

Aalto-yliopisto  
Insinööritieteiden korkeakoulu  
Energia- ja konetekniikka, tekniikan kandidaatti

---

# KANDIDAATINTYÖ

28.8.2024

Energiatehokkuuden optimointi älyratkaisuilla metsäteollisuudessa

**Akseli Iivonen**

---

---

**Tekijä** Akseli Iivonen

---

**Työn nimi** Energiatehokkuuden optimointi yläratkaisuilla metsäteollisuudessa

---

**Koulutusohjelma** Energia- ja konetekniikka, tekniikan kandidaatti

---

**Pääaine** Energiatekniikka

---

**Vastuopettaja/valvoja** Kari Alanne

---

**Työn ohjaaja(t)** Henrik Holmberg ja Sophia Havulinna

---

**Yhteistyötaho** Motiva ja Energiavirasto

---

**Päivämäärä** 28.8.2024    **Sivumäärä** 32    **Kieli** Suomi

### Tiivistelmä

Energiatehokkuuden optimointi on keskeinen tekijä Suomen metsäteollisuudessa, joka vastaa yli 50 prosenttia teollisuuden energiantarpeesta. Kansainvälisen kilpailukyvyyn ylläpitämisen sekä päästökaupan seurauksena energiatehokkuuden parantaminen teknologioiden avulla on yhä suuremmassa asemassa.

Kandidaatintyön aiheena oli Suomen metsäteollisuuden energiatehokkuuden optimointi Teollisuus 4.0 -teknologioita, kuten tekoälyä, pilviratkaisuja sekä 5G:tä hyödyntämällä. Työ keskittyi erityisesti globaaleihin teknologioihin sekä suomalaisten metsäteollisuusyritysten, kuten UPM Plywood Pelloksen ja Metsä Fibre Äänekosken tekemiin havaintoihin erilaisten teknologioiden käyttöönotosta ja niiden vaikutuksista tuotantoprosessien optimointiin.

Tutkimusaineisto koostui kirjallisuuskatsauksesta, laitevalmistajien tekemiin case-tutkimuksiin kansainvälisissä tuotantolaitoksissa ja asiantuntijahaastatteluista, joiden avulla saatiin tapauskohtaista ja laajaa tietoa teknologioiden toiminnasta. Case-tutkimukset tarjosivat konkreettisia esimerkkejä metsäteollisuusyrityksiltä erilaisten järjestelmien implementoinnista osaksi tuotantoprosesseja.

Case-tutkimusten tulokset osoittivat, että uuden sukupolven optimointityökalut ovat parantaneet metsäteollisuuden energiatehokkuutta sekä operatiivisten prosessien kannattavuutta. Teknologiat mahdollistavat reaaliaikaisen prosessioptimoinnin, minkä seurauksena tuotannon joustavuus, kannattavuus sekä ajoaika kehittivät merkittävästi.

Työssä osoitetaan asiantuntijahavaintojen sekä tutkimusdatan perusteella, että energiatehokkuuden ja tuotannon optimointiin tarkoitettujen teknologioiden integrointi osaksi tuotantoprosesseja on oleellisessa asemassa suomalaisten metsäteollisuusyritysten globaalissa kilpailukyvyssä. Teknologioiden tarjoamien suorien sekä oheishyötyjen

pohjalta investoinnit Teollisuus 4.0 -teknologioihin on suositeltavia. Tuotantoprosessien eroavaisuuksien sekä kompleksisuuksien vuoksi yksittäisen teknologian tuottamat hyödyt vaihtelevat. Tämän seurauksena ei ole universaalia ratkaisuehdotusta prosessien optimointiin, vaan jokaisen prosessin tarpeet tulee kartoittaa ennen investointien tekoa.

Avainsanat: Energiatehokkuus, älyratkaisut, optimointi, metsäteollisuus

## Esipuhe

Tämä kandidaattityö on tehty osana Aalto-yliopiston Energiatekniikan kandidaattiohjelman sekä Motivan ja Energiaviraston yhteishanketta. Työn tarkoituksena oli tutkia energiatehokkuuden optimointia älyratkaisuilla teollisissa ympäristöissä sekä syventää ymmärrystäni erilaisten optimointityökalujen positiivisesta vaikutuksesta tuotantoprosessien energiatehokkuuteen.

Haluan esittää lämpimät kiitokset ohjaajilleni Henrik Holmbergille Aalto-yliopistosta sekä Sophia Havulinnalle Motivasta, jotka ovat antaneet arvokasta ohjausta ja tukea työn aikana. Heidän asiantuntemuksensa ja kannustuksensa ovat olleet erittäin merkityksellisiä tämän työn valmistumisessa.

Kiitän myös Sami Kuvaa UPM Plywood Pelloksesta sekä Hannu Loiri Metsä Fibre Äänekoskelta, jotka ovat antaneet aikaa ja resursseja tämän työn toteuttamiseen.

Työ on toteutettu kesän 2024 aikana. Työprosessi on ollut opettavainen ja tarjonnut minulle mahdollisuuden syventyä tulevaisuuden energiaratkaisuihin laaja-alaisesti. Koen, että työ on antanut minulle arvokkaita valmiuksia kohdata tulevaisuuden haasteet energia-alan murroksessa.

Toivon, että tämä työ tarjoaa arvokasta tietoa teollisuuden energiatehokkuuden optimointityökaluista, jotka voivat toimia perustana laajemmalle energia-alan murrokselle.

