

Laadullinen sisällönanalyysi lastuavan työstön julkaisujen tulostarkkuudesta

TkK-tutkielma
Turun yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Kone- ja materiaalitekniikan laitos

Laatija:
Arttu Saarinen

6.6.2025
Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu
Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandidatutkielma

Oppiaine: Konetekniikka

Tekijä(t): Arttu Saarinen

Otsikko: Laadullinen sisällönanalyysi lastuavan työstön julkaisujen tulostarkkuudesta.

Ohjaaja(t): Apulaisprofessori Sampsa Laakso

Sivumäärä: 26 sivua

Päivämäärä: 6.6.2025

Tutkielman tavoitteena on selvittää laadullisen sisällönanalyysin menetelmin, mitä pidetään tällä hetkellä hyvän tulostarkkuuden rajana lastuavaa työstöä käsittelevissä akateemisissa julkaisuissa. Tämän selvittämiseksi tutkielman yhteydessä tehtiin kirjallisuuskatsaus, jonka perusteella taulukoitiin sekä kategorioitiin alan akateemisissa artikkeleissa annettuja kuvauksia erilaisille tulostarkkuuden virheprosentteille.

Artikkeleita oli yhteensä 18, ja niistä löytyi 25 erilaista tulostarkkuuden kuvausta. Artikkelit olivat seitsemästä eri maasta ja kolmelta eri mantereelta. Kaikissa artikkeleissa käsiteltiin sorvausta sekä FEM-mallinnusta. Artikkelit oli julkaistu vuosina 2009–2024.

Artikkelien tulostarkkuuden virheprosentit ja niiden kuvaukset jaettiin laadullisen sisällönanalyysin menetelmien mukaisesti kolmeen kategoriaan: ”positiivinen”, ”neutraali” ja ”negatiivinen”.

Suurimmaksi kategoriaksi muodostui positiivisten kuvausten kategoria, johon luokiteltiin 18 erilaista kuvausta. Näiden kuvausten tulostarkkuuden virheprosentit olivat väliltä 3–15 %. Neutraaliin kategoriaan sisällytettiin kolme kuvausta, joiden virheprosentit olivat väliltä 10–20 %. Negatiivisia kuvauksia oli neljä kappaletta, ja niiden virheprosentit olivat väliltä 17–59 %.

Tehdyn kirjallisuuskatsauksen ja laadullisen sisällönanalyysin perusteella hyvän tulostarkkuuden raja lastuavaa työstöä käsittelevissä akateemisissa julkaisuissa on noin 15 %. Analyysin perusteella maiden tai mantereiden välillä ei ollut havaittavissa huomattavaa eroa sen suhteen, mitä pidettiin hyvänä tulostarkkuutena.

Tutkielman perusteella voidaan myös todeta, että tällä hetkellä alan tutkijoilla ei vaikuta olevan käytössä standardisoitua tapaa FEM-mallintaa lastuavan työstön menetelmiä tai laskea tulostarkkuuden virheprosenttia.

Avainsanat: FEM, sorvaus, tulostarkkuus

Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Tutkimusaiheen kuvaus ja menetelmät	5
2.1	Lastuava työstö	5
2.2	FEM-analyysi	9
2.3	Suuret kielimallit laadullisen tutkimuksen tukena	12
2.4	Kirjallisuustutkimus ja laadullisen sisällöntutkimuksen menetelmät	13
3	Tulokset	18
3.1	Mitä pidetään hyvänä tulostarkkuutena	18
3.2	Laadullisen sisällönanalyysin taulukko	20
3.3	Päätelmät	23
4	Yhteenveto	25
	Lähteet	26

1 Johdanto

Tämän kandidaatin tutkielman tarkoitus on laadullisen sisällönanalyysin menetelmin selvittää, minkälaista lastuavan työstön tulostarkkuutta pidetään tällä hetkellä tutkijoiden keskuudessa yleisesti hyvänä. Hyvän tulostarkkuuden rajan selvittäminen on tärkeää, sillä täydellisiä simulaatioita ei ole olemassa. Simulaation täytyy kuitenkin saavuttaa tietty tarkkuus, jotta sen voidaan todeta olevan tutkimuksen kannalta hyödyllinen.

Aiheena hyvän tulostarkkuuden raja ei kuitenkaan vaikuta olevan erityisen tutkittu. Esimerkiksi Scopus-palvelusta ei löydy aikaisempia tutkimuksia, joissa olisi yritetty selvittää yleisesti hyvänä pidettyä FEM-analyysin tulostarkkuutta lastuavassa työstössä.

Tässä tutkielmassa tulostarkkuudella tarkoitamme FEM-simuloitujen ja mitattujen voimien välistä virhettä lastuavassa työstössä. Tutkielman yhteydessä toteutetussa kirjallisuuskatsauksessa keskityttiin lastuavan työstön menetelmistä sorvaukseen. Kirjallisuuskatsauksen lähdemateriaali kerättiin akateemisista artikkeleista ja julkaisuista vuosilta 2009–2024, painotuksen ollen 2020-luvulla. Kirjallisuuskatsauksessa tarkasteltavien artikkelien piti käsitellä sorvausta, sisältää FEM-simulaatioita ja tarkastella simuloitujen sekä mitattujen voimien välisiä eroja.

Eri artikkelit sisälsivät erilaisia tapoja FEM-mallintaa. Taulukkoon on merkattu mahdollisimman tarkasti, minkälaisesta mallintamistavasta kussakin artikkelissa on kyse. Joidenkin artikkelien mallinnustavaksi on merkattu käytetyn mallin nimi. Toisten mallinnustavaksi taas on merkattu sen simulaatio-ohjelman nimi, jolla simulaatio on tehty. Tutkimukseen sisältyi lopulta artikkeleita seitsemästä eri maasta, kolmelta eri mantereelta. Tällä tavalla saatiin parempi kuva siitä, onko tulostarkkuuksien arvioinnissa eroja eri puolilla maailmaa.

Artikkelien pohjalta on laadullisen sisällönanalyysin menetelmin arvioitu ja kategorioitu 25 tulostarkkuuden kuvausta. Tulostarkkuudet ja niiden kuvaukset jaettiin kolmeen eri kategoriaan. Kategoriat olivat ”positiivinen”, ”neutraali” ja ”negatiivinen”. Kategorioinnin jälkeen analysoitiin, mitkä tekijät vaikuttivat erilaisten tulostarkkuuksien erilaisiin kuvauksiin, miten tulostarkkuuden virhe laskettiin ja mikä vaikuttaa tällä hetkellä olevan hyvän tulostarkkuuden raja lastuavan työstön akateemisissa julkaisuissa.

2 Tutkimusaiheen kuvaus ja menetelmät

Tämän luvun alaotsikoissa tarkastellaan yksityiskohtaisemmin lastuavan työstön peruseriaatteita, sekä lastuavan työstön FEM-analysointia. Lisäksi käydään vaiheittain läpi tässä tutkimuksessa käytettyjä laadullisen sisällöntutkimuksen menetelmiä, sekä kielimallien roolia.

2.1 Lastuava työstö

Lastuavasta työstöstä puhuttaessa tarkoitetaan esimerkiksi jyrsimistä, sorvausta, hiomista sahausta tai porausta. (Maaranen, 2007, p. 12) Lastuavan työstön menetelmät toimivat materiaalia poistamalla. Lastuavan työstön menetelmiä voidaan soveltaa useisiin eri materiaaleihin, kuten esimerkiksi metalleihin ja puuhun. Konetekniikan alalla lastuavan työstön menetelmät ovat keskeisiä ja niillä voidaankin valmistaa osia, joissa on hyvin korkea mittatarkkuus ja pinnanlaatu, kun verrataan esimerkiksi taottuihin osiin. (Hurskainen, 2015, p. 12) Lastuavassa työstössä tärkeimpiä parametreja ovat esimerkiksi lastuamissyvyys, lastuamisnopeus, syöttönopeus sekä haluttu pinnanlaatu.

