääasiassa dataan pohjautuviin suorituskykymittareihin ja tuotantoprosessin teknisiin tekijöihin.

1.3 Tutkimuksen rakenne

Tämän diplomityön rakenne koostuu teoreettisesta ja empiirisestä osasta.

Ensimmäinen luku sisältää johdannon, jossa esitellään tutkimuksen tausta, tavoitteet ja rajaukset. Johdannossa määritellään tutkimusongelma ja käsitellään OEE:n merkitystä elintarviketeollisuudessa. Lisäksi tarkastellaan tutkimuksen käytännön sovelluksia ja työn vaikutuksia tuotantotehokkuuden parantamiseen.

Toisessa luvussa käsitellään OEE-menetelmän teoriaa ja sen soveltamista tuotantoprosessien parantamiseen. Luvussa määritellään OEE:n keskeiset osa-alueet: käytettävyys, suorituskyky ja laatu. Lisäksi tarkastellaan OEE:hen vaikuttavia tekijöitä tuotantoympäristössä. Luvussa esitellään myös tuotannon kehittämiseen soveltuvia viitekehyksiä, kuten Lean Manufacturing, Six Sigma (DMAIC), Theory of Constraints (TOC) ja Total Productive Maintenance (TPM), joiden avulla tuotantotehokkuutta voidaan parantaa.

Kolmannessa luvussa perehdytään tutkimusmetodologiaan ja käytettyihin analyysimenetelmiin. Luvussa esitellään tutkimuksessa hyödynnetty aineisto, tiedonkeruumenetelmät sekä kvantitatiiviset ja kvalitatiiviset analyysitavat. Luvussa tuodaan esiin tutkimuksen rajoitteet, kuten datan luotettavuus ja vertailukelpoisuus eri tuotantolinjojen välillä.

Tutkielman empiirinen osuus alkaa neljännessä luvusta, jossa analysoidaan nykytila ja tuotannon OEE-lukemat. Luvussa esitetään nykyiset OEE-arvot ja niiden vaihtelut eri tuotantolinjoilla. Analyysi keskittyy keskeisiin tehokkuutta rajoittaviin tekijöihin, kuten voilymin vaihteluun, tuotevaihtoihin, laitteiden suorituskykyyn ja operaattoreiden vaikutukseen.

Viidennessä luvussa esitetään tulokset sekä kehitysehdotukset OEE:n parantamiseksi. Luvussa tarkastellaan, kuinka tuotannosuunnittelua voidaan optimoida tehokkaammaksi, miten ennakoivaa kunnossapitoa voidaan hyödyntää laitteiden suorituskyvyn ylläpitämiseksi sekä miten seurantatyökalu voi tukea jatkuvaa OEE:n kehittämistä. Lisäksi luvussa esitellään toimenpiteiden priorisointi ja arvioidaan niiden vaikutusta.

Viimeisessä luvussa esitetään johtopäätökset ja suositukset. Luvussa tiivistetään tutkimuksen keskeiset löydökset ja arvioidaan niiden vaikutuksia tuotantotehokkuuteen. Lisäksi pohditaan tutkimuksen rajoitteita ja esitetään suosituksia jatkotutkimusaiheiksi, kuten OEE-mittariston kehittämiseksi tai laajemman datan hyödyntämiseksi tuotannon ohjauksessa.

2 OEE ja prosessien parantamisen viitekehukset

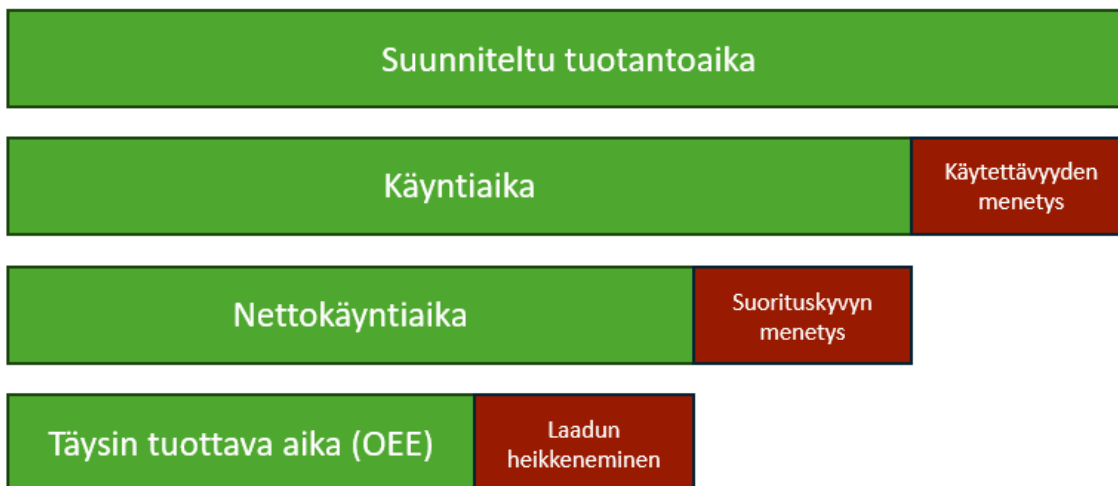
2.1 OEE:n määritelmä ja keskeiset komponentit

Laitteiden kokonaistehokkuus (OEE) on keskeinen suorituskykymittari, jolla mitataan erityyppisiä tuotantohäviöitä ja osoitetaan prosessin parantamisalueita (Muchiri & Pintelon, 2008). Se määritellään kolmen komponentin - käytettävyyden, suorituskyvyn ja laadun – tulona yhtälöllä

$$OEE = Käytettävyys \times Suorituskyky \times Laatu \quad (1)$$

Jokainen OEE:n osa-alue kuvaa tuotantoprosessin tehokkuuteen liittyviä häviöitä, joita voidaan havainnollistaa alla olevan kuvan 1 mukaisesti. Käytettävyys mittaa, kuinka suuren osan suunnitellusta tuotantoajasta laitteet ovat käytössä. Käytettävyysmenetykset syntyvät esimerkiksi odottamattomista seisokeista, huoltokatkoista ja tuotevaihtoihin kuluva ajasta. Kuvassa tämä ilmenee käytettävyyden menetyksenä, joka vähentää suunnitellusta tuotantoajasta käytössä olevaa aikaa. Suorituskyky kertoo, kuinka tehokkaasti koneet toimivat suhteessa niiden maksimikapasiteettiin. Hidastukset ja vajaateholla käyminen laskevat suorituskykyä, mikä näkyy kuvassa suorituskyvyn menetyksenä, joka pienentää nettoaikaa tuotannossa. Laatu mittaa hyväksytyjen tuotteiden osuutta kokonaismäärästä. Vialliset tai uudelleen

työstettävät tuotteet heikentävät OEE:tä, mikä ilmenee kuvassa laadun heikkenemisenä, joka edelleen pienentää täysin tuottavaa aikaa.



Kuva 1. Kokonaistehokkuuden (OEE) muodostuminen suunnitellusta tuotantoajasta: käytettävyyden, suorituskyvyn ja laadun menetykset.

Kuvan mukainen malli havainnollistaa, kuinka kokonaisajasta siirrytään asteittain täysin tuottavaan aikaan, ja miten eri tekijät vaikuttavat OEE-arvon muodostumiseen. Tämä vaiheittainen analyysi on keskeinen työkalu OEE:n optimoinnissa, sillä se auttaa tunnistamaan, missä häviöt syntyvät ja miten niitä voidaan vähentää tehokkuuden parantamiseksi.

OEE-arvojen tulkintaan on olemassa yleisesti hyväksytyt raja-arvot, joiden avulla voidaan arvioida tuotantoprosessin tehokkuuden tasoa. Hansenin (2002) mukaan alle 65 % OEE-arvoa pidetään heikkona ja ei-hyväksyttävänä: tällöin tuotannossa piilee merkittäviä, usein piilossa olevia häviöitä, jotka tulisi välittömästi tunnistaa ja korjata. Välillä 65–75 % sijoittuva OEE-taso on hyväksyttävä vain, mikäli kehitystrendi on selvästi nouseva. Arvojen 75–85 % voidaan katsoa edustavan varsin hyvää suoritustasoa, mutta tällöinkin suositellaan kehittämistoimien jatkamista kohti ylintä tasoa. Hansen esittää, että erävaltaisissa prosesseissa (batch processes) OEE-tavoitteen tulisi olla yli 85 %, diskreeteissä jatkuvissa prosesseissa (continuous discrete) yli 90 %, ja jatkuvasti käynnissä olevissa prosessiteollisuuden prosesseissa (continuous on-stream) jopa yli 95 % (Hansen, 2002).

Visuaaliset seurantajärjestelmät ovat keskeinen osa modernia OEE-hallintaa. Ne tarjoavat reaaliaikaisen näkymän tuotantolinjojen tilaan ja mahdollistavat nopean reagoinnin poikkeamiin. Kuvassa 2 on esimerkki Vorne XL -järjestelmästä, jossa OEE- ja tehokkuusluvut esitetään selkeästi väreillä koodattuna.



Kuva 2. Esimerkki OEE-seurannasta Vorne XL -järjestelmässä (Vorne, ei pvm.)

Jokaiselle linjalle näkyy muun muassa OEE-prosentti, tehokkuus ja hyväksytyjen tuotteiden määrä ("Good Count"). Värikoodien (vihreä, keltainen, punainen) avulla voidaan välittömästi havaita tuotantoon liittyviä ongelmia, kuten materiaalipuutteita tai laitteistovikoja. Tällaiset visuaaliset työkalut tukevat operatiivista johtamista ja jatkuvaa parantamista (*Real-Time Production Monitoring System* | Vorne, ei pvm.)

2.2 OEE:n vaikutustekijät tuotantoympäristössä

Kaikki niin sanottujen "kuuden suuren tappion" (Six Big Losses) lähteet heikentävät OEE:tä (Nakajima, 1988). Näitä ovat (1) laiterikot, (2) asetusten ja säätöjen aiheuttamat menetykset, (3) joutokäynti ja pienet pysähdykset, (4) nopeushäviöt, (5) prosessivirheet ja (6) tuotannon käynnistysvaiheen tappiot. Kukin näistä kohdistuu johonkin OEE:n osa-alueeseen.

Yksi merkittävä tekijä on laitteiden luotettavuus: usein toistuvat laiterikot ja ennakoimattomat seisokit vähentävät suoraan käytettävyyttä (Nakajima, 1988). Heikko luotettavuus johtuu usein puutteellisista kunnossapitokäytännöistä, mikä lisää seisonta-aikaa ja vähentää tuottavaa käyttöaikaa. Siksi tehokkaat kunnossapitostrategiat, kuten ennakoiva ja ennaltaehkäisevä kunnossapito, voivat vähentää laiterikkojen määrää ja kestoa, parantaen näin OEE:n käytettävyysskomponenttia (Hansen, 2002).

Toinen keskeinen tekijä on tuotannon aikataulutus ja asetusten vaihtaminen. Toistuvat tuotannonvaihdot, pitkät asetusten säätöajat tai aikataulutusaukot, kuten materiaalien tai työvoiman epäsynkronointi tuotantosuunnitelman kanssa, aiheuttavat seisokkeja, jotka heikentävät käytettävyyttä. Tekniikat, kuten SMED (Single Minute Exchange of Die), voivat lyhentää asetusaikoja ja siten lisätä käytettävissä olevaa tuotantoaikaa, parantaen OEE:tä (Muchiri & Pintelon, 2008). Lisäksi huono tuotannosuunnittelu voi johtaa laitteiden joutokäyntiin tai materiaalien odottamiseen, mikä aiheuttaa suorituskykytappioita.

Myös prosessien standardointi ja henkilöstökäytännöt vaikuttavat OEE:hen (Sohal ym., 2010). Standardoitujen toimintatapojen puute tai riittämätön koulutus voivat hidastaa tuotantocyklejä ja lisätä laatuvirheitä. Standardoidut työmenetelmät ja jatkuva koulutus vähentävät inhimillisiä virheitä ja prosessivaihtelua, parantaen suorituskykyä ja tuotetaldun tasaisuutta

Laadunvalvontaprosessit ovat myös keskeinen tekijä. Korkea vikaprosentti tai uudelleen-työstön tarve heikentävät OEE:n laatuosuutta. Vahvan laadunvarmistuksen ja juuri-syyanalyysin (kuten Six Sigma -ohjelmien avulla) käyttöönotto voi siten parantaa OEE:tä lisäämällä hyvän tuotannon määrää.

Erytisesti elintarviketeollisuudessa OEE:n optimointiin liittyy erityisiä haasteita, kuten hygieniavaatimukset, raaka-aineiden vaihtelut ja monimutkaiset tuotantoprosessit. Siksi OEE:n parantaminen edellyttää näiden tekijöiden käsittelyä paremmalla kunnossapidolla, tehokkaammilla tuotannonvaihoilla, vakioiduilla prosesseilla ja laadun parantamisella.

2.3 Prosessien parantamisen viitekehykset

OEE:n parantamiseksi organisaatiot hyödyntävät usein vakiintuneita prosessien parantamisen viitekehyksiä. Nämä kehykset tarjoavat jäsenneltyjä lähestymistapoja käytettävyyden, suorituskyvyn ja laadun heikkenemisen taustalla olevien syiden tunnistamiseen ja poistamiseen. Neljä yleisesti käytettyä kehystä ovat Lean Manufacturing, DMAIC (Six Sigma), Theory of Constraints (TOC) ja Total Productive Maintenance (TPM). Kukin tarjoaa erilaisia strategioita, joita voidaan hyödyntää OEE-luvun parantamisessa.

2.3.1 Lean Manufacturing

Lean Manufacturing keskittyy hukkan poistamiseen ja arvon maksimointiin tuotantoprosesseissa (Womack & Jones, 2003). Lean-periaatteet tukevat suoraan OEE:n parantamista, sillä ne kohdistuvat moniin samoihin hävikkeihin, joita OEE seuraa. Esimerkiksi Lean-periaatteiden painotus seisokkihukan poistamiseen ja prosessin virtauksen optimointiin auttaa lisäämään laitteiden käytettävyyttä ja suorituskykyä. Työkalut, kuten 5S (työpaikan organisointi), vähentävät pienten seisokkien ja hidastusten mahdollisuutta.

Lean-ajattelu, joka keskittyy hukkan vähentämiseen, parantaa OEE:n suorituskyky- ja käytettävyysskomponentteja poistamalla arvoa tuottamattomia toimintoja, kuten hitaita

syklejä tai seisokkia. Lean-työkalujen hyödyntäminen on osoittanut konkreettisia tuloksia OEE:n osalta; esimerkiksi Leanin soveltaminen sementinvalmistuksessa vähensi laitteiden rikkoutumisia ja nosti OEE:tä noin 65,6 prosentista 68 prosenttiin poistamalla hukkan ja hävikin lähteet (Hossen Irfan ym., 2025).

Toisessa tapauksessa Lean Six Sigma -hankkeessa voiteluaineiden pullotuslinjalla tunnistettiin vaihtotyöt ja koneiden seisonta-ajat tärkeimmiksi tappiotekijöiksi; soveltamalla SMED:tä vaihtotöihin ja autonomiseen kunnossapitoon seisonta-aikojen vähentämiseksi tiimi nosti OEE:n 48,8 prosentista 66,5 prosenttiin (Mohamad ym., 2020).

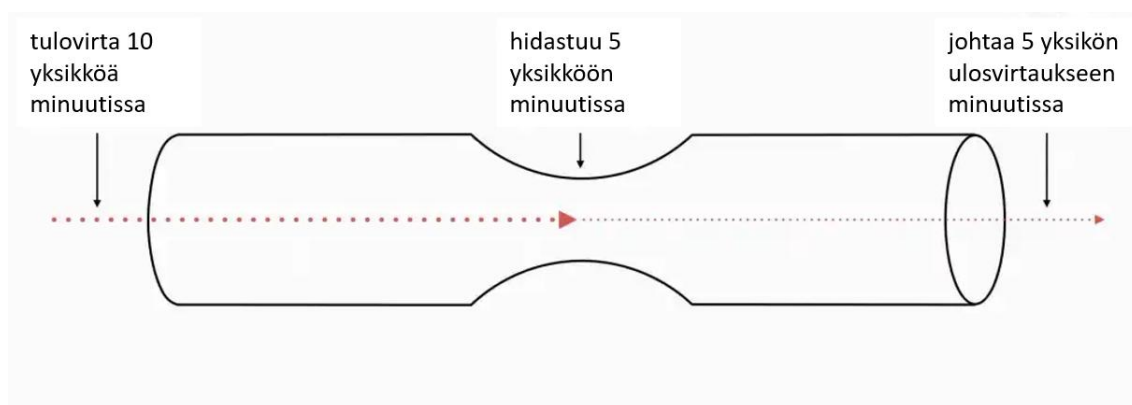
2.3.2 DMAIC – Six Sigma

Six Sigman DMAIC-kehys (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) on järjestelmällinen menetelmä prosessin vaihtelevuuden ja virheiden vähentämiseksi (Basu, 2009). Six Sigman keskittyminen tietoon perustuvaan analyysiin ja perimmäisten syiden poistamiseen täydentää OEE:n parantamista erityisesti laadun ja suorituskyvyn osalta. Määrittele ja mittaa -menetelmän avulla tiimit tunnistavat kriittiset laitteet ja määrittävät OEE:n perustason ja häviömallit (esim. seisokkien tiheys, vikamäärät), jotta ne voivat kohdistaa toimintansa vaikutuksiltaan suurimpiin ongelmiin. Analysointivaiheessa Six Sigma -työkalut, kuten Pareto-kaaviot, syy-seuraus-kaaviot (Ishikawa-kaaviot) ja tilastollinen analyysi, auttavat paikantamaan seisokkien tai vikojen taustalla olevat syyt. Esimerkiksi tietyn toistuvan laitevian tai prosessin poikkeaman, joka aiheuttaa poikkeavia tuotteita. Keskittymällä tietoihin DMAIC-menetelmällä vältetään arvailut ja varmistetaan, että heikon käytettävyyden tai huonon laadun todelliset syyt otetaan huomioon. Parannusvaiheessa toteutetaan ratkaisuja näiden syiden poistamiseksi tai hallitsemiseksi: tämä voi tarkoittaa esimerkiksi huolto-prosessin uudelleensuunnittelua, koneen asetusten muuttamista tai virheiden estämiseen tähtäävän virheenkorjauksen (poka-yoke) käyttöönottoa. DMAIC-kehystä sovelletaan analyysivaiheessa tunnistettaessa suurimmat tehokkuustappiot OEE:n osa-alueilta. Six Sigma -menetelmää hyödyntäneessä tutkimuksessa saavutettiin merkittäviä parannuksia laitteiston kokonaistehokkuudessa (OEE). Flippermoduulin rakenteelliset muutokset johtivat seisonta-ajan vähenemiseen 6,5

prosenttiyksiköllä ja OEE:n nousuun 70 %:sta 80 %:iin. Lisäksi parannus tuotti merkittäviä kustannussäästöjä ja menetelmä otettiin laajemmin käyttöön organisaatiossa (Ng ym., 2014).

2.3.3 Theory of Constraints (TOC)

Theory of Constraints (TOC) on parannusfilosofia, jossa keskitytään järjestelmän ensisijaisen pullonkaulan (rajoituksen) tunnistamiseen ja lieventämiseen kokonaisläpimenon parantamiseksi (Goldratt, 1990). Tuotantokontekstissa TOC määrittää, että tuotantojärjestelmän tuotosta rajoittaa vähintään yksi rajoittava prosessi tai kone; siksi parannuksissa olisi keskityttävä kyseiseen rajoitukseen, jotta saavutettaisiin suurin koko järjestelmän laajuinen vaikutus. TOC:n keskeinen ajatus on, että järjestelmän kokonaiskapasiteetti määräytyy sen heikoimman lenkin eli pullonkaulan mukaan. Tämä tarkoittaa, että tuotannon läpimenoa ei voida nopeuttaa yli sen pisteen kapasiteetin, joka rajoittaa virtausta. Kuvassa 3 on esitetty yksinkertaistettu visualisointi tästä periaatteesta: vaikka järjestelmään syötetään 10 yksikköä minuutissa, pullonkaula hidastaa virtausta, mikä johtaa vain 5 yksikön ulostuloon. Tämä havainnollistaa, kuinka yksi rajoite voi määrittää koko tuotantoprosessin suorituskyvyn.



Kuva 3. Pullonkaulan vaikutus tuotantovirtaan, mukailtu lähteestä: (Forte, 2016)

Kun TOC yhdistetään OEE:hen, se tarjoaa strategisen näkökulman OEE:n parantamistoi-
menpiteiden priorisointiin. Sen sijaan, että resursseja jaettaisiin tasaisesti kaikelle

laitteistolle, TOC ehdottaa pullonkaulalaitteiston suorituskyvyn maksimoimista ensin, sillä siellä saavutetut parannukset lisäävät suoraan koko tuotantolinjan tuotosta. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että pullonkaulakoneen käytettävyys on mahdollisimman korkea, läpimenoaika mahdollisimman lyhyt ja vikojen määrä mahdollisimman pieni - toisin sanoen sen OEE:n optimointia.