Helsingissä, 26.8.2024.

Akseli Iivonen

## Sisällysluettelo

Esipuhe.....	iv
1 Johdanto .....	1
2 Energiatehokkuuden tausta .....	3
3 Energiatehokkuuden optimoinnin oheishyödyt .....	3
4 Energiatehokkuuden optimointi nykypäivänä .....	4
4.1 Tekoäly ja koneoppiminen.....	6
4.2 Älykkäät sensorit sekä IoT .....	7
4.3 Energianhallintaohjelmistot .....	8
4.4 Automaatiojärjestelmät .....	11
4.5 Muita käytettyjä teknologioita maailmalla .....	13
5 Case-tutkielmat .....	15
5.1 UPM Plywood Pellos.....	16
5.2 Metsä Board Äänekoski.....	17
6 Johtopäätökset.....	19
6.1 Voimassaolo ja luotettavuus.....	20
6.1.1 Tutkimuksen rajoitteet.....	20
6.1.2 Case-tutkielman luotettavuusanalyysi .....	20
6.1.3 Kirjallisuuden luotettavuusanalyysi .....	21
7 Suositukset.....	22

## Kuvaluettelo

Kuva 1: Teollisuuden energiankäyttö toimialoilla Suomessa (Tilastokeskus, 2022)	2
Kuva 2: Energiatehokkuuden optimointityökalujen vaikutukset tuotannon osa-alueisiin (Arana-Landín et al. 2023a)	5
Kuva 3: Valmet DNA tulokset prosessi-integraatiosta (Valmet, 2023)	9
Kuva 4: UPM tuotantolaitokset ja kontrollikeskukset Euroopassa (ABB, 2024)	10
Kuva 5: ABB Ability pelkistetty toimintakaavio (ABB, 2024)	12
Kuva 6: MICMAC analyysi tuotantolaitoksesta (Tokai, 2015)	14
Kuva 7: Digital Twin mallinnos (Balderas, Ortiz ja Méndez, 2021)	15

## Lyhenteet

Kandidaattityössä on käytetty alakohtaisia, kansainvälisiä englanninkielisiä termejä tekstin sujuvuuden edistämiseksi.

AI	Artificial Intelligence
EE	Energy Efficiency
EEM	Energy Efficiency measure
EM	Energy Management
EMS	Energy Management Systems
IIoT	Industrial Internet-of-Things
IoT	Internet-of-Things
DT	Digital Twin
ML	Machine Learning
MICMAC	Matrice d'impacts croisés multiplication appliquée á un classment
SaaS	Software as a Service
ROI	Return on Investment
ISM	Interpretive Structural Modeling
AMRB	Additive Manufacturing and Robotics
AVAI	Artificial Vision and Artificial Intelligence
BDAA	Big Data and Advanced Analytics

# 1 Johdanto

Energiatehokkuus on yksi teollisuuden keskeisimmistä tavoitteista nykypäivänä, sillä se vaikuttaa suoraan yrityksen kustannuksiin ja siten sen kilpailukykyyn. Tuotantoteollisuus on suurin yksittäinen energiankuluttaja, minkä seurauksena energiatehokkuuden optimointia on pyritty jatkuvasti kehittämään hyödyntämällä uusimpia teknologioita, kuten automaatiojärjestelmiä, tekoälyä ja koneoppimista. Suomessa suurin energiankuluttaja on jo vuosikymmeniä ollut metsäteollisuus 20 terawatin kulutuksella (Kuva 1), mikä on noin 58 prosentin osuus Suomen teollisuuden energiankulutuksesta (Motiva, 2024).

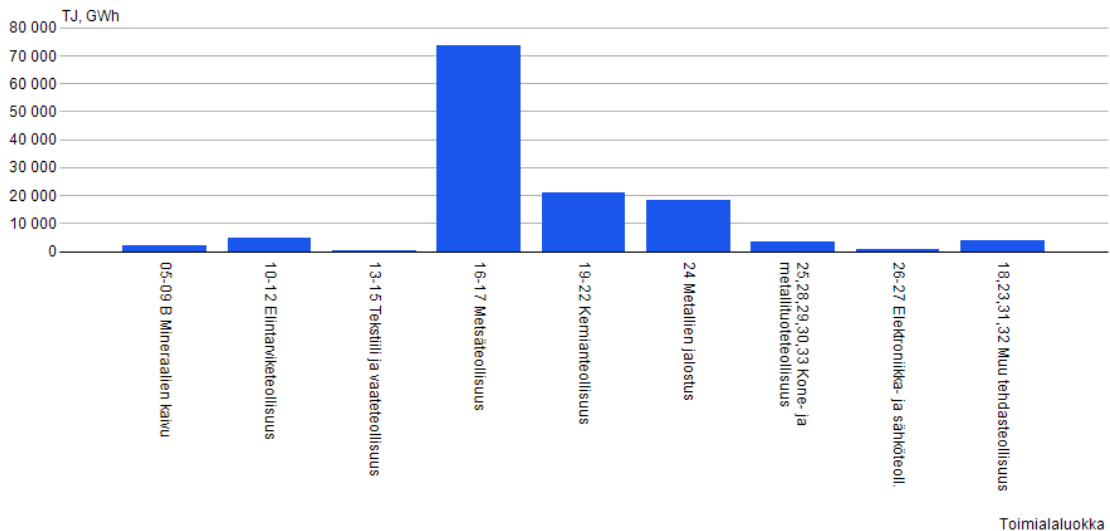
Tämän tutkimuksen tavoitteena on syventyä siihen, kuinka metsäteollisuudessa integroidaan uusimmat älyteknologiat osaksi tuotannon energiatehokkuuden optimointia. Tutkimuksen tarkoituksena on myös kartoittaa, millaisia ratkaisuita maailmalla on käytetty teknologioiden osalta sekä tutkia, kuinka kyseisiä ratkaisuita voitaisiin integroida yleisesti suomalaisiin teollisuusprosesseihin. Toivottujen tutkimustulosten saavuttamiseksi toteutettiin kirjallisuuskatsaus, tutkimalla laitevalmistajien tekemiä case-tutkimuksia kansainvälisissä tuotantolaitoksissa sekä asiantuntijahaastatteluista, joiden avulla saatiin tapauskohtaista ja laajaa tietoa teknologioiden toiminnasta. Case-tutkimukset tarjosivat konkreettisia esimerkkejä metsäteollisuusyritysten erilaisten järjestelmien implementoinnista osaksi tuotantoprosesseja. Tutkimuksessa keskitytään erityisesti kahteen tuotantoprosesseiltaan erilaiseen metsäteollisuuden tehtaaseen, UPM Plywood Pellokseen ja Metsä Fibre Äänekoskeen. Tehtaiden tuotantoprosessien eroavaisuuksien, mutta molempien johtavan markkina-aseman vuoksi, analysoidaan molempien energianhallintajärjestelmien tuomia hyötyjä.