Nämä parametrit ohjaavat koneistuksen yhteydessä tehtäviä työstöliikkeitä. Eri työstömenetelmillä työstön parametrit ja työstöliikkeet ovat erilaisia. Lastuavassa työstössä yleisimmät työstöliikkeet, sekä työstötavat ovat:

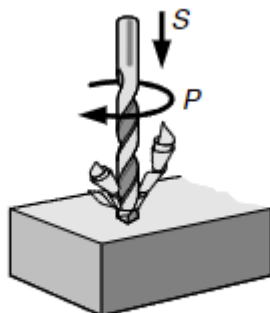
Pää- tai lastuamisliike, joka aiheuttaa työstettävän kappaleen lastuamisen. Lastuamisliikkeen mittana käytetään lastuamisnopeutta. Mittayksikkönä toimii joko m/s tai m/min.

Lastuamisnopeus lasketaan pyörivän työkappaleen (sorvaus), tai työkalun halkaisijan (poraus, jyrsintä, hiominen) mukaan. (Maaranen, 2007, p. 13)

Syöttöliike, joka vie työstettävää kappaletta ja työkalua lähemmäs toisiaan, jotta työstettävää kappaletta lastutaan halutulla tavalla. Syötön mittayksikkö on joko mm/r (millimetriä kierrosta kohti) tai mm/min. (Maaranen, 2007, p. 13)

Asetusliike on liike, joka määrittää lastuamissyvyyden. Asetusliikkeellä voidaan myös vaikuttaa syntyvän lastun poikkileikkauksen pinta-alaan. (Maaranen, 2007, p. 13)

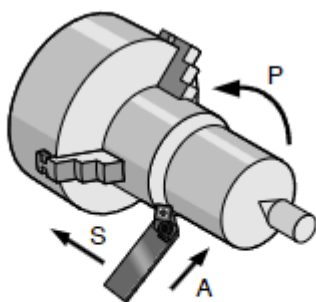
Poraamisessa työkaluun kiinnitetty terä pyöriessään irrottaa työstettävästä kappaleesta lastuja. Lastuamisnopeus lasketaan poraamisen tapauksessa terän halkaisijan mukaan. Syöttönopeus lasketaan sen mukaan, kuinka monta millimetriä liikutaan kierrosta kohti. (Maaranen, 2007, p. 13)



Työstöliikkeet porattaessa.
P = Pää- eli lastuamisliike
S = Syöttöliike

(Maaranen, 2007, koneistustekniikat, p. 13, "Työstöliikkeet porattaessa")

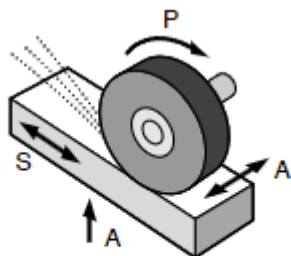
Sorvaamisessa lastuamisliikkeen tekee työkappale. Työkappale pyörii sorvin akselin päässä. Syöttöliikkeen tekee kuitenkin edelleen sorvin terä, jota tuodaan pyörivää työstökappaletta kohti. Sorvaamalla valmistetaan tavallisesti pyörähdyskappaleita. (Maaranen, 2007, p. 96)



Työstöliikkeet sorvattaessa.
P = Pää- eli lastuamisliike
A = Aetusliike
S = Syöttöliike

(Maaranen, 2007, koneistustekniikat, p. 13, "Työstöliikkeet sorvattaessa")

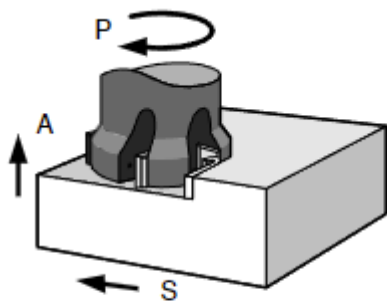
Hiomisessa poistetaan tavallisesti lastun kooltaan hyvin pieniä kappaleita työstettävän kappaleen pinnasta. Yleisimmin käytetään hiontalaikkaa, jossa hiontarakeet on kiinnitetty yhteen sideaineella. Tämän takia hionnassa on työstettävän kappaleen kanssa kontaktissa saman aikaisesti useita lastuavia teriä eli rakeita. (Maaranen, 2007, p. 67)



Työstöliikkeet hiottaessa.
P = Pää- eli lastuamislake
A = Asetusliike
S = Syöttöliike

(Maaranen, 2010, koneistustekniikat, p. 13, "Työstöliikkeet hiottaessa")

Jyrsimisessä monihampainen työkalu irrottaa pyörimällä lastuja työstettävästä kappaleesta. Työkappale kiinnitetään jyrsinkoneen pöytään. Tämä pöytä tekee jyrsimisessä tarvittavan syöttöliikkeen, sekä asetusliikkeen. (Maaranen, 2007, p. 173)



Työstöliikkeet jyrsittäessä jyrsimen otsapinnalla.
P = Pää- eli lastuamislake
A = Asetusliike
S = Syöttöliike

(Maaranen, 2007, koneistustekniikat, p. 13, "Työstöliikkeet jyrsittäessä jyrsimen otsapinnalla. ")

Lastuavassa työstössä käytetään monia erilaisia työkoneen parametreja halutun tarkkuuden tai pinnanlaadun saavuttamiseksi. **Sorvauksessa** tärkeimpiä parametreja ovat lastuamisnopeus (engl. cutting speed, V_c), syöttönopeus (engl. feed rate, f) ja lastuamissyvyys (engl. depth of cut a_p). Lastuamisnopeudella tarkoitetaan työkappaleen ja työkalun välistä suhteellista nopeutta (m/min). Syöttönopeus kuvaa, kuinka monta millia terä liikkuu yhdessä työkappaleen kierroksessa (mm/kierros). Lastuamissyvyys määrittää, kuinka paksua lastua työstökappaleesta poistetaan (mm).

Jyrsinnässä tärkeimpiin parametreihin kuuluvat myös lastuamisnopeus ja lastuamissyvyys. Jyrsinnässä käytetään kuitenkin usein teräpäitä, joissa on useita teräpaloja. Tämän seurauksena yksi jyrsinnän parametreista on syöttö hammasta kohti (engl. feed per tooth, f_z). Tämä parametri kertoo, kuinka monta millimetriä jyrsitään yhtä hammasta kohti, yhden kierroksen aikana (mm/hammas).

Poraamisessa tärkeitä parametreja ovat sorvaamisen ja jyrsinnän tavoin lastuamisnopeus, syöttönopeus ja työstökoneen kierrosluku.

Hionnassa muiden lastuavien työstötapojen tavoin syöttönopeus on keskeinen parametri. Hionnalle ominaisia parametreja ovat hiomalaikan nopeus (engl. wheel speed, V_s) ja hiontasyvyys (engl. depth of cut, a_e). Hiomalaikan nopeus on parametri, joka kertoo laikkaa käytettäessä laikan kehänopeuden (m/s). Hiontasyvyys määrittää, kuinka paljon materiaalia poistetaan yhtä hiontakertaa kohti (mm).

