

Ville Räsänen

CAD-OHJELMIEN VAIKUTUS SUUNNITTELUUN JA TUOTANTOON

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Teemu Launis
Toukokuu 2025

TIIVISTELMÄ

Ville Räsänen: CAD-ohjelmien vaikutus suunnitteluun ja tuotantoon
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden kandidaattiohjelma, konetekniikka
Toukokuu 2025

Tämän kandidaatintyön aiheena on CAD-ohjelmistojen (engl. Computer-Aided Design) vaikutus nykyaikaiseen tuotesuunnitteluun ja tuotantoon. Työn tavoitteena oli selvittää, kuinka CAD-ohjelmistot vaikuttavat suunnitteluprosessin tehokkuuteen, tuotannon laatuun ja kustannustehokkuuteen sekä tarkastella uusien teknologioiden, kuten tekoälyn, pilvipohjaisen yhteistyön ja generatiivisen suunnittelun, roolia järjestelmien kehityksessä.

Työssä esiteltiin ensin CAD-ohjelmistojen perusteet ja niiden keskeinen rooli suunnitteluprosessissa. CAD mahdollistaa tarkan 3D-mallinnuksen, simuloinnin ja digitaalisten kaksosten hyödyntämisen, joiden avulla suunnitteluratkaisuja voidaan testata ja optimoida ennen fyysistä prototyyppiä. Tämä vähentää virheitä, nopeuttaa tuotekehitystä ja parantaa lopputuotteen laatua. Tuotantoprosessin näkökulmasta CAD tukee valmistuksen automatisointia, prosessien optimointia ja resurssien tehokasta käyttöä.

Uusien teknologioiden vaikutusta tarkasteltiin erityisesti tekoälyn, pilvipohjaisten alustojen ja generatiivisen suunnittelun näkökulmista. Tekoäly tuo mahdollisuuksia suunnittelun automatisointiin, virheanalyysiin ja optimointiin. Generatiivinen suunnittelu yhdistää tekoälyn laskentatehon luovaan suunnitteluun ja mahdollistaa uusien, innovatiivisten rakenteiden luomisen. Pilvipohjaiset CAD-ratkaisut taas mahdollistavat reaaliaikaisen, globaalin yhteistyön ja tehostavat tiimityöskentelyä.

Työn tuloksena havaittiin, että CAD-ohjelmistojen jatkuva kehitys lisää niiden merkitystä paitsi suunnittelutyökaluna, myös strategisena osana koko tuotekehitys- ja tuotantoketjua. Tekoälyn, pilvipalveluiden ja generatiivisen suunnittelun integrointi CAD-järjestelmiin vie teollisuutta kohti älykkäämpää, nopeampaa ja resurssitehokkaampaa tulevaisuutta.

Avainsanat: koneensuunnittelu, CAD, tuotanto, suunnittelu

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia: Scopus AI

Tekoälysovellusten nimet ja versiot:
Scopus AI (ei ole virallista versiota tiedossa)
ChatGPT 4o-mini

Käyttötarkoitus: Scopus Ai:ta käytetty lähteiden etsimiseen. ChatGPT:tä käytetty tiivistelmän luonnosteluun.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Tiedonhaku, tiivistelmä

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. CAD-OHJELMISTO SUUNNITTELUSSA.....	3
2.1 Suunnittelun tehostuminen	3
2.2 Digitaalinen kaksonen ja simuloinnin hyödyntäminen	6
3. CAD-OHJELMISTO TUOTANNOSSA	9
3.1 Tuotantoprosessien automatisointi.....	9
3.2 Materiaalitehokkuus ja kestävä kehityksen näkökulma	11
4. TULEVAISUUS	12
4.1 Tekoäly.....	12
4.2 Virtuaalitodellisuus.....	14
5. YHTEENVETO.....	16
LÄHTEET	18

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>CAD/CAE/CAM-järjestelmien rooli osana laajempaa digitaalista suunnittelu- ja tuotantoympäristöä sekä siirtymä kohti kyberfyysisiä järjestelmiä. (Toche et al. 2017)</i>	<i>5</i>
Kuva 2.	<i>CAEn avulla voidaan tunnistaa rakenteen kriittiset kohdat virtuaalisesti. (Xia et al. 2017)</i>	<i>7</i>
Kuva 3.	<i>Nykyiset ja uudet STEP-NC-rajapinnat robotin ohjelmoimiseksi. (Slavković et al. 2017)</i>	<i>10</i>
Kuva 4.	<i>Turvavyön lukko, joka on Generative Design Toolin luoma, verrattuna tavanomaiseen lukkomalliin (2018).</i>	<i>13</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AI	engl. Artificial intelligence, tekoäly
AR	engl. Augmented Reality, lisätty todellisuus
CAD	engl. Computer-Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CAE	engl. Computer-Aided Engineering tietokoneavusteinen tekniikka
CAM	engl. Computer-Aided Manufacturing, tietokoneavusteinen valmistus
IoT	engl. Internet of Things, esineiden internet
VR	engl. Virtual Reality, virtuaalitodellisuus

1. JOHDANTO

Viime vuosikymmeninä tietokoneavusteiset suunnitteluohjelmistot eli CAD-ohjelmistot (engl. Computer-Aided Design) ovat mullistaneet tuotantoteollisuutta ja suunnitteluprosesseja. Perinteisestä manuaalisesta piirustustyöstä on siirrytty digitaaliseen suunnitteluun, jossa tarkat 3D-mallit mahdollistavat visuaaliset tarkastelut, simuloinnit ja valmistusprosessien optimoinnin jo ennen fyysistä tuotantoa. CAD-ohjelmistojen merkitys ei rajoitu pelkästään tuotekehitykseen, vaan ne vaikuttavat koko tuotantoketjuun, aina raaka-aineiden käytön optimoinnista valmistuksen automatisointiin ja laadunvarmistukseen.

CAD-ohjelmistot ovat merkittävästi muuttaneet tuotantoteollisuutta. Ne vähentävät suunnitteluvirheitä, optimoivat raaka-aineiden käyttöä ja mahdollistavat tuotantoprosessien automatisoinnin, mikä lisää joustavuutta ja kustannustehokkuutta. Erityisesti suurissa tuotantoympäristöissä CAD mahdollistaa useiden osapuolten yhtäaikaisen työskentelyn, mikä parantaa tiedonkulkua ja vähentää suunnittelun aikaisia virheitä. Tämä johtuu sen kyvystä mahdollistaa monimutkaisten rakenteiden ja komponenttien tarkemman suunnittelun ja analysoinnin, joka on erityisen tärkeää esimerkiksi koneteollisuudessa ja autoteollisuudessa, joissa tarkkuus, kestävyys ja optimointi ovat keskeisiä vaatimuksia.

Ilman CAD-ohjelmistojen tuomia etuja nykyaikainen teollisuus ei olisi saavuttanut nykyistä teknologista tasoaan. Edut ovat mahdollistaneet kehittyneitä valmistusmenetelmiä, kuten 3D-tulostuksen ja CAM-järjestelmien (engl. Computer-Aided Manufacturing) integroinnin, jotka tukevat tuotantoprosessien automatisointia, resurssitehokkuutta ja kustannusten hallintaa. Erityisesti 3D-tulostus on tuonut uusia mahdollisuuksia nopeaan prototyyppien ja yksilöllisten tuotteiden valmistamiseen. Tulevaisuudessa tekoälyn ja koneoppimisen integrointi CAD-ohjelmistoihin voi mahdollistaa entistä älykkäämmän suunnitteluprosessin, jossa ohjelmistot voivat esimerkiksi optimoida rakenteita itsenäisesti, ehdottaa vaihtoehtoisia ratkaisuja tai tunnistaa suunnitteluvirheitä reaaliaikaisesti.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on analysoida, kuinka CAD-teknologian käyttö tehostaa suunnitteluprosessia, parantaa tuotannon tehokkuutta ja edistää resurssitehostusta valmistusta. Tutkimus toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, jossa hyödynnetään

tieteellisiä artikkeleita ja alan kirjallisuutta. Työssä tarkastellaan CAD-ohjelmiston vaikutuksia suunnitteluprosessin tehostamiseen, tuotannon tehokkuuteen sekä tulevaisuuden kehityssuuntiin.

