

# TEKOÄLYN SOVELLUSMAHDOLLISUUDET BIOTEKNIKASSA

Ennustava mallinnus biomateriaalien suunnittelussa ja muotoilussa

TkK-tutkielma  
Turun yliopisto  
Bioteknologian laitos  
Biotekniikka  
Marraskuu 2024  
Niilo Savukoski

TURUN YLIOPISTO

Bioteknologian laitos

NIILO SAVUKOSKI: Tekoölyn sovellusmahdollisuudet biotekniikassa

Kandidaattitutkielma, 19 s., 2 liites.

Biotekniikka

Marraskuu 2024

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

---

Tekoölyn integraatio biotekniikan alan tutkimukseen sekä sovelluksiin mahdollistaa tietojenkäsittelyä ennennäkemättömällä tarkkuudella ja nopeudella. Useat biotekniikan alan tutkimukset perustuvat valtavien tietomäärien käsittelyyn, ja niistä saatujen johtopäätösten tuomiseen käytännön sovelluksiin. Biomateriaalitutkimuksessa tekoölyn tuomalle tehokkuudelle on myös paikkansa. Tämän tutkimuksen tarkoitus on luoda lukijalle hyvä peruskäsitys tekoölyä käyttävän ennustavan mallinnuksen toiminnasta, sekä biomateriaalien suunnitteluprosessista. Lisäksi tutkimuksessa pyritään luomaan kuva tulevaisuuden mahdollisuuksista ennustavan mallinnuksen sovellusten käytölle nykyisen tiedon ja osaamisen perusteella.

Tutkimuksessa on tehty kirjallisuuskatsaus tekoölyn toimintaan yleisellä tasolla, ennustavan mallinnuksen sovelluksien toimintaprosessiin, sekä biomateriaalien ja niistä rakennettujen implanttien suunnittelu- ja valmistusprosesseihin. Lisäksi pohdittiin tekoölyn integraation mahdollisia ongelmakohtia biotekniikan tutkimuksessa, ja pohdittiin tulevaisuuden lupaavia mahdollisuuksia ennustavan mallinnuksen sovellusten käytölle biomateriaalitutkimuksessa. Avainasemassa viitemateriaalina tutkimuksessa on käytetty biomateriaaleihin perehtyviä julkaisua *Raghavendra, G. M. (2015) Biomaterials: Design, Development and Biomedical applications*, sekä tekoölyyn ja ennustavan mallinnuksen toimintaa tutkivaan *Muhsen, I. N. (2022) Utilizing machine learning in predictive modeling: what's next?*

Tutkimuksessa todettiin ennustavan mallinnuksen sovelluksien hyödyt virtaviivaistamaan biomateriaalien suunnittelun pitkää ja työlästä tiedonkäsittelyprosessia. Neuroverkkoja käyttävän ennustavan mallin todettiin olevan lupaavin vaihtoehto tutkituista mallin sovellusmahdollisuuksista. Todettiin myös tekoölyä käyttävien sovellusten ongelmien tuomat riskit tutkimukseen, jossa virhemarginaalit ovat todella tarkat.

Asiasanat: tekoöly; algoritmit; neuroverkot; biomateriaalit; implantit; tietojenkäsittely.

# 1 Sisällys

1 Sisällys .....	2
2 Johdanto .....	3
3 Tekoäly .....	4
3.1 Tekoälyn määritelmä .....	4
3.2 Tekoälyn toimintaperiaate .....	4
4 Ennustava mallinnus .....	5
4.1 Ennustavan mallin määritelmä .....	5
4.2 Ennustavan mallin rakentaminen ja toiminta .....	5
4.3 Käytössä olevat sovellukset.....	9
5 Biomateriaalit.....	10
5.1 Biomateriaalin määritelmä .....	10
5.2 Biomateriaalien käyttökohteet, suunnittelu ja muotoilu.....	10
5.3 Ennustavan mallinnuksen integraatio biomateriaalien suunnitteluprosessiin .....	13
6 Tulevaisuus.....	14
6.1 Markkinatilanne.....	14
6.2 Haasteet ja eettiset kysymykset .....	14
7 Yhteenveto ja tutkimustulokset .....	15
7.1 Kirjoittajan näkemys .....	15
8 Lähteet & Viitteet .....	16

## 2 Johdanto

Marraskuussa 2022 yleiseen käyttöön julkaistu OpenAI:n sovellus ChatGPT toi tekoälyn konseptin osaksi arkipäivää miljoonille ihmisille ympäri maailmaa. Tammikuussa 2023 sovellus oli nopeiten internetissä kasvanut sivusto 590 miljoonalla vierailulla yli sadalta miljoonalta käyttäjältä. Lokakuussa 2024 kuukausittaiset vierailut olivat nousseet 3.1 miljardiin (Similarweb 2024). Tekoäly on kuitenkin paljon muutakin, kuin kotitehtävät käyttäjän puolesta kirjoittava keskustelubotti. Vuonna 2024 tekoälyn integraatio jo olemassa oleviin prosesseihin on yksi tiedemaailman polttavimmista haasteista.