Lastuavan työstön menetelmien tuottamaa laatua voidaan arvioida monella tavalla. Yksi näistä tavoista on **Ra-arvo**. Ra-arvo on aritmeettinen keskimääräinen pinnankarheusarvo. Ra-arvossa pinnan epätasaisuuksia verrataan pinnan keskimääräiseen korkeuteen. Tasaisen pinnan Ra-arvo on siis matalampi, kuin epätasaisen pinnan.

Eri työstömenetelmillä on saavutettavissa erilaisia Ra-arvoja. **Sorvaamalla** työstettyjen kappaleiden Ra-arvot ovat tyypillisesti väliltä 1.6–12.5. **Poraamisella** saavutettavat Ra-arvot ovat hieman korkeammat, eli noin 6.3–25. **Jyrsimällä** normaalit Ra-arvot ovat 1.6–6.3 väliltä. Lastuavan työstön menetelmistä kaikkein tasaisin pinnanlaatu, sekä pienin Ra-arvo on saavutettavissa hiomalla. **Hiomisen** tyypilliset Ra-arvot ovat väliltä 0.2–1.6. (Hasari ja Salonen, 2006, p. 168)

Lopullinen työstömenetelmä tulee siis valita vaaditun pinnanlaadun mukaan. Eri työstömenetelmissä epätasaiselle pinnanlaadulle on erilaisia syitä. Sorvauksessa ja jyrsimisessä tyypillinen epätasaisen pinnan aiheuttaja on värinä (engl. chatter). Värinä aiheuttaa pahimmillaan epätasaisen pinnan lisäksi tulostarkkuuden heittelyä, teräpalan normaalia nopeampaa kulumista tai työstökoneen vaurioitumisen.

Värinää voivat aiheuttaa väärät työstöparametrit, työkoneen rakenne, kulunut teräpala tai työstettävän materiaalin ominaisuudet.

2.2 FEM-analyysi

FEM-analyysi, eli elementtimenetelmä (engl. Finite Element Method) on yksi monista tavoista mallintaa lastuavan työstön menetelmiä. FEM-analyysi valittiin tämän tutkielman pääasialliseksi mallinnustavaksi, sillä se on laajasti käytetty ja siitä on saatavilla runsaasti tutkimustietoa.

FEM-analyysissä prosessi on jaettu useisiin pieniin yhtälöihin työkappaleeseen ja työkaluun vaikuttavien voimien mukaan. Analyysin aluksi työkappale ja työkalu jaotellaan osiin (engl. discretizing). Jaottelua voidaan tehdä monella erilaisella tavalla, mutta usein työkappale ja työkalu jaetaan pienistä neliöistä tai kolmioista koostuvaan verkkoon (engl. mesh). (Laakso, 2015, p. 21) Tällä tavoin saadaan monimutkaisillekin geometrisille muodoille laskettua approksimaatioita käyttäen yksinkertaisimmille muodoille tarkoitettuja yhtälöitä.

FEM-analyysissä paloitetuja verkkoja voi olla kolmenlaisia. **Lagrangialaisissa** verkoissa verkko mukautuu työstettävän kappaleen liikkeisiin, esimerkiksi venymiseen. **Eulerialaisissa** verkoissa verkko pysyy aina staattisena. Kolmas verkkotyyppi on sekoitus kahdesta edellisestä, eli niin sanottu hybridiverkko. Hybridiverkoissa rajapinnoilla olevat rakenteet käyttäytyvät Lagrangialaisten verkkojen tavoin ja sisäpinnoilla olevat rakenteet käyttäytyvät Eulerialaisten verkkojen tavoin. (Laakso, 2015, p. 21)

Lastuavan työstön FEM-analyysissä vaikeuksia aiheuttavat työstettävässä kappaleessa esiintyvät plastiset muodonmuutokset ja materiaalin poistamisen yhteydessä muuttuva kappaleen geometria. Näitä ongelmia voidaan vähentää esimerkiksi vääristämällä työstettävän kappaleen verkkoa haluttuun suuntaan. Toinen tapa vähentää lastuavaa työstöä simuloitaessa esiintyvää virhettä on työstettävän kappaleen jatkuva uudelleen verkotus (engl. re-meshing).

Uudelleen verkotuksessa ohjelma määrittelee sille annettuja parametreja käyttäen lastun irronneeksi työkappaleesta. Tämän jälkeen ohjelma voi verkottaa jäljelle jäävän työkappaleen uudelleen. (Agmell, 2018, p. 36)

FEM-mallinnustapoja on useita erilaisia, mutta tämän tutkielman kannalta ei ole tarkoituksenmukaista käydä niitä kaikkia erikseen läpi. Erilaiset mallinnustavat on merkitty kirjallisuuskatsauksesta koostettuun taulukkoon mahdollisimman tarkasti. Käydään kuitenkin esimerkin vuoksi yksi FEM-mallinnustavoista läpi. Kirjallisuuskatsauksen artikkeleissa yleisin mallinnustapa oli **Johnson-Cook**, jota taulukossa merkittiin kirjaimilla JC. Johnson-Cook malli on erityisen käytetty, kun simuloidaan tilanteita, joihin liittyy suuri venymä, venymänopeus ja korkeat lämpötilat. Tässä mallissa yhtälö on käytännössä jaettu kolmeen osaan. Näissä kolmessa osassa otetaan erikseen huomioon venymä, venymänopeus ja lämpötila. Yhtälö on muodossa:

$$\bar{\sigma} = (A + B \varepsilon_p^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_{\{p,0\}}} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{(\theta - \theta_{\{0\}})}{(\theta_{\{m\}} - \theta_{\{0\}})} \right)^m \right)$$

Yhtälössä:

$\bar{\sigma}$ = virtausjännitys (engl. flow stress)

A = alkuvirtausjännitys σ_y (engl. initial yield stress)

B = muokkauslujittumismoduuli (engl. strain hardening modulus)

C = venymänopeuskerroin (engl. strain-rate dependence coefficient)

ε_p = plastinen venymä (engl. plastic strain)

n = muokkauslujittumiskerroin (engl. strain hardening exponent)

$\dot{\varepsilon}_p$ = plastinen venymänopeus (engl. plastic strain rate)

$\dot{\varepsilon}_{\{p,0\}}$ = referenssi plastinen venymänopeus (engl. reference plastic strain rate)

m = lämpöpehmenemiskerroin (engl. thermal softening coefficient)

θ = lämpötila (pisteessä) (engl. temperature)

$\theta_{\{0\}}$ = kokonaislämpötila (engl. bulk temperature)

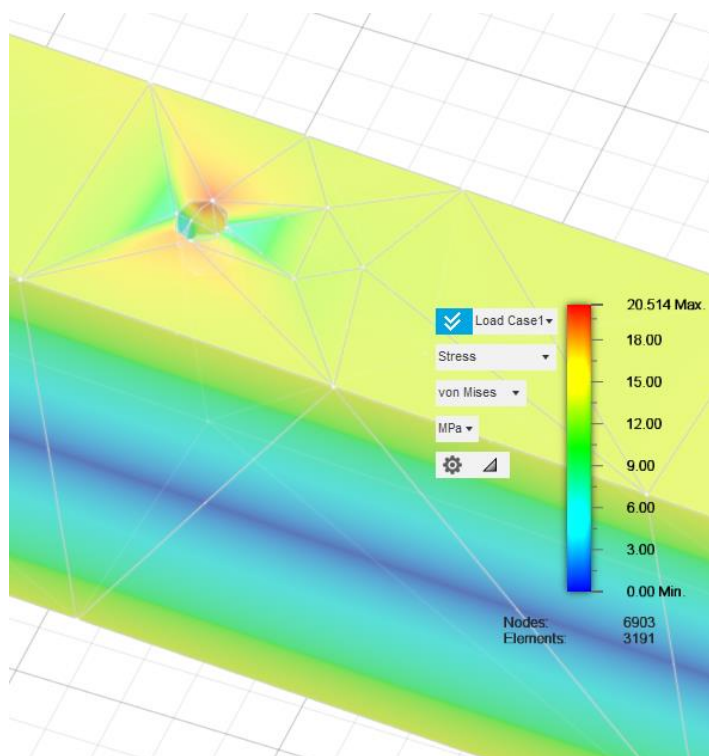
$\theta_{\{m\}}$ = sulamislämpötila (engl. melting temperature)