2. CAD-OHJELMISTO SUUNNITTELUSSA

CAD-ohjelmistot ovat keskeinen osa nykyaikaista tuotesuunnittelua, sillä ne mahdollistavat tarkan, tehokkaan ja joustavan suunnitteluprosessin. Niiden avulla tuotteiden geometriaa ja rakennetta voidaan luoda, analysoida ja hallita digitaalisessa ympäristössä, mikä parantaa suunnittelun tarkkuutta ja optimoi tuotantoprosesseja.

Nykyään CAD-ohjelmistot ovat laajasti käytössä tuotteen kehitysprosessin suunnittelu- ja valmistusvaiheissa. CAD-malleihin sisältyvän tiedon uudelleenkäyttö ja jakaminen on yhä tärkeämpää suunnitteluprosessin nopeuttamiseksi, tuotteen laadun parantamiseksi ja kustannusten vähentämiseksi (Hou et al. 2007). Ikubanni et al. (2022) mukaan CAD on mahdollistanut kehittyneiden rakenteiden ja komponenttien suunnittelun esimerkiksi koneteollisuudessa ja autoteollisuudessa, jossa tarkkuus ja optimointi ovat ensiarvoisen tärkeitä. CAD-ohjelmistot mahdollistavat monimutkaisten geometrinen rakenteiden mallintamisen ja analysoinnin. Tämä tuo esiin CAD-ohjelmistojen merkityksen kehittyneiden rakenteiden suunnittelussa, joissa pienetkin virheet voivat johtaa suuriin kustannuksiin ja laadun heikkenemiseen.

2.1 Suunnittelun tehostuminen

CAD-ohjelmisto on tietokoneavusteinen suunnitteluohjelmisto, joka mahdollistaa tuotteiden geometrioiden ja rakenteiden luomisen, muokkaamisen ja analysoinnin digitaalisessa ympäristössä. Se tehostaa suunnitteluprosessia vähentämällä manuaalista työtä ja parantamalla suunnittelun tarkkuutta. CAD-ohjelmistojen käyttöönoton alkuperäisenä tavoitteena oli tehostaa suunnittelutyötä ja vähentää hallinnollisia kustannuksia tarjoamalla insinööreille työkalu, joka nopeuttaa ja yksinkertaistaa suunnittelupiirustusten laatimista. (Brown 2009) Teknologian kehittyessä ja markkinoiden vaatimusten kasvaessa CAD-ohjelmistoista on tullut keskeinen tekijä suunnittelun nopeuttamisessa ja virheiden vähentämisessä.

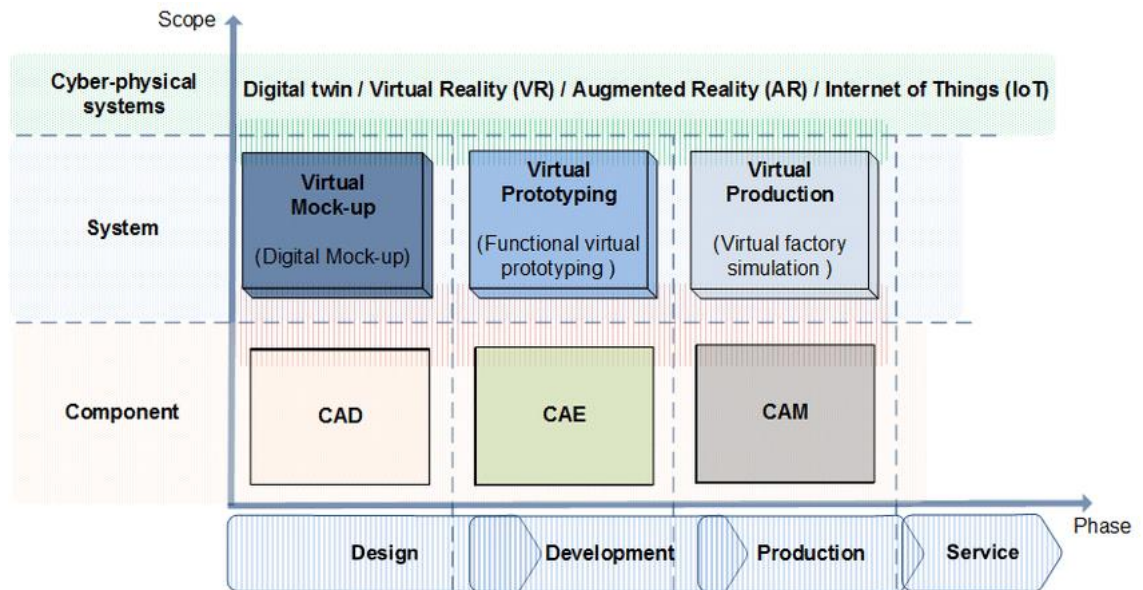
CAD-ohjelmistojen merkittävä etu on niiden kyky lyhentää tuotekehityksen läpimenoaika. Tämä saavutetaan automatisoimalla suunnitteluprosessin vaiheita, vähentämällä manuaalista työtä ja mahdollistamalla samanaikainen työskentely eri osastojen välillä. Lisäksi CAD-ohjelmistoihin kytketyt analyysi- ja simulointityökalut, joita kutsutaan CAE-järjestelmiksi (engl. Computer-Aided Engineering), mahdollistavat suunnitteluvirheiden havaitsemisen jo varhaisessa vaiheessa, mikä vähentää kalliita muutoksia tuotantovai-

heessa. (Tan & Vonderembse 2006) CAE-järjestelmä on tietokoneavusteinen suunnittelu- ja analyysityökalu, joka tukee suunnitteluprosessia simuloimalla tuotteen toimivuutta ja suorituskykyä erilaisissa olosuhteissa ennen sen valmistusta. CAE-ohjelmistot mahdollistavat rakenteiden, lämpötilojen, jännityksien, virtauksen ja muiden tärkeiden tekijöiden analysoinnin, mikä auttaa havaitsemaan mahdolliset suunnitteluvirheet ja parantamaan tuotteen kestävyyttä. Näiden järjestelmien avulla voidaan tehdä ennusteita tuotteen käyttäytymisestä ja optimoida sen ominaisuuksia, mikä vähentää kalliita muutoksia tuotantovaiheessa. (Lantada 2013)