Kandidaatteja tekoälyn lupaavista sovellusmahdollisuuksista on lukuisia. Lähes kaikilla tieteen aloilla ensiaskeleet tekoälyn valjastamisesta hyötykäyttöön on otettu. Biotekniikan sekä biolääketieteen tutkimusympäristö ei ole erikoistapaus. Mielikuvituksen rajoille asti riittävästä mahdollisuuksista joukkoon kuuluvat myös biomateriaalien suunnittelu sekä muotoilu. Tärkeitä sovelluskohteita biomateriaaleille ovat esimerkiksi lääketieteelliset kudostekniikat sekä biologisten toimintojen tehostaminen ja tukeminen.

Tekoälyn sekä tarkemmin ennustavan mallinnuksen käyttö voi tehostaa ja nopeuttaa tutkimusta biomateriaalien sovelluksissa. Tekoälyn integraation on todettu olevan tehokasta matemaattisten ja fysikaalisten ongelmien ratkaisussa, joihin monet haasteet biomateriaalien muotoilussa liittyvät. Lisäksi kallis ja hidas perinteinen *in vivo* ja *in vitro* -testiprosessi on johtanut useaan kudostekniikan alan lupaavan yhtiön konkurssiin (Williams). Tekoälyn tuoma virtaviivaistettu ongelmanratkaisu voi olla vastaus alan yritysten kipeään tarpeeseen saavuttamaan myös taloudellinen kestävyys raskaissa kehitysprosesseissa. Korvaamalla *in vivo* -prosesseja tekoälyllä, myös eettisesti kyseenalaisten eläinkokeiden vähentäminen on mahdollista.

Kandidaattityössä perehdytään tekoälyn toimintaan sekä tekoälyn ja ennustavan mallinnuksen tuomiin mahdollisuuksiin biomateriaalien suunnittelussa ja muotoilussa. Biomateriaalien käyttökohteina työssä on keskitytty ihmisen hyvinvointia edistäviin biolääketieteellisiin ratkaisuihin ja prosesseihin. Lisäksi tarkastellaan tulevaisuuden kehityskohtia sekä haasteita, mitä tekoälyn ja ennustavan mallinnuksen integraatio tuovat biotekniikan ja biolääketieteen tutkimukseen sekä biomateriaalien tuotantoprosessiin.

## 3 Tekoäly

### 3.1 Tekoälyn määritelmä

Tekoälyksi (*eng. Artificial Intelligence, AI*) kutsutaan teknologiaa, joka kykenee toimimaan älykkäällä tavalla. Tarkempi määritelmä älykkästä teknologiasta on ohjelmisto tai laitteisto, joka käyttää siihen syötettyä tai sen itse keräämää tietoa saavuttaakseen sille asetetut tavoitteet. Edellä mainitulla ohjelmistolla on useita toimintaperiaatteita, joista yleisimpiä ovat koneoppiminen (*eng. Machine learning (ML)*), syväoppiminen (*eng. Deep learning*) ja kielten käsittely (*eng. Natural language processing (NLP)*). (Ghosh 2023) Näitä prosesseja käytetään hyväksi lukuisissa jokapäiväisissä käyttökohteissa, kuten kääntäjäsovelluksissa, älypuhelimien kameroissa sekä sosiaalisen median algoritmeissa.

Tekoälyn määritelmässä ensimmäinen askel on tunnistaa, kuuluuko ohjelmisto kapeaan tekoölyyn (*eng. Narrow AI*) vai yleiseen tekoölyyn (*eng. General AI*). Tällä hetkellä näistä jälkimmäinen on vain teoriassa mahdollinen ja vaatisi ohjelmiston, joka olisi kykenevä kognitiiviseen ajatteluun. Myös keinotekoisesta superälystä (*eng. Artificial superintelligence (ASI)*) on teorioitu, mutta sen saavuttaminen on toistaiseksi lähempänä tieteisfiktiota kuin todellisuuden sovelluksia. Kappaleessa 3 mainitut esimerkit ovat kaikki katsauksia kapean tekoälyn toiminnasta. (Tai 2020)

### 3.2 Tekoälyn toimintaperiaate

Kapean tekoälyn kaikki sovellukset ovat tarkoitettu vastaamaan tehokkaasti yhteen komentoon tai tehtävään. Niihin luodut neuroverkot (*eng. Neural network*) käsittelevät suuria määriä merkittävää tietoa tai raakadataa (*eng. Raw data*). Kaikissa tapauksissa tekoälyn oppimisvaiheessa ihmiskäyttäjän läsnäolo vahvistamaan tekoälyn tulokset ovat avainasemassa tehokkaaseen kehitysprosessiin, sekä eliminoimaan mahdolliset väärät positiiviset (*eng. False positive*) tulokset. (Ang, Choolani 2023)

Koneoppimisessa tekoäly voi toimia valvotussa tai valvomattomassa ympäristössä sekä vahvistavassa oppimisen tilassa. Valvotussa ympäristössä sovellus käsittelee suuren määrän tunnettua tietoa ja käyttää tätä tietopankkia hyväksi halutun ratkaisun löytämiseen. Valvomattomassa ympäristössä tekoäly etsii suuresta määrästä raakadataa rakenteita ja malleja (*eng. Pattern*), joiden avulla haluttuun ratkaisuun päästään.