Tutkimuksessa tarkastellaan älyratkaisuita, joita on otettu käyttöön maailmalla, sekä prototyypitasolla tutkittuja teknologioita. Rajaamalla teknologiat koskemaan uusimpia ratkaisuita sekä vertaamalla niitä perinteisempään teknologiaan, pystytään syventymään analyysiin ja tuottamaan tarvittavaa uutuusarvoa tutkimukselle. Teollisuudessa säätöjärjestelmiä sekä optimointityökaluja on kehitelty markkinasovelluksista sekä tehtaiden käyttökokemukseen perustuvilla tietotaidoilla, joten usein uudet älyteknologiat ovat prosesseja täydentäviä toimintoja, eivätkä siten anna 100 prosentin kuvaa energiatehokkuuden kehityksestä. Keskeisiä käsitteitä älysovelluksissa ovat tekoäly, koneoppiminen, IoT (Internet of Things) sekä automaatiojärjestelmät, jotka määritellään ja tarkennetaan tutkimuksen aikana.

Tutkielman pohjimmaisena tarkoituksena voidaan tiivistää tutkimuskysymyksiin:

1. Millaisia Teollisuus 4.0 -teknologioita metsäteollisuudessa hyödynnetään nyky-päivänä?
2. Millaisia tuloksia teknologioiden integroinnilla on ollut prosessien energiatehokkuuteen?

Teollisuuden energiankäyttö muuttujina Toimialaluokka. Kaikki energialähteet yhteensä, Energiakäyttö (GWh), 2022.



Kuva 1: Teollisuuden energiankäyttö toimialoilla Suomessa (Tilastokeskus, 2022)

Tutkimus jakautuu viiteen osioon. Ensimmäisessä osiossa määritellään energiatehokkuuden taustaa ja oheishyötyjä teollisuudessa. Toisessa osiossa syvennytään markkinoilla löytyvien Teollisuus 4.0 -teknologioiden tarjontaan ja yksilöllisiin mahdollisuuksiin energiatehokkuuden optimoinnissa. Kolmannessa osiossa käsitellään case-tutkimusten tuloksia suomalaisten metsäteollisuusyritysten käyttöönottamista optimointiratkaisuista prosessienohjauksessa ja sen kautta energiatehokkuuden kehittämisessä. Neljäs ja viimeinen osio syvenyy tutkimuksen pohjalta syntyneisiin johtopäätöksiin ja suosituksiin metsäteollisuusyritysten tulevaisuuden päätöksenteon tueksi.

## 2 Energiatehokkuuden tausta

Energiatehokkuudelle teollisuudessa ei ole yksiselitteistä määritelmää. Energiatehokkuus yleisesti määritellään prosessiksi, jossa kyetään käyttämään vähemmän energiaa saman tehtävän suorittamiseen. Teollisessa ympäristössä pelkkä energiankulutuksen vähentäminen ei ole ainoa tehokkaampaan tuotantoon liittyvä tekijä, vaan se on osa laajempaa kokonaisuutta. Martin et al. (1994) määrittelee energiatehokkuuden teollisuudessa osaksi tuotannon laatua teollisuussektorilla.

Laskennallisesti energiatehokkuus määritellään hyödyllisten prosessilopputuotteiden ja prosessiin syötetyn energian osamääränä. Yksistään pienempi energiamäärä ei tuota tuotantolaitoksille erityistä hyötyä, vaan energiatehokkuus on sidottava tuotettujen lopputuotteiden kvantitatiiviseen ja laadulliseen määrään. Syvällisemmin tarkasteltaessa prosessien energiatehokkuutta on luotava termodynaamiset, fysikaalis-termodynaamiset, taloudelliset-termodynaamiset sekä ekonomiset indikaattorit (Martin et al. 1994).