(Agmell, 2018, p. 39)

Yksi Johnson-Cook mallin vahvuuksista liittyy siihen, että se on eniten käytettyjen mallien joukossa. Sen käyttämät, kokeellisesti määritettävät materiaalivakiot, on jo määritelty useimmille mahdollisille työkappaleiden materiaaleille. (Agmell, 2018, p. 39)

Johnson-Cook mallin yhtälöllä selvitetyllä virtausjännityksellä voidaan laskea työstön aikana ilmenevät lastuamisvoimat. Sorvauksessa ne olivat F_c eli päälastuamisvoima, F_f eli syöttövoima ja F_p eli passiivivoima. (Laakso, 2015, p. 15) Joskus passiivivoimasta käytetään myös nimitystä radiaalivoima ja merkintää F_r .

Tässä tutkielmassa FEM-simulaation mallinnustapa ei kuitenkaan ole tarkastelun kohteena, vaan se, miten kullakin mallilla luodut simulaatiot pitivät paikkansa ja miten mallin avulla saatuja tuloksia on sanallisesti kuvailtu. Eli toisin sanoen kuinka tyytyväisiä tutkijat olivat simulaatioidensa saavuttamiin tulostarkkuuksiin.



(Fusion 360 sovelluksella generoitu verkko teräksiseen palkkiin poratulle reiälle. 2025)

2.3 Suuret kielimallit laadullisen tutkimuksen tukena

Tämän tutkielman kaltaisissa kirjallisuuskatsauksissa on tyypillistä, että lähdemateriaalia on paljon ja sen läpikäyminen vaatii huomattavan määrän aikaa. Kirjallisuuskatsauksen lähdemateriaalin läpikäymiseen vaadittavaa aikaa voidaan lyhentää käyttämällä tekoälytyökaluja, eli suuria kielimalleja (engl. Large Language Model, LLM). Nämä kielimallit pystyvät käymään muutamassa minuutissa läpi suuria määriä tekstiä eri tietokannoista, erottamaan tekstistä haluttuja konsepteja ja avainsanoja, sekä luomaan tutkimuksen tekijälle lähdemateriaalista tiivistelmiä ja listauksia. (Christou, 2023, p. 6)

Suurien kielimallien käyttämisessä laadullisessa tutkimuksessa on myös haasteita. Suuret kielimallit, kuten esimerkiksi ChatGPT perustuvat suureen lähdeaineistoon ja tilastollisten eroavaisuuksien havainnoimiseen. Jos lähdeaineistossa on virheitä, ei kielimalli pysty niitä itsenäisesti korjaamaan, tai erottamaan oikeaa ja väärää tietoa. Varsinkin laadullisessa tutkimuksessa haasteita tekoälyn käytölle aiheuttaa myös se, että tutkimuksen tekijän pitää tyypillisesti laadullisessa tutkimuksessa kyetä tekemään lähdeaineistosta saadun datan perusteella omia päätelmiään. (Christou, 2023, p. 6)

Tässä tutkielmassa on käytetty kielimallina OpenAI:n eri kielimalleja. Pääasiassa ChatGPT 4.0 ja 4.5. Kielimalleille annettiin lähdemateriaalia, josta niitä on pyydetty etsimään haluttuja avainsanoja. Kielimallit tulostivat lopuksi listan lähdemateriaalin artikkeleista, joista haluttuja avainsanoja löytyi. Tällä tavalla lähdemateriaalista pystyttiin nopeasti seulomaan tutkimuksen kannalta oleellisia artikkeleita analysoitaviksi.

Suuria kielimalleja voidaan kirjallisuuskatsauksissa käyttää lähdemateriaalista etsittävien avainsanojen löytämisen lisäksi myös epäoleellisen datan poistamiseksi, tekstin tai tiedoston muokkaamiseksi haluttuun muotoon, sekä usein toistuvien kaavojen tunnistamiseen. (Noroozi, 2023, pp. 3574–3575)

2.4 Kirjallisuustutkimus ja laadullisen sisällöntutkimuksen menetelmät

Laadullinen sisällöntutkimus (engl. qualitative content analysis) keskittyy **laadullisen datan** (engl. qualitative data) tutkimiseen **määrällisen datan** (engl. quantitative data) sijasta. Laadullinen data tarkoittaa esimerkiksi asiakkaiden tyytyväisyyttä johonkin tuotteeseen tietyllä skaalalla. Määrällisellä datalla tarkoitetaan esimerkiksi kyseisen tuotteen määrää varastossa, valmistuskustannusta tai painoa. (Kuckartz ja Rädiker, 2023, p. 2)

Laadullinen sisällöntutkimus ei ole tekniikan alalla käytetyimpiä menetelmiä, mutta esimerkiksi lääketieteeseen liittyvissä tutkimuksissa laadullisen sisällöntutkimuksen menetelmiä käytetään laajasti. (Hsieh ja Shannon, 2005, p. 1277)

Laadullisen sisällöntutkimuksen avulla voidaan mennä pelkkää sanojen laskemista pidemmälle ja tutkia kielenkäyttöä syvemmin. Suuret tekstimäärät voidaan luokitella tutkimuksen kannalta oleellisiin kategorioihin, joissa sanoilla ja kuvauksilla on samankaltaisia merkityksiä. (Hsieh ja Shannon, 2005, p. 1278)

Taulukko 1: Laadullisen ja määrällisen analyysin käyttökohteita. Käännetty lähteestä Kuckartz ja Rädiker, 2023, p. 3, Table 1.1.

	Laadullinen data	Määrällinen data
Laadullinen analyysi	A Hermeneutiikka, Grounded theory- tutkimusmenetelmä, Tulkitseva tekstintutkimus.	B Päätelmien tekeminen ja esittäminen määrällisen datan perusteella.
Määrällinen analyysi	C Sanojen muuttaminen numeroiksi, sanataajuudet, sanaluettelot.	D Numeeristen tietojen tilastolliset ja matemaattiset analyysit.

Laadullisessa tutkimuksessa käytetään metodeja, jotka eivät ole tiukasti standardoituja. Usein tutkimuksen tekijän pitää itse tehdä datan pohjalta päätelmiä. (Oswald, 2010, p. 75) Esimerkiksi tässä tutkielmassa tekijän pitää itse arvioida, milloin lähdetekstissä kuvataan saatua tulostarkkuutta positiivisessa valossa ja milloin ei. Usein tämä arviointi pitää tehdä hyvin lyhyidenkin tekstikatkelmien perusteella.