Valvomattoman ympäristön sovellus toimii itsenäisesti ilman ulkoisia ohjeita. Vahvistavan oppimisen tilassa tekoäly käyttää yritys ja erehdys -oppimisperiaatetta, ja optimoi toimintaansa toimintojen jälkeisen tekoälyn kouluttajan palautteen perusteella. (Ang, Choolani 2023)

## 4 Ennustava mallinnus

### 4.1 Ennustavan mallin määritelmä

Ennustava mallinnus on matemaattinen prosessi, joka käyttää hyväkseen koneoppimista sekä olemassa olevaa tietoa luodakseen tarkan ennustuksen sille annetun toiminnon tuloksista tai todennäköisyydestä saavuttaa haluttu tulos. Ennustavaa mallinnusta käytetään muun muassa rahoitusalan, lääketieteen ja tekniikan alan käyttäjien toiminnassa. Ennustavan mallin rakentaminen vaatii useita askelia. Niihin kuuluvat mallin tehtävän mukaan esimerkiksi tiedon kerääminen, tiedon puhdistus, halutun algoritmin valinta, koneopin integraatio, mallin koulutus- sekä testivaihe. Prosessi voi kestää pitkään, mutta tehokkaan mallin rakentaminen on osoittautunut tehokkaaksi työkaluksi useassa tieteen alan tutkimuksessa. (Muhsen 2022)

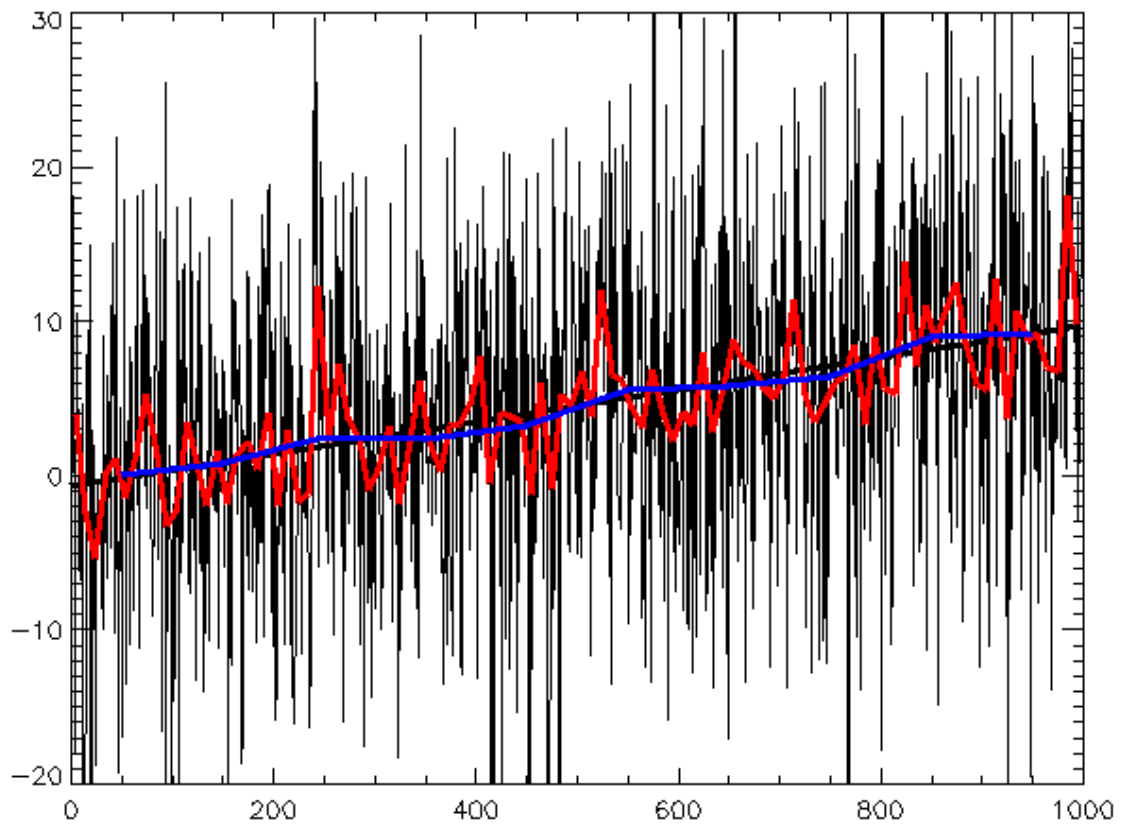
Selkeimmät edut ennustavan mallinnuksen sovelluksista saadaan nopeuttamaan suurien tietomäärien hidasta analyysiprosessia sekä tehostamaan tarkkojen ennustusten saatavuutta kyseiseen tietoon liittyvissä kysymyksissä.