Energiatehokkuus on usein määritelty teollisuusympäristöissä ensisijaiseksi kehityskohteeksi sijoitusprojekteissa, ja se voi tuoda yrityksille merkittäviä kestävyysparannuksia, kuten pienempiä päästökustannuksia, oheishyötyjä, tuottavuusparannuksia sekä taloudellisia säästöjä (Schoeneberger et al. 2020).

Pienempi energiankulutus parantaa yksittäisen prosessin tehokkuutta, mutta kokonaisuudessa merkittävämmässä asemassa on energiankäytön oikea-aikaisuus. Energiatehokkuuden avulla teollisuuslaitokset pyrkivät säästämään kustannuksissa, lisäämään kestävyyttä muutoksille sekä kehittämään riippumattomuuttaan ulkoisen sähköverkon sähköstä.

## 3 Energiatehokkuuden optimoinnin oheishyödyt

Teollisuusprosessien energiatehokkuuden optimoinnin avulla voidaan saavuttaa useita erilaisia oheishyötyjä tuotantolaitokselle. Energiatehokkuuden parantaminen mahdollistaa tuotantolaitoksen energiakustannusten vähentämisen, tuotannon laadun ja luotettavuutta parantamisen optimointijärjestelmien tuoman vaihtelun vähenemisen kautta, päästöjä vähentämisen sekä yrityksen ympäristöimagon parantamisen (Lung, Nimbalkar, ja Wenning, 2017). Optimointityökalut luovat prosesseihin kehittyneitä olosuhteita, joiden seurauksena huollon ennakointi, materiaaliparannukset sekä tuotannon ajoittaminen voidaan saavuttaa energiatehokkuuden optimoinnin rinnalla.



Teollisuuden tuotantoprosessi kokonaisuudessaan hyötyy energiatehokkuutta parantavien älyratkaisujen tuomasta mittausdatasta, sillä yksittäisen sensorin mitaamat arvot antavat kattavamman kuvan prosessien toiminnasta sekä mahdollisista epäkohdista järjestelmissä. Monteiro et al. (2023) mukaan ottamalla älyratkaisuiden mahdollistamat datat mukaan tuotantoprosessien digitaalisten kaksosten numeraalisiksi alkuarvoiksi, voidaan prosessien turvallisuutta, kustannustehokkuutta, huoltotarpeen minimointia sekä prosessin käyttöaikoja parantamaan.

## 4 Energiatehokkuuden optimointi nykypäivänä

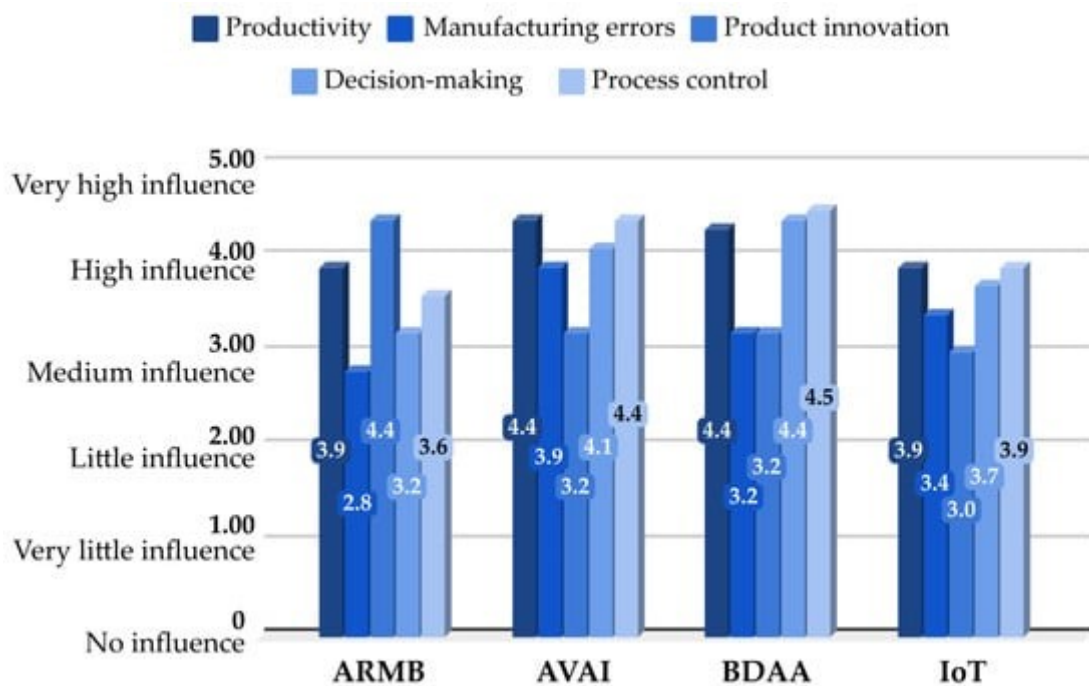
Energiatehokkuuden optimointiin teollisuusprosesseissa voidaan hyödyntää useita eri ratkaisuja, ottaen huomioon prosessille ominaiset vaatimukset ja rajoitteet. Energiatehokkuuden perustana on prosesseissa tuotetun ja käytetyn energian mahdollisimman korkea hyötysuhde.