2.3.4 TPM

Total Productive Maintenance (TPM) on kokonaisvaltainen kunnossapitofilosofia, jonka tavoitteena on saavuttaa nolla suunnittelematonta seisokkia, nolla virhettä ja nolla tapaturmaa. TPM oli alkuperäinen konteksti, jossa Seiichi Nakajima esitteli OEE:n 1980-luvulla keinona mitata laitteiden tehokkuutta ja tuoda esiin tuottavuushäviöitä (Nakajima, 1988). TPM:n ydinajatus on, että kaikki työntekijät osallistuvat laitteiden ennakoivaan kunnossapitoon niiden koko elinkaaren ajan, mikä vaikuttaa suoraan OEE:n käytettävyys- ja suorituskykykomponentteihin.

Yksi TPM:n tukipilareista on suunniteltu kunnossapito (Nakajima, 1988). Ennaltaehkäisevän huollon ja tarkastusten aikatauluttaminen odottamattomien vikojen välttämiseksi. Parantamalla keskimääräistä vikojen välistä aikaa (MTBF) ja vähentämällä keskimääräistä korjausaikaa (MTTR), TPM lisää koneiden käytettävyyttä.

Toinen keskeinen pilari, autonominen kunnossapito, antaa koneenkäyttäjille valtuudet suorittaa päivittäisiä tarkastuksia, puhdistuksia, voiteluja ja pieniä korjauksia (Nakajima, 1988). Tämä operaattoreiden osallistuminen ei ainoastaan pidä laitteita optimaalisessa kunnossa ja maksiminopeudella käynnissä (parantaen suorituskykyä), vaan myös luo omistajuuden tunnetta, mikä usein johtaa ongelmien varhaisempaan havaitsemiseen (ja siten vikojen ja seisokkien ennaltaehkäisyyn).

TPM:n jatkuva parantaminen (Kaizen) keskittyy OEE:n tunnistamien merkittävien häviöiden järjestelmälliseen poistamiseen yksi kerrallaan monialaisten pienryhmätoimintojen kautta. Esimerkiksi TPM-aloite voi muodostaa tiimin analysoimaan kroonisia lyhyitä pysähdyksiä (kuten jumiutumisia tai syöttöhäiriöitä) pakkauslinjalla ja toteuttamaan

korjauksia, mikä parantaa suorituskykyä. Työssä tarkastellaan TPM-periaatteiden mukaista ennakoivaa kunnossapitoa tuotantotyökalun suorituskyvyn ylläpitämiseksi.

2.4 OEE:n vertailu muihin suorituskykymittareihin

Kokonaistehokkuus (OEE) on merkittävä työkalu tuotannon tehokkuuden arvioinnissa, mutta sen rajoja ja vahvuuksia voidaan ymmärtää paremmin vertaamalla sitä muihin teollisuudessa käytettyihin suorituskykymittareihin. Tässä luvussa tarkastellaan OEE:n asemaa suhteessa muihin mittareihin, korostaen niiden keskinäisiä täydentäviä suhteita erityisesti elintarviketeollisuuden kontekstissa.

2.4.1 TEEP (Total Effective Equipment Performance)

TEEP (Total Effective Equipment Performance) laajentaa OEE:n näkökulmaa mittaamalla laitteiden käyttöastetta 24/7-kalenteriajan perusteella. Sen kaava on:

$$TEEP = OEE \times \frac{\textit{Operating Time}}{\textit{Total Time}}$$

TEEP tarjoaa kokonaisvaltaisemman kuvan resurssien käytöstä, mutta se ei erottele suunniteltuja katkoja (esim. huoltoaikoja) tuotantohäviöistä. OEE:n avulla voidaan kohdentaa parannuksia nimenomaan tuotantoprosessin sisäisiin häviöihin, kun taas TEEP soveltuu strategiseen kapasiteettisuunnitteluun (Muchiri & Pintelon, 2008). Elintarviketeollisuudessa TEEP:ia voidaan hyödyntää arvioitaessa, kuinka tehokkaasti yritys hyödyntää kalenteripohjaista aikaa esimerkiksi jatkuvan tuotannon skenaarioissa.

2.4.2 Prosessisyklin tehokkuus (PCE, Process Cycle Efficiency)

Lean-valmistuksessa käytetty PCE (Process Cycle Efficiency) mittaa arvonnäkökulman osuutta kokonaissykliajasta. Esimerkiksi, jos tuotteen valmistus vie 8 tuntia, mutta arvonnäkökulmasta on vain 30 minuuttia, PCE on 6,25 %. PCE korostaa prosessin virtauksen optimointia, kun taas OEE keskittyy laitteiden tehokkuuteen (Liker, 2021). Näiden

yhdistäminen mahdollistaa sekä resurssien että ajan tehokkaamman hyödyntämisen. Elintarviketeollisuudessa tämä yhdistelmä auttaa vähentämään sekä laitehäviöitä (OEE) että turhaa odotusaikaa (PCE).

2.4.3 MTBF ja MTTR (Mean Time Between Failures / Mean Time to Repair)

MTBF (Mean Time Between Failures) ja MTTR (Mean Time To Repair) ovat keskeisiä kunnossapidon mittareita, jotka kuvaavat laitteiden luotettavuutta ja korjausvalmiutta. MTBF mittaa keskimääräistä toiminta-aikaa ennen seuraavaa vikaa, kun taas MTTR kertoo keskimääräisen ajan, joka kuluu vian korjaamiseen ja tuotantolinjan palauttamiseen toimintakuntoon (Daniewski ym., 2018). Nämä mittarit tarjoavat yksityiskohtaisen näkyvän kunnossapidon suorituskykyyn.

Vaikka OEE mittaa seisokkien, hidastusten ja laatuvirheiden kokonaisvaikutusta tuotantoon, se ei erottele yksityiskohtaisesti vikojen määrää eikä korjausaikoja. Tässä mielessä MTBF ja MTTR täydentävät OEE:tä tarjoamalla syvempää teknistä tietoa laitteiden suoritusvarmuudesta ja kunnossapitostrategioiden tehokkuudesta (Daniewski ym., 2018).

Korkea MTBF yhdistettynä alhaiseen MTTR-arvoon viittaa siihen, että laitteet toimivat pitkään ilman vikoja ja palautuvat nopeasti käyttöön – tämä parantaa käytettävyyttä ja tukee korkeaa OEE-arvoa. Vastaavasti lyhyt MTBF ja pitkä MTTR heikentävät käytettävyyttä ja siten OEE-tasoa. Näiden mittareiden yhdistetty seuranta mahdollistaa tarkemman päätöksenteon tuotantoympäristössä.

2.5 Elintarviketeollisuuden erityispiirteet

Elintarviketeollisuuden tuotantoprosesseissa on useita erityispiirteitä, jotka vaikeuttavat tuotannon tehokkuuden mittaamista, ylläpitämistä ja parantamista verrattuna muihin valmistavan teollisuuden aloihin. Ensinnäkin korkeat hygieniavaatimukset edellyttävät säännöllisiä perusteellisia puhdistusjaksoja (esim. CIP-puhdistus, clean-in-place), mikä vähentää tuotantolinjojen käytettävissä olevaa tuotantoaikaa ja luo väistämättä

suunniteltuja seisokkeja (Moerman ym., 2014). Toiseksi elintarvikkeet ovat pilaantuvia, ja niille asetetut tiukat säilyvyys- ja laatuvaatimukset voivat rajoittaa pitkien valmistuserien tuotantoa, tuotanto on ajoitettava tarkasti pilaantumisen estämiseksi ja laatuvaatimusten saavuttamiseksi (Soman ym., 2004). Lisäksi laaja tuotevalikoima ja pienet eräkoot johtavat tiheisiin tuotevaihtoihin; jokainen vaihto aiheuttaa aikaa vieviä asetusten muutoksia ja edellyttää usein linjan puhdistamista ristikontaminaation välttämiseksi, mikä osaltaan lisää seisona-aikoja ja heikentää tehokkuutta (Soman ym., 2004). Myös raaka-aineiden biologinen vaihtelu on merkittävä haaste: elintarviketuotannossa käytettävien maatalousperäisten raaka-aineiden ominaisuudet vaihtelevat luonnostaan sato-kauden ja tuotantoerien mukaan, mikä vaikeuttaa prosessin vakaana pitämistä ja vaatii jatkuvaa sopeutumista tuotannossa (Bourquard ym., 2022). Nämä tekijät tarkoittavat, että elintarviketeollisuudessa tehokkuuden hallintaan on kehitettävä toimialakohtaisia mittareita ja parannuskeinoja, jotka huomioivat väistämättömät hygieniasta ja laadusta johtuvat tuotantokatkokset.

2.6 Yhteenveto kirjallisuudesta

Kirjallisuuskatsaus osoittaa, että kokonaistehokkuus (OEE) on keskeinen mittari tuotannon suorituskyvyn seuraamiseen ja parantamiseen. Sen kolmikomponenttinen rakenne, käytettävyys, suorituskyky ja laatu, mahdollistaa tuotannon häviöiden systemaattisen tunnistamisen. OEE:n vahvuutena on sen kyky yhdistää erityyppisiä häviölähteitä yhdeksi tunnusluvuksi, joka tukee tuotantoprosessien kokonaisvaltaista kehittämistä.

Prosessien kehittämisen viitekehykset, kuten Lean, Six Sigma, TOC ja TPM, tarjoavat konkreettisia menetelmiä OEE:n parantamiseen eri näkökulmista. Tutkimukset osoittavat, että niiden soveltaminen voi johtaa huomattaviin parannuksiin tuotannon tehokkuudessa ja käyttöasteessa.

Elintarviketeollisuuden kontekstissa OEE:n optimointi kohtaa erityisiä haasteita, kuten hygieniavaatimuksista johtuvat pakolliset seisokit ja tuotevaihtojen suuri määrä. Näihin haasteisiin vastaaminen edellyttää tuotantosunnittelun, kunnossapidon ja datan

hyödyntämisen kehittämistä. Reaaliaikainen OEE-seuranta sekä Lean- ja TPM-viitekehysten yhdistäminen ovat keskeisiä toimenpiteitä tehokkuuden parantamiseksi.

Empiiriset esimerkit osoittavat, että OEE:n systemaattinen mittaaminen ja kehittäminen voivat tuottaa 10-20 % parannuksia tuotantotehokkuuteen. Näiden löydösten pohjalta voidaan todeta, että OEE toimii sekä tilannekuvan tuottajana että jatkuvan parantamisen lähtökohtana, kun se yhdistetään analytiikkaan ja operatiiviseen päätöksentekoon. Tässä työssä esitellyt viitekehykset (Lean, TPM, TOC, Six Sigma) muodostavat myös analyysin teoreettisen perustan. Erityisesti Lean- ja TPM-periaatteita hyödynnetään tuotantosuunnittelun ja kunnossapidon kehitysehdotuksissa.

3 Metodologia

3.1 Tutkimusmenetelmät

3.1.1 Aineiston kuvaus

Tutkimuksessa käytettävä aineisto koostuu kahden tuotantolaitoksen tuotantodatasta, joka on kerätty tuotannonhallintajärjestelmistä. Aineisto kattaa muun muassa tuotantomäärät ja konelinjakohtaiset ajotiedot. Tarkasteltava aikaväli on kaksi vuotta, mikä mahdollistaa pitkän aikavälin trendien tunnistamisen ja tehokkuuden vaihteluiden analysoinnin. Lisäksi tutkimuksessa on hyödynnetty haastatteluja tuotannon työntekijöiden ja esimiesten kanssa, jotta saataisiin syvällisempää ymmärrystä tehokkuuteen vaikuttavista tekijöistä.

3.1.2 Menetelmät

Tutkimuksessa käytetään sekä kvantitatiivisia että kvalitatiivisia menetelmiä. Kvantitatiivinen analyysi perustuu OEE:n laskentaan, jossa huomioidaan käytettävyys, suorituskyky ja laatu. Tilastolliset menetelmät, kuten keskiarvo- ja hajontalaskenta ja regressioanalyysi, auttavat tunnistamaan tehokkuuteen vaikuttavia keskeisiä tekijöitä ja tuotannon vaihteluiden syitä. Kvalitatiivisessa analyysissä hyödynnetään haastatteluja ja haavainnointia, joiden avulla tunnistetaan tuotantoprosessien pullonkauloja ja kehityskoh-
tia.

Tutkimuskysymys	Mitkä ovat keskeiset syyt OEE:n vaihteluihin tuotantolinjoilla?
Tarkasteluyksikkö	Kahden tehtaan tuotantolinjat (OEE-arvot, tuote-erät, operaattorit, tuotantotyökalut)
Menetelmä	Tilastollinen analyysi, korrelaatioanalyysit, tuotantodatasta tehtävät laskelmat (käytettävyys, suorituskyky)
Data	Tehtaan tuotantodata kahdelta vuodelta sekä tuotannon havainnointi ja haastattelut
Tulokset	Tuotevaihdot, pienet eräkoot, matriisin kuluminen ja huollon ajoitus vaikuttavat tehokkuuteen merkittävästi

Tutkimuskysymys	Mitä menetelmiä voidaan hyödyntää OEE:n parantamisessa?
Tarkasteluyksikkö	Tuotantoprosessin eri osa-alueet ja kehittämiskohteet (suunnittelu, kunnossapito, työkalut)
Menetelmä	Lean, TOC, TPM, tuotannon suunnittelun simulointi, kunnossapidon optimointi
Data	Historiallinen tuotantodata
Tulokset	Viikkotason suunnittelu, työkalujen vaihtorytmin säätö ja jatkuva kehittäminen parantavat OEE:tä merkittävästi

3.2 Tutkimuksen rajoitteet

Tutkimukseen liittyy useita rajoitteita, jotka tulee huomioida tulosten tulkinnessa. Ensimmäinen keskeinen rajoite on laadun puutteellisuus, sillä laadun mittaamista ei ole toteutettu tuotantolinjoilla. Tämän takia OEE-laskennassa joudutaan käyttämään vain käytettävyden ja suorituskyvyn komponentteja. Toinen rajoite liittyy tuotantolaitosten välisiin eroihin, kuten laitteistojen ja työvuorojärjestelmien vaihteluun, mikä voi vaikuttaa tulosten vertailtavuuteen. Kolmas merkittävä rajoite on analyysin aikajänne, joka kattaa vain kaksi vuotta tehtaalta 1 ja noin 3 kuukautta tehtaalta 2. Tämä voi rajoittaa havaittujen trendien yleistettävyyttä erityisesti, jos tuotannossa on tapahtunut merkittäviä muutoksia analysoidun ajanjakson ulkopuolella.

4 OEE Analyysi – nykytila

4.1 Yleiskuvaus analysoiduista tuotantolinjoista

Tässä tutkimuksessa analyysin kohteena ovat kaksi erillistä tehdasta, joiden tuotantoprosessit ovat pääosin vertailukelpoisia. Tehtaiden välillä esiintyy kuitenkin eroja muun muassa työvuorojärjestelmissä sekä käytettävissä olevissa resursseissa.

Nykytilan OEE-analyysit perustuvat ensisijaisesti tehtaan 1 tuotantodataan. Tehtaan 2 osalta analyysi pyritään suorittamaan niiltä osin, kuin saatavilla oleva data mahdollistaa vertailun. Näin voidaan tunnistaa mahdollisia yhtäläisyyksiä ja eroja tehtaiden välillä sekä arvioida, missä määrin havaintoja voidaan yleistää laajemmin.

Työvuorojärjestelmä eroaa kahden tehtaan välillä. Tehtaalla 1 työvuorot noudattavat kolmivuorojärjestelmää arkipäivisin, jolloin vuorot kestävät 8 tuntia. Viikonloppuisin tuotanto on epätasaista ja riippuu kysynnän mukaan määritellystä kuormituksesta. Tehtaalla 2 puolestaan käytössä on 12 tunnin työvuorot, joita tehdään viikon jokaisena päivänä.

Molemmilla tehtailla on neljä tuotantolinjaa, mutta tuote-eroista ja laite-eroista johtuen ne eivät ole suoraan vertailukelpoisia datan pohjalta. Havaintoja voidaan kuitenkin hyödyntää molempien tehtaiden analysoinnissa ja kehitysehdotusten muodostamisessa. Analyysissa tehtaalta 1 on huomioitu vain arkipäivien data, sillä viikonlopun epätasainen tuotanto ei ole suoraan verrannollinen arkipäivien tuotantoon.

4.2 OEE-laskennan periaatteet ja rajoitukset

Kokonaistehokkuuden (OEE) laskennassa on tarkasteltu tuotantolinjojen käytettävyyttä ja suorituskykyä toteuman perusteella. Tarkastelujaksona on käytetty kahden vuoden tuotantodataa, jonka perusteella on pyritty määrittämään kunkin linjan tehokkuus suhteessa suunniteltuun tuotantoaikaan ja toteutuneisiin kapasiteetteihin.

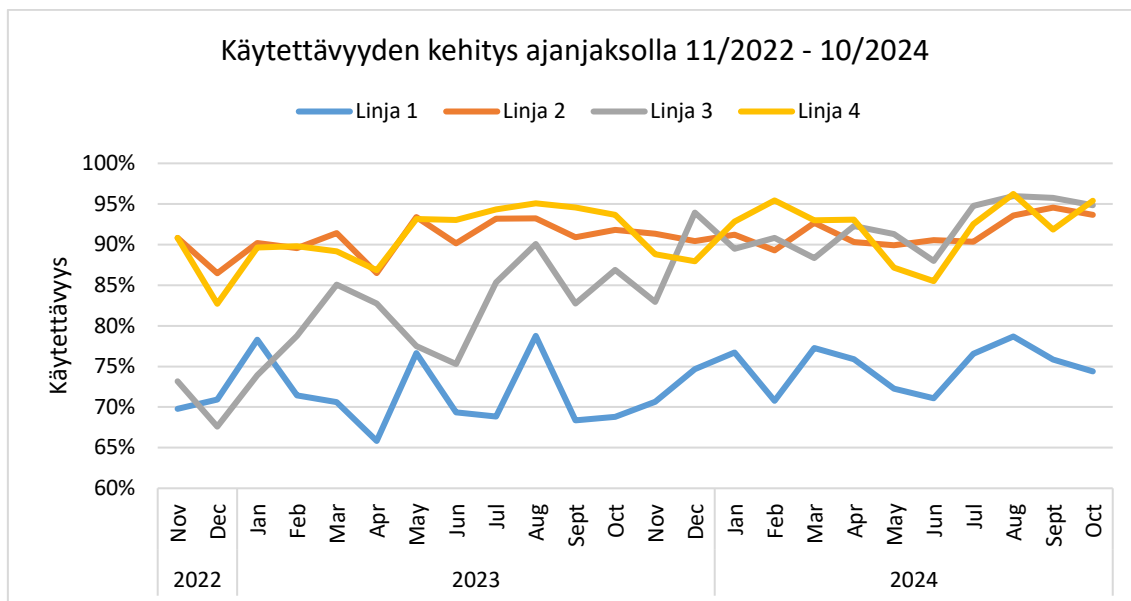
Koska laatukerroin ei ole tarkasti määritettävissä päivittäisellä tai linjakohtaisella tasolla, OEE-laskennassa on käytetty kaavaa

$$OEE = \text{Suorituskyky} \times \text{Käytettävyys} \quad (2)$$

Jatkossa olisi suositeltavaa kehittää tarkempi tapa laadun mittaamiseen, jotta OEE-laskennasta saataisiin kattavampi kuva tuotannon kokonaistehokkuudesta.

4.2.1 Käytettävyys

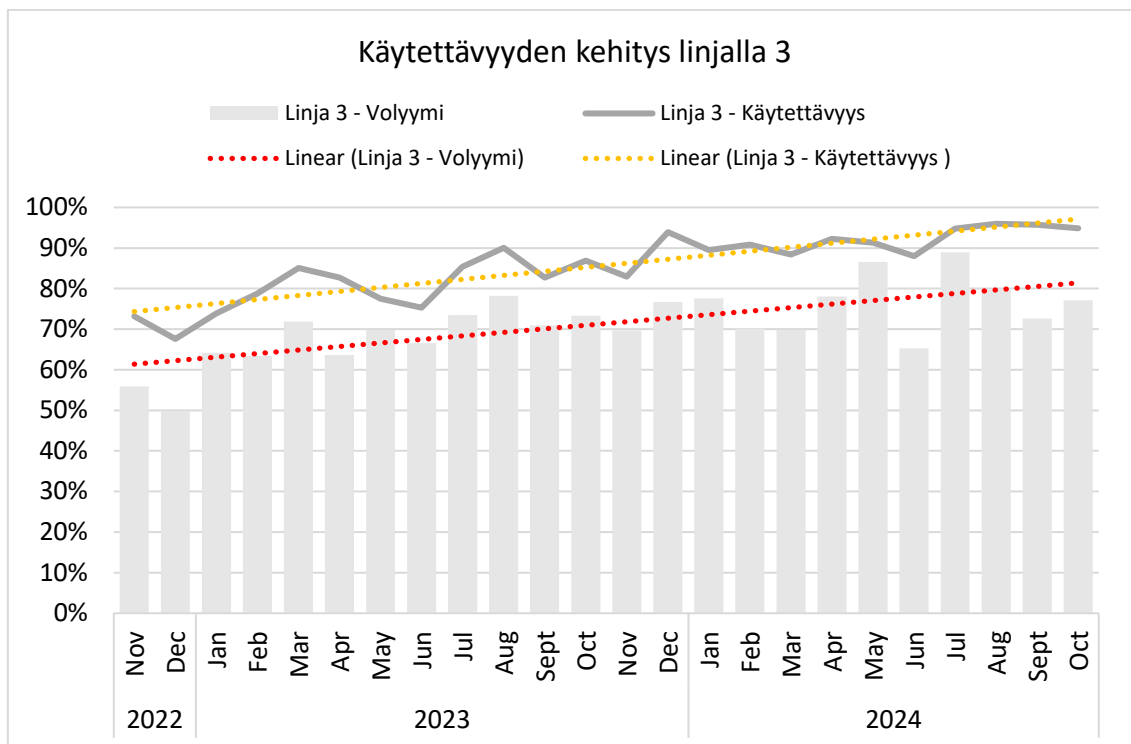
Käytettävyys mittaa sitä, kuinka suuren osan suunnitellusta tuotantoajasta laitteet ovat toiminnassa. Tässä tapauksessa suunniteltu tuotantoaika on määritelty 24/5-järjestelmän mukaan, eli laitteiden oletetaan olevan käytettävissä ympäri vuorokauden arkipäivisin. Käytettyyteen vaikuttavat tuotantokatkokset, tuotevaihdot, kunnossapidon vaatimat seisokit sekä suunnittelemattomat häiriöt. Kuviossa 1 esitetään neljän tuotantolinjan käytettyyden kehitys tarkastellulla ajanjaksolla. Linjojen käytettyydessä on merkittäviä eroja sekä ajallisesti että linjoittain, mikä heijastaa tuotantorakenteen ja valmistettävien tuotteiden eroja.