Yhä useammin CAD-ohjelmistot integroidaan osaksi laajempaa digitaalisen suunnittelun ekosysteemiä, kuten tietokoneavusteista valmistusta eli CAM-järjestelmää. CAM-järjestelmä on tietokoneavusteinen valmistusohjelmisto, joka käyttää CAD-mallia valmistusprosessin ohjaamiseen ja optimoimiseen. CAM-järjestelmät luovat tarkat ohjeet tuotteen valmistamiseksi, kuten työstöradat ja muut valmistusparametrit, joita voidaan suoraan käyttää koneilla ja roboteilla valmistusprosessin ohjaamiseen. CAM-ohjelmisto parantaa valmistusprosessin tarkkuutta ja tehokkuutta, sillä se vähentää virheiden mahdollisuuksia ja mahdollistaa tuotannon automatisoinnin. (Lantada 2013) Tämä saumaton tiedonsiirto suunnittelun ja tuotannon välillä minimoi yhteensopivuusongelmia ja parantaa kokonaisprosessin tehokkuutta, sillä virtuaaliset prototyypit ja simuloinnit mahdollistavat tuotteen testaamisen jo ennen fyysisen valmistuksen aloittamista. Näin voidaan vähentää virheiden määrää ja parantaa lopputuotteen laatua. (Miao et al. 2002)

Kuva 1 havainnollistaa, kuinka CAD-, CAE- ja CAM-järjestelmät muodostavat perustan digitaaliselle suunnittelulle, analysoinnille ja valmistukselle eri tuotekehityksen vaiheissa. Kuvassa esitetään, miten nämä teknologiat yhdistyvät järjestelmätasolla virtuaalisten mallien (engl. virtual mock-up), virtuaalisten prototyyppien (engl. virtual prototyping) virtuaalisen tuotannon (engl. virtual production) kautta. Virtuaalinen malli tarkoittaa digitaalista esitystä tuotteesta tai rakenteesta, jota voidaan tarkastella ja analysoida ennen fyysisen version valmistamista. (Touche et al. 2017) Virtuaalinen prototyyppi on digitaalinen prototyyppi, jonka avulla tuotteen toimivuutta, suorituskykyä ja ominaisuuksia voidaan testata ja arvioida ilman fyysisiä kokeita. Virtuaalinen tuotanto viittaa tuotantoprosessin simulointiin digitaalisessa ympäristössä, mikä mahdollistaa valmistusmenetelmien optimoinnin ja ongelmakohtien havaitsemisen ennen varsinaista tuotantoa. Näiden toimintojen laajentamista tukevat uudet teknologiat kuten digitaalinen kaksonen (engl. digital twin), virtuaalitodellisuus (VR, engl. Virtual Reality), lisätty todellisuus (AR, engl. Augmented Reality) ja esineiden internet (IoT, engl. Internet of Things), jotka yhdessä mahdollistavat kyberfyysisten järjestelmien suunnittelun ja simuloinnin (Touche et al. 2017).

Digitaalinen kaksonen tarkoittaa fyysisen tuotteen tai prosessin tarkkaa digitaalista vastinetta, jonka avulla voidaan reaaliaikaisesti seurata ja optimoida toimintaa. Virtuaalitoimellisuus on tietokoneella luotu keinotekoinen ympäristö, jossa käyttäjä voi liikkua ja toimia kolmiulotteisesti. Lisätty todellisuus puolestaan yhdistää digitaalista sisältöä todellisen maailman näkymään, rikastaen käyttäjän havaintokokemusta. Esineiden internet viittaa verkkoon liitettyihin laitteisiin ja järjestelmiin, jotka keräävät ja vaihtavat tietoa keskenään älykkään ohjauksen ja päätöksenteon mahdollistamiseksi. (Touche et al. 2017)



Kuva 1. CAD/CAE/CAM-järjestelmien rooli osana laajempaa digitaalista suunnittelua ja tuotantoympäristöä sekä siirtymä kohti kyberfyysisiä järjestelmiä. (Toche et al. 2017)

Pilvipohjainen CAD-ratkaisu tarkoittaa CAD-ohjelmiston käyttöä pilvipalvelussa sen sijaan, että ohjelmisto olisi asennettu suoraan käyttäjän työasemalle. Tällöin käyttäjät voivat käyttää CAD-ohjelmistoa ja työskennellä suunnitelmien parissa internetin kautta, missä tahansa ja millä tahansa laitteella, joka on yhteydessä verkkoon. Pilvipohjaiset CAD-ratkaisut ovat muuttaneet tapaa, jolla suunnittelijat ja insinöörit työskentelevät. (Suzuki 2021) Aiemmin CAD-ohjelmistot vaativat tehokkaita työasemia, mutta pilvipohjaiset ratkaisut mahdollistivat joustavamman ja skaalautuvamman työskentelytavan. Näiden järjestelmien keskeisiä etuja ovat reaaliaikainen yhteistyö, automaattinen varmuuskopiointi sekä laitteisto- ja sijaintiriippumattomuus (Ikubanni et al. 2022). Pilvipohjainen CAD tukee monimutkaisten projektien hallintaa globaalisti tarjoamalla insinööreille ja suunnittelijoille mahdollisuuden tehdä reaaliaikaista yhteistyötä ja jakaa tietoja tehokkaasti (Hunden & Woldeyohanneksen 2022). Tämä kehitys on merkittävä osa nykyaikaisten

CAD-ohjelmistojen kehittymistä, sillä ne mahdollistavat interaktiiviset simulaatiot ja reaaliaikaisen muokkauksen. Erityisesti valmistusteollisuudessa, jossa suunnittelun ja tuotannon välinen integraatio on ratkaisevan tärkeää, nämä ominaisuudet parantavat tehokkuutta ja vähentävät virheitä.

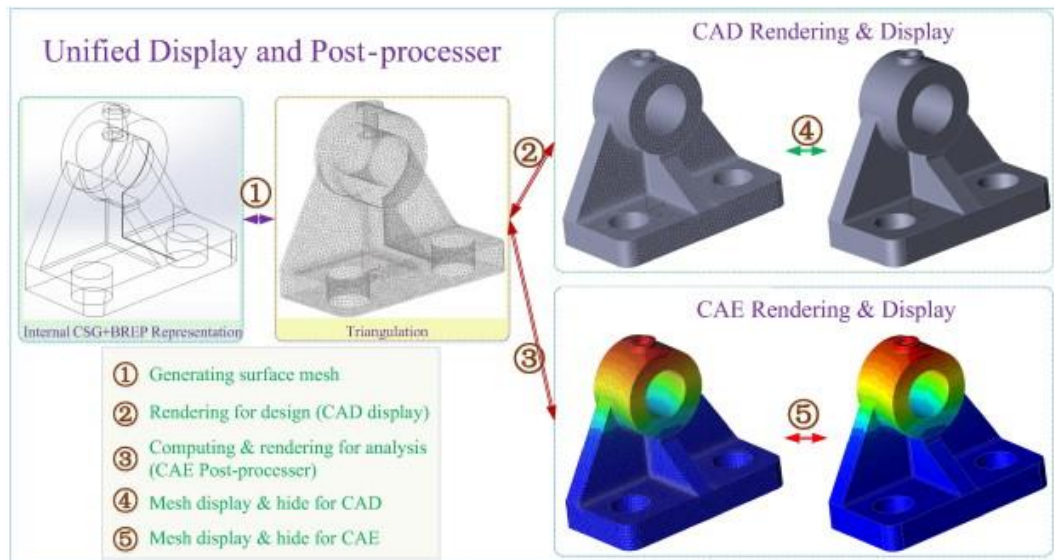
2.2 Digitaalinen kaksonen ja simuloinnin hyödyntäminen

Digitaalinen kaksonen on virtuaalinen malli fyysisestä tuotteesta, järjestelmästä tai prosessista, jota voidaan käyttää suunnittelun, analyysin ja optimoinnin tukena (Wang et al. 2023). Se yhdistää reaaliaikaisen tai simuloitun datan fyysisen järjestelmän käyttäytymiseen, mahdollistaen ennakoivan analyysin ja jatkuvan kehityksen koko tuotteen elinkaaren ajan. Yhdistämällä fyysisen ja virtuaalisen tilan reaaliaikaisella tiedonkeruulla digitaalinen kaksonen voi optimoida tuotteen suorituskykyä sekä parantaa elinkaarenhallintaa.