Monissa prosesseissa mekanismit on kehitetty vuosien saatossa materiaaliratkaisujen avulla mahdollisimman pienihäviöisiksi, mutta tuotannon ajoittaminen ja ennakointi tarjoavat merkittäviä mahdollisuuksia energiatehokkuuden kehittämiseksi. Tutkimustulosten ja ammattilaisten haastatteluiden perusteella perusteellisuuden suurimmat häviöt syntyvät prosessien keskeytymisen ja epäideaalisen ajoittamisen seurauksena (Kuva, 2024).

Älysovellusten käyttöönotto energiatehokkuuden optimoinnissa ei kuitenkaan ole ongelmattonta. Tekoälyratkaisut aiheuttavat haasteita datan yksityisyyden suhteen, sillä tekoälyprosessorit täytyy käyttää ulkopuolisten palvelimien kautta, mikä saattaa altistaa yrityksen luottamuksellisen datan väärinkäytöksille. Lisäksi tekoälyjärjestelmät edellyttävät osaavaa henkilöstöä, ja infrastruktuurin integrointi uusiin tekoälyjärjestelmiin vaatii merkittävää ajankäyttöä (Loiri, 2024).

Näihin haasteisiin vastaaminen on olennaista, jotta tekoäly saadaan hyödynnettyä prosesseissa mahdollisimman kattavasti. Tekoäly (AI) avaa täysin uudenlaisia mahdollisuuksia energiatehokkuuden parantamiseen teollisissa ympäristöissä, mahdollistaen älykkäät ohjauksjärjestelmät ja energiasysteemien optimoinnin prosesseihin sopiviksi. Kuvassa 2 havainnollistetaan älyratkaisuiden tuottamia tuloksia tuotantoprosessien eri vaiheissa, kun käytössä on erilaisia älyratkaisuja. Teollisuus 4.0 -järjestelmiin perustuvat ratkaisut voivat tutkimusten mukaan parantaa energiatehokkuutta, pienentää kustannuksia ja tasaa prosessien energiankulutusta. Esimerkkejä älyratkaisujen tuottamista kehitysaskelista tuotannossa käsitellään tarkemmin luvuissa 4 ja 5.

Kuvassa kaksi Arana-Landín et al. (2023a) esittelee tutkimusta, joka käsittelee energiatehokkuuden optimointityökalujen vaikutuksia tuotannon eri osa-alueisiin. Tutkimuksessa käytettiin dataa, joka on kerätty 72 globaalin valmistavaa teollisuutta edustavan yrityksen havainnoista operatiivisissa vaiheissa. Tutkimuksessa keskityttiin neljään eri teknologiaan: Additive Manufacturing and Robotics (AMRB), Artificial Vision and Artificial Intelligence (AVAI), Big Data and Advanced Analytics (BDAA), sekä Internet of Things (IoT). Tutkimuksen tavoitteena oli arvioida eri teknologioiden vaikutusta tuotantoon skaalalla Ei vaikutusta – Hyvin suuri vaikutus (No influence – Very high influence), ja arvioinnissa käytettiin asteikkoa nolasta viiteen. Teknologioiden vaikutuksia tuotannon osa-alueisiin, kuten tuottavuuteen, tuotantohäiriöihin, tuoteinnovaatioon, päätöksentekoon ja prosessikontrolliin, tutkittiin perustellusti. Keskimääräisesti AVAI:n integroinnissa oli suurin merkitys koko prosessin eri osa-alueisiin, kun taas IoT:lla oli keskimäärin pienin vaikutus mitattaviin arvoihin. Tuotanto ja energiatehokkuus ovat tiiviisti sidoksissa toisiinsa, ja taulukosta on havaittavissa merkittävät vaikutukset, joita AVAI:n ja BDAA:n integrointi tuotantoprosesseihin on saanut aikaan.

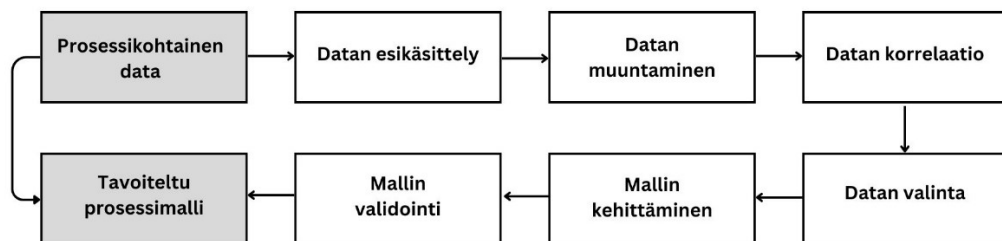


Kuva 2: Energiatehokkuuden optimointityökalujen vaikutukset tuotannon osa-alueisiin (Arana-Landín et al. 2023a)

## 4.1 Tekoäly ja koneoppiminen

Tämänhetkiset teollisuusympäristöt suosivat suurta datan keräämistä prosesseista, mutta vain harvat yritykset ottavat datan tuomat mallit käytäntöön (Narciso ja Marting, 2020). Tekoäly ja koneoppiminen ovat viime vuosina saaneet osakseen suurta huomiota. Niiden avulla voidaan tuottaa yhä laajempaa ja tarkempaa analyysia reaaliajassa. Teollisessa ympäristössä tekoälyä on alettu kouluttamaan vastaamaan prosessien tarkoituksia syöttämällä sille historiallista dataa. Tekoäly ja koneoppiminen tarjoavat merkittävän potentiaalinen energiatehokkuuden optimointiin, mutta koska jokainen teollisuusprosessi on ainutlaatuinen, niiden kouluttaminen vaatii suurta tarkkuutta.