### 4.2 Ennustavan mallin rakentaminen ja toiminta

Ennustavaa mallinnusta käyttävän sovelluksen rakentaminen perustuu huolelliseen tiedonkeruuseen sovelluksen tehtävää varten. Kouluttamista varten sovellukselle syötetään tiedettyihin lopputuloksiin johtavaa tietoa. Tätä tietomäärää kutsutaan harjoitteludataksi (*eng. Training data*). Mitä enemmän harjoitteludataa sovellus kykenee hyödyntämään, sitä tarkempia ennustuksia se pystyy käyttövaiheessa toteuttamaan. Koneoppimisen algoritmit opettavat ennustavan mallinnuksen sovelluksen luomaan kerätystä tiedosta ennustuksen sille valitun mallin (*eng. Model*), sekä asetettujen parametrien mukaan. (Lamba 2022) Näitä malleja ovat esimerkiksi:

Aikasarja-analyysi (*eng. Time series analysis*), missä sovellus kohtelee aikaa riippumattomana muuttujana. Se kerää tasaisin väliajoin havainnoitua tietoa löytääkseen tietomäärästä malleja ja suuntauksia, joita se pystyy tulevaisuudessa hyödyntämään.

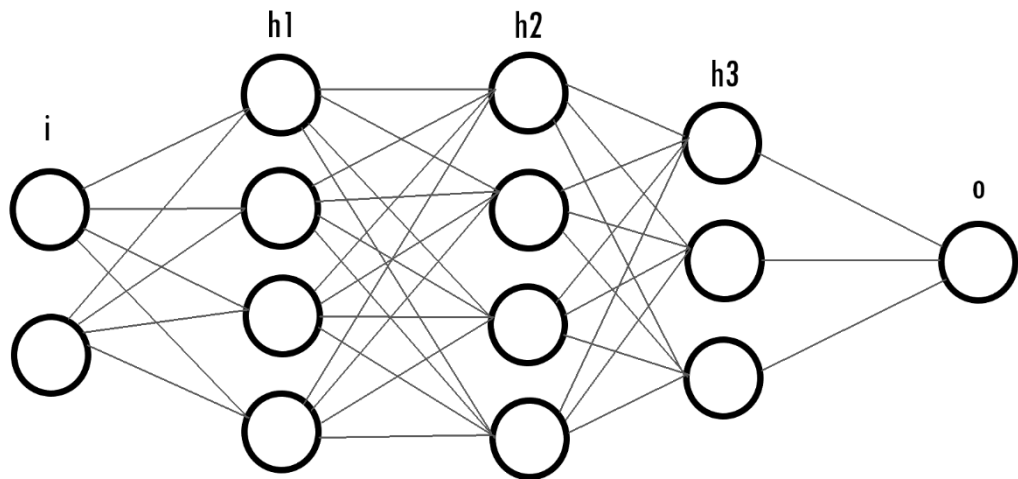
*Kuvio 4.2.1 Aikasarja sekä siinä esiintyvät suuntaukset ajan funktiona. Punaiset ja siniset datapisteet ovat raakadatan keskiarvoja 10 ja 100 datapisteen välein. (Connolley)*





Neuroverkko, missä sovellus luo biologista neuroverkkoa muistuttavan verkoston, millä se kykenee tuottamaan lukuisista muuttujista tarkkoja ennustuksia luovan kokonaisuuden.

*Kuvio 4.2.3 Pelkistetty kuvitus koneoppimisen neuroverkosta. Malli johdattelee ihmisaivojen neuronitoimintaa useiden keinotekoisien neuronien yhteyksillä. Vasemmalla (i) syöttöneuroni, oikealla (o) tulosneuroni. (Niilo Savukoski)*



Koulutusvaiheen jälkeen ennustavan mallinnuksen sovellus käyttää valittua malliaan luomaan siihen syötetystä tiedosta ennustuksen. Tuotetut tiedot voidaan tapauskohtaisesti muuttaa vielä esimerkiksi tekstiksi tai visuaaliseksi esitykseksi lopputulosten tarkastelun selkeyttämiseksi. (Lamba 2022)

Koneoppimista hyväksi käyttävät ennustavat mallit eroavat perinteisistä tietokoneohjelmista antamalla vastaukset sille asetettuihin toimintoihin todennäköisenä keskiarvona. Tämä lisää testitulosten tarkkuutta monimuuttujallisissa kysymyksissä verrattaessa vanhempiin binäärisiin malleihin.

Ennustavan mallinnuksen käytön kiistattomat vahvuudet ovat nopea ja tehokas mallien tunnistaminen suuresta määrästä tietoa, mikä olisi ihmiselle vaikea ja hidas prosessi. Sen kyky käsitellä monen muuttujan kysymyksiä auttaa virtaviivaistamaan pitkiä tiedonpurkuprosesseja. Tämän lisäksi sovellus on muokattavissa tutkimuksen tarpeisiin parhaalla mahdollisella tavalla vastaavaksi. Hyvin rakennettu sovellus myös kehittyy ajan

myötä, toisin sanoen malli ei jää vanhaksi, mikäli sen annetaan käyttää tuoreinta saatavilla olevaa tietoa. (Lamba 2022)