CAD-ohjelmistot ovat keskeinen työkalu digitaalisten kaksosten luomisessa, sillä ne tarjoavat tarkat 3D-mallit, joita voidaan hyödyntää simuloinneissa ja toimintojen optimoinnissa. Näiden mallien korkea tarkkuus ja monimutkaisuus lisäävät digitaalisten kaksosten täsmällisyyttä ja luotettavuutta, mikä on keskeistä suunnitteluprosessien tarkkuuden ja optimoinnin kannalta. (Wang et al. 2023)

CAE-järjestelmät mahdollistavat digitaalisen kaksosen analysoinnin ja virtuaalisen testaamisen. Simuloinnin avulla voidaan analysoida rakenteellisia, termisiä ja virtausominaisuuksia jo ennen fyysisten prototyyppien valmistusta (Gandouzi et al. 2021). Esimerkiksi lujuusanalyysi ja virtausdynamiikka mahdollistavat rakenteiden kestävyysarvioinnin ja tuotteen suorituskyvyn optimoinnin jo varhaisessa suunnitteluvaiheessa.

Kuva 2 esittää lujuusanalyysin von Mises – jännitys jakauman, jonka avulla voidaan tunnistaa kriittiset alueet ennen tuotteen valmistusta. Von Mises -jännitys on yleisesti käytetty menetelmä materiaalin murtumisen arviointiin monimutkaisissa kuormitustilanteissa. Simulaatioiden avulla voidaan myös ennakoida mahdollisia vikoja tai toimintahäiriöitä, mikä tukee parempaa päätöksen tekoa ennen tuotteen fyysistä valmistusta (Kirkwood & Sherwood 2018). Tämä vähentää tarvetta kalliille ja aikaa vieville fyysisille testeille sekä täten lyhentää tuotekehitysaikaa.



Kuva 2. CAEn avulla voidaan tunnistaa rakenteen kriittiset kohdat virtuaalisesti.
(Xia et al. 2017)

CAD-ohjelmistot mahdollistavat myös monimutkaisten geometristen rakenteiden mallintamisen ja analysoinnin, mikä tukee innovatiivisten ja optimoitujen ratkaisujen kehittämistä. Esimerkiksi lujuus- ja virtausanalyysit voidaan integroida suoraan suunnitteluprosessiin, jolloin insinöörit voivat testata ja parantaa tuotetta jo ennen fyysisten prototyyppien valmistusta. Tämä vähentää materiaalihukkaa ja prototyyppien valmistukseen liittyviä kustannuksia. (Tan & Vonderembse 2006)

Tulevaisuudessa digitaalisen kaksosen ja CAD-ohjelmistojen integraatio tulee entisestään kehittymään. Esimerkiksi tekoälyn ja esineiden internetin eli IoT:n yhdistäminen digitaaliseen kaksoseen voi tuottaa entistä tarkempia simulointeja ja parantaa tuotteiden suorituskyvyn ennustettavuutta. (Montenegro 2022) Esineiden internet tarkoittaa fyysisten laitteiden esineiden verkottamista internettiin, jolloin ne voivat kerätä, siirtää ja vaihtaa tietoa automaattisesti. IoT-laitteita ovat esimerkiksi sensorit, koneet, ajoneuvot ja kodin älylaitteet, jotka voivat kommunikoida keskenään ja ohjautua etäyhteyksien kautta. (Simpanen 2017)

Teollisuus 4.0 viittaa tuotannon ja teollisuuden digitalisaation aikakauteen, jossa hyödynnetään edistyksellisiä teknologioita, kuten automaatiota, tietojenkäsittelyä, tietoverkkoa, tekoälyä, esineiden internetiä, virtuaalista todellisuutta ja lisättyä todellisuutta. (Singh, T. et al. 2023) Tällä on ollut merkittävä vaikutus teolliseen tuotantoon, sillä se vähentää kustannuksia ja parantaa tuotannon joustavuutta, tehokkuutta ja laatua. Esimerkiksi teollisuus 4.0-ratkaisujen käyttäjät ovat saaneet tuotantokustannuksia 10–30 %, logistiikkakustannuksia 10–30 % ja laadunhallintakustannuksia 10–20 % vähemmäksi. (Singh, T. et al. 2023) Digitaalinen kaksoinen voi edistää teollisuus 4.0-ratkaisujen kehitystä, joissa

tuotantoprosessit ovat aiempaa älykkäämpiä, joustavampia ja automatisoidumpia. (Rajaja et al. 2023) Näiden teknologioiden yhdistäminen voi avata uusia mahdollisuuksia tuotteen räätälöinnissä ja tuotekehityksessä, mikä johtaa kustannustehokkaampiin ja kestävämpiin tuotteisiin.

3. CAD-OHJELMISTO TUOTANNOSSA

CAD-ohjelmistot ovat keskeinen osa nykyaikaista tuotantoprosessia, sillä ne mahdollistavat tehokkaan, joustavan ja tarkasti hallitun valmistuksen. CAD-ohjelmistojen avulla tuotteen geometriaa ja teknisiä ominaisuuksia voidaan simuloida, optimoida ja muokata ennen fyysistä valmistusta, mikä vähentää virheitä ja nopeuttaa tuotantoprosessia. Tämä on erityisen tärkeää monimutkaisissa valmistusympäristöissä, joissa tuotteen laadunhallinta ja tuotantoparametrien tarkka säätö on olennaista.

CADin käyttöönotto mahdollisti tuotannon monimuotoisuuden lisäämisen. Tässä uudessa tuotantomallissa kustannukset eivät olleet enää ensisijainen strateginen tavoite, vaan painopiste siirtyi laatuun, joustavuuteen, asiakaspalveluun ja juuri oikeaan aikaan -toimitusketjun hallintaan (Theodorou & Florou 2008). Nykyisin digitalisaation myötä CAD toimii myös datalähtöisen tuotannon perustana, mahdollistaen älykkäät valmistusprosessit ja paremman tuotantoresurssien hallinnan