Maailmalla tehtyjen tutkimusten mukaan tekoäly- ja koneoppimiskäytöjen avulla teollisuusprosesseissa on saavutettu 15–25 prosentin parannuksia energiatehokkuudessa laitteissa, joihin järjestelmät on integroitu (Arana-Landín et al. 2023b). Kuvassa 3 havainnollistetaan koneoppimismallin kouluttamista tuotantoprosessista kerättävän datan avulla. Aluksi teollisuusprosesseissa kerätty data prosessoidaan. Data muunnetaan tarvittavienkorjausten jälkeen tuotantoprosessiin sopivaksi, ja siihen tehdään vaadittavat muutokset. Tämän jälkeen hyödyllinen data valitaan mallille opetettavaksi. Kerätyn datan pohjalta muodostetaan malli prosessille, minkä jälkeen koneoppimismalli on valmis. Kun tuotantoprosessille muodostetaan malli koneoppimisen avulla, tekoäly kykenee ennustamaan energiatarpeita ennakoivasti, mikä parantaa energiatehokkuutta tuotannossa.



*Kaavio 1: Koneoppimismallin koulutuskaavio (Muokattu: Narciso ja Marting, 2020)*

Koneoppiminen ja tekoäly eivät itsessään ole itsenäisiä teknologioita, jotka kehittävät energiatehokkuutta tuotantolaitoksissa, vaan ne ovat osa IIoT -järjestelmää. Koneoppimisen ja tekoälyn rooli on luoda kerätystä datasta malleja ja ennusteita prosesseista, joiden perusteella prosesseja ohjataan.

## 4.2 Älykkäät sensorit sekä IoT

Teollisuusprosesseissa on kehitetty vuosikymmenien aikana mittausjärjestelmiä sekä niihin sopivia sensoreita koneistojen toiminnan mittaamiseen. Viimeisten vuosikymmenien aikana sensoreihin on yhdistetty laskentatehoa, ja niiden välille on rakennettu verkosto prosessien tukemiseksi. Älykkäät sensorit määritellään sensoreiksi, jotka muuntavat prosessikohtaiset syötteen suorittaakseen ennalta määriteltyjä toimintoja. Sensorit prosessoivat tiedot ennen niiden siirtämistä digitaaliseen tietovirtaan. (Gupta, 2021)

IIoT-järjestelmiä hyödynnetään monenlaisiin tarpeisiin yritysten omien intressien mukaisesti. Ruotsalaisessa SCA Munksundin paperitehtaassa on integroitu useita älykkäitä sensoreita, jotka muodostavat IIoT-verkoston laitteistojen kunnossapidon tueksi. Tuottamalla arvokasta dataa koneistojen kunnosta tuotantovastaavat pystyvät identifioimaan kehitystarpeita, joiden avulla koneistojen tehostamisesta voidaan edistää. SCA Munksund (2021) -tutkimusten mukaan tietoverkoston avulla yritys pystyi ajoittamaan tuotantoaan paremmin, minkä seurauksena tuotantolaitos säästi yli 50 gigawattituntia energiaa vuoteen 2020 verrattuna.

Älysensorit ja IIoT-järjestelmät ovat keskeisiä teknologioita tuotantoprosessien automaatioissa, ja ne mahdollistavat tiedonkeruun, -vaihdon ja -analysoinnin tuotannon tehokkuuden ja tuottavuuden parantamiseksi. Älykkäiden sensorien vaikutus prosessien energiatehokkuuteen perustuu kerätyn datan analysoimiseen sen mukaan, missä, milloin, kuinka ja miksi energiaa on kulunut prosessin aikana. Sensorit voivat monitoroida koneistoja ja järjestelmien suorituskykyä, luoda ja kerätä dataa lähes virheettömästi, ennustaa laiterikkoja, hälyttää kunnossapitotarpeista sekä nopeuttaa informaation kulkua prosessien ohjausjärjestelmien välillä. (Gupta, 2021)