Kuvio 1. Käytettävyyden kehitys tehtaalla 1 ajanjaksolla 11/2022-10/2024

Kuviossa 1 linja 1 (sininen viiva) erottuu selvästi heikommalla käytettävyydellään, pysytellen pääosin 65–80 % välillä. Tämä linja valmistaa vähemmän tuotteita, joiden tuotantomäärät ovat pienempiä, ja siinä käytössä oleva tuotantotyökalu estää samojen tuotteiden valmistamisen kuin muilla linjoilla. Tästä syystä, vaikka volyymin kasvu on nostanut muiden linjojen käytettävyyttä, linjan 1 käytettävyys on pysynyt suhteellisen samalla tasolla koko tarkastelujakson ajan.

Linjalla 3 havaitaan myös käytettävyyden kasvua pitkällä aikavälillä, mutta tämä kehitys korreloi käytännössä ainoastaan tuotantovolyymin kasvun kanssa, kuten kuviosta 2 nähdään.



Kuvio 2. Käytettävyyden kehitys linjalla 3

Kuviossa näkyy selkeä positiivinen trendi sekä käytettävyyden että tuotantovolyymin osalta tarkastelujaksolla. Trendiviivat osoittavat, että molemmat muuttujat ovat kasvaneet tasaisesti ajassa, mikä viittaa siihen, että suuremmat tuotantomäärät parantavat linjan käytettävyyttä. Tämä tukee havaintoa, että käytettävyyden nousu ei johdu prosessien tehostumisesta, vaan tuotannon paremmasta kuormittumisesta ja vähentyneistä seisokeista suhteessa käytettävään aikaan.

4.2.2 Suorituskyky

Suorituskyky on laskettu suhteuttamalla tuotantolinjan toteutunut ajonopeus sen **realistiseen maksimikapasiteettiin**, joka on määritetty kahden vuoden tuotantodatan perusteella linjoittain. Näin ollen suorituskykyluku ei perustu teoreettiseen maksimikapasiteettiin, vaan toteutuneeseen tuotantonopeuteen, mikä antaa realistisemmän kuvan tuotannon tehokkuudesta. Todellisen maksimikapasiteetin

määrittäminen vaatisi tuotekohtaiset koeajot, joiden avulla selvitetäisiin jokaisen tuotteen optimaalinen tuotantonopeus.

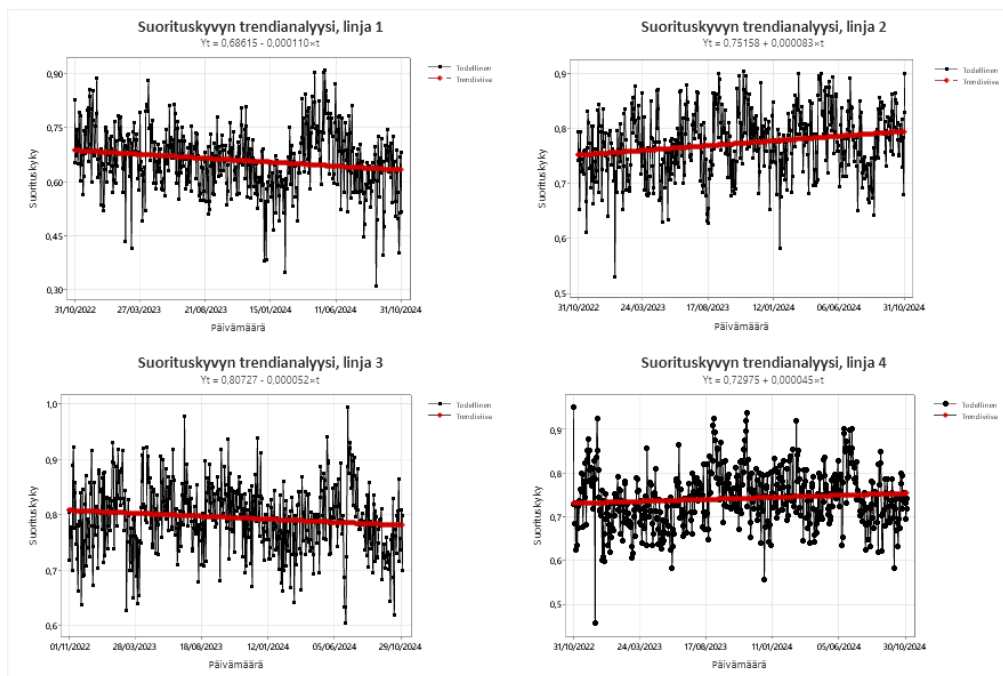
$$\text{Suorituskyky} = \frac{\text{Toteutunut nopeus}}{\text{Maksiminopeus}} \quad (3)$$

Painotettu suorituskyky on laskettu linjakohtaisesti päivätasolle, erän määrän mukaan painottaen

$$\text{Painotettu suorituskyky} = \frac{\sum_i (\text{Erän määrä}_i \times \text{Suorituskyky}_i)}{\text{Kokonaisvolyymi}} \quad (4)$$

Painotettu suorituskyky tarkoittaa tuotannon tehokkuuden mittaamista siten, että suuremmat tuotantoerät vaikuttavat laskentaan enemmän kuin pienemmät. Tämä tehdään kertomalla kunkin erän suorituskyky sen määrällä ja jakamalla näiden tulojen summa kokonaisvolyymilla. Tällainen laskentatapa antaa realistisemmän kuvan koko linjan tehokkuudesta, sillä suurten erien vaikutus näkyy tuloksessa paremmin. Menetelmää käytetään, koska yksittäisten pienten erien suorituskykytasot eivät kuvaa koko linjan toimivuutta luotettavasti. Painottamalla estetään se, että satunnaiset poikkeamat vääristävät kokonaiskuvaa. Tämä auttaa tunnistamaan tuotantolinjan todellisen suorituskyvyn ja

vertailemaan eri linjoja keskenään oikeudenmukaisemmin. Kuvassa 4 on esitetty painotetun suorituskyvyn kehitys, joka perustuu tähän logiikkaan.



Kuva 4. Päivittäisten suorituskykylukujen trendianalyysi neljällä tuotantolinjalla 24 kuukauden ajalta.

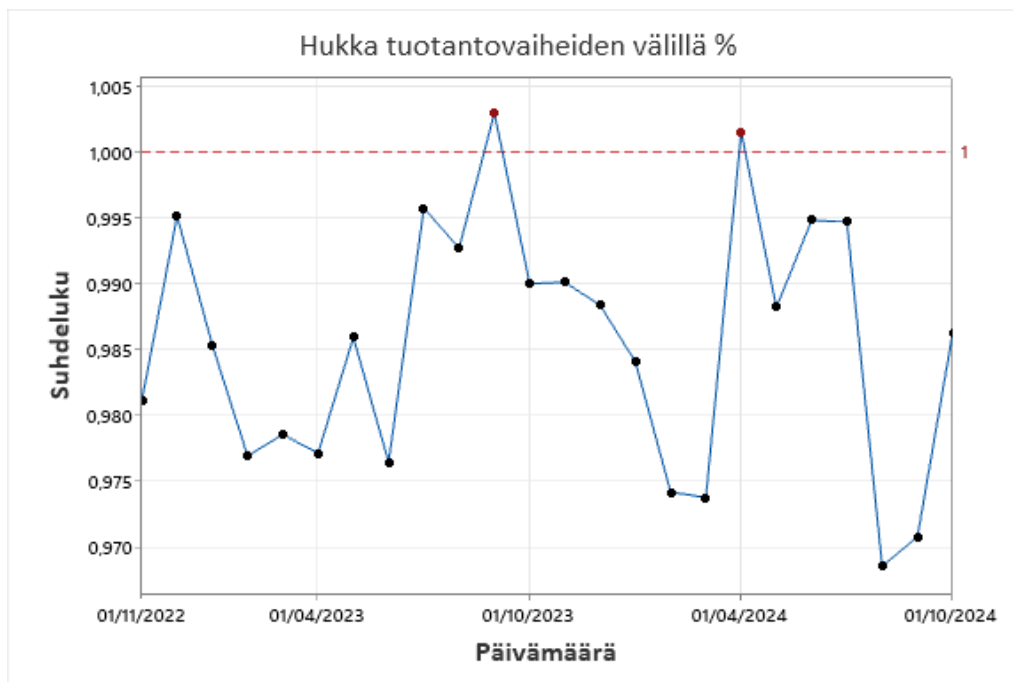
Kuva 4 esittää painotetun suorituskyvyn kehitystä neljällä eri tuotantolinjalla aikavälillä 11/2022–10/2024. Kuvasta nähdään, että suorituskyvyssä esiintyy selviä eroja linjojen välillä ja ajallisesti. Linja 1 erottuu muista selvästi matalammalla suorituskyvyllä lähes koko tarkastelujakson ajan, mikä viittaa joko teknisiin rajoitteisiin tai tuotantoprosessiin liittyviin ongelmiin. Vaikka linjalla 1 ajettavien tuotteiden keskinopeus on alhaisempi kuin muilla linjoilla, ei tämä yksin selitä havaittua suorituskyvyn eroa, sillä suorituskyky on laskettu suhteessa kyseisen linjan maksimikapasiteettiin. Mahdollisena selityksenä voi olla se, ettei linjaa ole tarpeen ajaa maksiminopeudella, koska linjan 1 tuotteille ei ole yhtä suurta kysyntää kuin muiden linjojen tuotteille. Lisäksi linjan 1 tuotantotyökalua vaihdetaan harvemmin, mikä voi johtaa suurempaan kulumiseen ja tätä kautta suorituskyvyn heikkenemiseen ajan myötä.

Muiden linjojen suorituskyky vaihtelee, mutta yleisesti niiden taso pysyttelee korkeammalla, välillä 65–80 prosentin välillä.

4.2.3 Laatu

Laatukerointa on pyritty määrittämään tunnistamalla tuotantohävikkiä kahden peräkkäisen tuotantovaiheen välillä. Koska saatavilla oleva data sisältää epävarmuuksia, laatukerointa on tarkasteltu vain kuukausitasolla, jotta sen vaikutuksia voidaan arvioida yleisemmällä tasolla.

Kuvassa 5 esitetty suhdeluku on laskettu vertaamalla peräkkäisten tuotantovaiheiden välisiä tuotantomääriä. Tällä kertoimella pyritään kuvaamaan, kuinka suuri osa ensimmäisen vaiheen tuotannosta siirtyy läpi seuraavasta vaiheesta ilman hävikkiä. Ensimmäisen vaiheen tuotantoa ei kuitenkaan voida luotettavasti yhdistää yksittäisiin toisen vaiheen tuotantoeeriin, mikä rajoittaa tarkemman, esimerkiksi linjakohtaisen analyysin tekemistä.



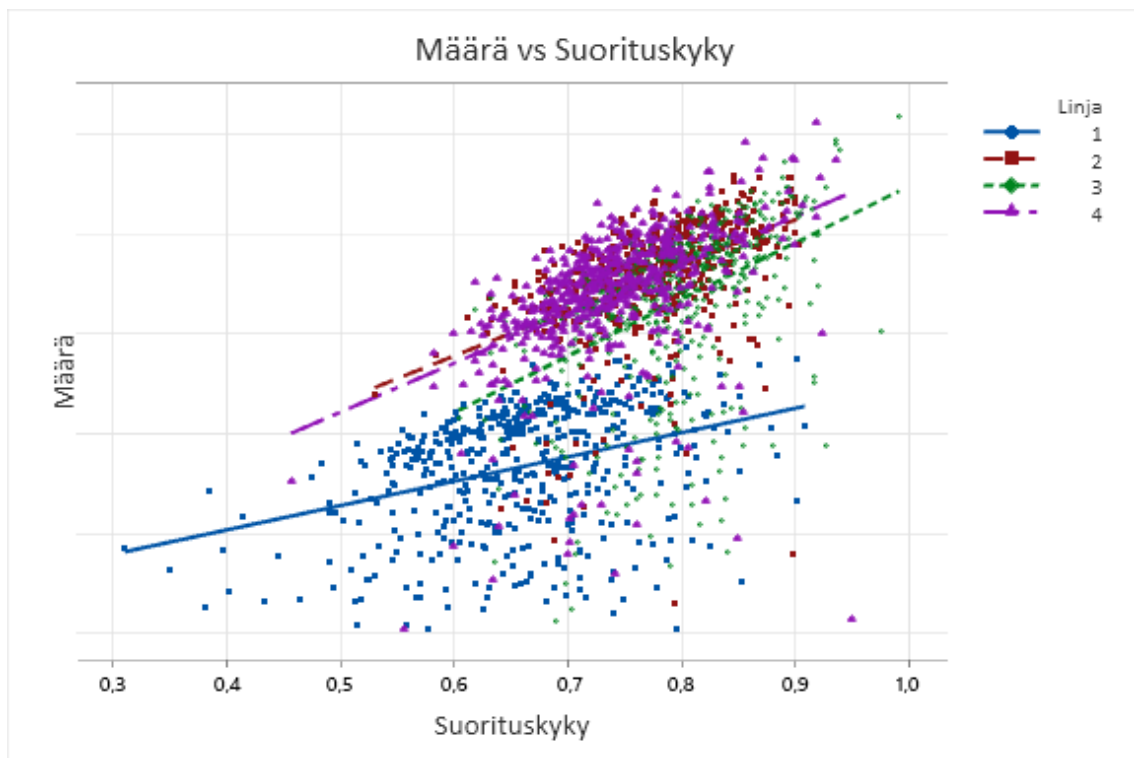
Kuva 5. Tuotantovaiheiden välillä esiintyvien volyymin suhdeluku, kuvastaa prosessissa tapahtuvaa hukkaa.

Lisäksi datan epäluotettavuus ilmenee tilanteissa, joissa jälkimmäisestä tuotantovaiheesta on raportoitu suurempi tuotantomäärä kuin ensimmäisestä. Näistä esimerkkinä kuvassa kaksi kuukautta, jolloin suhdeluku on yli 1. Näiden syiden vuoksi laatukerrointa ei ole sisällytetty OEE-laskentaan tässä tarkastelussa.

4.3 Volyymin vaikutus tuotannon tehokkuuteen

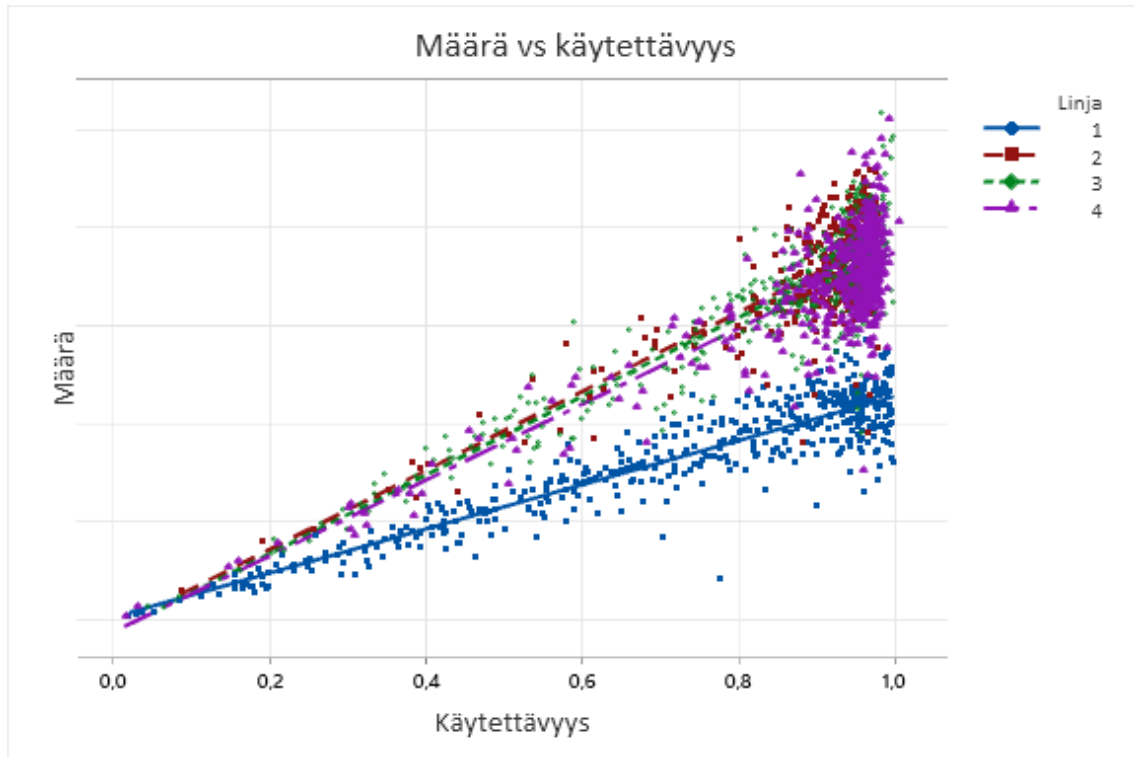
Yksi merkittävä havainto tuotantodatan analysoinnista on volyymin ja tehokkuuden välinen positiivinen yhteys. Päivinä, jolloin tuotantolinjoilla on korkeampi tuotantomäärä, myös kokonaistehokkuuden (OEE) osatekijät käytettävyys ja suorituskyky paranevat. Tuotannon käytettävyys paranee suuremman volyymin päivinä, mikä selittyy pääasiassa kahdella tekijällä: vähentyneillä tuotantokatkoilla ja paremmalla linjaston kuormituksella. Kun tuotantolinjoilla on enemmän ajettavaa, laitteiden pysähdyksiä ja tuotevaihtoja on vähemmän suhteessa kokonaisuikaan, mikä nostaa käytettävyyslukua. Tämä korostaa tuotantokapasiteetin tehokasta hyödyntämistä suurten erien valmistuksessa.

Korkeamman volyymin päivinä on havaittavissa myös suorituskyvyn paraneminen. Tämä voi johtua useista syistä, kuten optimaalisemmista linjanopeuksista, vähemmistä käynnistys- ja säätövaiheista sekä operatiivisen toiminnan sujuvuudesta. Kun tuotanto pyörii tasaisemmin, prosessit vakautuvat ja tuotantonopeus saadaan ylläpidettyä korkeammalla tasolla. Seuraavat kuvaajat havainnollistavat volyymin ja tehokkuuslukujen välistä positiivista yhteyttä.