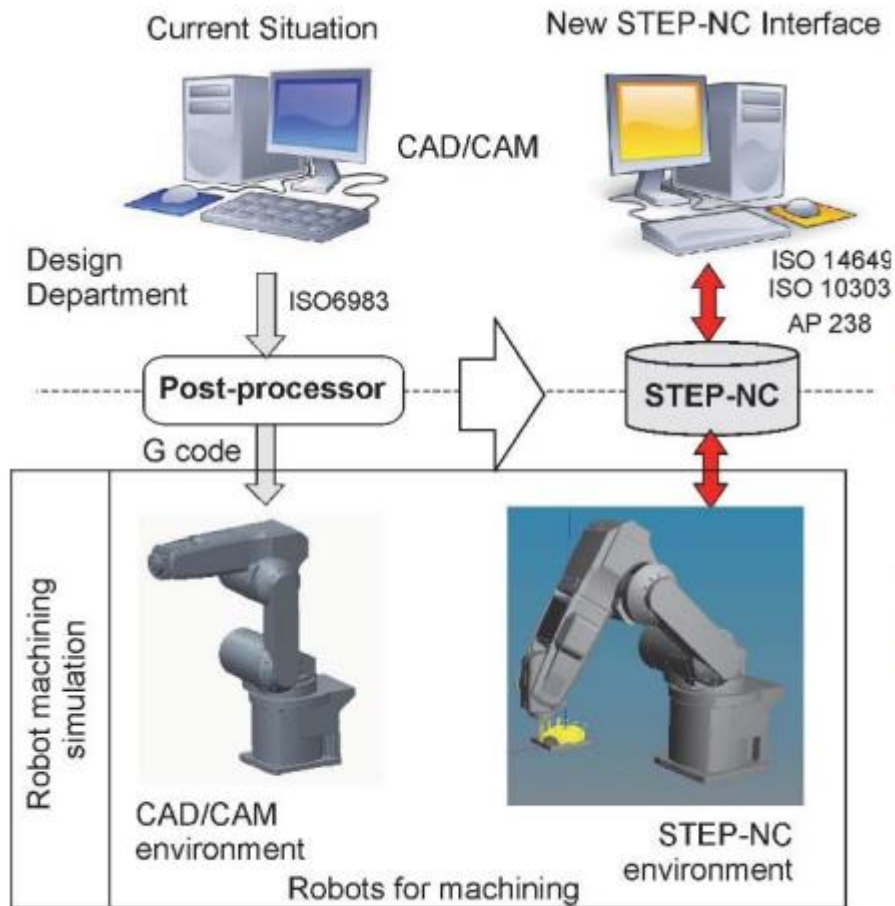
Ilman CAD-teknologian tarjoamia etuja moderni valmistusteollisuus ei olisi saavuttanut nykyistä monimuotoisuuttaan ja tehokkuuttaan. Se on mahdollistanut uusien valmistusmenetelmien, kuten 3D-tulostuksen integroinnin tuotantoon. Erityisesti joustava ja asiakaskohtainen valmistus on tehostunut, sillä CAD-mallien avulla voidaan helposti mukauttaa tuotantoa ilman merkittäviä lisäkustannuksia.

3.1 Tuotantoprosessien automatisointi ja optimointi

CAD-ohjelmistot ovat keskeisessä roolissa tuotantoprosessien automaation ja optimoinnin kehittämisessä. Ne mahdollistavat saumattoman siirtymän suunnittelusta valmistukseen integroimalla suunnittelutiedot suoraan valmistusjärjestelmiin, kuten CAM-ohjelmistoihin. CAD- ja CAM-sovellusten tehokas integrointi vähentää datan konvertoinnista johtuvia virheitä, parantaa tuottavuutta ja lyhentää tuotteen kehitysaikaa. (Stänășel et al. 2015) Tämä on erityisen tärkeää korkean tarkkuuden valmistusympäristöissä, joissa virheettömyys ja tehokkuus ovat keskiössä.

Näiden järjestelmien yleistymisen on lisännyt tarvetta monipuolisesti CAD/CAM-osaville insinööreille, mikä puolestaan on kannustanut koulutusjärjestelmiä ja yrityksiä kehittämään asiantuntemustaan. Lisäksi digitaalisten kaksosten hyödyntäminen suunnittelun ja valmistuksen välisessä tiedonsiirrossa mahdollistaa reaaliaikaisen optimoinnin ja simuloinnin tuotannon aikana, mikä entisestään vähentää virheiden määrää ja parantaa prosessien tehokkuutta. (Wang et al. 2023)

Yksi esimerkki automaation ja ohjelmoinnin yhdistämisestä on STEP-NC-standardi. Se tarjoaa uudenlaisen, olio-ohjelmointiin perustuvan lähestymistavan tuotannon ohjelmointiin. Vaikka perinteinen ohjelmointi on edelleen yleisesti käytetty menetelmä, STEP-NC:n mahdollistama ominaisuuspohjainen ohjelmointi on yleistymässä. Näitä kahta lähestymistapaa käytetään yhä useammin rinnakkain. Kuvassa 3 esitetään nykyinen ja uusi ohjelmointikäytäntö. (Slavković et al. 2017)



Kuva 3. Nykyiset ja uudet STEP-NC-rajapinnat robotin ohjelmoimiseksi. (Slavković et al. 2017)

Azemi et al. (2019) mukaan robotiikka on yksi keskeisimmistä CAD/CAM-integraation mahdollistamista teknologioista. Robottisovellusten yhdistäminen CAD-pohjaisiin valmistusprosesseihin mahdollistaa materiaalinkäsittelyn ja työnkulkujen automatisoinnin, mikä lyhentää tuotantoaikoja ja parantaa tuotelaatua. Erityisesti joustavassa automaatiassa, jossa tuotantoprosessit mukautuvat reaaliaikaisesti kysynnän vaihteluihin, CAD/CAM-ratkaisut tarjoavat merkittäviä etuja.

Optimointialgoritmit mahdollistavat entistä tarkemman valmistusprosessien hallinnan, mikä pienentää tuotantovirheiden riskiä ja parantaa tuotannon joustavuutta (Kirkwood &

Sherwood 2018). Tekoälyn ja koneoppimisen integrointi CAD/CAM-järjestelmiin tarjoaa uusia mahdollisuuksia automaattiseen suunnittelupäätöksentekoon ja tuotantoprosessien reaaliaikaiseen mukautumiseen. Kehittyneet simulaatiot ja optimointialgoritmit mahdollistavat entistä tarkemman valmistusprosessien hallinnan, mikä pienentää tuotantovirheiden riskiä (Gandouzi et al. 2021).

3.2 Materiaalitehokkuus ja kestävä kehityksen näkökulma

CAD-ohjelmistojen merkitys ulottuu tuotantoprosessien automatisoinnin ja optimoinnin lisäksi myös materiaalitehokkuuden parantamiseen ja kestävä kehityksen edistämiseen. Vinodhin (2011) mukaan digitaalinen suunnittelu mahdollistaa tarkemman materiaalin käytön, minimoi hukan ja tukee kiertotaloutta tarjoamalla keinoja materiaalien uudelleenkäyttöön ja optimointiin jo suunnitteluvaiheessa.

Yksi keskeisimmistä CAD-teknologian eduista materiaalitehokkuuden näkökulmasta on topologinen optimointi. Tässä menetelmässä ohjelmisto laskee rakenteen optimaalisen muodon mekaanisten kuormitusten perusteella. Tämän avulla voidaan suunnitella kevyempiä, mutta silti kestäviä rakenteita, mikä vähentää materiaalinkulutusta rakenteen lujuuden kärsimättä. Lisäksi CAD-ohjelmistot tukevat elinkaarianalyysiä, jonka avulla voidaan arvioida materiaalivalintojen ja valmistusmenetelmien ympäristövaikutuksia koko tuotteen elinkaaren ajalta. (Yoely et al. 2018) Tämä auttaa suunnittelijoita tekemään päätöksiä, jotka vähentävät energiankulutusta ja hiilijalanjälkeä.