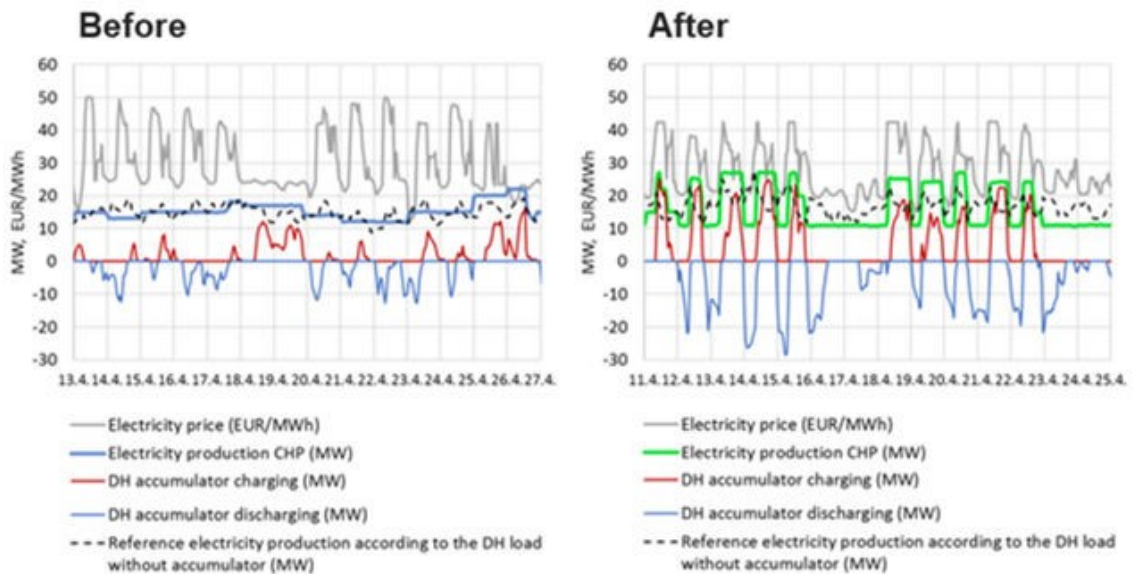
Yhdistämällä älysensorit ja IIoT-järjestelmät tuotantolaitokset voivat kerätä jatkuvaa analyysiä ympäri infrastruktuuria lähes viiveettömällä vasteajalla ilman tarvetta fyysisen ihmisen valvontakierroksille ja mittauksille. Sensorien kehittyminen sisältämään useita sisäänrakennettuja toimintoja, kuten itsehavaitseminen, älykäs kalibrointi, digitaalisen sensoridatan tuottaminen, tunnistuskyky sekä viestintä etävalvontaa, ovat parantaneet tuotantolaitosten prosessien ajoittamista, minkä seurauksena energiankäyttöä voidaan ohjata tarkemmin. (Gupta, 2021)

### 4.3 Energianhallintaohjelmistot

Energianhallintaohjelmistot ovat olleet keskeisessä asemassa metsäteollisuuden prosessien automaatiokehityksessä. Erilaisten ohjelmistojen avulla energiankulutusta voidaan säädellä optimaalisesti. Lisäksi prosesseista voidaan seurata erilaisia parametreja ja kerätä arvokasta tietoa energiakulutuksesta. Energianhallintaohjelmistot on integroitu tehtaan energiantuotantoon, jossa prosessioperaattori muuttaa manuaalisesti viitearvoja prosessin optimoinnin tueksi.

Markkinoilla on tarjolla erilaisia energianhallintaohjelmistoja, kuten Valmet DNA Energy Management, ABB Ability™ Energy Management System, Schneider Electric EMS ja Siemens EnergyIP. Näiden järjestelmien avulla yksittäiset tuotantolaitokset voivat valita tuotantoprosesseilleen sopivat ominaisuudet. Energianhallintajärjestelmiin kuuluu erilaisia analyysi-, datankeruu- ja ennakointityökaluja. Järjestelmät pohjautuvat laajaan valikoimaan valmistajien sensoreita, joiden avulla kerätty data voidaan siirtää järjestelmään. Kerätyn tiedon avulla järjestelmät tarjoavat reaaliaikaista ohjausta prosessioperaattoreille, jolloin arvot voidaan muuttaa joko manuaalisesti operaattorin avulla tai järjestelmä voi automaattisesti suorittaa toimintoja annettujen raja-arvojen perusteella. (ABB, 2005; Valmet, 2023)

Optimoimalla energiahallintajärjestelmiä tuotantolaitokset voivat kehittää lyhyen ja pitkän aikavälin tuotantosuunnittelua, vähentää lämmön ja sähkön tuotantokustannuksia, mahdollistaa tuotetun energian ulosmyynnin sekä automatisoida suuren määrän prosessin ajotoimintoja (Valmet, 2023). Monissa energianhallintajärjestelmissä on integroituna avoimista lähteistä kerättyä sähkömarkkina- ja sääennustetietoa. Yhdistämällä tuotantoprosesseista saatavat prosessikohtaiset tiedot teollisuuslaitokset voivat ennustaa energiantuotantoaan ja seurata mahdollisen lisäsähkön tarvetta kantaverkosta tai ulosmyyntimahdollisuuksia. Laskemien perusteella tuotantolaitokset saavat tietoa tulevaisuuden investointien ja niiden kannattavuuden arvioimiseksi. Valmet DNA tarjoaa automaattisia prosessinkäynnistys-ehtoja optimaalisten energiakustannusten perusteella. Alla olevassa kuvassa (Kuva 4) on esitetty EMS-järjestelmän tarjoama kulutustasaus energiatarpeen suhteen.



Kuva 3: Valmet DNA tulokset prosessi-integraatiosta (Valmet, 2023)