Koska laadullisessa tutkimuksessa tutkijat tekevät paljon omia päätelmiään, on erityisen tärkeää, että tutkimusta tehtäessä tunnetaan tutkimusryhmän sisäiset resurssit, sekä niiden mahdolliset vaikutukset tutkimukseen. Tällä tarkoitetaan, että tutkijoiden pitää ottaa tutkimusta tehdessään huomioon esimerkiksi heidän oman tietotaitonsa taso, sekä mahdolliset ennakoasenteet. (Bengtsson, 2016, p. 8)

Tämän tutkielman tarkoituksena on kartoittaa, millä arvoilla tutkijat kuvailevat saamaansa tulostarkkuutta positiivisesti, milloin neutraalisti ja milloin negatiivisesti. Tulostarkkuus ja lähtöparametrit ovat määrällistä dataa. Tyytyväisyys saatuihin tulostarkkuuksiin on laadullista dataa.

Laadullisen sisällöntutkimuksen vaiheet ovat Kuckartzin ja Rädikerin mukaan seuraavat:

- 1. Lähdetekstien läpikäynti.** Tämän kyseisen tutkielman osalta tämä tarkoittaa kirjallisuuskatsausta lastuavan työstön akateemisista teksteistä, joissa tulostarkkuutta on mallinnettu FEM-analyysin avulla.
- 2. Kategorioiden luonti.** Luodaan kerättyä laadullista dataa varten kategoriat, joihin saatu data voidaan jakaa. Tässä tutkielmassa on käytetty kategorioita ”positiivinen”, ”neutraali” ja ”negatiivinen” kuvaamaan suhtautumista saatuu tulostarkkuuteen.
- 3. Ensimmäinen kategoriointi kierros.** Kirjallisuuskatsauksessa kerätyt kuvaukset koodataan omiin kategorioidihinsa.
- 4. Alakategorioiden luonti.** Suuremmissa tutkimuksissa on usein tarpeen jakaa jotkin kategoriat vielä alakategorioidiin. Tämän tutkielman datan määrällä tähän ei ole tarvetta.
- 5. Toinen datan kategoriointi kierros.** Tässä vaiheessa data koodataan 4. vaiheessa luotuihin alakategorioidiin. Tämän tutkielman datan määrällä tähän ei ole tarvetta.
- 6. Yksinkertainen ja monimutkainen analyysi.** Edellisissä vaiheissa koodattua dataa ja luotuja kategorioita analysoidaan monesta eri näkökulmasta. Esimerkiksi: Miten kategoriat ja niihin koodatun datan määrä vertautuvat toisiinsa ja mitä se kertoo? Miten kerättyä dataa voitaisiin visualisoida?
- 7. Tuloksien kirjaaminen ylös.** Viimeinen vaihe on luonnollisesti saatujen tuloksien ja päätelmien kirjaaminen.

(Kuckartz ja Rädiker, 2023, pp. 102–122)

Tässä tutkielmassa nämä vaiheet toteutuivat seuraavasti:

1. Lähdetekstien läpikäynti. Lähteitä etsittiin Scopus-palvelusta hakusanoilla ”FEM”, ”Turning” ja ”Force”. Artikkelit järjestettiin sitaattien lukumäärän perusteella eniten siteeratusta artikkelista vähiten siteerattuun. Tämän jälkeen käytiin läpi 200 eniten siteerattua artikkelia. Näistä karsittiin kielimallilla pois ne, joissa ei ollut mainintaa tulostarkkuudesta. Tämän lisäksi arvioitiin artikkeleissa ilmeneviä kuvauksia esimerkiksi pinnanlaadun RA-arvosta, sekä työstöparametrien valinnasta. Näin oli mahdollista arvioida, johtuiko tulostarkkuus virheistä simulaatiossa vai epäonnistuneesta työstöstä. Tämän jälkeen artikkeleita karsittiin vielä niiden julkaisuajankohdan mukaan, koska tutkimuksen oli tarkoitus käsitellä sitä, mitä tulostarkkuutta pidetään nykyään hyvänä.

Koska yksi tutkimuskysymyksistä käsitteli sitä, onko hyvän tulostarkkuuden raja samanlainen ympäri maailman, valittiin analyysiin mukaan sopivia artikkeleita mahdollisimman monesta eri maasta. Tämä tehtiin kuitenkin niin, että lähdekieli oli edelleen rajattu Englantiin.

Lopuksi valitut artikkelit käytiin läpi ja niissä ilmenneet kuvaukset tulostarkkuudesta kerättiin taulukkoon. Tämän lisäksi kyseiseen taulukkoon kerättiin tulostarkkuuden laskemiseen käytettyjen voimien määrä, keskimääräinen virhe tulostarkkuudessa, artikkelin julkaisumaa, julkaisuvuosi, FEM-mallinnustapa tai käytetty ohjelma sekä tutkimuksessa työstetty materiaali.

2. Kategorioiden luonti. Kuten aiemmin todettiin, tässä tutkielmassa päädyttiin kolmeen kategoriaan ”positiivinen”, ”neutraali” ja ”negatiivinen”, koska näiden kategorioiden väliset rajat ovat laadullisen tutkimuksen kontekstissa selkeät. Oli myös selvää, että osa kuvauksista olisi jäänyt pelkästään kategorioiden ”positiivinen” ja ”negatiivinen” ulkopuolelle, joten ”neutraali” kategoria tarvittiin rajatapauksia varten.

Koska artikkeleissa olleet kuvaukset saadulle tulostarkkuudelle olivat suurimmaksi osaksi positiivisia, olisi kategorioihin voitu lisätä neljänneksi kategoriaksi ”hyvin positiivinen”, jotta kaikki kategoriat sisältäisivät suunnilleen saman verran tuloksia. Tämän kuitenkin todettiin olevan tutkielman kannalta tarpeetonta. Lisäksi ”positiivisen” ja ”hyvin positiivisen” kuvauksen rajan asettaminen olisi ollut huomattavasti vaikeampaa kuin esimerkiksi ”positiivisen” ja ”neutraalin” kuvauksen.

3. Ensimmäinen kategoriointi kierros. Tässä vaiheessa kaikki 25 kerättyä tulostarkkuutta ja niiden kuvaukset jaettiin kohdassa 2. luotuihin kategorioihin. Kun kuvauksia ja virheprosentteja jaetaan näihin kategorioihin, pitää laadulliselle tutkimukselle tyypillisesti tutkimuksen tekijän pystyä tekemään päätelmiä annetun datan pohjalta. Tässä tutkielmassa päätelmiä siitä, olivatko artikkelin tekijät tyytyväisiä artikkelissa simuloidun ja mitattujen voimien väliseen tulostarkkuuteen tehtiin joissain tapauksissa hyvin vähäsanaistenkin kuvausten pohjalta. Vähäsanaissa kuvauksissa yksittäiset adjektiivit korostuivat. Adjektiivit, jotka useimmiten aiheuttivat kuvauksen kategorioinnin positiiviseksi, olivat esimerkiksi ”good”, ”sufficient” ja ”accurate”.

Pelkästään adjektiivien perusteella lajittelua ei kuitenkaan tehty. Jos tutkijat totesivat simuloitujen ja mitattujen arvojen vastaavan toisiaan, pidettiin kuvausta positiivisena. Jos taas simuloitujen ja mitattujen arvojen todettiin olevan ”hyväksyttävää” tai niiden välistä eroa ei kommentoitu millään tavalla, todettiin kuvauksen olevan neutraali. Neutraaleja kuvauksia oli artikkeleissa yhteensä kolme kappaletta.