Kestävä kehityksen näkökulmasta CAD-teknologiat mahdollistavat myös kiertotalouden periaatteiden hyödyntämisen. Modulaariset ja helposti purettavat rakenteet tukevat materiaalien uudelleenkäyttöä ja kierrätystä. Esimerkiksi uudelleenkäytettävien komponenttien suunnittelu CAD-mallien pohjalta voi vähentää jätettä ja pidentää tuotteiden käyttöikä. (Tao et al. 2017) Lisäksi digitaalinen prototyyppiointi ja simulointi vähentävät fyysisten prototyyppien tarvetta, mikä pienentää materiaalikulutusta ja ympäristökuormaa jo tuotteen kehitysvaiheessa. Yhdistettynä tuotteen elinkaaren hallintaan CAD-suunnittelu tukee kestävä tuotekehitystä koko tuotteen elinkaaren ajan. Materiaalivalinnoista aina käytöstä poistamiseen ja kierrätykseen saakka. (Singh, H et al. 2023)

4. TULEVAISUUS

CAD-ohjelmistojen kehitys kiihtyy uusien teknologioiden, kuten tekoälyn, pilvipohjaisen yhteistyön ja generatiivisen suunnittelun, myötä. Tekoäly mahdollistaa automaattisen optimoinnin, virheanalyysin ja nopeamman päätöksenteon, mikä tehostaa tuotekehitystä ja vähentää suunnitteluvirheitä (Madan et al. 2023). Pilvipohjaiset ratkaisut parantavat yhteistyötä globaalisti, mahdollistaen reaaliaikaisen suunnittelun seurannan ja vähentäen paikallisten laskentaresurssien tarvetta. Generatiivinen suunnittelu yhdistettynä tekoälyyn auttaa kehittämään innovatiivisempia ja kustannustehokkaampia tuotteita, joissa geometriat ja materiaalit optimoidaan automaattisesti (Madan et al. 2023). Lisäksi tulevaisuudessa CAD voi yhdistyä virtuaalimallitodellisuuteen, tarjoten immersivisiä suunnitteluympäristöjä, jotka parantavat visualisointia ja mahdollistavat mallien testaamisen ennen valmistusta (Ikubanni et al. 2022). Näiden kehityssuuntien myötä CAD-ohjelmistot muuttuvat entistä älykkäämmiksi ja integroituvat tiiviimmin tuotantoprosesseihin, mikä lisää tehokkuutta ja vähentää virheiden määrää.

4.1 Tekoäly

Tekoäly eli AI (engl. Artificial intelligence) tarkoittaa tietojenkäsittelyn osa-aluetta, jossa kehitetään järjestelmiä ja koneita suorittamaan tehtäviä, jotka normaalisti edellyttävät ihmisen älykkyyttä, kuten oppimista, päättelyä ja ongelmanratkaisua. Tekoäly mahdollistaa koneiden oppimisen, päätöksenteon, ongelmanratkaisun, luonnollisen kielen käsittelyn, visuaalisen tunnistamisen ja jopa luovan toiminnan ilman suoraa ihmisen ohjausta. (Stryker & Kavlakoglu) Tekoälyn kehittyessä suunnittelutehtävistä voi tulla entistä automaattisempia, ja tekoäly voi luoda ainutlaatuisia suunnitelmia ilman ihmisen panosta. Tekoälyn ja CAD-ohjelmiston yhdistäminen nopeuttaa tuotekehitystä, sillä tekoäly voi analysoida tietoa ja tehdä päätöksiä. Lisäksi tekoäly voi tallentaa suunnittelutietoa ja tehdä muutoksia ilman ihmisen väliintuloa, lyhentäen suunnittelun läpimenoaikaa ja parantaen suunnitteluprosessin ergonomiamia. (Ikubanni et al. 2022)

Generatiivinen suunnittelu yhdistettynä tekoälyyn mahdollistaa täysin uusien suunnitteluratkaisujen kehittämisen, joissa tekoäly optimoi geometrian ja materiaalinkäytön annetuille kuormituksille ja ympäristöolosuhteille (Hunden & Woldeyohanneksen 2022). Generatiivinen suunnittelu on suunnittelun etsintätekniikka, joka käyttää tekoälypohjaisia algoritmeja luodakseen samanaikaisesti useita kelpollisia ratkaisuja. Kuvassa 4 vasemalla perinteisesti valmistettu turvavyön lukko koostuu kahdeksasta osasta, kun taas

oikealla oleva generatiivisen suunnittelun avulla kehitetty komponentti. Uusi ratkaisu on 40 % kevyempi ja 20 % vahvempi kuin alkuperäinen rakenne. (Danon 2018)



Kuva 4. Turvavyön lukko, joka on Generative Design Toolin luoma, verrattuna tavanomaiseen lukkomalliin (Danon 2018).

Tämä havainnollistaa, miten tekoäly voi luoda täysin uudenlaisia suunnitteluratkaisuja, joita ihmissuunnittelijat eivät välttämättä osaisi itse kehittää. Autodeskin ja General Motorsin yhteistyöprojekti osoittaa, että tekoälypohjainen suunnittelu ei pelkästään vähennä materiaalin kulutusta ja komponenttien määrää, vaan voi samalla nopeuttaa koko tuotekehitysprosessia ja tukea kestävä tuotannon tavoitteita (Danon 2018). Lisäksi tekoäly mahdollistaa älykkäät virheanalyysityökalut, jotka tunnistavat mahdolliset suunnitteluvirheet jo ennen valmistusta vertaamalla nykyisiä malleja aikaisempiin projekteihin tallennettuun tietoon (Madan et al. 2023).

Tulevaisuudessa tekoäly voi hyödyntää koneoppimista analysoidakseen suunnittelijoiden työskentelytapoja ja tarjotakseen entistä parempia ratkaisuja aiempien projektien perusteella. Insinöörit voivat tarkastella ja vertailla laajaa valikoimaa valmistuskelpoisia suunnitteluvaihtoehtoja nopeammin kuin koskaan ennen. Samalla he vapautuvat toistuvista rutiinitehtävistä ja voivat keskittyä merkittävämpiin päätöksiin, kuten osien suorituskyvyn maksimointiin. (Danon 2018)

Tekoäly ei ainoastaan tue mallien luomista ja optimointia, vaan myös parantaa merkittävästi CAD-ohjelmistojen käyttökokemusta. Se tehostaa käyttäjän ja ohjelman välistä

vuorovaikutusta sekä tarjoaa tukea suunnitteluprosessin eri vaiheissa. Hunden ja Woldeyohanneksen (2022) tutkimuksessa todetaan, että tekoälyn integrointi CAD-ohjelmistoihin mahdollistaa suunnittelun automatisoinnin ja älykkään suunnitteluympäristön luomisen, jossa voidaan analysoida useita suunnitteluvaihtoehtoja rinnakkain. Tämä vähentää suunnitteluvirheitä ja optimoi tuotantokustannuksia. Lisäksi ilman tekoälyä CAD-ohjelmistot eivät kykene tuottamaan suurta määrää erilaisia suunnitteluratkaisuja lyhyessä ajassa tai vertailemaan eri mallien eroja reaaliajassa. (Madan et al. 2023)

4.2 Virtuaalitodellisuus

Virtuaalitodellisuus eli VR on teknologia, joka luo keinotekoisien, kolmiulotteisten ympäristön, jossa käyttäjä voi olla vuorovaikutuksessa ympäristön kanssa käyttäen erityisiä laitteita, kuten VR-laseja tai -kypärää. VR mahdollistaa täysin immersivisen kokemuksen, jossa käyttäjä kokee ympäristönsä aivan kuin se olisi todellinen, vaikka kyseessä on digitaalinen luomus. (Lowood 2025) Virtuaalitodellisuuden avulla käyttäjät voivat liikkua, tutkia ja vuorovaikuttaa digitaalisissa ympäristöissä, mikä on erityisen hyödyllistä esimerkiksi suunnitteluprosessissa, kun tuotteiden prototyyppjä voidaan tarkastella ja testata ennen fyysisen valmistuksen aloittamista. (Ikubanni et al. 2022) VR on kasvattanut suosiotaan erityisesti 3D-mallinnuksen yhteydessä, mutta teknologia on vielä kehitysvaiheessa ja sen laajempi käyttöönotto edellyttää edullisempia laitteistoja ja tehokkaampia ohjelmistoja (Hunden & Woldeyohanneksen 2022). Virtuaalitodellisuus tarjoaa myös mahdollisuuden tarkastella ja muokata mallia immersivisessä ympäristössä ennen valmistusta (Madan et al. 2023). Tämä mahdollistaa esimerkiksi koneenkäyttäjien koulutuksen ilman fyysistä laitteistoa, mikä voi parantaa työturvallisuutta ja vähentää materiaalihukkaa (Hunden & Woldeyohanneksen 2022). Stadler et al. (2020) toteavat tutkimuksessaan, että VR-sovelluksilla luodut mallit olivat mittasuhteeltaan ja rakenteeltaan parempia. Vaikka VR:n käyttömahdollisuudet insinööritieteissä ovat rajallisia tällä hetkellä, teknologian odotetaan laajenevan merkittävästi tulevaisuudessa erityisesti monimutkaisten kokoonpanojen ja rakenteiden suunnittelussa (Madan et al. 2023).