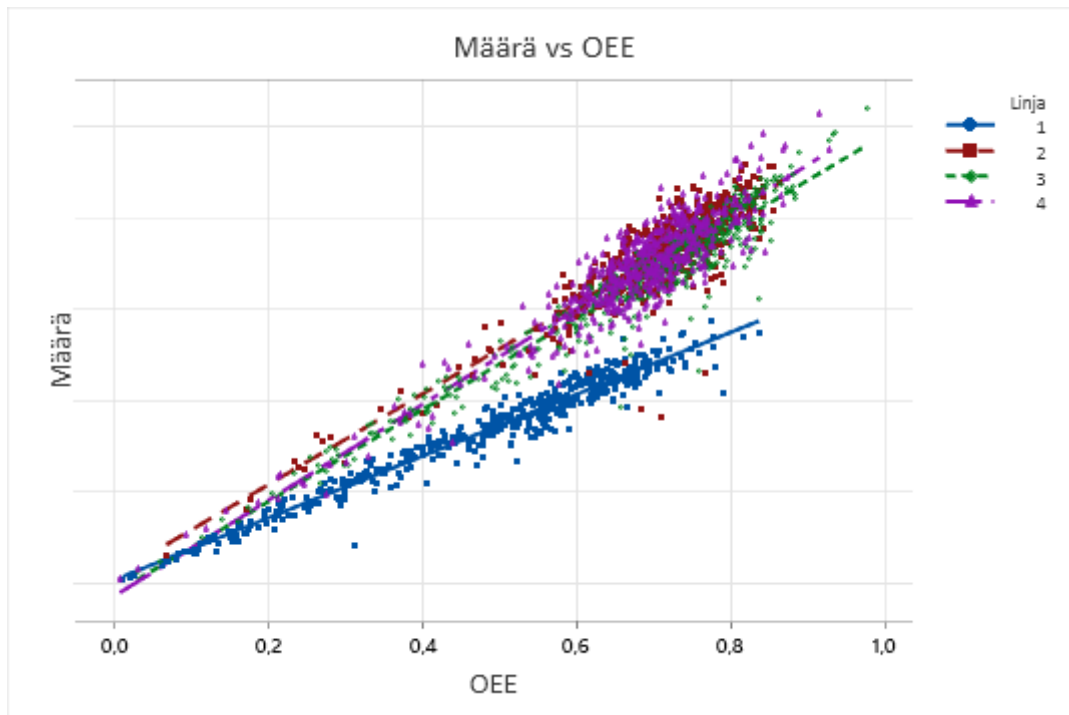
Kuva 6. Tuotantomäärä päivätasolla suhteessa suorituskykyyn, linjoittain

Kuva 6 esittää jokaisen tuotantolinjan havaintoja, joissa x-akselilla on suorituskyky ja y-akselilla saman päivän kokonaismäärä. Suuremmat pistejoukot oikealla yläkulmassa viittaavat siihen, että korkean suorituskyvyn päivinä on myös ajettu kokonaisuudessa suurempia määriä. Linjoilla 2, 3 ja 4 nähdään selkeästi nouseva lineaarinen yhteys, kun taas linja 1 poikkeaa muista selvästi matalammilla määrillä ja hajanaisemmalla jakaumalla, johtuen pääosin tuoterajoitteista linjalla.



Kuva 7. Tuotantomäärä päivätasolla suhteessa käytettävyyteen, linjoittain

Kuva 7 osoittaa volyymin yhteyttä käytettävyyteen. Näissä hajontakuivissa havaitaan lineaarinen korrelaatio erityisesti linjoilla 2–4. Kun päivän aikana on ajettu suurempi määrä, myös käytettävyys on ollut korkeampi. Tämä on loogista, sillä suuremmilla tuotantomäärillä linjat ovat käytössä pidempään sekä pystytään vähentämään suhteellisesti seisokkien ja tuotevaihtojen osuutta ajasta. Linja 1 jää jälleen muista jälkeen, mikä voi viitata sen käyttörajoitteisiin ja siihen, että se toimii lähinnä linjana erikoistuotteille.



Kuva 8. Tuotantomäärä päivätasolla suhteessa OEE-lukuun, linjoittain

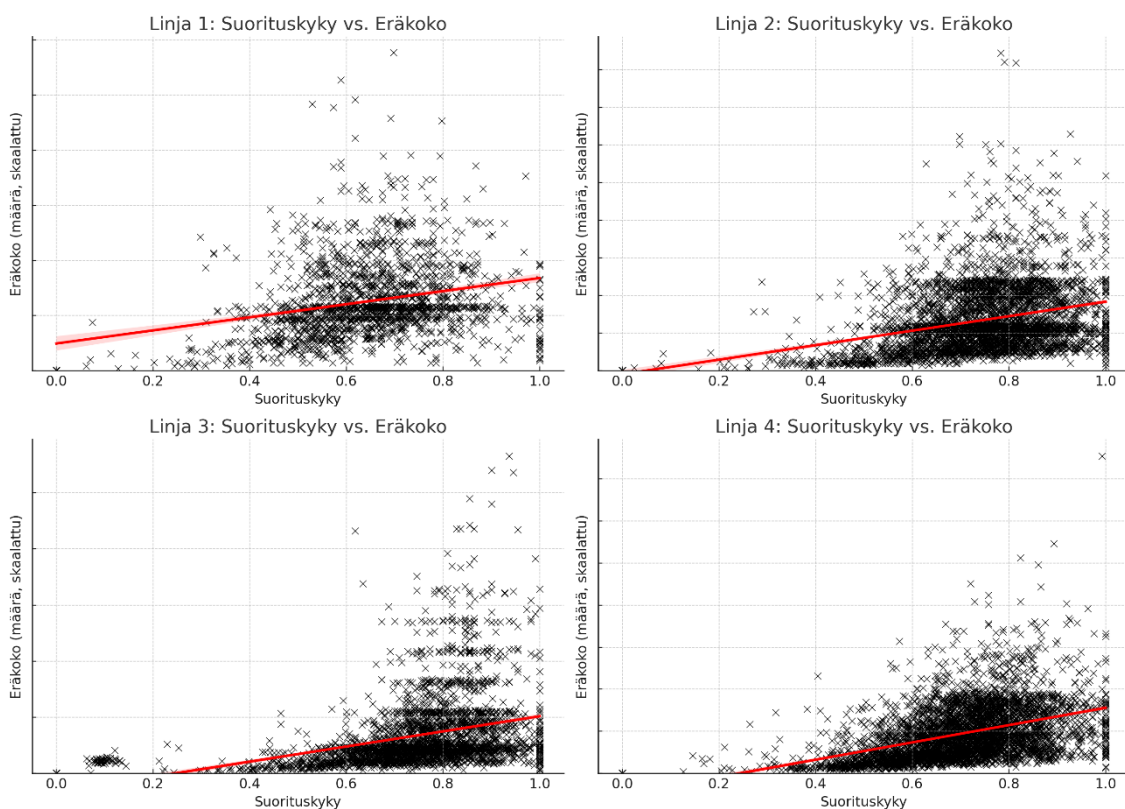
Kuva 8 yhdistää suorituskyvyn ja käytettävyyden yhteisvaikutuksen: OEE:n kasvaessa myös päivän kokonaismäärä kasvaa. Tässä korrelaatio on selkeä: tehokkaamman päivän aikana linja tuottaa enemmän, mikä tukee OEE:n käyttökelpoisuutta kokonaissuorituksen mittarina. Linjat 2–4 noudattavat melko samankaltaista regressiota, mutta linja 1 jää jälleen jälkeen, mikä liittyy sen alhaiseen käytettävyyteen, kuten aiemmin havaittiin.

Kokonaisuutena näistä kuvaajista voidaan päätellä, että korkeampi tuotantomäärä liittyy parempaan tehokkuuteen. Korkean volyymin päivät mahdollistavat tasaisemman toiminnan, vähentävät ajon aloitus- ja lopetusvaiheita suhteellisesti ja parantavat sekä käytettävyyttä että suorituskykyä ja siten myös OEE:tä. Nämä havainnot tukevat ajatusta siitä, että tuotannon suunnittelua tulisi optimoida viikkotasolla suurempien erien ja pidempien ajojen saavuttamiseksi.

4.3.1 Eräkoon vaikutus suorituskykyyn

Tässä kappaleessa tarkastellaan eräkoon ja tuotantolinjojen suorituskyvyn välistä yhteyttä. Lähtöoletuksena on, että suuremmilla eräkoilla on positiivinen vaikutus suorituskykyyn, sillä pienemmät erät aiheuttavat suhteellisesti enemmän häiriöitä, asetusajoja ja siirtymiä tuotannossa. Analyysi toteutettiin vertaamalla tuotantoerä ja niihin liittyviä suorituskykyprosentteja neljällä eri tuotantolinjalla. Tarkastelu perustuu toteutuneeseen tuotantodataan, ja se toteutettiin eräkohtaisella tasolla, jossa jokainen havainto sisältää erän koon ja vastaavan suorituskyvyn.

Alla kuvassa 9 on esitetty scatterplot-kuvaajina jokaisen tuotantolinjan osalta eräkojen ja suorituskyvyn välinen yhteys. Punainen regressioviiva havainnollistaa lineaarisen yhteyden suuntaa ja vahvuutta.



Kuva 9. Tuotantolinjojen suorituskyvyn ja eräkoon suhde

Scatterplot linjalle 1 osoittaa lievän positiivisen korrelaation. Suuremmat eräkoot näyttävät tuottavan hieman parempia suorituskyvyn arvoja, ja etenkin pienimmistä eristä on havaittavissa heikoimpia suorituskykylukuja. Myös linjalla 2 nähdään lievä positiivinen yhteys. Regressiosuora nousee hieman, ja pisteiden jakauma tukee oletusta, että suuremmat erät voivat johtaa tehokkaampaan tuotantoon. Linjalla 3 yhteys on hieman vahvempi kuin kahdella edellisellä linjalla. Spearmanin korrelaatio osoittaa kohtalaista yhteyttä, mikä viittaa siihen, että suurempia eräiä seuraa parempi suorituskyky. Selvin yhteys havaittiin linjalla 4, jossa sekä Pearsonin että Spearmanin korrelaatiokertoimet olivat korkeimmat. Kuvasta näkyy selkeä nouseva trendi, ja pienet eräkoot näyttävät liittyvän matalampaan suorituskykyyn, kun taas suuremmat eräkoot yltyvät lähelle maksimaalista suorituskykyä.

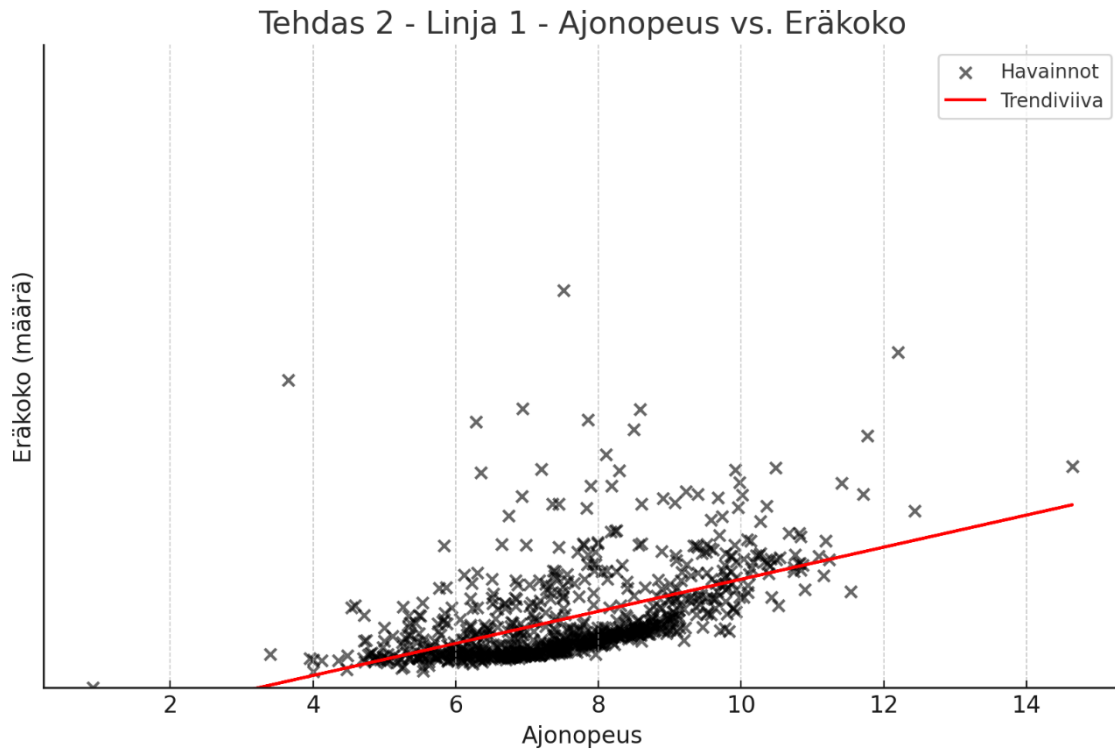
Taulukko 1. Linjojen eräkokojen ja suorituskyvyn väliset korrelaatiokertoimet ja p-arvot

Linja	Pearson r	p-arvo	Spearman p	p-arvo
1	0.252	< 0.001	0.293	< 0.001
2	0.297	< 0.001	0.303	< 0.001
3	0.329	< 0.001	0.458	< 0.001
4	0.427	< 0.001	0.484	< 0.001

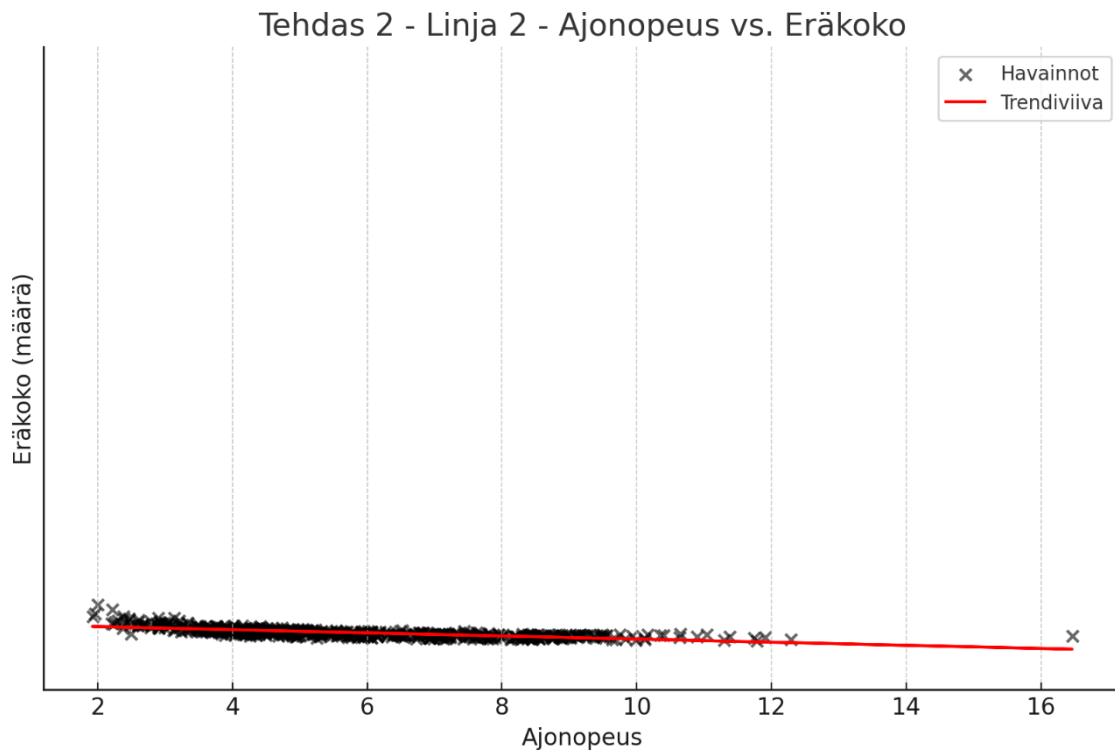
Korrelaatiotulokset osoittavat, että eräkoon ja suorituskyvyn välillä on tilastollisesti merkitsevä positiivinen yhteys kaikilla linjoilla. Pearsonin korrelaatiokertoimet viittaavat lievään tai kohtalaiseen lineaariseen yhteyteen, ja Spearmanin ρ tukee tätä tulosta järjestyksellisen riippuvuuden osalta. Merkittävin yhteys havaittiin linjalla 4, mikä voi viitata siihen, että kyseinen linja hyötyy erityisesti pidemmistä eristä.

Kuvista 10, 11 ja 12 nähdään, että tehtaan 2 linjoilla esiintyy selkeitä eroja eräkoon ja ajonopeuden välisessä suhteessa. Kuvassa 10, joka kuvaa linjaa 1, havaitaan selvä positiivinen trendi: suuremmat eräkoot näyttävät liittyvän korkeampaan ajonopeuteen. Tämä vastaa havaintoja tehtaan 1 linjoilta ja tukee oletusta, että suuret eräkoot parantavat tuotannon suorituskykyä. Samansuuntainen ilmiö on havaittavissa myös kuvassa 12,

joka esittää linjan 3 tuloksia. Myös siinä suurempi määrä korreloi yleisesti ottaen korkeampien nopeuksien kanssa, mikä viittaa tehokkaampaan tuotantoon pidemmillä ajosarjoilla.

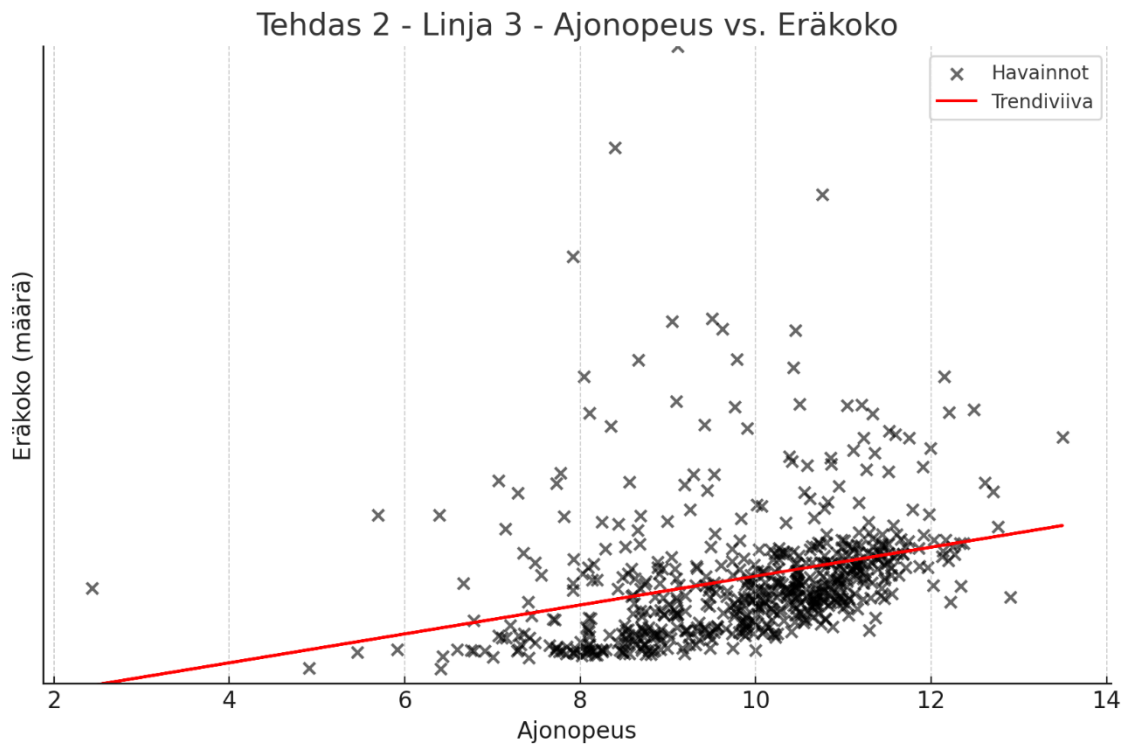


Kuva 10. Tehdas 2 - Linja 1: Eräkoon ja ajonopeuden välinen suhde. Kuvaajassa havaitaan lievä positiivinen korrelaatio, mikä viittaa siihen, että suuremmat eräkoot johtavat keskimäärin korkeampaan ajonopeuteen.



Kuva 11. Tehdas 2 - Linja 2: Eräkoon ja ajonopeuden välinen suhde. Eräkoot ovat tällä linjalla pienempiä, eikä niiden ja nopeuden välillä havaita positiivista yhteyttä.

Sen sijaan kuvassa 11 esitetty linja 2 poikkeaa muista linjoista. Tässä tapauksessa eräkoot ovat keskimäärin pienempiä ja niillä ei näytä olevan positiivista vaikutusta ajonopeuteen. Itse asiassa trendiviiva osoittaa lievää laskevaa suuntaa, mikä viittaa siihen, että suuremmat erät eivät paranna ja saattavat jopa heikentää tuotantonopeutta tällä linjalla. Tämä viittaa mahdollisesti linjakohtaisiin erityispiirteisiin, kuten tuoterakenteeseen tai laitteiston ajettavuuteen, joiden vuoksi eräkoon kasvattaminen ei johda vastaavaan tehokkuuden parantumiseen kuin muilla linjoilla. Tämä korostaa tarvetta tarkastella tehokkuutta ja kehitystoimenpiteitä linjakohtaisesti.



Kuva 12. Tehtas 2 - Linja 3: Eräkoon ja ajonopeuden välinen suhde. Kuvaaja osoittaa positiivista korrelaatiota, mikä tukee oletusta siitä, että pidemmät tuotantoerät parantavat tuotantolinjan nopeutta.