Negatiiviseksi luokitellut tulostarkkuuden kuvaukset olivat selkeästi kategorioitavissa negatiivisiksi. Negatiivisiksi luokitelluissa kuvauksissa esimerkiksi kerrottiin, että simulaatio ei vastannut kokeellisia arvoja, tai että jokin toinen testattu malli vastasi näitä arvoja selkeästi paremmin. Negatiivisia kuvauksia oli artikkeleissa yhteensä neljä kappaletta.

4. Yksinkertainen ja monimutkainen analyysi. Koska tämän tutkielman datan määrällä ei ollut tarpeellista jakaa kategorioita alakategorioihin, on tämän kyseisen laadullisen sisällönanalyysin seuraavana vaiheena yksinkertainen ja monimutkainen analyysi.

Ensin tarkasteltiin kategorioiden kokoa. Tämän analyysin pohjalta oli huomattavissa, että useimmat artikkelit kuvasivat saamaansa tulostarkkuutta positiivisesti. Oli myös huomattavissa, että positiivisten kuvauksien määrä vähenee huomattavasti tulostarkkuuden virheen kasvaessa yli 15 prosentin.

Tämän jälkeen tarkasteltiin vuosilukujen vaikutusta kuvauksiin, tämän tutkielman tuloksien mukaan viimeisen viidentoista vuoden aikana positiivisen tulostarkkuuden raja ei ole ainakaan huomattavasti muuttunut.

Lopuksi tarkasteltiin, vaikuttivatko erilaiset tutkimuksen kohteena olleet materiaalit tai tutkimuksen toteutusmaa siihen, miten tulostarkkuutta arvioitiin. Kerätyissä artikkeleissa oli käytetty yhteensä 12 erilaista materiaalia. Näistä kaikki olivat metalleja tai metalliseoksia. Huolimatta materiaalista, positiivisesti kuvattujen tulostarkkuuksien virheet pysyivät välillä 0–15 %.

Tutkimuksen tekomaa ei myöskään näyttänyt vaikuttavan tulostarkkuuden kuvauksiin. Ainoana erikoisuutena oli malesialaisen tutkimuksen maininta siitä, että tulostarkkuus oli hyvä, koska virhe oli alle 10 %. Tästä 10 % säännöstä ei kuitenkaan löytynyt mainintaa muista malesialaisista tai kaakkois-aasialaisista artikkeleista. Tämän säännön olemassaolosta ei löytynyt viitteitä myöskään muista alan artikkeleista tai tämän tutkielman laadullisen sisällönanalyysin tuloksista.

5. Tuloksien kirjaaminen. Tulostarkkuuksien kuvaukset, virheprosentit ja kategoriat kirjattiin ylös erilliseen taulukkoon, josta ne olivat helposti luettavissa. Taulukkoon on myös sisällytetty artikkelin julkaisuvuosi, julkaisumaa, sekä katkelma artikkelin kategoriointiin vaikuttaneesta tulostarkkuuden kuvauksesta. Tämä taulukko (Taulukko 2.) löytyy kohdasta ”**3.2 Laadullisen sisällönanalyysin taulukko**”, eli sivulta 20.

3 Tulokset

Tutkielman tarkoituksena oli saada tulokseksi arvio hyvän tulostarkkuuden rajasta. Tämän lisäksi tehtiin huomioita lastuavan työstön FEM-mallinnuksen yhteydessä ilmenevistä virheistä, sekä tulostarkkuuden laskemiseen liittyvistä erilaisuuksista artikkelien välillä. Seuraavissa alaotsikoissa käydään tarkemmin läpi, mitä tällä hetkellä pidetään tutkimuskirjallisuudessa hyvänä tulostarkkuutena, miltä tulokset näyttivät taulukoituna ja mitä päätelmiä näiden tuloksien pohjalta voidaan tehdä.

3.1 Mitä pidetään hyvänä tulostarkkuutena

Tämän kirjallisuuskatsauksen, sekä laadullisen sisällönanalyysin perusteella, tällä hetkellä yleisesti hyvänä pidetty tulostarkkuus tutkijoiden keskuudessa on noin 0–15 %. Eri maissa julkaistujen artikkelien välillä ei vaikuttaisi olevan juurikaan eroavaisuuksia hyvänä pidetyn tulostarkkuuden rajan suhteen. Artikkelissa 17 kerrotaan tulostarkkuuden olevan hyväksyttävä, koska virhe on alle 10 %. Tätä alle 10 prosentin määritelmää hyvän tulostarkkuuden rajasta ei kuitenkaan kirjallisuuskatsauksessa yksikään toinen artikkeli toistanut tai seurannut, olivat ne tehty samassa maassa kuin artikkeli 17 tai eivät. Suurin tulostarkkuuden virhe, jolle annettiin positiivinen kuvaus, oli artikkelissa 12, jossa päälastuamisvoiman simuloidun ja mitatun kokeellisen voiman välinen ero oli 15.3 %.

Suurin osa artikkeleista, jotka sisälsivät negatiivisia kuvauksia saadusta tulostarkkuudesta, sisälsivät myös selityksen sille, miksi tulostarkkuus oli huono. Esimerkiksi artikkeli 18 kertoo, että tulostarkkuus kärsi, kun työstöparametreja muutettiin. Tulostarkkuuden virheen kasvu oli siis osittain vääränlaisten parametrien tai värinän aiheuttamaa. Tämän lisäksi artikkelissa 18 kerrotaan, että tulostarkkuuden heikkeneminen saattoi johtua myös terän kulumisesta tai työstettävän materiaalin heterogeenisyydestä. Artikkelissa 18 korkein tulostarkkuuden virhe syöttövoimassa oli 33 % ja lastuamisvoimassa 42 %.

Negatiivisia kuvauksia oli kirjallisuuskatsauksen lähdeaineistossa huomattavasti vähemmän, kuin positiivisia kuvauksia. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että tutkimuksissa on tehty erilaisia simuloiteja, sekä testattu erilaisia parametreja, kunnes on löydetty kelvollinen tulostarkkuus. Jos artikkelista oli löydettävissä negatiivinen kuvaus kokeellisen mallinnustavan tulostarkkuudesta, oli kyseisessä artikkelissa todennäköisesti myös positiivinen kuvaus vertauskohteena olevasta perinteisemmästä mallinnustavasta.

Erilaisten FEM-mallinnustapojen välillä ei tässä tutkimuksessa ollut havaittavissa huomattavaa eroa sen suhteen, mitä pidettiin hyvänä tulostarkkuutena. Useissa artikkeleissa kuitenkin todettiin eri mallien sopivan erilaisiin kokeisiin eri tavalla. Tärkeimpinä eroina on se, miten esimerkiksi lämmön tai materiaalin taipumisen vaikutus otetaan huomioon. Tämän lisäksi on myös huomattava, että eri mallinnustavat kehittyvät jatkuvasti. Esimerkiksi artikkelissa 1 tavallisella Johnson-Cook mallinnustavalla saatiin tulostarkkuuden virheen keskiarvoksi 16.6 %. Samassa artikkelissa kokeiltiin myös uutta mallinnustapaa, jossa Johnson-Cook malliin lisättiin parametrien valitsemiseen kehitetty algoritmi. Tällä uudella mallinnustavalla tulostarkkuuden virheen keskiarvo oli 6.4 %.

Kirjallisuuskatsauksen aikana oli huomattavissa, että artikkelien välillä ei ollut standardisoitua tapaa mitata tulostarkkuuden virhettä. Useat artikkelit mittasivat vain päälastuamisvoimaa, eivätkä ollenkaan esimerkiksi syöttövoimaa tai passiivivoimaa. Tämän lisäksi FEM-mallinnustavat, valitut työstöparametrit ja kokeen toistojen määrät vaihtelivat artikkelien välillä. Toisin sanoen tulostarkkuuden ”keskimääräinen virhe” on laskettu eri artikkeleissa erilaisista lähtökohdista ja eri tavoilla.