Kehittyvä VR-teknologia voi tulevaisuudessa mahdollistaa tehokkaan reaaliaikaisen yhteistyön virtuaalisissa suunnitteluympäristöissä, jolloin useat käyttäjät voivat tarkastella ja muokata mallia samanaikaisesti eri puolilla maailmaa. Tämä voi parantaa suunnittelun tehokkuutta ja vähentää iterointien määrää (Madan et al. 2023). Lisäksi VR mahdollistaa erilaisten simulaatioiden ja testauksen suorittamisen ennen fyysisten prototyyppien val-

mistamista, mikä voi vähentää tarpeetonta materiaalinkulutusta ja nopeuttaa kehitysprosessia huomattavasti verrattuna nykyisiin suunnittelumenetelmiin (Hunden & Woldeyohanneksen 2022).

Toinen merkittävä sovellus on käyttäjäkokemuksen simulointi. Esimerkiksi ajoneuvojen, työkalujen ja käyttöliittymien ergonomiaa ja käytettävyyttä voidaan arvioida virtuaalitodellisuuden avulla ennen fyysistä valmistusta, mikä auttaa suunnittelijoita optimoimaan tuotteiden käytettävyyttä ja mukavuutta (Hunden & Woldeyohanneksen 2022). Näiden kehityssuuntien myötä VR:n rooli insinöörialoilla kasvaa ja sen sovellusmahdollisuudet laajenevat huomattavasti tulevinä vuosina, erityisesti yhdistettynä lisättyyn todellisuuteen, joka voi entisestään parantaa suunnittelun tarkkuutta ja käytännöllisyyttä (Madan et al. 2023). VR-tekniikan yhdistäminen muihin kehittyviin suunnittelutyökaluihin, kuten tekoälyyn ja generatiiviseen suunnitteluun, voi tehostaa tuotekehitystä entisestään. Esimerkiksi virtuaalitodellisuudessa voidaan tarkastella tekoälyn luomia malleja realistisessa mittakaavassa ja arvioida niiden toimivuutta jo ennen valmistusta. Tämä visuaalinen ja immerstiivinen lähestymistapa tukee päätöksentekoa, helpottaa sidosryhmien osallistamista ja voi lyhentää merkittävästi tuotteen markkinoille saattamisen aikaa. Useat teollisuusyritykset, kuten autoteollisuuden toimijat, ovatkin jo alkaneet hyödyntää VR-ympäristöjä tuotekehityksen rinnalla muun muassa ergonomiaan, kokoonpanoharjoituksiin ja huoltotilanteiden simulointiin (Lawson et al. 2016). Näin VR:n avulla voidaan kehittää paitsi itse tuotetta, myös siihen liittyviä tukiprosesseja turvallisemmaksi, tehokkaammaksi ja käyttäjäystävällisemmäksi (Henriques & Winkler).

5. YHTEENVETO

Tämä kandidaatintyö tarkastelee CAD-ohjelmistojen vaikutusta suunnitteluun ja tuotantoon, erityisesti uusien teknologioiden, kuten tekoälyn, pilvipohjaisen yhteistyön ja generatiivisen suunnittelun näkökulmasta. Työn tavoitteena on ollut selvittää, miten nämä teknologiat tehostavat suunnitteluprosessia, parantavat tuotannon tehokkuutta ja mahdollistavat kustannussäästöjä sekä laadukkaampia lopputuotteita.

Työn alussa käsiteltiin CAD-ohjelmistojen perustoimintoja ja niiden roolia suunnittelutyössä. CAD mahdollistaa tarkan 3D-mallinnuksen ja simuloinnin, jotka vähentävät inhimillisiä virheitä ja nopeuttavat päätöksentekoa. Digitaalisten kaksosten ja simulointien avulla suunnitteluratkaisuja voidaan testata ja optimoida jo ennen fyysisen prototyypin valmistusta, mikä pienentää kehityskustannuksia ja parantaa lopputuotteen laatua.

Tuotannon näkökulmasta CAD-ohjelmistot tukevat automaatiota, mahdollistavat valmistuksen simuloinnin ja parantavat materiaalien käytön tehokkuutta. Ne mahdollistavat suoran integraation muihin järjestelmiin, kuten CAM-järjestelmiin, mikä tehostaa koko tuotantoketjua. Tämä edistää resurssien hallintaa, vähentää hukkaa ja parantaa toimitusvarmuutta.

Eryityisesti tekoälyn hyödyntäminen avaa uusia mahdollisuuksia suunnittelun automatisointiin ja optimointiin. Tekoäly kykenee analysoimaan suuria tietomääriä, tunnistamaan parhaat ratkaisut ja vähentämään suunnitteluun liittyviä virheitä. Generatiivinen suunnittelu, jossa tekoäly tuottaa useita vaihtoehtoisia rakenteita määritettyjen reunaehtojen pohjalta, voi johtaa innovatiivisiin, kevyempiin ja kestävämpiin tuotteisiin, joita ihmissuunnittelija ei välttämättä pystyisi itse kehittämään.

Pilvipohjaiset CAD-ohjelmistot tuovat suunnitteluun uuden ulottuvuuden mahdollistamalla reaaliaikaisen yhteistyön eri sidosryhmien välillä. Tämä nopeuttaa projektien etenemistä ja mahdollistaa globaalin tiimityön ilman sijaintirajoituksia. Pilvipalveluiden avulla tiedostot pysyvät ajan tasalla ja helposti saavutettavissa, mikä tehostaa projektinhallintaa ja vähentää virheitä.

Työn perusteella voidaan todeta, että CAD-ohjelmistojen kehitys on tiiviisti sidoksissa teknologian murrokseen. Tekoäly, generatiivinen suunnittelu ja pilvipohjaiset ratkaisut eivät ainoastaan paranna suunnittelun ja tuotannon tehokkuutta, vaan muuttavat koko

tuotekehitysprosessin luonnetta kohti älykkäämpää, integroitua ja reaaliaikaista toimintamallia. Nämä edistysaskeleet tukevat yritysten kilpailukykyä, lyhentävät tuotteiden markkinoilletuontiaikaa ja mahdollistavat paremman resurssien käytön. Täten ne tarjoavat suunnittelijoille tehokkaampia ja innovatiivisempia työkaluja.