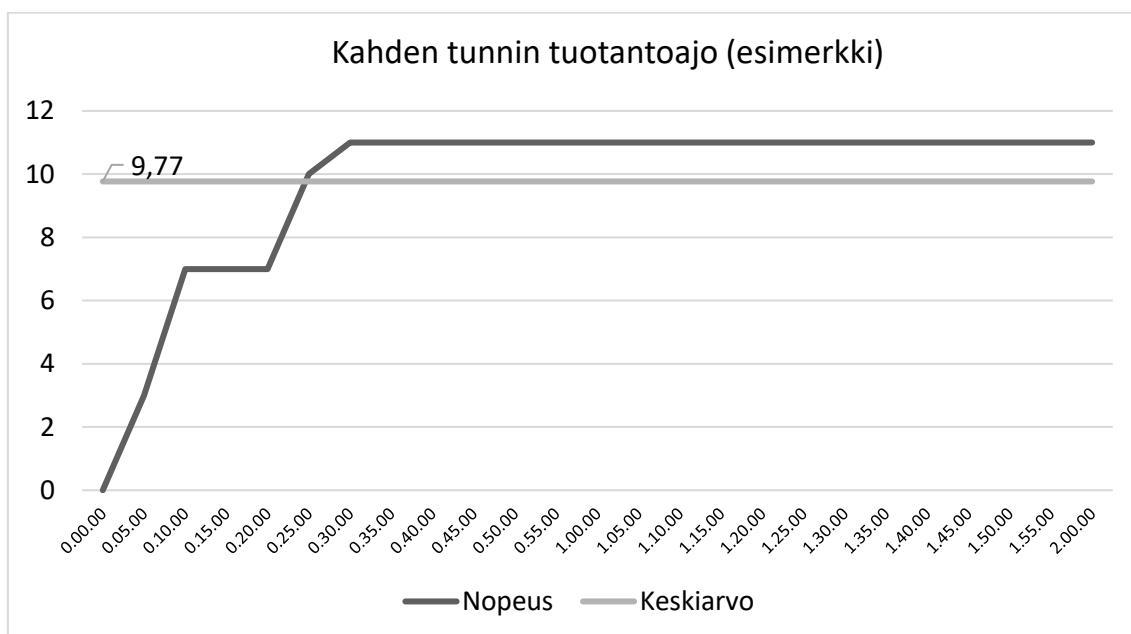
On kuitenkin tärkeää huomioida, että tässä tarkastelussa käytettiin ajonopeutta mittarina, kun taas aiemmassa tehtaan 1 analyysissä vertailtiin eräkokoja suoraan linjakohtaiseen suorituskäyttöprosenttiin. Tämä ero voi vääristää tuloksia, sillä ajonopeus ei ota huomioon kunkin linjan realistista maksimikapasiteettia. Tehtaan 2 osalta tavoitenopeutta ja tätä kautta suorituskäyttöä ei ole määritetty, koska käytettävissä oleva data kattaa huomattavasti lyhyemmän ajanjakson kuin tehtaalla 1.

4.4 Tuotevaihdot ja niiden merkitys

Tuotannon tehokkuuteen vaikuttavista tekijöistä yksi keskeisimmistä on tuotevaihtojen määrä ja niiden vaikutus käytettävyyteen sekä suorituskäyttöön. Nykyisessä tuotantomallissa suunnittelu tapahtuu päivätasolla, mikä tarkoittaa, että kunkin päivän tarpeet määrittävät valmistettavat erät. Tämä johtaa usein pienempiin tuotantoeriin, mikä puolestaan lisää tuotevaihtojen määrää tuotantolinjoilla.

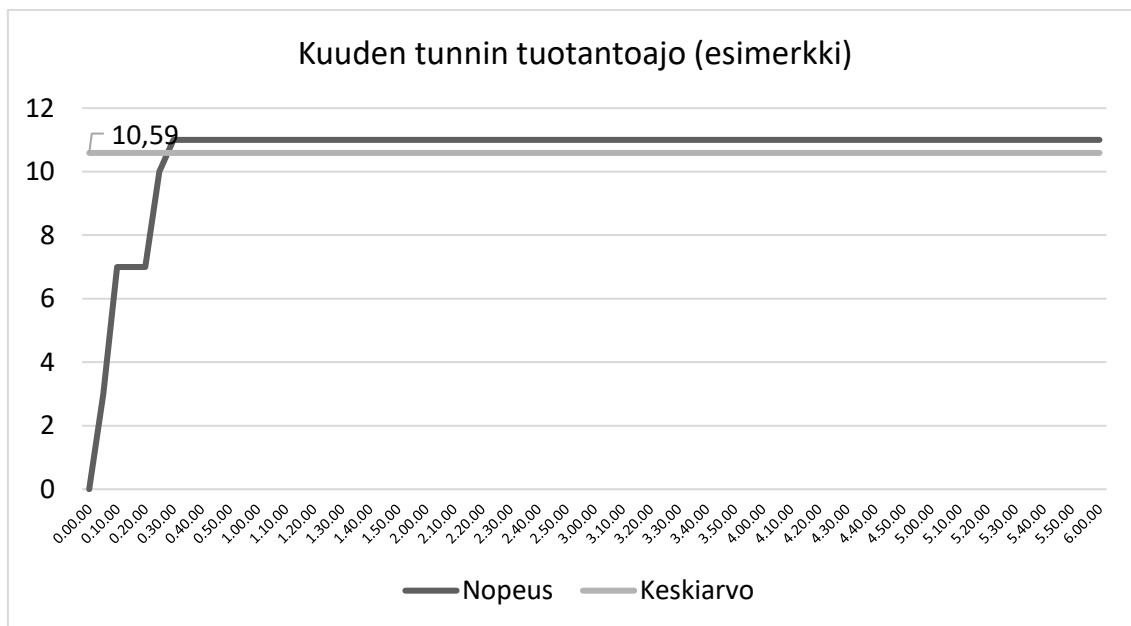
Tuotevaihtojen lisääntyminen heikentää sekä **käytettävyyttä** että **suorituskykyä**.

Jokaisen tuotantolinjan ajo vaatii keskimäärin 15–30 minuuttia ennen kuin lopullinen ajonopeus saavutetaan. Tämä johtaa siihen, että erän kokonaisajonopeus jää alhaisemmaksi, sillä osa tuotantoajasta kuluu tehottomampaan vaiheeseen. Mitä useammin tuote vaihtuu, sitä suurempi osuus kokonaisajasta kuluu tuotantovauhdin vakautumiseen, mikä laskee linjan suorituskykyä. Huomioitavaa on, että tämä 15–30 minuutin ajonopeuden saavuttamiseen kuluva aika ei perustu tilastolliseen dataan, vaan se on havaittu tuotannon tarkkailun yhteydessä. Alla kuvioissa 3 ja 4 on kuvattu käynnistysvaiheiden vaikutusta eri pituisiin tuotantoajoihin.



Kuvio 3. Esimerkki nopeuden kehityksestä käynnistysvaiheessa kahden tunnin tuotantoajossa

Kuviossa 3 on esitetty kahden tunnin tuotantoajon nopeuden kehitys. Esimerkin data perustuu havainnoituun tuotantoajoon, joka on kerätty manuaalisesti kirjaamalla nopeuden kehitys linjalla. Vaikka nopeus on tasaisesti tasolla 11 suurimman osan ajosta, keskiarvo jää alle 10 alun kiihdytysvaiheen takia.



Kuvio 4. Esimerkki nopeuden kehityksestä käynnistysvaiheessa ja sen vaikutuksesta kuuden tunnin tuotantoajossa

Kuviossa 4 on käytetty vastaavaa käynnistysvaiheen nopeuden kehitystä, kuin kuvassa 4, mutta tuotantoajoa, eli eräkokoja, on kasvatettu. Tällöin tuotantoajo kestää 6 tuntia, ja huomataan, että nopeuden keskiarvo on 10,59. Tämä on 8,4 % suurempi kuin kahden tunnin esimerkissä. Tästä huomataan käynnistysvaiheen huomattava vaikutus tuotannon keskinopeuteen, etenkin lyhyissä ajoissa, ja tapauksissa, joissa operaattori ei ole välttämättä ollut aktiivisesti nostamassa nopeutta.

Useat tuotevaihdot lisäävät ajon keskeytyksiä, sillä linjan täytyy pysähtyä tuotteen vaihdon ajaksi. Tuotevaihtoihin on arvioitu kuluvan keskimäärin 30 minuuttia. Lisäksi tietyissä tapauksissa linjan puhdistus on välttämätöntä, mikä pidentää katkojen kestoja. Näiden seurauksena käytettävyys heikkenee, sillä tuotantolinjat eivät ole yhtäjaksoisesti tuotannossa koko vuorokauden ajan.

Kun tuotanto on pirstaleista ja erät pieniä, kokonaistehokkuus laskee. Jokainen tuotevaihto lisää ajon vaihtelua ja tuottamatonta aikaa, mikä vähentää

tuotantokapasiteetin hyödyntämistä. Tämä näkyy suoraan OEE-luvussa, sillä sekä käytettävyys että suorituskyky jäävät optimitasoa alhaisemmiksi.

Tuotevaihtojen vaikutusta tehokkuuteen voidaan vähentää optimoimalla tuotannosuunnittelua pidemmällä aikavälillä, esimerkiksi viikkotasolla, jolloin suurempia tuotantoeriä voitaisiin ajaa kerralla ja vaihtojen määrä vähenisi. Tämän ilmiön tilastollinen tarkastelu auttaa ymmärtämään, kuinka paljon tuotevaihdot heikentävät OEE:tä ja millä toimenpiteillä niiden vaikutusta voitaisiin minimoida.

4.5 Operaattoreiden vaikutus

Analysoitaessa eri operaattoreiden suorituskykyä ja keskinopeutta havaitaan, että erot operaattorien välillä ovat varsin pieniä. Taulukossa 1 on esitetty suorituskyvyn ja keskinopeuden keskiarvo tarkasteluajanjaksolta. Suorituskyvyn vaihtelu suurimmasta pienimpään on 1 prosenttiyksikön luokkaa (71,1 % - 72,1 %), mikä osoittaa, että tuotannon suorituskyky on suhteellisen tasainen eri työntekijöiden välillä. Keskinopeudessa vaihtelu on hieman suurempaa, mutta edelleen melko vähäistä, 1,7 prosenttiyksikköä (7,05–7,17).

Taulukko 2. Keskiarvot operaattoreiden suorituskyky- ja keskinopeusluvuista tarkasteluajanjaksolta.

Operaattori	Suorituskyky	Keskinopeus
1	72,1 %	7,17
2	71,5 %	7,11
3	71,5 %	7,07
4	71,3 %	7,08
5	72,0 %	7,10
6	72,0 %	7,12
7	71,6 %	7,08
8	71,7 %	7,07
9	71,1 %	7,05

Vaikka erot ovat tilastollisesti pieniä, ne voivat viitata hienovaraisiin eroihin työskentelytavoissa, kokemuksessa tai prosessinhallinnassa. Joillakin operaattoreilla saattaa olla tehokkaampia toimintatapoja esimerkiksi tuotannon sujuvuuden varmistamisessa tai laitteiston käytössä. Tähän voi vaikuttaa myös kappaleessa 4.4. kuvattu ilmiö, jossa käynnistysvaiheen nopeuden kehitys vaikuttaa kokonaisnopeuteen. Tällöin aktiivisemmin ja nopeammin nopeutta tavoitetasolla nostavat operaattorit saavuttavat paremman suorituskyvyn. Toisaalta mahdolliset vaihtelut voivat liittyä myös työvuorokohtaisiin tuotantolosuhteisiin, kuten raaka-aineiden saatavuuteen tai koneiden toimivuuteen.

4.6 Tuotantotyökalun vaihto ja suorituskyky

Tuotantotyökalun vaihdot vaikuttavat linjastojen käytettävyyteen ja suorituskykyyn, sillä se aiheuttaa tuotantokatkoksia ja rajoittaa tuotantokapasiteetin hyödyntämistä. Vaihdot tapahtuvat joko rikkoutumisista johtuen tai osana suunniteltuja kunnossapidon huoltotoimenpiteitä.

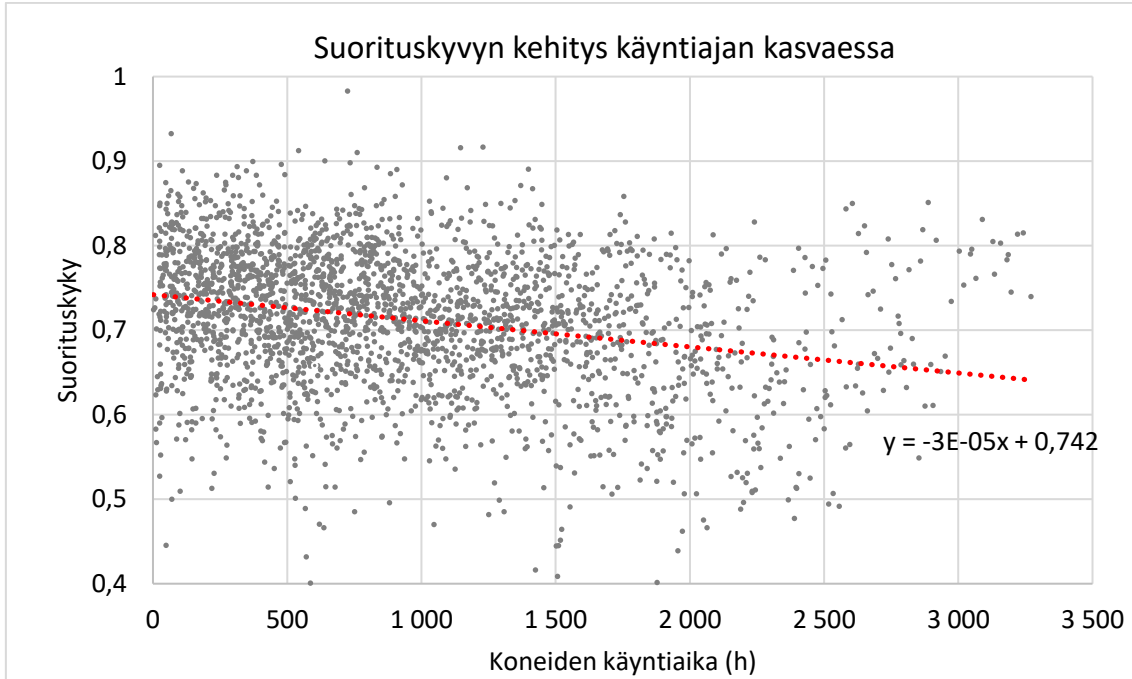
Tuotantotyökalun vaihtoväli on vaihdellut tarkastellulla ajanjaksolla linjakohtaisesti seuraavasti: Linjalla 1 keskimäärin 195 päivän välein, linjalla 2 keskimäärin 58 päivän välein, linjalla 3 keskimäärin 105 päivän välein ja linjalla 4 keskimäärin 91 päivän välein. Linjan 1 vähäisen volyymin takia työkalun vaihtoväli on paljon suurempi kuin muilla linjoilla.

Taulukossa 3 esitetyt luvut kuvaavat kunkin tuotantolinjan ajettuja tunteja ennen tuotantotyökalun vaihtoa. Pitkät tuotantoajat työkalun vaihtojen välillä voivat viitata työkalun hyvään toimintaan ja prosessin vakauteen, mikä mahdollistaa tehokkaan tuotannon ilman tarpeettomia keskeytyksiä. Lyhyet tuotantoajat voivat olla merkki ennakoimattomista häiriöistä, kuten työkalun rikkoutumisista tai muista tuotantokatkoksista, jotka heikentävät kokonaistehokkuutta.

Taulukko 3. Tuotantotyökalujen käyttötunnit linjoittain ennen vaihtoa

Linja 1 (h)	Linja 2 (h)	Linja 3 (h)	Linja 4 (h)
2897	1759	1868	1880
2905	1775	2224	1900
2510	955	2240	2061
2524	1064	3271	2075
	1116	760	2062
	1127	1948	2076
	1457	1964	1737
	1478		1539
	586		
	868		
	880		
	1306		

Kuviossa 5 on esitetty tuotannon suorituskykyä työkalun käyttöajan suhteessa. Suorituskyky on laskettu päivätason keskiarvona linjakohtaisesti. Kuvan perusteella voidaan havaita, että lineaarinen trendi osoittaa laitteiston suorituskyvyn heikkenevän käyntiajan kasvaessa. 1600 käyttötunnin kohdalla suorituskyky on laskenut noin 5 %. Tämän perusteella voidaan todeta, että laitteiston kunnossapito vaikuttaa merkittävästi tuotannon tehokkuuteen.



Kuvio 5. Suorituskyvyn kehitys tuotantotyökalun käyntiajan kasvaessa. Kaikki linjat 24 kuukauden ajanjaksolta.

Kuviossa 5 nähdään kunnossapidon vaikutus suorituskykyyn. Lineaarisen trendiviivan kulmakerroin kertoo, että suorituskyky heikkenee keskimäärin 0,003 % yksikköä per käyttötunti. Tämä tarkoittaa siis 4,5 % suorituskyvyn laskua 1500 käyttötunnin kohdalla.

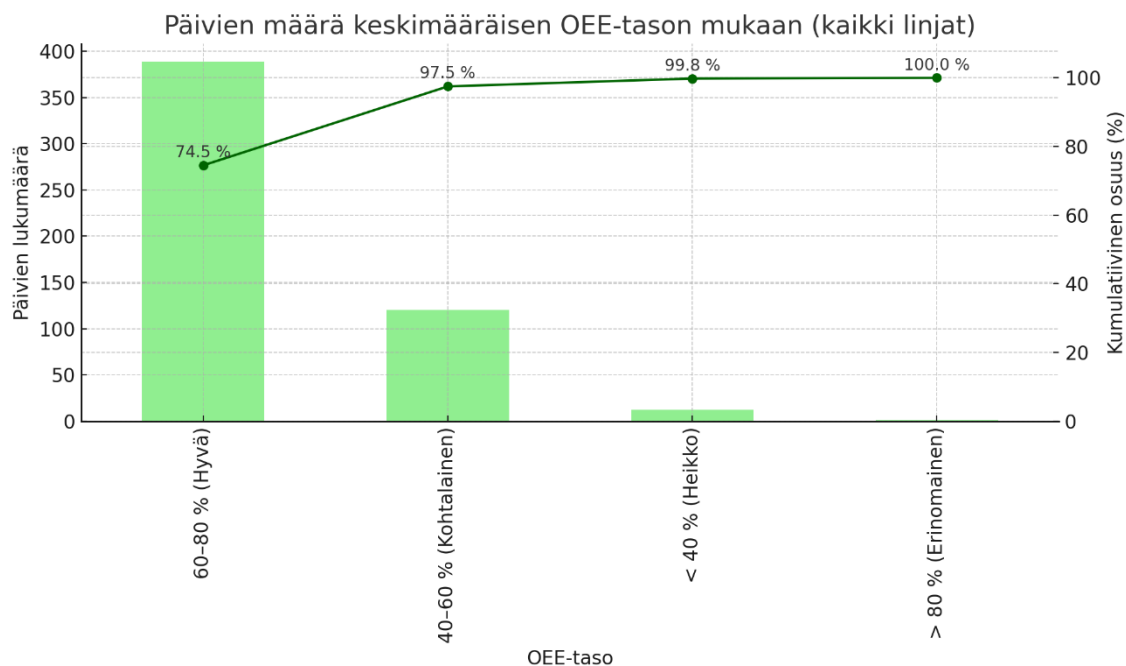
Haastattelujen perusteella vaihtoprosessi kestää normaalisti **4–6 tuntia**, jonka ajan tuotantolinja on kokonaan poissa käytöstä. Tämä vaikuttaa suoraan tuotantolinjojen käytettävyyteen ja sitä kautta kokonaistehokkuuteen.

Linja 1:n käytettävyys on huomattavasti muita linjoja alhaisempi, sillä sen nykyinen tuotantotyökalu ei mahdollista samojen tuotteiden valmistusta kuin muilla linjoilla. Tämä rajoittaa linjan monikäyttöisyyttä ja aiheuttaa tuotannosuunnitteluun haasteita.

Mahdollinen ratkaisu olisi tarkastella tuotantotyökalun vaihtoa tietyissä tilanteissa tasaamaan kuormaa muilta linjoilta. Tämä mahdollistaisi linjan hyödyntämisen laajemmin eri tuotteiden valmistuksessa ja lisäisi käytettävyyttä.

4.7 Päivittäisten OEE-arvojen jakauma

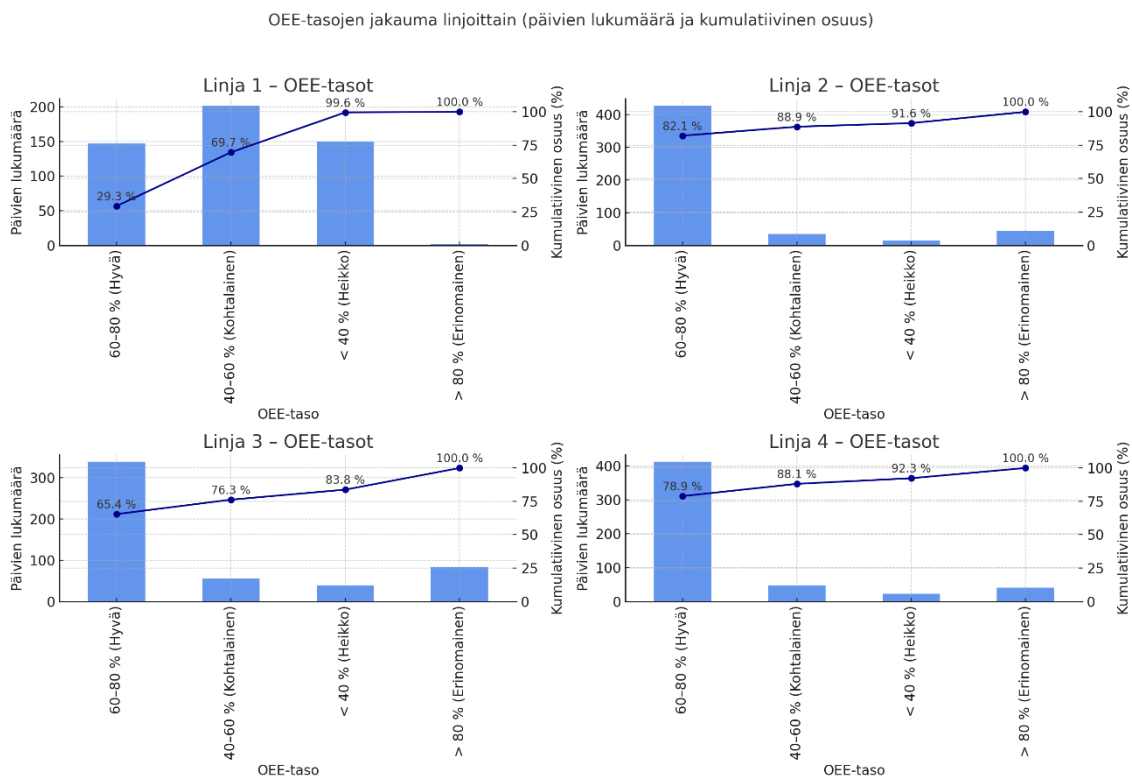
Päivittäisten OEE-arvojen keskiarvo neljältä tuotantolinjalta tarjoaa selkeämmän kokonaiskuvan tuotannon kokonaissuorituskyvystä. OEE-tasojen jakautuminen ja kumulatiivinen tarkastelu on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Päivien lukumäärä keskimääräisen OEE-tason mukaan kaikilta tuotantolinjoilta sekä kumulatiivinen osuus. Suurin osa päivistä sijoittuu hyvälle (60–80 %) tasolle.