Ennustavan mallinnuksen heikkoudet löytyvät vahvuuksien varjoista. Suuren tietomäärän tehokas ja tarkka käsittely vaatii sovellukselta koulutusvaiheessa valtavan määrän läpikäytyä laadukasta harjoitteludataa. Virheellinen harjoitteludatan käyttö voi johtaa koko mallin käyttökelvottomuuteen. Lisäksi algoritmien koulutusvaiheessa on usein huomattu esiintyvän yleisyysarhaa, joka aiheuttaa mallin taipumuksen keskittyä harjoitteludatan trendeihin, jotka eivät välttämättä ole tutkimukselle olennaisia. Tämän tapahtuminen voi taas johtaa mallissa pysyvään ennakkoluuloon ja virheellisiin ennustuksiin, vaikka kyseiset trendit eivät olisi tutkimukselle olennaisia. Esimerkkejä yleisyysarhan tavanomaisista kohteista ovat lääketieteen tutkimuksen algoritmeissa muun muassa sukupuoli, ikä sekä etnisuus. Mitä tehokkaampi koneoppimisen algoritmi on, sitä todennäköisemmin yleisyysarhaa esiintyy. (Kalpana 2022)

### 4.3 Käytössä olevat sovellukset

Tällä hetkellä ennustavan mallinnuksen algoritmeja käytetään pääasiallisesti lääketieteen sekä biolääketieteen tutkimuksen tietojenkäsittelyssä. Tämän lisäksi menestystä on löydetty yhdistämällä laaja kirjo koneopin algoritmeja esimerkiksi lämpökuvauksen ja spektroskopian sovelluksiin. Käytännön toteutuksia ovat muun muassa Fan ja muut tuottama kuuden ennustavan mallinnuksen algoritmin vertailu ennustamaan kaulavaltimon ateroskleroosin esiintymistä verrattaessa potilaiden sairaushistoriaa. Näissä tutkimuksissa käytettyjä algoritmeja olivat muun muassa neuroverkot sekä logistinen regression applikaatio. Lisäksi Magalhaes ja muut osoittivat tutkimuksessaan koneopin integraatiosta infrapunalämpökuvaukseen jopa kuudenkymmenen kahdeksan koneopin mallin olevan valmiina diagnosoimaan esimerkiksi syöpää, palovammoja, skitsofreniaa sekä diabetesta. (Kalpana 2022)

Toistaiseksi kaupallisia käytännön sovelluksia biomateriaalien suunnittelusta potilaskäyttöön ei ole saatavilla. Kokeellisia näyttöjä toiminnasta kuitenkin on. Useat nimeämättömät algoritmit odottavat kuitenkin hyväksyntää esimerkiksi Yhdysvaltojen elintarvike- ja lääkehallinnolta (USFDA). (Kalpana 2022)

## 5 Biomateriaalit

### 5.1 Biomateriaalin määritelmä

Biomateriaaleiksi luokitellaan biotekniikassa käytetyt synteettiset tai luonnolliset materiaalit, jotka ovat vuorovaikutuksessa biologisen systeemin kanssa. Biomateriaalin on tarkoitettu toimimaan joko biologisen prosessin rinnalla tukevassa roolissa, tai korvaamaan vahingoittunut ihmiskehon osa tai funktio. Ihmiskehon biologiseen prosessiin asennettua aktiivista biomateriaalia kutsutaan implantiksi. Yleisimmin biomateriaalit ja niistä rakennetut implantit käyttävät yhtä materiaalityyppiä, tai useamman materiaalin sekoitusta. Näihin kuuluvat laajan kirjon eri fysikaalisia, kemiallisia, mekaanisia ja biologisia ominaisuuksia omaavat aineet kuten polymeerit, komposiitit, metallit ja keramiikka.

Termiä biomateriaali ei tule sekoittaa ”biologiseen materiaaliin”, joka pitää sisällään elävän organismin tuottaman materiaalin, esimerkiksi luu, puu sekä luonnollisesti tuotettu kudos. Yleisimpiä tuttuja esimerkkejä biomateriaalin käytöstä ovat silikoniset hampaiden paikat ja purukaluston keraamiset implantit, metalliset ortopediset levyt (*eng. Orthopedic plate*) sekä synteettiset nivelet. Biomateriaalin lopullinen tavoite on tukea trauman parantumisprosessia, edistää ihmisen terveyttä, sekä edesauttaa ihmiskehon toimintoja halutuilla osa-alueilla. (Park 2007)

### 5.2 Biomateriaalien käyttökohteet, suunnittelu ja muotoilu

Suunnitellessa biomateriaalia käyttöön ihmiskehon biologiseen toimintoon on otettava huomioon useita muuttujia, jotka vaikuttavat niin materiaalin valintaan, kuin implantin muotoiluprosessiin. Näitä huomioitavia muuttujia ovat huolellinen biomateriaalista suunnitellun implantin käyttötarkoituksen määrittäminen, biomateriaalin toimintoympäristön tarkka kartoittaminen, implanttiin kohdistuvan rasituksen määrän ja vähimmäistoiminta-ajan rajaaminen sekä biomateriaalin ja implantin käyttöön liittyvät turvallisuus- ja terveystriskit. (Raghavendra 2015) Biomateriaalitutkimuksen kehityksessä on ennen kaikkea tärkeää olla huolellinen, sillä ihmiskehon monimutkaiset toiminnot vaativat paljon sekä implanteilta, että materiaaleilta, joista ne ovat tehty. Hyvällä biomateriaalilla on sen käyttötarkoitukseen edulliset fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet, se on biologisesti yhteensopiva (*eng. Biocompatibility*) sijoituskudoksensa kanssa sekä tuotannollisesti järkevä aine käyttää.