Tämän lisäksi eri artikkelit tutkivat usein eri materiaaleja, joten materiaalikohtaiset ominaisuudet kuten lujuus tai lämmönjohtavuus eivät aina olleet artikkelien välillä verrattavissa toisiinsa. Artikkeleiden käyttämien sorvien välillä oli myös rakenteellisia eroja. Jotkut artikkelit, kuten esimerkiksi Artikkelit 7. käsittelivät erilaisia sorvien teräpaloja. Artikkelissa 7. teräpalaan oli tehty pieniä reikiä, joiden havaittiin vähentävän lastuamisvoimia. Samassa artikkelissa kuitenkin todettiin simuloidun ja todellisen voimien välisen virheen nousseen normaalista teräpalasta teksturoituun teräpalaan siirryttäessä neljästä prosentista kahdeksaan prosenttiin.

On kuitenkin hyvä huomata, että artikkeleissa hyvän tulostarkkuuden raja pysyi noin 15 prosentissa, vaikka koeasetelmat olivat artikkelien välillä erilaisia.

3.2 Laadullisen sisällönanalyysin taulukko

Taulukko 2: Laadullisesta sisällönanalyysistä koostettu taulukko.

+ = Positiivinen kuvaus

N = Neutraali kuvaus

- = Negatiivinen kuvaus

Artikkeli	Vuosi	Voimat	Mallinnustapa	Materiaali	Virhe	Kuvaus	Katkelma	Julkaisumaa
Artikkeli 1.	2024	1	JC	304 ruostumaton teräs	16.6%	-	"This large fluctuation in error... could not accurately reflect actual turning experiment conditions."	Kiina
Artikkeli 1.	2024	1	JCM	304 ruostumaton teräs	6.4%	+	"Results demonstrated that this JCM model suited the actual experiments conducted the most"	Kiina
Artikkeli 2.	2024	3	Hybrid FEML	42CrMo4 teräs	13 %	+	"The prediction accuracy is good"	Suomi
Artikkeli 3.	2024	1	FEM&ANN (force prediction)	AISI-52100 teräs	8.1%	+	"Increased level of accuracy (from conventional methods)"	Kreikka
Artikkeli 3.	2024	1	FEM&ANN (power prediction)	AISI-52100 teräs	11.2%	+	"Increased level of accuracy (from conventional methods)"	Kreikka
Artikkeli 4.	2009	1	FEM (lastuamisvoima)	100Cr6 teräs	20 %	N	Kirjoittaja ei kommentoinut tulostarkkuutta negatiivisesti tai positiivisesti	Yhdysvallat
Artikkeli 5.	2015	1	FEM (lastuamisvoima)	Ti-6Al-4V	3 %	+	"It can be seen that all three cutting forces have good agreement between the experimental and numerical results."	Yhdysvallat
Artikkeli 5.	2015	1	FEM (syöttövoima)	Ti-6Al-4V	4 %	+	"It can be seen that all three cutting forces have good agreement between the experimental and numerical results."	Yhdysvallat

Artikkeli	Vuosi	Voimat	Mallinnustapa	Materiaali	Virhe	Kuvaus	Katkelma	Julkaisumaa
Artikkeli 5.	2015	1	FEM (passiivivoima)	Ti-6Al-4V	10 %	+	"It can be seen that all three cutting forces have good agreement between the experimental and numerical results."	Yhdysvallat
Artikkeli 6.	2019	1	FEM (lastuamisvoima)	Ti-6Al-4V	15 %	+	"There exists a close agreement in experimental and simulation results"	Intia
Artikkeli 7.	2016	3	FEM (regular cutting tool)	Ti-6Al-4V	4 %	+	"It can be said that the FEM model can be used to simulate.... With adequate accuracy"	Yhdysvallat
Artikkeli 7.	2016	3	FEM (microtextured cutting tool)	Ti-6Al-4V	8 %	+	"It can be said that the FEM model can be used to simulate.... With adequate accuracy"	Yhdysvallat
Artikkeli 8.	2015	1	FEM (lastuamisvoima)	Ti-6Al-4V	10.9%	N	"The prediction error for mechanistic model is less when compared with FEM at various cutting speeds"	Intia
Artikkeli 9.	2014	2	JC	TC21 Titanium	<15%	+	"The cutting force in simulation agrees well with that in the tests"	Kiina
Artikkeli 10.	2021	-	FEM/FEA	AISI-D3 teräs	<10%	+	"The relative error is low for both cases"	Kreikka
Artikkeli 11.	2023	1	JC (lastuamisvoima)	304 ruostumaton teräs	13.1%	+	"Therefore, it can be considered that the 3-D cutting finite element model established in this article is consistent with the actual turning."	Kiina
Artikkeli 12.	2020	1	JC (lastuamisvoima)	Inconel 718	15.3%	+	"The simulation results were in good agreement with the practical test results."	Kiina

Artikkeli	Vuosi	Voimat	Mallinnustapa	Materiaali	Virhe	Kuvaus	Katkelma	Julkaisumaa
Artikkeli 13.	2021	1	3D FEM	AISI 420 teräs	4.1%	+	"Thus, it indicates that 3D FE model is more suitable in the prediction of machining responses."	Intia
Artikkeli 13.	2021	1	2D FEM	AISI 420 teräs	59%*	-	"Thus, it indicates that 3D FE model is more suitable in the prediction of machining responses."	Intia
Artikkeli 14.	2015	1	FEM (lastuamisvoima)	FCD700 valurauta	8.1%	+	"Therefore, the prediction is accurate"	Malaysia
Artikkeli 15.	2022	1	JC (lastuamisvoima)	AISI 4340 teräs	10 %	+	"Good agreement can be noticed between experiments and model results."	Saudi-Arabia
Artikkeli 16.	2020	2	JC (lastuamisvoima ja passiivivoima)	AISI 4340 teräs	6 %	+	"It was found that the experimental values of output parameters are good agreement with simulated and predicted values."	Intia
Artikkeli 17.	2017	3	FEM&RSM	Inconel 718	10 %	N	"The error for cutting force is acceptable since the value is less than 10%"	Malaysia
Artikkeli 18.	2011	1	FEM (syöttövoima)	26NiCrMo V145 teräs	33 %*	-	"FEM predictions match well... at almost all of the conditions. However, the feed force at... has 22%-33% deviations. Exact match between FEM and experimental results could not be expected..."	Kiina
Artikkeli 18.	2011	1	FEM (lastuamisvoima)	26NiCrMo V145 teräs	42 %*	-	"FEM predictions match well... at almost all of the conditions. However... the main cutting force has 30%-42% deviations. Exact match between FEM and experimental results could not be expected..."	Kiina

* Artikkelissa ei ilmoitettu tulostarkkuuden virheen keskiarvoa, merkattu suurin prosentti.