Kun OEE:t laskettiin linjojen keskiarvona kullekin päivälle, suurin osa päivistä sijoittui 60–80 prosentin välille, mikä luokitellaan hyväksi tasoksi. Vain pieni osa päivistä ylitti 80 prosentin rajan, joka edustaa erinomaista tuotannon tehokkuutta. Vastaavasti alle 40 prosentin OEE-päiviä oli vain vähän, mikä viittaa siihen, että tuotanto toimii pääosin kohtalaisella tai hyvällä tasolla. Kumulatiivinen analyysi osoittaa, että noin 80 prosenttia päivistä saavutti vähintään kohtalaisen tason (> 40 %), mikä vahvistaa, että tuotannossa on saavutettu kohtuullisen tasainen suorituskyky.

Kun tarkastellaan tuotantolinjoittain päivittäisten OEE-arvojen jakaumaa (Kuva 14), havaitaan, että linja 1 poikkeaa selvästi muista tuotantolinjoista.



Kuva 14. Linjakohtaiset OEE-tasojen jakaumat

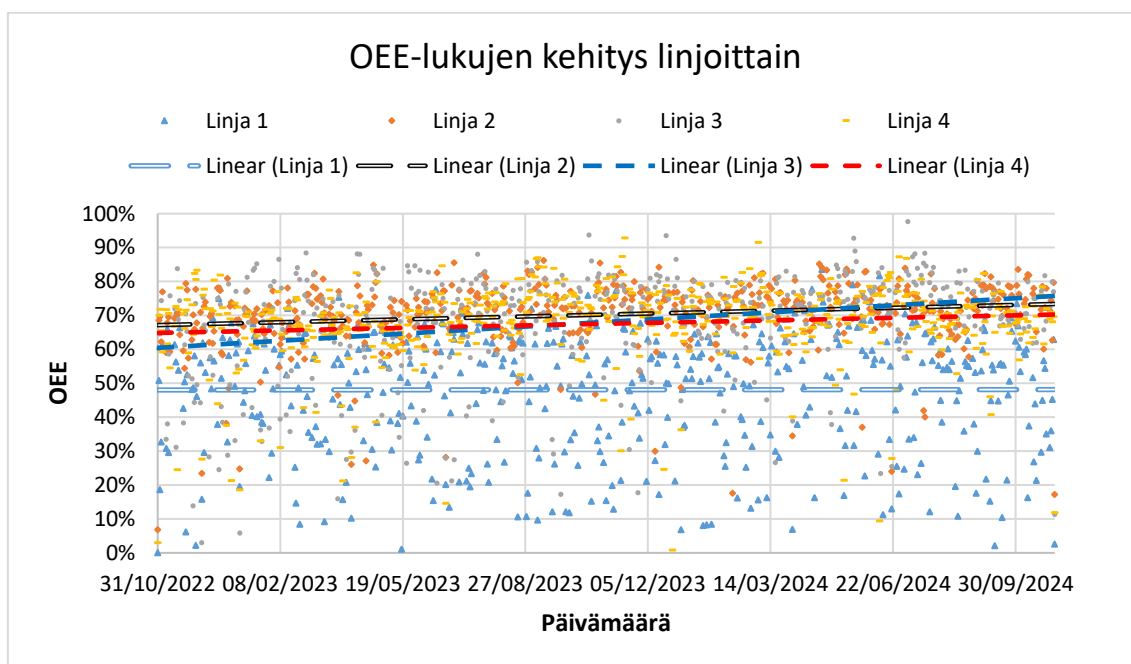
Linjalla 1 päivistä huomattava osa sijoittuu alle 60 prosentin tasolle, ja vain hyvin pieni osa saavuttaa erinomaisen suorituskyvyn (> 80 %). Toisin kuin linjalla 1, linjat 2–4 osoittavat keskenään hyvin samankaltaista jakaumaa: suurin osa päivistä sijoittuu hyvälle tasolle (60–80 %), ja myös erinomaisten päivien osuus on selvästi korkeampi.

Linjan 1 poikkeava jakauma on ymmärrettävä tuotantoteknisestä näkökulmasta, sillä kyseisellä linjalla valmistetaan erityyppisiä tuotteita, joiden tuotantosykli poikkeavat muista linjoista. Tämä näkyy erityisesti käytettävyyden alempana keskiarvona, mikä vaikuttaa suoraan OEE-tulokseen. Näin ollen linjan alempi suorituskyky ei välttämättä viittaa suoraan ongelmiin tuotannossa, vaan kuvastaa enemmän linjan erityisluonnetta ja tuotannollisia reunaehtoja.

4.8 OEE-lukujen kehitys 11/2022–10/2024

Tässä kappaleessa tarkasteltiin kokonaistehokkuuden (OEE) kehitystä ajanjaksolla marraskuu 2022 - lokakuu 2024 neljällä tuotantolinjalla. Tarkastelu perustui päivätasolle lasketun OEE:n keskiarvoihin, jotka on laskettu käytettävyyden ja suorituskyvyn perusteella (laadun mittaaminen jäi datarajoitteiden vuoksi tämän analyysin ulkopuolelle).

Kuvasta 15 on OEE:n kehityksessä nähtävissä selkeitä eroja tuotantolinjojen välillä. Eri-tyisesti linjoilla 2–4 OEE on noussut tasaisesti kahden vuoden aikana, mikä viittaa tuotantovolyymin kasvun. Linja 1:n OEE on sen sijaan pysytellyt matalammalla tasolla koko tarkastelujakson ajan. Tämä johtuu pääosin linjan rajoitetusta tuotevalikoimasta ja työkalun harvinaisemmasta vaihtorytmistä, jotka yhdessä rajoittavat linjan käyttöastetta ja heikentävät suorituskykyä.



Kuva 15. Kokonaistehokkuuden (OEE) kehitys linjoittain ajanjaksolla 11/2022–10/2024

Kokonaisuutena analyysi osoittaa, että tuotantolinjojen välillä on merkittäviä eroja tehokkuudessa, ja että kehitystoimenpiteillä, kuten tuotannon suunnittelun optimoinnilla,

työkalujen ennakoivalla vaihdolla sekä volyymien paremmalla kohdistamisella, voidaan tukea OEE:n nousua edelleen tulevaisuudessa.

5 Tulokset

Tässä kappaleessa esitetään vastaukset työn alussa asetettuihin tutkimuskysymyksiin.

1. Mitkä ovat keskeiset syyt OEE:n vaihteluihin tuotantolinjoilla?

OEE:hen vaikuttavat keskeiset tekijät on koottu kappaleessa 5.1, jossa tarkastellaan erityisesti käytettävyyden ja suorituskyvyn vaihtelun taustalla olevia syitä.

2. Mitä menetelmiä voidaan hyödyntää OEE:n parantamisessa?

Tunnistetut kehitystoimenpiteet on käsitelty kappaleissa 5.2 Tuotannon suunnittelun optimointi ja 5.3 Tuotantotyökalujen vaihdot. Näissä esitetään konkreettisia keinoja, joilla OEE:tä voidaan parantaa käytännössä.

3. Millä tavoin tuotannon tehokkuuden parannuksia voidaan seurata ja mitata järjestelmällisesti?

Seurantatyökalun määrittely ja siihen tarvittavat tietosisällöt on esitetty kappaleessa 5.4 OEE-seurantatyökalu, jossa kuvataan systemaattinen lähestymistapa parannusten vaikutusten seuraamiseen.

5.1 Keskeiset tekijät

Nykytilan analyysi tuotantolinjoilta paljastaa, että OEE-tasot vaihtelevat merkittävästi eri päivien ja linjojen välillä. Tarkastellun 24 kuukauden ajanjakson perusteella voidaan tunnistaa joukko tekijöitä, jotka vaikuttavat OEE-lukuun.

Keskeiset tekijät:

1. Korkea tuotantovolyymi

Suurten tuotantomäärien päivät korreloivat positiivisesti OEE:n, käytettävyyden ja suorituskyvyn kanssa (ks. kuviot 4–6). Tämä viittaa siihen, että pidemmät erät mahdollistavat tehokkaamman ajon, vähentävät suhteellisesti seisokkeja ja parantavat linjaston kuormitusastetta.

2. Tuotevaihtojen määrä

Pidemmät yhtäjaksoiset ajot ilman tuotevaihtoja vähentävät tehokkuushäviöitä. Käytettävyyden kannalta tämä tarkoittaa vähemmän seisokkeja ja suorituskyvyn osalta vähemmän ajonopeuden laskua säätövaiheiden vuoksi.

3. Tuotantolinjojen kuormitus

Korkean OEE:n päivinä tuotantolaitteet ovat olleet käytössä lähes koko ajan. Tämä viittaa onnistuneeseen kunnossapitoon, tuotevaihtojen minimointiin ja häiriöiden välttämiseen, sekä kuormitukseen.

4. Suorituskyky ja ajonopeus

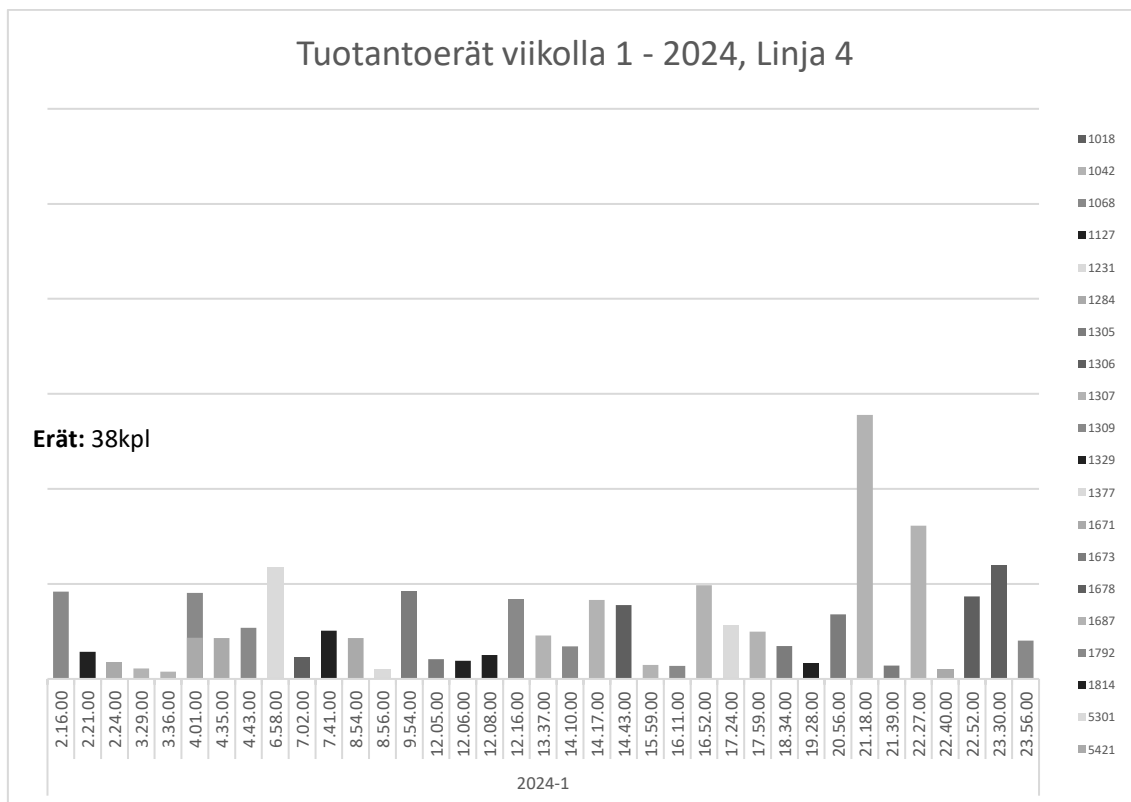
Hyvän OEE:n päivinä ajonopeus on lähellä linjan realistista maksimikapasiteettia. Tällöin prosessi on ollut vakaa, ja käynnistys- tai hidastusvaiheita on ollut vähän. Tämä liittyy usein suureen eräkokoan ja vakaaseen tuotantoon.

5. Tuotantotyökalujen kuluminen

OEE paranee, kun laitteet toimivat ilman vikaantumisia ja suorituskyvyn laskua. Erityisesti linjat 2–4 ovat osoittaneet vakaampaa suorituskykyä, kun työkalun käyttöikä on ollut optimaalisella tasolla ennen vaihtoa.

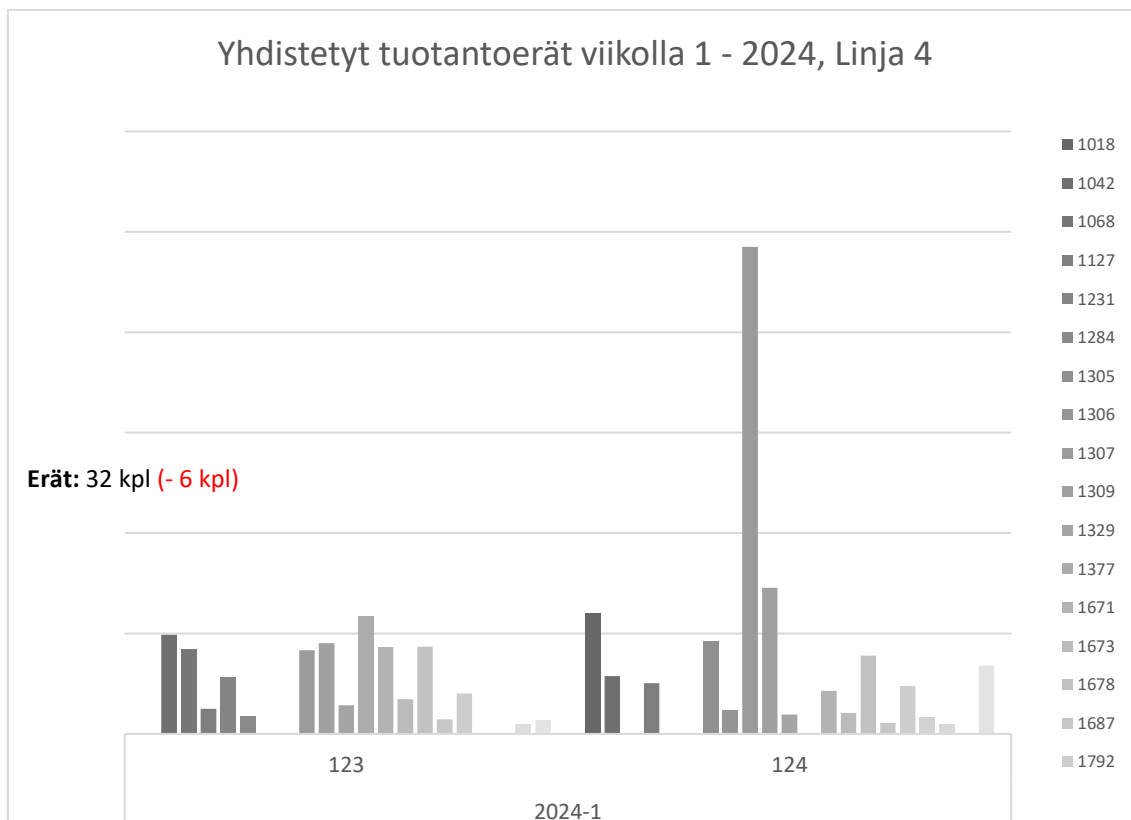
5.2 Tuotannon suunnittelun optimointi

Nykyisessä tuotannosuunnittelumallissa tuotanto ohjautuu pääasiassa myynnin ja kuljetussuunnittelun tarpeiden mukaan. Myynnistä määritetään toimitusaikaväli, johon kuljetussuunnittelija kohdistaa tilauksen ja tuotannon aikataulutuksen. Päivittäin kuljetussuunnittelijalta saapuu lastauslistat, joiden mukaan tuotantolinjoilla tai varastossa tulee olla tiettyjä tuotteita valmiina tiettyihin kellonaikoihin. Tämä prosessi on joustava asiakkaiden toimitustarpeiden suhteen, mutta se ei aina mahdollista tehokkainta tuotannon järjestämistä. Vaikka useampien eri asiakkaiden samojen tuotteiden noudot yhdistetään päivän aikana mahdollisuuksien mukaan yhdeksi tuotantoeräksi, tuotannon optimointimahdollisuudet jäävät hyödyntämättä pidemmältä aikaväliltä. Kuvassa 16 on tarkasteltu linjan 4 tuotantoeriä vuoden 2024 ensimmäiseltä viikolta. Viikolla on ollut 38 eri tuotantoajoa, ja valmistettujen tuotekoodien määrä on 21.



Kuva 16. Tuotantoerien jakauma viikolla 1 vuonna 2024. Viikon aikana tuotettiin yhteensä 38 erää.

Ehdotettu parannus tuotannonsuunnitteluun on siirtyminen lukittuun tuotantojaksoon. Laskennassa käytetty esimerkkiä, jossa maanantaista keskiviikkoon ja torstaista sunnuntaihin ajo suunnitellaan ja lukitaan etukäteen. Tämä mahdollistaisi pidemmät tuotantoerät ja vähentäisi tuotevaihtojen määrää, joka nykyisessä järjestelmässä lisää tuotannon seisokkeja ja heikentää tehokkuutta. Tästä esimerkkinä kuva 17, jossa edellä tarkasteltu viikko 1, on jaettu kahteen tuotantojaksoon (kuvassa numeroituna 123 ja 124), ja erät on yhdistetty näiden sisällä. Tällöin viikolla on yhteensä 32 eri tuotantoajoa, eli tässä tapauksessa säästytettäisiin kuudelta tuotevaihdolta, joka lisäisi suorituskykyä sekä vapauttaisi noin. 3 tuotantotuntia.



Kuva 17. Yhdistetyt tuotantoerät viikolla 1 vuonna 2024. Yhdistämisen seurauksena erien määrä olisi vähentynyt 6 kappaleella, mikä parantaa tuotannon sujuvuutta ja tehokkuutta.

Taulukossa 4 on tarkasteltu tuotevaihtojen vähentymisen vaikutusta 52 viikon ajalta edellä esitetyn logiikan mukaisesti. Ylimääräiset tuotantoerät kuvaavat teoreettiselle "lukitulle" tuotantokaudelle osuvien duplikaattierien määrää, eli tilanteita, joissa samaa tuotetta on valmistettu useaan otteeseen saman viikon aikana, joko maanantain ja keskiviikon tai torstain ja sunnuntain välillä.

Kun nämä erät yhdistetään yhdeksi suuremmaksi eräksi, voidaan tuotannosuunnittelua tehostaa merkittävästi. Taulukon perusteella vapautuneet tuotantotunnit osoittavat, kuinka paljon kapasiteettia on saatu käyttöön yhdistämisen ansiosta. Yhteensä vapautui 2085 tuotantotuntia, mikä vastaa 8,5 %:n kasvua tuotantokapasiteetissa ja käytettävyydessä. Tämä osoittaa, että tuotantoerien yhdistäminen voi merkittävästi parantaa tehokkuutta vähentämällä tarpeettomia tuotevaihtoja ja sitä kautta vähentämällä häviöitä.

Taulukko 4. Tuotannosuunnittelun mukauttamisen arvioidut vaikutukset 52 viikon ajalta.