Biomateriaalin ja sen implantin käyttötarkoituksen määrittäminen aloitetaan vaurioituneen tai puuttuvan biologisen funktion tunnistamisella. Hammasimplantin käyttötarkoitus on toimia purukaluston korvaavana osana tukena ruoansulatuselimistöä. Ortopedisen levyn on tarkoitus edesauttaa luunmurtuman parantumista ja luutumista keholle parhaalla tavalla. Keinotekoisen sydänläpän on toimittava saumattomasti sydämen kanssa verenkierron takaamiseksi koko elimistölle. Käyttökohteita biomateriaaleille löytyy lukuisista lääketieteellisistä toimenpiteistä. (Raghavendra 2015)

Biomateriaalin toimintaympäristön määrittämisessä tarkastellaan ihmiskehon paikkaa, johon implanti tullaan asettamaan. Toimintaympäristön määrittäminen on erityisen tärkeä vaihe harkittaessa biomateriaalin valintaa tulevaan implantaattiin. Materiaalin valinnassa huomioon on otettava ympäristön aiheuttaman lämpötilavaihtelut, happamuus, korjattavan funktion mekaaniset tarpeet sekä kudostyyppi, mihin materiaalia asetetaan. Esimerkiksi vatsan seinämän tyrän hoitamiseen on valittava elastinen happamuutta kestävä materiaali, jotta vatsalaukun elastisuus ei kärsi implantin läsnäolosta huolimatta. Kyseisessä esimerkissä yleisesti käytetty biomateriaaliverkko (*eng. Mesh*) voi olla solupäällystetty, sekoitus metalleja kuten terästä ja hopeaa, sekä polymeerejä kuten PET ja PP. (Gómez-Gil 2019)

Kuvio 5.2.1 Biomateriaalien yleisimmät käyttökohteet, edut ja haittakohdat. (Muokattu, Raghavendra 2015 ja Gómez-Gil 2019)

Materiaali	Käyttökohde	Edut	Haitat
Polymeerit			
Nylon, Silikonit, PTFE	Jännemateriaalit	Joustavuus Nopea ja helppo tuotantoprosessi	Materiaalin heikkous Ajan myötä rappeutuminen Mahdollinen muodonmuutos
Metallit			
Titaani, Teräs, Jalometalliseokset	Proteesit, luutumista tukevat levyt Sydänläpät	Lujuus Sitkeys	Mahdollinen korroosio Korkea tiheys lisää painoa
Komposiitit			
Vaihtelee käyttökohteittain	Proteesit	Vahvuus Muokattavuus käyttökohteittain	Hidas ja vaikea tuotantoprosessi
Keramiikka			
Alumiinioksidi, Hiili, Lasikeramiikka	Hammasimplantit, silmänsisäinen linssi	Hyvä puristuksenkestokyky Korkea biologinen yhteensopivuus	Hauraus Heikko rasituksenkesto Vaikea tuotantoprosessi

Biomateriaalia käyttökohteeseen valittaessa toinen tärkeä huomioitava tekijä on biomateriaalilta vaaditut fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet, sekä biologinen yhteensopivuus. Haluttuihin fysikaalisiin ominaisuuksiin päästään valitsemalla sellaisia materiaaleja ja materiaaliyhdistelmiä, jotka jäljittelevät korvatus kudoksen tai elimen ominaisuuksia mahdollisimman tarkasti. Sama periaate pätee myös biomateriaalin muotoilussa. Asetettavan implantin tulee jäljitellä korvatus kudoksen ja ympäristön muotoa varmistaakseen implantin täydellinen toiminta ja samalla yhteensopivuus ympäröivien biologisten prosessien kanssa. (Raghavendra 2015, Gómez-Gil 2019)

Biologinen yhteensopivuus varmistetaan käytettävän materiaalin kemiallisten ominaisuuksien perusteella. Vieraiden aineiden tuominen kehoon aiheuttaa kudostavasteen (*eng. Tissue response*). Kudostavasteen on oltava oikeanlainen, mikä tarkoittaa

biomateriaalin ”hyväksymistä” isäntäkudokseen. Kudosvasteen aiheuttamat reaktiot voivat olla joissain tapauksissa hyvin vahvoja, ja niistä aiheutuneet terveyshaitat, kuten verenhyytyminen ja tulehdustilat eivät ole biomateriaalia käytettäessä hyväksytyjä. Tätä kutsutaan vieraan kappaleen reaktioksi (*eng. Foreign body reaction*). Implantin asentaminen tulisi aina olla isäntäkudokselle edullinen prosessi. (Raghavendra 2015)