LÄHTEET

Azemi, F., Šimunović, G., Lujčić, R., Tokody, D. & Rajnai, Z. (2019). The use of advanced manufacturing technology to reduce product cost, *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 16(7), pp.115–131. <https://doi.org/10.12700/APH.16.7.2019.7.7>

Brown, P. (2009). CAD: Do computers aid the design process after all? *Intersect: The Stanford Journal of Science, Technology, and Society*. Vol.2(1), pp. 52–66. Saatavissa (Viitattu 24.02.2025): <https://ojs.stanford.edu/ojs/index.php/intersect/article/view/117/33>

Danon, B. (2018). How GM and Autodesk are using generative design for vehicles of the future. Autodesk. Saatavissa (Viitattu 09.04.2025): <https://adsknews.autodesk.com/en/news/gm-autodesk-using-generative-design-vehicles-future/>

Gandouzi G., Belhadj I., Aifaoui N., Hammadi M. & Choley J.Y. (2021). A CADDEX tool for CAD and CAE integration, *IEEE International Systems Conference (SysCon)*, Vancouver, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/SysCon48628.2021.9495827>

Henriques, A. C. & Winkler, I. (2020). Automotive Marketing Research and Virtual Reality: A Systematic Literature Review, *Porto de Galinhas, Brazil*, pp. 339–345, <https://doi.org/10.1109/SVR51698.2020.00057>

Hou, X., Zhang, X. & Liu, W. (2007). Using enhanced shape distributions to compare CAD models. *Advances in Multimedia Information Processing – PCM 2007*. Presented at the Pacific-Rim Conference on Multimedia. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 385–388. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77255-2_41

Hunde, B.R. & Woldeyohannes, D.A. (2022). Future prospects of computer-aided design (CAD) – A review from the perspective of artificial intelligence (AI), extended reality, and 3D printing. *Results in Engineering*, Vol.14, p. 100–478. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100478>

Ikubanni, P.P., Adeleke, A.A., Agboola, O.O., Christopher, C.T., Ademola, B.S., Okonkwo, J., Adesina, O.S., Omoniyi, P.O. & Akinlabi, E.T. (2022). Present and future impacts of Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing (CAD/CAM). *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Vol 55(3), pp.349–357. <https://doi.org/10.18280/jesa.550307>

- Kirkwood, R. & Sherwood, J.A. (2018). Sustained CAD/CAE integration: integrating with successive versions of step or IGES files. *Engineering with Computers*, pp. 1–13. <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1007/s00366-017-0516-z>
- Lantada, A. D. (2013). Computer-Aided Engineering Resources and FEM for Biodevices. In *Handbook on advanced design and manufacturing technologies for biomedical devices*, Springer, pp. 137–165. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6789-2_8
- Lawson, G., Salanitri, D., Waterfield, B. (2016). Future directions for the development of virtual reality within an automotive manufacturer, *Applied Ergonomics*, Vol. 53, pp. 323–330. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.06.024>
- Lowood, H. E. (2025). Virtual reality. *Saatavissa* (Viitattu 29.04.2025): <https://www.britannica.com/technology/virtual-reality>
- Madan, A. K., Kharbanda, P., Yadav, P. & Kumar, R. (2023). AI and Machine Learning Uses in CAD/CAM. *International Journal of Research Publication and Reviews*, Vol. 4, pp. 4397–4401. *Saatavissa* (viitattu 19.3.2025): <https://ijrpr.com/uploads/V4IS-SUE4/IJRPR12061.pdf>
- Miao, H. K., Sridharan, N. & Shah, J. J. (2002). CAD-CAM integration using machining features, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 15(4), pp. 296–318. <https://doi.org/10.1080/09511920110077502>
- Montenegro, A. L. (2022). How the Internet of Things Empowers CAD, *Data Science Central*, *Saatavissa* (Viitattu 27.4.2025) <https://www.datasciencecentral.com/how-the-internet-of-things-empowers-cad/>
- Rajora, R., Rajora A. Sharma, B. Aggarwal, P. & Thapliyal, S. (2023) Unveiling the Synergy: IoT and Digital Twins in Transforming Industries, 3rd International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON), Bangalore, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/SMARTGENCON60755.2023.10442175>
- Simpanen, E. (2017). Tiesitkö (uskotko) tämän IoT:stä?, *CadWorks*. *Saatavissa* (Viitattu 27.04.2025): <https://www.cadworks.fi/en/articles/tiesitko-uskotko-taman-iotsta>
- Singh, H., Kaplas, N., Sharma, A. & Raj, S. (2023). Product Life Cycle. In *Factories of the Future* (eds C.D. Singh and H. Kaur), pp. 229–256, <https://doi.org/10.1002/9781119865216.ch10>

Singh, T., Singh, D., Singh, C.D. & Singh, K. (2023). Industry 5.0. In *Factories of the Future* (eds C.D. Singh and H. Kaur), pp. 21–45,

<https://doi.org/10.1002/9781119865216.ch2>

Slavković, N., Živanović, S., Milutinović, D., & Kokotović, B. (2017). Robot machining simulation in step-nc machine environment. In *Proceedings of the 13th International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology DEMI 2017*, pp. 43–50, Saatavissa (Viitattu 02.04.2025):

https://machinery.mas.bg.ac.rs/bitstream/id/11346/demi_2_2017.pdf

Stadler S., Cornet H., Mazeas D., Chardonnet J.-R. & Frenkler F. (2020). Impro: immersive prototyping in virtual environments for industrial designers, *DESIGN Conference*, Vol. 1, pp. 1375–1384. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.81>

Stănăşel, I., Blaga, F.S. & Buidoş, T. (2019). Manufacturing based on feature recognition using NX. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 568(1), pp.12–15. Saatavissa (Viitattu 22.02.2025): <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/568/1/012015/pdf>

Stryker, C., Kavlakoglu, E. (2024). What is artificial intelligence (AI)? Saatavissa (Viitattu 29.04.2025): <https://www.ibm.com/think/topics/artificial-intelligence>

Suzuki, E. (2021). How Cloud-Based CAD helps you work faster and smarter, Autodesk. Saatavissa (Viitattu 27.04.2025): <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/cloud-based-cad-faster-smarter/>

Tan, C.L. & Vonderembse, M.A. (2006). Mediating effects of computer-aided design usage: From concurrent engineering to product development performance. *Journal of Operations Management*, Vol. 24, pp. 494–510.

<https://doi.org/10.1016/j.jom.2005.11.007>

Tao, J., Chen Z., Yu S. & Liu, Z. (2017) Integration of Life Cycle Assessment with computer-aided product development by a feature-based approach, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 143, Pp. 1144–1164, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.005>

Theodorou, P. & Florou, G. (2008). Manufacturing strategies and financial performance—The effect of advanced information technology: CAD/CAM systems. *Omega*, Vol. 36, pp. 107–121. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.10.005>

Toche, B., Mcsorley, G., Pellerin, R. & Fortin, C. (2017). A framework to support collaboration during prototyping and testing. *International Journal of Product Lifecycle Management*, Vol. 10, pp. 348–374, <https://doi.org/10.1504/IJPLM.2017.090329>

Vinodh, S. (2011) Sustainable design of sprocket using CAD and Design Optimisation. *Environ Dev Sustain*, Vol. 13, pp. 939–951. <https://doi.org/10.1007/s10668-011-9299-3>

Wang, P., Liu, W. & Youpeng, Y. (2023). A hybrid framework for manufacturing feature recognition from CAD models of 3-axis milling parts. *Advanced Engineering Informatics*. Vol. 57, pp. 73–102 <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102073>

Xia, Z., Wang, Q., Wang, Y. & Yu, C. (2015). A CAD/CAE incorporate software framework using a unified representation architecture. *Advances in Engineering Software*, Vol. 87, pp. 68–85, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.05.005>

Yoely, Y.M, Amir O. & Hannel, I. (2018). Topology and shape optimization with explicit geometric constraints using a spline-based representation and a fixed grid, *Procedia Manufacturing*, Vol. 21, pp.189–196, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.110>.