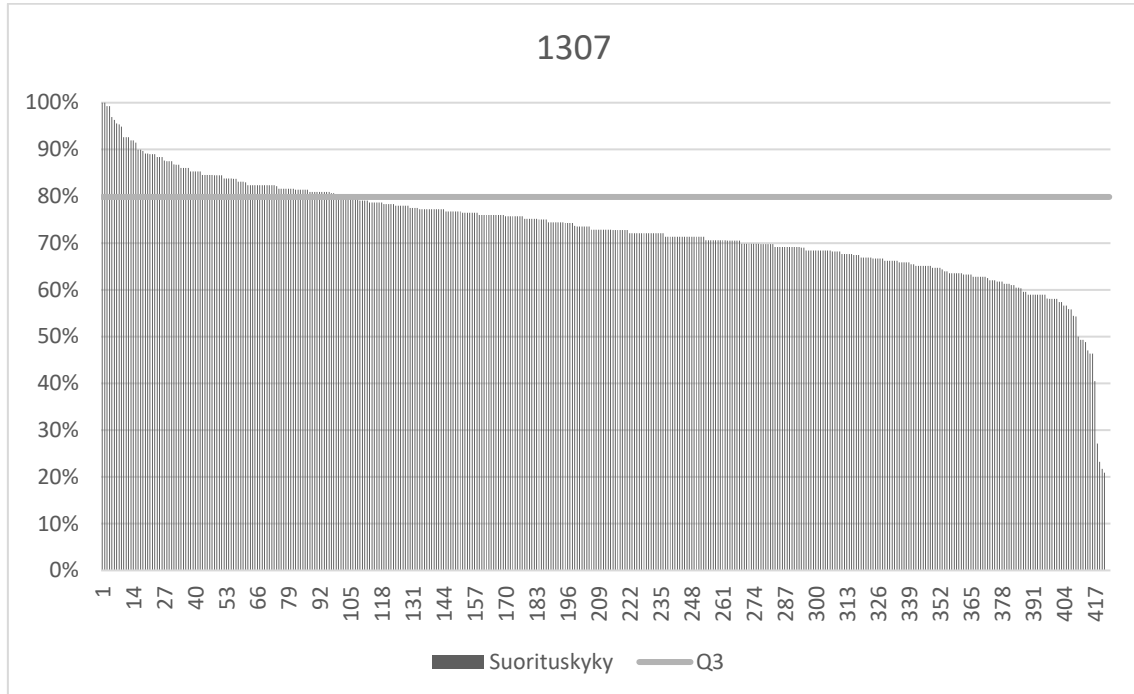
Linja	Toteutuneet tuotantotunnit	"Ylimääräiset tuotantoerät"	Vapautuneet tuotantotunnit	Muutos %
Linja 1	5012	696	348	6,9 %
Linja 2	6546	1164	582	8,9 %
Linja 3	6461	1012	506	7,8 %
Linja 4	6544	1297	649	9,9 %
Yhteensä	24562	4169	2085	8,5 %

Kuten kappaleessa 4.4 kuvioissa 3 ja 4 on esitetty, tuotantoerien yhdistämisellä on merkittävä vaikutus paitsi tuotantokapasiteettiin myös tuotantonopeuteen ja sitä kautta suorituskykyyn. Yhdistämällä lyhyet, esimerkiksi kahden tunnin tuotantoerät pidemmiksi, kuten kuuden tunnin eräksi, voidaan vähentää käynnistysvaiheen suhteellista vaikutusta ja saavuttaa tasaisempi ajonopeus. Esimerkkitapauksessa tämä näkyy suorituskyvyn parantumisena 8,4 %.

Tätä logiikkaa hyödyntäen jokaiselle tuotteelle on analysoitu parhaiten sujuneet ajot käyttämällä yläkvartiilia (top 25 %) vertailutasona. Tämä paras kvartaali toimii tavoitetasona, johon tuotannosuunnittelun avulla voitaisiin päästä useammin.

Alla kuvassa 18 on esimerkkinä tuote 1307, jonka eri ajojen suorituskyky on esitetty laskevassa järjestyksessä. Harmaa viiva kuvaa Q3-tasoa eli yläkvartiilia. Kuvasta nähdään,

että merkittävä osa ajoista jää selvästi tämän tason alapuolelle, mikä viittaa potentiaaliin parantaa keskimääräistä suorituskykyä tuotantoerien yhdistämisen avulla.



Kuva 18. Tuotteen 1307 suorituskyvyn jakauma eräkohtaisesti. Suorituskyvyt on järjestetty laskevaan järjestykseen, ja harmaa viiva kuvaa kolmatta kvartiilia (Q3), joka toimii tavoitetasona.

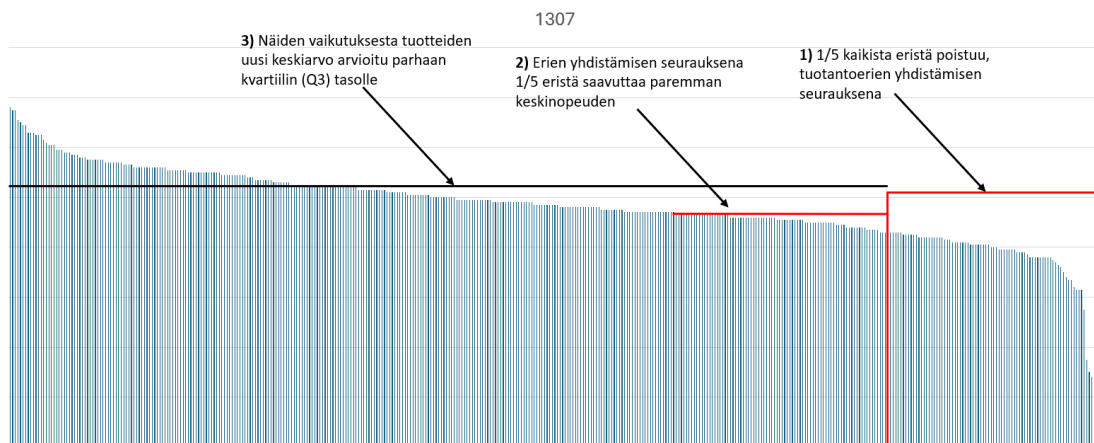
5.2.1 Tuotannosuunnittelun vaikutukset

Taulukko 5 kokoaa yhteen arvioidut vaikutukset tuotannosuunnittelun kehitystoimenpiteistä viikkotasolla. Tavoitteena on havainnollistaa, kuinka paljon tuotantoa voidaan tehostaa esimerkiksi vähentämällä tuotevaihtoja ja parantamalla suorituskykyä. Vaikutukset on esitetty prosentuaalisesti sekä muunnettuna ajaksi ja työvuoromääräksi, jolloin niiden käytännön merkitys korostuu.

Tuotannosuunnittelun vaikutusta suorituskykyyn on arvioitu erityisesti ajon pituuden ja ajonopeuden käynnistysvaiheen näkökulmasta. Jokaisen tuotantoerän alussa linjaston ajonopeus lähtee nolasta ja nousee vähitellen kohti tavoitetasoa. Tämä käynnistysvaihe vie aikaa ja on tuotannollisesti tehottomampi. Mitä lyhyempi yksittäinen ajo on, sitä

suuremmaksi tämän tehottoman vaiheen osuus suhteessa koko ajoon muodostuu. Kun tuotantoerien yhdistämisen avulla ajojen pituudet kasvavat, käynnistysvaiheen suhteellinen vaikutus vähenee, ja näin koko erän suorituskyky paranee.

Analyysin perusteella arvioitiin, että noin viidennes kaikista tuotantoeristä olisi yhdistettävissä toisiin eriin. Tämä tarkoittaa käytännössä, että osa lyhyistä, tehottomista eristä poistuu kokonaan, ja niiden tilalle muodostuu pidempiä, keskimäärin selvästi tehokkaampia ajoja. Tällöin voidaan olettaa, että yhdistettävissä olevien erien suorituskyky kasvaa merkittävästi. Näin ollen on perusteltua asettaa tavoitetasoksi kullekin tuotteelle sen paras kvartiili (Q3), joka kuvaa parhaiten toteutuneiden ajojen tehokkuutta. Kuvassa 19 on havainnollistettu tätä ilmiötä.



Kuva 19. Tuotteen 1307 suorituskykyjakauma ja tuotannosuunnittelun vaikutus. Yhdistämällä 1/5 eristä poistetaan tehottomimpia ajoja, jolloin keskiarvotaso nousee kolmannen kvartiiliin (Q3) tasolle.

Taulukossa 5 on esitetty tuotannosuunnittelun kehittämistoimenpiteiden vaikutus koko tuotannon tasolla, perustuen kaikkien tuotteiden suorituskykydataan. Taulukko yhdistää kahden päätekijän, tuotevaihtojen vähenemisen ja suorituskyvyn kasvun, vaikutukset kapasiteettiin, ja esittää ne sekä prosentteina että muunnettuna viikkotason tunneiksi ja työvuoroiksi.

Taulukko 5. Tuotannosuunnittelun kehittämistoimenpiteiden vaikutus viikkotason kapasiteettiin. Vaikutukset on esitetty sekä prosentteina että muunnettuna tunneiksi ja työvuoroiksi, jotka kuvaavat vapautuvaa kapasiteettia tuotannossa.

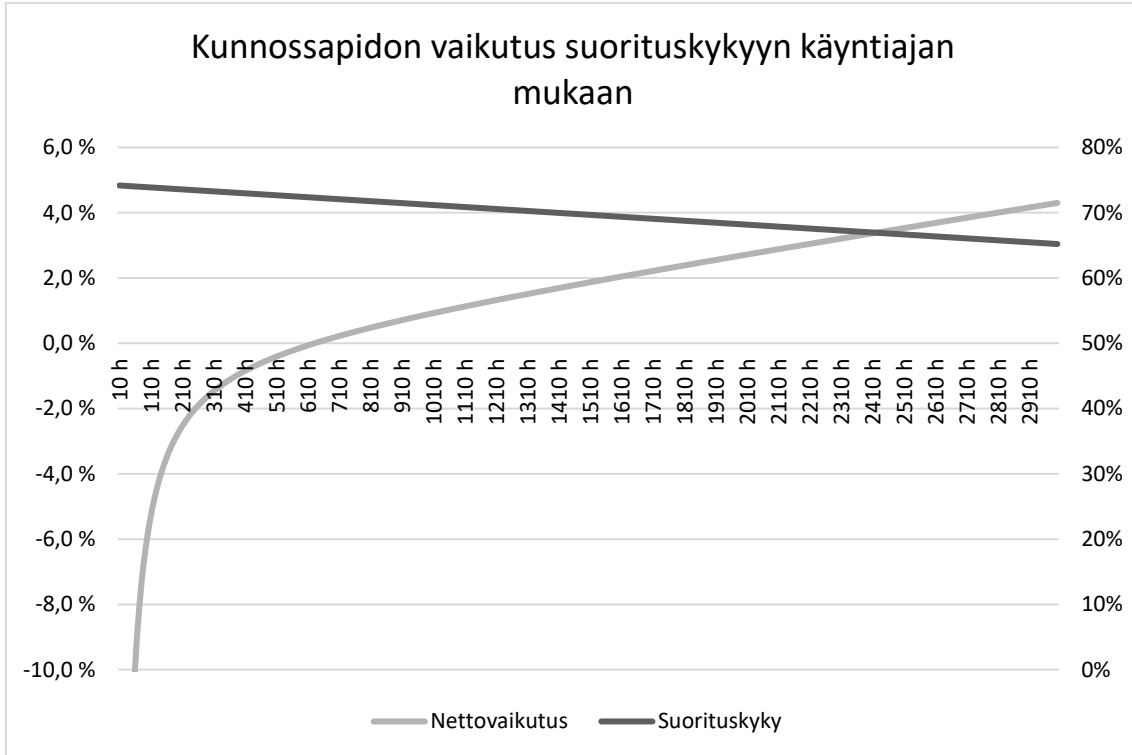
Vaikutus	%	Vaikutus viikkotasolla
Tuotevaihtojen väheneminen	8,5 %	-10 h / -1,25 työvuoroa
Suorituskyvyn kasvu	7,4 %	-8 h / -1 työvuoro
Yhteensä	15,3 %	-18 h / -2,25 työvuoroa

Esimerkiksi tuotevaihtojen väheneminen ja suorituskyvyn kasvu voivat yhdessä tehostaa tuotantoa jopa 15,3 %, mikä vastaa noin 18 tunnin vapautumista viikossa. Tämä tarkoittaa käytännössä jopa 2,25 työvuoron verran lisäkapasiteettia viikkotasolla laskettuna, jonka tuotanto voidaan hyödyntää muulla tavalla tai jättää tyhjilleen esimerkiksi kunnossapitoa tai joustavuutta varten.

5.3 Tuotantotyökalujen vaihdot

Kappaleessa 4.6 havaittiin, että tuotantotyökalun käyttöajalla on selkeä negatiivinen vaikutus tuotannon suorituskykyyn. Käyttötuntien kasvaessa suorituskyky heikkenee, mikä viittaa työkalun kulumiseen ja sen vaikutuksiin prosessitehokkuudessa. Kyseisessä kappaleessa havaittua lineaarikuvaajan kulmakerrointa on hyödynnetty laskemaan suorituskyvyn nettovaikutusta eri käyttöajankohdissa.

Kuvion perusteella voidaan todeta, että noin 620 käyttötunnin kohdalla tuotantotyökalun vaihdosta saatava suorituskyvyn parannus ylittää työkalun vaihtoon kuluvan arvioidun 6 tunnin vaikutuksen. Tämä tarkoittaa, että vähintään 620 käyttötuntia tarvitaan, jotta vaihto on suorituskyvyn näkökulmasta kannattavaa historiallisten tietojen perusteella.



Kuvio 6. Tuotantotyökalun vaihtamisen nettovaikutus ja suorituskyky käyntiajan funktiona

Käytännössä pelkkä käyttötuntien seuranta ei kuitenkaan riitä. Tuotantotyökalun kulumisen ja suorituskyky voivat vaihdella linjakohtaisesti ja olosuhteiden mukaan. Siksi tarvitaan reaaliaikainen suorituskyvyn seuranta, jotta voidaan tarkemmin arvioida, milloin vaihdolla saavutetaan positiivinen vaikutus.

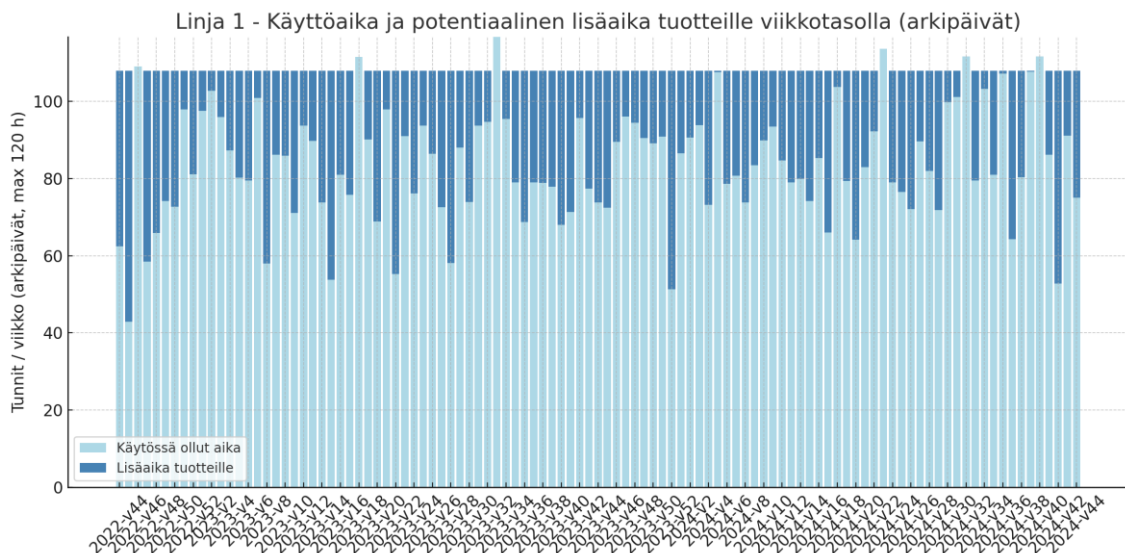
Tässä voidaan hyödyntää kaavaa 4, jossa arvioidaan uuden matriisin keskimääräiseksi suorituskyvyksi 74,2 %. Tällöin nettovaikutus voidaan laskea yksinkertaistettuna seuraavasti:

$$\text{Nettovaikutus} = \frac{(0,742 - \text{suorituskyky hetkellä})}{2} - \frac{\text{huoltoon kuluva aika}}{\text{käyttötunnit}} \quad (4)$$

Kaava voidaan sisällyttää osaksi tuotannon reaaliaikaista seurantatyökalua, jolloin työkalun vaihtopäätös voidaan tehdä tietoon perustuen. Tämä tukee kunnossapidon oikea-aikaisuutta ja auttaa optimoimaan kokonaistehokkuutta (OEE).

5.3.1 Linja 1 käytettävyyden lisääminen tuotantotyökalun vaihdoilla

Linja 1:n alhainen käytettävyys mahdollistaa tarkastelun, jossa arvioidaan, kuinka paljon sen seisona-ajasta voitaisiin käyttää muiden linjojen tuotteiden valmistamiseen. Analyysissä oletettiin, että linjalla suoritetaan matriisin vaihto kahdesti viikossa (yhteensä 12 tuntia), jonka jälkeen linjalla voidaan valmistaa samoja tuotteita kuin muilla linjoilla. Viikoittainen maksimituotantoaika rajattiin 120 tuntiin (5 päivää × 24 h). Tämä otettiin huomioon laskettaessa potentiaalista lisäaikaa tuotannolle.



Kuva 20. Linja 1:n viikoittainen käyttöaika ja potentiaalinen lisäaika muiden tuotteiden valmistukseen.

Kuten kuvassa 19 esitetään, linjan käyttöaste jää monilla viikoilla selvästi alle maksimikapasiteetin, ja potentiaalista lisäaikaa muiden tuotteiden valmistukseen syntyy merkittävästi. Keskimäärin lisäaikaa kertyy **24,8 tuntia viikossa**, ja koko tarkastelujakson aikana lisäaikaa kertyi yhteensä **noin 2600 tuntia**. Tämä vastaa yli 21 täyttä arkipäiväviikkoa (120 h) ylimääräistä kapasiteettia. Tulokset osoittavat, että tuotantotyökalun vaihtaminen muiden tuotteiden valmistamisen mahdollistamiseksi voisi olla kannattava tapa tehostaa resurssien käyttöä ja laajentaa tuotantomahdollisuuksia. Tämän toimenpiteen mahdollistamiseksi vaaditaan kuitenkin myös tuotannonsuunnittelun uudistamista.

5.4 OEE-seurantatyökalu

Kokonaistehokkuuden (OEE) jatkuva seuranta on elintärkeää tuotantoprosessien optimoinnille, koska se mahdollistaa reaaliaikaisen häiriöiden tunnistamisen ja korjaavien toimenpiteiden nopean käyttöönoton. Tässä luvussa määritellään vaatimukset OEE-seurantatyökalulle, joka visualisoi tuotantolinjojen suorituskykyä, häviöitä ja kehitystrendejä. Työkalu on suunniteltu tukemaan päätöksentekoa sekä operatiivisella että strategisella tasolla.

5.4.1 Työkalun tavoitteet ja käyttötarkoitus

OEE-seurantatyökalun ensisijaisena tavoitteena on tarjota selkeä näkymä tuotannon tehokkuuteen vaikuttavista tekijöistä. Sen avulla voidaan seurata käytettävyyden, suorituskyvyn ja laadun kehitystä sekä tunnistaa toistuvia häviölähteitä. Työkalu on suunniteltu erityisesti tuotannon henkilöstön, esimiesten ja johtamisen tarpeisiin, jotta he voivat tehdä datapohjaisia päätöksiä.

5.4.2 Järjestelmän tekniset vaatimukset ja tarvittavat tietosisällöt

OEE-seurantatyökalun onnistunut toteutus Power BI -ympäristössä edellyttää tarkkaan määriteltyjä teknisiä ja tietosisällöllisiä vaatimuksia. Järjestelmän on tuettava operatiivista, taktista ja strategista päätöksentekoa, joten sen tulee tarjota riittävä tiedon tarkkuus ja ajantasaisuus eri raportointitasoille: päivä-, viikko- ja kuukausitasolle.

Tietosisällöt, joita järjestelmältä edellytetään:

- **Tuotantoerän aloitus- ja lopetusaika** (erän kesto ja ajoitus)
- **Tuotantolinja** (mihin linjaan tuotantoerä kohdistuu)
- **Tuotantotuote / tuotekoodi**
- **Toteutunut tuotantomäärä**
- **Suunniteltu tuotantoaika** (esim. operaattorit työvuorossa)

- **Todellinen tuotantoaika** (kone käynnissä -aika)
- **Tuotantonopeus**
- **Tuotevaihdon ja seisonnan alku- ja loppuajat**
- **Seisokkien syykoodit** (standardoidusti kirjattu)
- **Laatutiedot** (hyväksytyt / hylätyt määrät, jos saatavilla)

Näistä tiedoista muodostetaan OEE:n kolme komponenttia: käytettävyys, suorituskyky ja laatu. Mikäli laatuosuutta ei ole saatavilla, se voidaan rajata tarkastelun ulkopuolelle ja korvata huomautuksella raportissa.

5.4.3 Keskeiset raportit ja visualisoinnit

Seurantatyökalun tulisi sisältää ainakin kolme keskeistä raporttia, jotka kattavat eri aikavälit ja käyttäjätasot. Reaaliaikainen päivätason raportti keskittyy tuotannon hetkelliseen tilaan, jolloin se näyttää OEE-arvon, käytettävyyden, suorituskyvyn ja laadun tämänhetkiset lukemat. Lisäksi siinä tulisi esittää tuotannon seisonnan syyt avulla, jotta voidaan nopeasti tunnistaa yleisimmät häiriölähteet. Tuotantonopeuden vertailu tavoitenopeuteen tarjoaa myös visuaalisen kuvan suorituskyvyn vaihteluista.