Ennen uuden biomateriaalin tai implanttimallin hyväksymistä tuotantoon ja kliinisiin operaatioihin seuraa suunnittelun testivaihe. Kun tarkoitukseen sopiva biomateriaali on valittu edellisissä kappaleissa ilmoitettujen prosessien mukaan, siirrytään arvioimaan biomateriaalin toimintaa *in vitro*. Kontrolloidussa laboratorioympäristössä tapahtuva koevaihe kohdekudoksen ja biomateriaalin yhteensopivuudesta määrittää, voidaanko suunnittelussa siirtyä *in vivo* -vaiheeseen. Usein tutkimukselle eduksi on suorittaa useita rinnakkaisia kokeita mahdollisilla biomateriaalin pienillä muutoksilla, kuten jalometalliseosten pitoisuuksien vaihteluilla, useilla eri polymeereillä sekä biomateriaalikappaleiden muodon vaihtelulla. Vaiheen tärkeimpiä tutkimuskohteita ovat kudoksen reaktio biomateriaaliin, mahdolliset biomateriaalin aiheuttamat vahingot sekä myrkyllisyyden arviointi ajan funktiona. (Raghavendra 2015)

Suunnittelun viimeisessä vaiheessa *in vitro* -testivaiheen läpäisseet biomateriaalit siirtyvät *in vivo* -kokeisiin. Näissä eläinkokeissa tarkoituksena on tarkastella biomateriaalien sekä niistä muotoiluiden implanttien toimintaa elävässä organismissa. Tarkkailun kohteena ovat esimerkiksi mahdolliset allergeeniset reaktiot, tulehdustilat sekä geenitoksisuus (*eng. Genotoxicity*). Prosessi on usein pitkä, mutta välttämätön varmistamaan biomateriaalin turvallisuuden ihmiskäyttäjälle. (Raghavendra 2015)

### 5.3 Ennustavan mallinnuksen integraatio biomateriaalien suunnitteluprosessiin

Biomateriaalitutkimukset ovat tarkasti dokumentoituja prosesseja, sillä kliiniset operaatiot vaativat ympäri maailmaa useiden organisaatioiden hyväksynnän ennen käyttöön pääsemistä (Raghavendra 2015). Tämä avaa oven ennustavan mallinnuksen integraatiolle useaan vaiheeseen suunnitteluprosessia. Perinteiset tiedonkäsittelymetodit vaativat käytettävissä olevan tiedon määrän mukaan paljon aikaa sekä tarkkuutta. Biomateriaalitutkimuksessa usein käytetyillä materiaaleilla pienet muuttujat erottavat lukuisia testivaiheen tuloksia. Ennustavan mallinnuksen algoritmit ovat tehokkaimmillaan juuri tämänlaisissa ympäristöissä. Biomateriaalitutkimuksen tieto on

muutettavissa tekoälylle sopivaan muotoon, lopputulokset historiallisista testituloksista ovat tarkasti yhdistettävissä muuttujiin. (Lamba 2022)

Muuttujien suuren määrän takia yksi ratkaisu on luoda kattava neuroverkko koko suunnitteluprosessista. Tällöin yksi malli voisi teoriassa vastata koko prosessista. Tällaista lähestymistapaa on ehdotettu esimerkiksi Chang ja muut tutkimuksessa ennustettaessa koostumusta ja lujuutta korkean entropian metalliseoksissa tekoälyllä. Toistaiseksi on kuitenkin osoittautunut tehokkaammaksi keskittää koneopin mallit etsimään ratkaisuja vain yhdelle materiaalityypille kerrallaan. Menestystä on löytynyt esimerkiksi komposiittien suunnittelussa sekä täysin uusien polymeeriyhdistelmien löytämisessä. Simulaatiot näissä tutkimuksissa ovat osoittautuneet perinteisiä keinoja tehokkaammaksi yksinkertaisimmillakin koneopin malleilla. Tekoälyä käytettiin edellä mainituissa tutkimuksissa hyväksi muun muassa ennustamaan polymeeriyhdisteiden fysikaalisia ominaisuuksia sekä mallintamaan implantin toimintaa ihmiskehon olosuhteissa. Näissä tapauksissa suurin huomattu etu saatiin tekoälyn neuroverkkojen nopeudesta tuottaa teknisesti käyttöön valmiita materiaaleja. (Gokcekuy 2024)

## 6 Tulevaisuus

### 6.1 Markkinatilanne

Kansainvälinen tarve yhä kestävämmille ja tehokkaammille biomateriaaleille on suuressa nousussa väestön ikääntyessä. Vuonna 2024 biomateriaalimarkkinoiden markkina-arvo oli arviolta 171 miljardia dollaria (USD) (Precedence Research 2025). Tämän lisäksi kansainvälisen tekoälyn kehityksen vastaava arvo oli vuonna 2024 yli 200 miljardia dollaria, ja sen on ennustettu nousevan seuraavan kymmenen vuoden aikana yli neljään biljoonaan dollariin (UN trade & development 2025).