3.3 Päätelmät

Tehdyn kirjallisuuskatsauksen ja laadullisen sisällönanalyysin perusteella voidaan tärkeimpänä päätelmänä pitää sitä, että tällä hetkellä hyvän tulostarkkuuden raja on n. 15 %. Ei ollut huomattavissa merkittävää muutosta tulostarkkuuden kuvauksissa sen perusteella, missä maassa kyseisen artikkelin tutkimus oli tehty, tai minä vuonna kyseinen artikkeli oli julkaistu. Laadullisen sisällönanalyysin perusteella ei myöskään ollut havaittavissa, että hyvän tulostarkkuuden raja vaihtelisi materiaalien tai simulointitapojen välillä.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella oli pääteltävissä, että tällä hetkellä ei ole yleistä standardia sille, mitkä työstövoimat otetaan tulostarkkuuden laskemisessa huomioon.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella oli myös pääteltävissä, ettei tällä hetkellä ole alan laajuista standardisoitua FEM-mallinnustapaa tai ohjelmistoa, jota suurin osa tutkijoista käyttäisi tutkimuksissaan.

Artikkelien välillä ei myöskään ollut havaittavissa samanlaisuuksia sen suhteen, kuinka monta kertaa kokeet toistettiin. Joidenkin artikkelien tulostarkkuuksien virheprosenttien keskiarvot olivat siis laskettu suuremmalla määrällä tuloksia, kuin toisten artikkelien.

Kategorioiden koosta on huomattavissa, että suurin osa tulostarkkuuksien kuvauksista oli positiivisia. Tästä voidaan päätellä, että tutkimuksissa simulaatioita tehtäessä pyritään saavuttamaan tietty taso, ennen kuin tutkimus julkaistaan, tai tutkimusta jatketaan.

Negatiivisten kuvausten kategorian koko jäi odotettua pienemmäksi. Kaikki negatiiviset kuvaukset olivat myös artikkeleista, jotka sisälsivät myös positiivisia kuvauksia jostain muusta mallinnustavasta tai erilaisista työstöparametreista.

Vaikuttaa siis siltä, että useimmat tutkimukset vaativat ainakin yhden onnistuneen simulaation, jotta tutkimusta voidaan pitää onnistuneena tai toistettavana. Kun tämä onnistunut simulaatio tai koeasetelma onnistuneilla työstöparametreilla saadaan toteutettua, ei vanhaa ”epäonnistunutta” simulaatiota välttämättä edes sisällytetä tutkimuksesta kirjoitettuun artikkeliin tai raporttiin.

Negatiivisia kuvauksia löytyi siis eniten artikkeleista, joissa tutkittiin eri mallinnustapojen välisiä eroja. Näiden artikkelien kohdalla on koettu tärkeäksi julkaista myös epätarkkojen simulaatioiden tulokset, joiden tulostarkkuuteen ei olla oltu täysin tyytyväisiä, sillä eri mallinnustapoja vertailtaessa epätarkatkin simulaatiot antavat tietoa siitä, miten eri mallinnustavat sopivat erilaisiin tilanteisiin.

Neutraalit kuvaukset olivat harvinaisia, mutta yleisempiä artikkeleissa, joissa pääasiallinen mielenkiinto ei ollut FEM-simulaatiossa vaan esimerkiksi tutkittavassa materiaalissa.

Tämän kirjallisuuskatsauksen perusteella ei ollut huomattavissa, että jonkin tietyn työstövoiman simuloinnin tulostarkkuus olisi ollut merkittävästi muiden työstövoimien simuloituja tulostarkkuuksia huonompi. Ei myöskään ollut huomattavissa, että työstövoimien välillä hyvän tulostarkkuuden raja olisi vaihdellut. Oli kuitenkin havaittavissa, että jos jokin kolmesta työstövoimasta jätettiin kokeessa mittaamatta, niin se oli useimmiten passiivivoima.

4 Yhteenveto

Tutkimuksessa kuvausten määrällisesti suurin kategoria oli positiivisten kuvausten kategoria, johon luokiteltiin 18 erilaista virheprosenttia väliltä 3–15 %. Neutraali kategoriaan kategorioitiin kolme kuvausta, joiden virheprosentit olivat väliltä 10–20 %. Negatiivisia kuvauksia oli neljä kappaletta ja niiden virheprosentit olivat väliltä 17–59 %. Useimmissa artikkeleissa tutkijat olivat siis simuloitujen ja kokeellisesti mitattujen voimien väliseen virheeseen tyytyväisiä.

Tutkielman perusteella vaikuttaa siltä, että hyvän tulostarkkuuden rajana pidetään yleisesti noin 15 % virhettä. Yksikään positiivisesti kuvailtu virheprosentti ei kahteen merkitsevään numeroon pyöristämisen jälkeen ylittänyt tätä lukua. Maiden tai mantereiden välillä ei ollut havaittavissa vaihtelua hyvän tulostarkkuuden rajan kanssa.

Tutkielman perusteella voidaan todeta, että tällä hetkellä alan tutkimuksissa ei ole käytössä standardisoitua tapaa FEM-mallintaa lastuavan työstön menetelmiä. Tämän lisäksi tällä hetkellä ei vaikuta olevan käytössä vakiintunutta akateemista standardia sille, miten tulostarkkuutta mitataan tai mitä kaikkia voimia sen laskemisessa huomioidaan.

Tutkielman rajoituksiin kuului lähdetekstien kielen rajoittaminen englantiin. Toisena rajoitteena oli se, että laadulliselle tutkimukselle tyypillisesti tässäkin tutkielmassa tutkielman tekijä tekee oman tulkintansa mukaan esimerkiksi kuvausten kategorioinnit.

Aiheen jatkotutkimuksissa olisi hyödyllistä tutkia onko hyvän tulostarkkuuden rajoissa erilaisuuksia erilaisten lastuavien työstötapojen välillä. Myös lähdeaineiston lisääminen esimerkiksi lähdekieleen liittyviä rajoituksia poistamalla saattaisi mahdollistaa aiheen tutkimisen tavalla, jossa artikkelien välillä olisi vähemmän muuttujia. Tutkimus voitaisiin esimerkiksi kohdistaa pelkästään tiettyä mallinnustapaa tai työstömateriaalia käyttäviin artikkeleihin.

Näiden aiheiden lisäksi jatkotutkimuksissa olisi hyödyllistä tutkia esimerkiksi lastuavan työstön tulostarkkuuden laskemisen tai FEM-analysoinnin standardisoinnin hyötyjä ja haittoja alan tutkimuskirjallisuudelle.

Lähteet

1. Maaranen, K. (2007). *Koneistustekniikat*. Sanoma Pro.
2. Hurskainen, V.-V. (2015). *Pyörivän keskiökärjen rakenteen kehittäminen työstövärahtelyjen välttämiseksi sorvauksessa*. Diplomityö. LUT-yliopisto.
3. Hasari, H. & Salonen, P. (2006). *Teknillinen piirtäminen*. Otava
4. Laakso, S. (2015). *Development of material models and acquisition of model parameters for metal cutting simulations*. Aalto University publication series
5. Agmell, M. (2018). *Applied FEM of metal removal and forming*. Studentlitteratur
6. Christou, P. (2023). *How to Use Artificial Intelligence (AI) as a Resource, Methodological and Analysis Tool in Qualitative Research?* Saatavilla: <https://nsuworks.nova.edu> (Viitattu 19.5.2025)
7. Kuckartz, U. & Rädiker, S. (2023). *Qualitative Content Analysis: Methods, Practice and Software*. SAGE Publications
8. Hsieh, H.-F. & Shannon, S.E. (2005). Three approaches to qualitative content analysis. *Qualitative Health Research*, 15(9), pp.1277-1288.
9. Bengtsson, M. (2016). How to plan and perform a qualitative study using content analysis. *NursingPlus Open*, 2(1), pp. 8-14.
10. Noroozi, M. (2023). An AI-Assisted Systematic Literature Review of the Impact of Vehicle Automation on Energy Consumption. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 8(6), pp. 3572-3592.