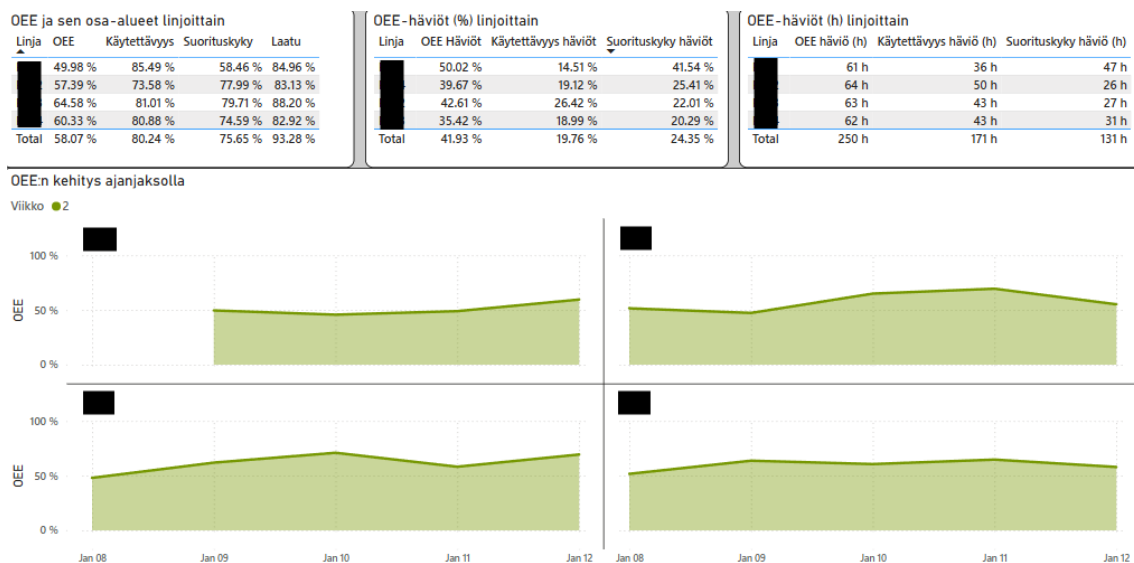
1. Päivänäkymä (Operaattori-taso)

- Tavoite: Reagointi poikkeamiin ja jatkuva parantaminen vuoron aikana
- Näytettävät asiat:
 - OEE, käytettävyys, suorituskyky, laatu (24h rullaava)
 - Tuotantolinjojen seisonnan reaaliaikaiset syykoodit
 - Ajonopeus vs. tavoite
 - Tuotevaihtojen kesto

2. Viikkonäkymä (Esimies-taso)

- Tavoite: Analysointi ja toistuvien ongelmien tunnistaminen
- Näytettävät asiat:
 - Linjakohtaiset OEE-trendit
 - Yleisimmät seisontasyyt viikkotasolla

- Keskimääräiset eräkoot ja suorituskyky

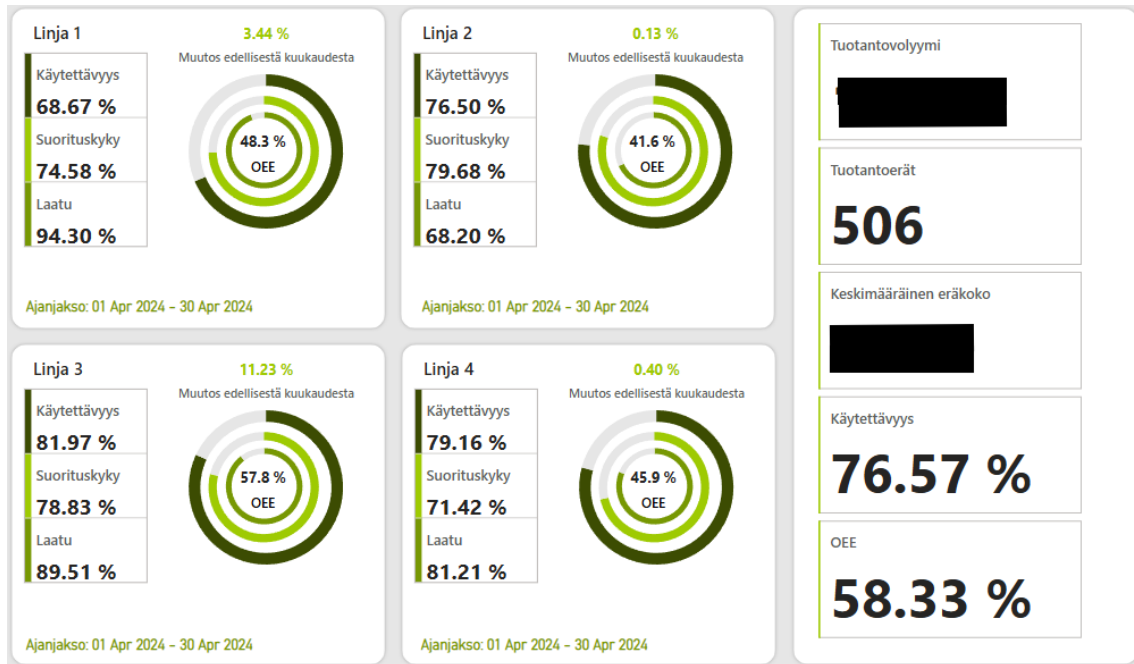


Kuva 21. OEE:n taso, häviöt (%) ja häviöt tunneissa linjoittain sekä viikkokohtainen kehitys.

Kuva 21 esittää viikkotasolla OEE:n kokonaiskehitystä linjoittain ja sen osa-alueita sekä häviöitä prosentti- ja tuntimääräisinä. Todellisessa seurantatyökalussa tulisi näiden lisäksi tarkastella myös seisontojen syitä sekä muita häviöihin vaikuttavia tuotantotekijöitä (esim. häiriötyypit, vikaantumiset, tuotannonvaihdot), joita ei ole tässä vaiheessa vielä saatavilla tai yhdistetty analyysiin.

3. Kuukausinäkömä (Johto-taso)

- Tavoite: Pitkän aikavälin kehityssuunnittelu
- Näytettävät asiat:
 - OEE:n ja sen osa-alueiden kehitys (trendit)
 - Kumulatiiviset tuotantohäviöt (aika & €)
 - Tuotelinjojen ja tuotteiden suoritusvertailu
 - Kehitystoimenpiteiden vaikutusten seuranta



Kuva 22. OEE:n osa-alueet ja kehitys linjoittain sekä keskeiset tuotantomäärät huhtikuussa 2024.

Kuva 22 esittää kuukausitasolla linjakohtaisen OEE-tason sekä sen osa-alueet (käytettävyys, suorituskyky ja laatu), mukaan lukien OEE:n kuukausittainen muutos edelliseen kuukauteen. Oikealla näkyy koko tuotannon yhteenvedot: tuotantovolyymi, tuotantoerien määrä, keskimääräinen eräkoko sekä kokonaiskäytettävyys ja OEE. Todellisessa seurantatyökalussa tulisi näiden lisäksi tarkastella myös seisontojen ja häviöiden tarkempia syitä, kuten häiriöluokituksia ja vaihtoajoja, joita ei tässä vaiheessa ole vielä saatavilla.

5.4.4 Tekniset vaatimukset

Työkalun toimivuus edellyttää luotettavaa datan integraatiota tuotantojärjestelmistä, kuten MES- ja ERP-järjestelmistä. Automaattinen datan päivitys vähintään tunnin välein varmistaa, että tiedot ovat ajan tasalla. Käyttöliittymän tulee olla yksinkertainen ja saatavutettava myös mobiililaitteilla, jotta kaikki sidosryhmät voivat hyödyntää työkalua.

5.4.5 Implementoinnin haasteet ja edellytykset

Työkalun käyttöönottoon liittyy useita käytännön haasteita, kuten datan laadun varmistaminen ja standardointi. Seisontasyiden ja muiden häviöiden täytyy olla johdonmukaisesti koodattuja, jotta ne voidaan luokitella ja analysoida. Käyttäjien koulutus on myös keskeinen tekijä, jotta työkalua osataan hyödyntää tehokkaasti. Tällä hetkellä laadun mittaaminen on rajallinen, joten sen kehittäminen olisi tärkeä parannuskohde tulevaisuudessa.

5.4.6 Odotetut hyödyt

OEE-seurantatyökalun odotetaan parantavan tuotannon tehokkuutta useilla tavoilla. Reaaliaikaiset hälytykset voivat mahdollistaa nopeamman reagointiin häiriötilanteisiin, mikä lyhentää seisonta-aikoja. Häviöiden syiden systemaattinen analyysi auttaa priorisoimaan parannustoimenpiteitä ja kohdentamaan resurssit tehokkaammin. Lisäksi työkalu edistää läpinäkyvyyttä ja yhteistä ymmärrystä tuotannon tilasta eri sidosryhmien keskuudessa.

5.5 Priorisointi ja toimenpidesuunnitelma

Kokonaistehokkuuden (OEE) parantamisen edistämiseksi on keskeistä aloittaa systemaattisella mittaus- ja analyysijärjestelmän käyttöönotolla. Tämä muodostaa perustan kaikille myöhemmille toimenpiteille, sillä ilman luotettavaa dataa häviölähteiden tunnistaminen ja parannusten mittaaminen jäävät epätarkkoihin arvioihin. Alkuvaiheessa tulisi keskittyä OEE-seurannan pilotoimiseen. Tässä vaiheessa kerättäisiin tietoa käytettävyydestä, suorituskyvystä ja mahdollisista laadun poikkeamista, vaikka laadun mittaus jääkin aluksi rajoittuneeksi. Tämän datan avulla voidaan luoda selkeä kuva nykytilasta ja tunnistaa suurimmat häviöiden lähteet, kuten toistuvat tuotevaihdot tai laitteiden hidasteet.

Kun OEE-seuranta on vakiinnutettu ja ensimmäiset trendit tunnistettu, seuraava askel on kohdentaa resurssit nopeisiin korjauksiin, jotka tuovat lyhytaikaisia parannuksia. Esimerkiksi tuotevaihtojen optimointi tai kriittisten laitteiden kunnossapidon tihentäminen.

Samalla tulisi aloittaa laadunvalvonnan kehittäminen. Tämä auttaa ymmärtämään, kuinka paljon laatu vaikuttaa OEE-lukuun ja mitkä tekijät aiheuttavat eniten hylkyjä.

Tämän jälkeen tulisi siirtyä syvempään tuotantoprosessien uudistamiseen. Tässä vaiheessa tuotantosuunnittelua tulisi tehostaa siirtämällä se päivätasolta pitkän aikavälin suunnitteluun. Tällöin voidaan yhdistää pienet erät suuremmiksi, mikä vähentää tuotevaihtojen määrää ja parantaa ajon sujuvuutta. Tähän voidaan hyödyntää historiallista kysyntädataa ja ennustemalleja, jotka auttavat ennakoimaan tuotantotarpeita tarkemmin. Lisäksi reaaliaikaisen OEE-datan integroiminen suunnitteluun mahdollistaa dynaamisen reagoinnin häiriöihin, kuten materiaalipuutteisiin tai laitevian aiheuttamiin hidasteisiin.

Pitkällä aikavälillä on tärkeää vakiinnuttaa parhaat käytännöt ja laajentaa niitä kaikkiin tuotantolinjoihin. Tämä edellyttää jatkuvaa koulutusta, prosessien standardointia sekä investointeja teknologiaan, kuten IoT-sensoreihin ja ennakoivaan analytiikkaan. Esimerkiksi koneoppimispohjaiset mallit voivat ennustaa laitteiden kulumista ja ehkäistä rikkoutumisia ennalta. Samalla tulisi luoda kulttuuri, jossa kaikki työntekijät osallistuvat häviöiden tunnistamiseen ja ideoiden jakamiseen. Tämä edistää sitoutumista ja tehostaa muutosten toteuttamista.

6 Johtopäätökset ja suositukset

Tässä työssä on tutkittu kokonaistehokkuuden (OEE) merkitystä elintarviketeollisuuden tuotannon tehostamisessa. Analyysi kahden tehtaan tuotantodatasta ja prosessien tarkastelu ovat tuoneet esiin keskeisiä tekijöitä, jotka vaikuttavat laitteiden tehokkuuteen, sekä keinoja niiden hallitsemiseksi. Työssä korostuu, että OEE:n parantaminen edellyttää sekä teknisten ratkaisujen että prosessiuudistusten yhdistelmää.

6.1 Keskeiset löydökset

Tuotannon tehokkuuteen vaikuttivat merkittävimmin toistuvat tuotevaihdot ja pienet eräkoot, jotka lisäsivät seisonta-aikoja ja hidastivat prosessin vakautumista. Laitteiden kunnossapidolla oli myös ratkaiseva rooli: suorituskyvyn heikkeneminen käyntituntien kasvaessa osoitti, että ennakoiva huolto voi säilyttää tehokkuuden korkeammalla tasolla. Laadun seurannan puutteet rajoittivat kuitenkin OEE-laskennan tarkkuutta. Operaattoreiden väliset erot olivat vähäisiä, mikä kertoo standardoitujen prosessien toimivuudesta.

6.2 Vaikutukset toimintaan

Ehdotetut toimenpiteet, kuten tuotantosuunnittelun uudistaminen, ennakoivan kunnossapidon käyttöönotto ja OEE-seurantatyökalun kehittäminen, voivat parantaa kokonaistehokkuutta arviolta 10–20 %-yksiköllä. OEE:n 10–20 % parannuksen taloudelliset vaikutukset voidaan arvioida seuraavasti:

Jos tehtaan vuosituotannon arvo on 10 miljoonaa euroa ja OEE:n parantaminen 15 %:lla lisää kapasiteettia, se vastaa 1,5 miljoonan euron lisämyyntiä ilman merkittäviä investointeja. Samoin myös esimerkiksi kustannussäästöt tuotannon seisonnan vähentämisestä (esim. 2000 tuntia/vuosi \times Y €/h) tuottaisivat merkittäviä säästöjä vuodessa.

Tämä korostaa, että OEE:n optimointi ei ole pelkästään tekninen toimenpide, vaan strateginen investointi yrityksen kilpailukyvyyn kehittämiseen.

6.3 Tutkimuksen rajoitteet

Tulosten yleistettävyyttä rajoittivat laadun mittauksen puute sekä rajallinen data toisesta tehtaasta. Laatutiedon puuttuminen heikensi OEE-laskennan luotettavuutta, ja lyhyt aikaväli tehtaalta 2 ei paljastanut pitkäaikaisia trendejä, kuten laitteiden kulumisen vaikutuksia. Lisäksi eri tehtaiden prosessierot tuotantolinjoilla vaikeuttivat suoranaista vertailua.

6.4 Jatkotoimenpiteet

Tutkimuksen pohjalta on tarpeen kehittää laadun seuranta viallisten tuotteiden ja hukan tunnistamiseksi OEE-laskentaan. Seurantatyökalun pilotointi yhdellä tehtaalla mahdollistaisi käytännön testaamisen ennen laajempaa käyttöönottoa. Tuotevaihtoajan lyhentäminen standardoitujen menetelmien avulla ja investointien kustannus-hyötyanalyysit vahvistaisivat parannusten taloudellista perustetta.

6.4.1 Jatkotutkimukset

Saavutettujen tulosten perusteella voidaan tunnistaa useita jatkotutkimusalueita, joilla voidaan edelleen kehittää tuotannon suorituskykyä ja ohjaukkyvykkyttä. Yksi keskeinen tutkimuskohde liittyy tuotannon käynnistysvaiheisiin. Manuaalinen käynnistysprosessi voi aiheuttaa merkittäviä häviöitä operaattoreista riippuen. Näiden vaiheiden automatisoinnin vaikutuksia olisi hyödyllistä tarkastella tarkemmin etenkin suorituskyvyn näkökulmasta. Automaattiset käynnistystoiminnot voisivat vähentää prosessivaihtelua, mikä heijastuisi suoraan parantuneena OEE-tasona.

Tässä työssä analyysi keskittyi pääosin tehtaan 1 tuotantodataan. Jatkotutkimuksissa olisi perusteltua tarkastella myös tehtaan 2 tuotantolinjojen suorituskykyä samoilla mittareilla ja muuttujilla pidemmältä aikaväliltä. Tällainen vertailuanalyysi mahdollistaisi parhaiden käytäntöjen tunnistamisen ja siirtämisen yksiköiden välillä sekä

tuotantorakenteen yhtenäistämisen. Lisäksi se loisi perustan systemaattiselle kehitystyölle koko tuotantoympäristön laajuudessa.

Lähteet

- Aman, Z., Ezzine, L., Fattah, J., & Lachhab, A. (2017). *Improving efficiency of a production line by Using Overall Equipment Effectiveness: A case study*.
- Basu, R. (2009). *Implementing six sigma and lean: A practical guide to tools and techniques* (First edition). Butterworth-Heinemann.
<https://doi.org/10.4324/9780080949604>
- Belaud, J.-P., Prioux, N., Vialle, C., & Sablayrolles, C. (2019). Big data for agri-food 4.0: Application to sustainability management for by-products supply chain. *Computers in Industry*, 111, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.06.006>
- Bourquard, B., Berenguer, G., Gray, A., & Preckel, P. (2022). Raw material variability in food manufacturing: A data-driven snack food industry case. *Production & Manufacturing Research*, 10, 294–320.
<https://doi.org/10.1080/21693277.2022.2083030>
- Cusiatado Palomino, A. M., Farfán Carhuamaca., N. Y., & Rada Mota, L. C. (2024). Systematic Review on Lean Manufacturing in the Productivity of the Food Industry. *Proceedings of the 4th LACCEI International Multiconference on Entrepreneurship, Innovation and Regional Development (LEIRD 2024): "Creating Solutions for a Sustainable Future: Technology-Based Entrepreneurship"*. 4th LACCEI International Multiconference on Entrepreneurship, Innovation and Regional Development (LEIRD 2024): "Creating solutions for a sustainable future: technology-based entrepreneurship". <https://doi.org/10.18687/LEIRD2024.1.1.325>
- Daniewski, K., Kosicka, E., & Mazurkiewicz, D. (2018). Analysis of the correctness of determination of the effectiveness of maintenance service actions. *Management and Production Engineering Review*; 2018; vol. 9; No 2. <https://journals.pan.pl/dlibra/publication/119522/edition/103989>
- Forte, T. (2016, syyskuuta 29). *Theory of Constraints 101: Applying the Principles of Flow to Knowledge Work*. Forte Labs. <https://fortelabs.com/blog/theory-of-constraints-101/>
- Goldratt, E. M. (1990). *What is this thing called theory of constraints and how should it be implemented?* North River Press.

- Hansen, R. C. (2002). *Overall equipment effectiveness: A powerful production/maintenance tool for increased profits* (1st ed). Industrial Press.
- Hossen Irfan, Md. T., Rafiquzzaman, Md., & Manik, Y. A. (2025). Productivity improvement through lean tools in cement industry – A case study. *Heliyon*, 11(3), e42057. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42057>
- Liker, J. K. (2021). *The Toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer* (Second edition). McGraw Hill Education.
- Moerman, F., Rizoulières, P., & Majoor, F. A. (2014). 10—Cleaning in place (CIP) in food processing. Teoksessa H. L. M. Lelieveld, J. T. Holah, & D. Napper (Toim.), *Hygiene in Food Processing (Second Edition)* (ss. 305–383). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857098634.3.305>
- Mohamad, E., Tukiran, M. A., Ito, T., Jamli, M. R., Mohamad, N. A., Salleh, M. R., Yuniarti, R., & Sulaiman, M. A. (2020). Improving Overall Equipment Effectiveness Using Lean Six Sigma in Lube Blending Plant: A Case Study. *The Proceedings of Design & Systems Conference*, 2020.30(0), 2212. <https://doi.org/10.1299/jsmedsd.2020.30.2212>
- Mrugalska, B., & Wyrwicka, M. K. (2017). Towards Lean Production in Industry 4.0. *Procedia Engineering*, 182, 466–473. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.135>
- Muchiri, P., & Pintelon, L. (2008). Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): Literature review and practical application discussion. *International Journal of Production Research*, 46(13), 3517–3535. <https://doi.org/10.1080/00207540601142645>
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total productive maintenance*. Productivity Press.
- Ng, K. C., Chong, K. E., & Goh, G. G. G. (2014). Improving Overall Equipment Effectiveness (OEE) through the six sigma methodology in a semiconductor firm: A case study. *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 833–837. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2014.7058755>
- Real-Time Production Monitoring System | Vorne.* (ei pvm.). Vorne. Noudettu 15. huhtikuuta 2025, osoitteesta <https://www.vorne.com/>

- Soman, C. A., van Donk, D. P., & Gaalman, G. (2004). Combined make-to-order and make-to-stock in a food production system. *International Journal of Production Economics*, *90*(2), 223–235. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(02\)00376-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(02)00376-6)
- Womack, J. P., & Jones, D. T. (2003). *Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation* (1st Free Press ed., rev.updated). Free Press.