### 6.2 Haasteet ja eettiset kysymykset

Tekoälyn suurimmat haasteet pohjautuvat kysymyksiin sen tietoturvasta, epäluotettavuudesta sekä useista etiikan kysymyksistä. Koneopin käytännön sovellukset voivat käsitellä suuria määriä herkkäluonteista dataa, jonka on pysyttävä tallessa ja ulkopuolisten tavoittamattomissa. Tämän turvallisuuden ylläpitämiseksi on kaikille koneoppia käyttäville lääketieteen sekä biolääketieteen alan organisaatioille rakennettava tarkat infrastruktuurit esimerkiksi kyberhyökkäyksiä vastaan. Lisäksi lääketieteen

potilasvastuun siirtäminen algoritmille virheen sattuessa on herättänyt keskustelua. Koneopin mallit sekä niiden käyttämät menetelmät eivät aina ole helposti läpinäkyviä. Varsinkin ihmisen biologian kysymyksissä varjoihin jäävät hoitokeinot voivat olla käyttäjälle epämiellyttäviä. (Lamba 2022) (Kalpana 2022)

## 7 Yhteenveto ja tutkimustulokset

### 7.1 Kirjoittajan näkemys

Koneoppimisen algoritmeja sekä ennustavan mallinnuksen tutkimusta on toteutettu biotekniikan, biolääketieteen sekä lääketieteen alalla toistaiseksi rajallisesti. Kirjallisuuskatsauksesta kuitenkin on huomattavissa suurta liikettä tekoälyn sovelluksien integraatioon biomateriaalitutkimuksessa. Suuri osa käytetyistä lähdejulkaisuista ovat tutkimuksia 2020-luvulta, mikä on tulevaisuuden kannalta lupaava merkki tutkimuksen kehittymisestä.

Käytännön esimerkkejä ennustavan mallin sovelluksista biomateriaalitutkimuksessa en löytänyt ainuttakaan, mutta esimerkiksi Yhdysvalloissa lääketieteen yritykset pitävät toimintansa patentoituna sekä tarkkaan salassa kilpailijoilta.

Vaikka näyttöjä toimivista sovelluksista löytyy jo, ennen kuin koneopin algoritmit voivat mullistaa biolääketieteen tutkimuksen, on syvennettävä käyttäjäkunnan tietotasoa jatkamalla tutkimusta algoritmien toiminnasta. Kansainvälisen tutkimuksen tulee keskittyä mahdollisiin heikkouksiin, mitä tekoälyn käyttö voi esimerkiksi potilashoidossa aiheuttaa.

Ottaen huomioon resurssit mitä sekä biomateriaalitutkimukseen, että tekoälyn kehittämiseen on siirretty viimeisen vuosikymmenen aikana, on vahvasti uskottavissa, että tekoälyn läpimurto myös biomateriaalitutkimuksessa on lähellä. Sovellukset, jotka pelastavat henkiä sekä auttavat yhä tehokkaampaan ja nopeampaan hoitoon eivät ole enää tieteisfiktiota. Miten nopeasti hyötykäyttö alkaa? Sen näemme huomenna.

## 8 Lähteet & Viitteet

Tai, M. C. (2020) The impact of artificial intelligence on human society and bioethics. *Tzu Chi Medical Journal* 32

Ang, T. L., Choolani, M., See, K. C., Poh, K. K. (2023) The rise of artificial intelligence: addressing the impact of large language models such as ChatGPT on scientific publications.

Ghosh, A. (2023) How can artificial intelligence help scientists? A (non-exhaustive) overview. *OECD, Artificial intelligence in science*

Lamba, M., Margam, M. (2022) Predictive modeling. *Text Mining for Information Professionals: An Uncharted Territory* (213-242)

Williams, D. F. (2019) Challenges with the Development of Biomaterials for Sustainable Tissue Engineering. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 7

Williams, D. F. (2004) Benefit and risk in tissue engineering. *Materials Today* 7: 24-29

Muhsen, I. N., Hashmi, S. K. (2022) Utilizing machine learning in predictive modeling: what's next? *Bone Marrow Transplantation* 57:699-700

Raghavendra, G. M., Varaprasad, K., Jayaramudu, T. (2015) Biomaterials: Design, Development and Biomedical applications. *Nanotechnology Applications for Tissue Engineering* (21-44)

Park, J. B., Lakes, R. S. Biomaterials: An Introduction 3<sup>rd</sup> edition (2007)

Gómez-Gil, V., Pascual, G., Bellón, J. M. Biomaterial Implants in Abdominal Wall Hernia Repair: A Review on the Importance of the Peritoneal Interface (2019) *Biomaterials and Tissue Engineering*

Kalpana, Srivastava, A., Jha, S. (2022) 13-Data-Driven machine learning: A new approach to process and utilize biomedical data. *Predictive Modeling in Biomedical Data Mining and Analysis. Advanced studies in Complex Systems: Theory and Applications* (225-252)

Gokcekuyu, Y., Ekinci, F., Guzel, M. S., (2024) Artificial Intelligence in Biomaterials: A Comprehensive Review *Applied Sciences* 14 (15)

Zhang, K., Ma, B., Hu, K., (2022) Evidence-based biomaterials research *Bioactive Materials* (15: 495-503)

Kuvio 4.2.1 <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Random-data-plus-trend-r2.png>  
(Creative commons -käyttöluvut)

Kuvio 4.2.2 [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Exam\\_pass\\_logistic\\_curve.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Exam_pass_logistic_curve.svg) (Creative commons -käyttöluvut)