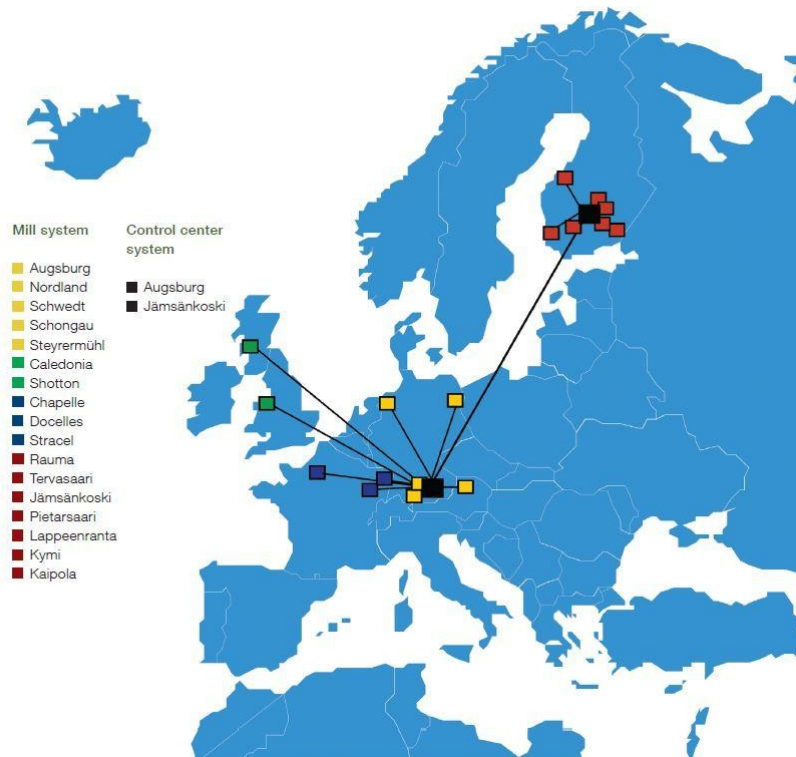
Kuvassa neljä esitellään Valmet DNA Energy Management Systemin (EMS) mahdollistamaa tuotannon joustoa. Ennen järjestelmän integroimista CHP-tuotantolaitokseen (Combined Heat and Power) laitoksen tuottama energia ei ollut ajoitettu optimaalisesti markkinahintojen mukaan, mikä johti lämpöverkkoon syötetyn energian pienempään hyötyyn. EMS-järjestelmän integroinnin avulla CHP-laitos pystyi ajoittamaan sähkön- ja lämmöntuotannon optimaalisesti markkinahintojen mukaa, mikä paransi huomattavasti laitoksen kannattavuutta.

Energianhallintajärjestelmien integrointi osaksi yrityksen strategiaa kohti kantaverkosta riippumatonta ja itsenäistä energiantuotantoa on huomioitu suomalaisissa metsäteollisuusyrityksissä, kuten UPM:n paperitehtailla ympäri Eurooppaa. UPM on tutkinut ABB EMS-järjestelmän vaikutuksia paperitehtaidensa energiaomavaraisuuteen integroimalla järjestelmän kymmeneen Keski-Euroopan laitokseensa ja kahdeksaan Suomessa sijaitsevaan tuotantolaitokseen. Järjestelmä on laajentunut ja otettu käyttöön osittain prosessien osana. Vuonna 2007 UPM-Kymmene kykeni kattamaan 70 prosenttia omasta sähköntarpeestaan globaalisti, mutta Suomessa se saavutti täyden omavaraisuuden. Suomen ulkopuolisissa tuotantolaitoksissa energia hankitaan paikallisten sopimusten mukaan, minkä seurauksena energiaressurssien optimointi EMS-järjestelmillä kasvattaa yrityksen energiadivisioonan tuottoja. (ABB, 2024)

Prosesseista kerättävä reaaliaikainen data on mahdollistanut laskennan ja raportoinnin sähkön, höyryn, veden ja maakaasun taseista. Näiden avulla energiankulutuksen ennustaminen on mahdollistanut tuotantosuunnittelun sekä oman generaattorikapasiteetin optimoinnin tuotannon tarpeisiin (Junttila ja Parkkinen, 2008).

Kuvassa viisi näkyvien kahden kontrollikeskuksen avulla UPM kykenee jatkuvasti hyödyntämään ympäri Eurooppaa sijaitsevien tehtaiden saapuvaa informaatiota ja luomaan kattavan tilannekuvan tehtaiden päästöistä ja kulutuksista sekä jakamaan resurssejaan tarpeen vaatiessa (Junttila ja Parkkinen, 2008).

Energianhallintajärjestelmät eivät ole pelkästään yksittäisten tuotantolaitosten optimointiin tarkoitettuja instrumentteja; niiden avulla organisaatiot voivat seurata laitosverkostonsa toimintaa ja sen perusteella tuottaa johtoportaalte reaaliaikaisen kuvan prosessien kannattavuudesta ja tuottavuudesta. Suomen energiantuotantojärjestelmissä UPM:n osuus on merkittävässä asemassa sähköntuotannossa, minkä seurauksena energianhallintajärjestelmien luomat mahdollisuudet ennustaa tuotannon ja ulkoisen tarpeen muutoksia luovat yritykselle suuren ulkoisen taloudellisen potentiaalin lisätuotolle.



Kuva 4: UPM tuotantolaitokset ja kontrollikeskukset Euroopassa (ABB, 2024)

## 4.4 Automaatiojärjestelmät

Teollisuuden automaatiojärjestelmät ovat luoneet yrityksille mahdollisuuden tehostaa ja kehittää vanhoja tuotantolaitoksiaan sekä suunnitella uusia laitoksia vastaamaan nykypäivän vaatimuksia. Esimerkkejä automaatiojärjestelmistä ovat ABB:n valmistama Ability™-järjestelmä ja Rockwell Automationin FactoryTalk -järjestelmä.

Rockwell Automationin FactoryTalk -automaatiojärjestelmän avulla useat metsäteollisuusyritykset ovat pystyneet nostamaan tuotannon ajoaikaa, optimoimaan henkilöstökapasiteettia sekä ympärivuorokautista tuotantojärjestelmien valvontaa ja ylläpitoa. (Rockwell Automation, 2023).

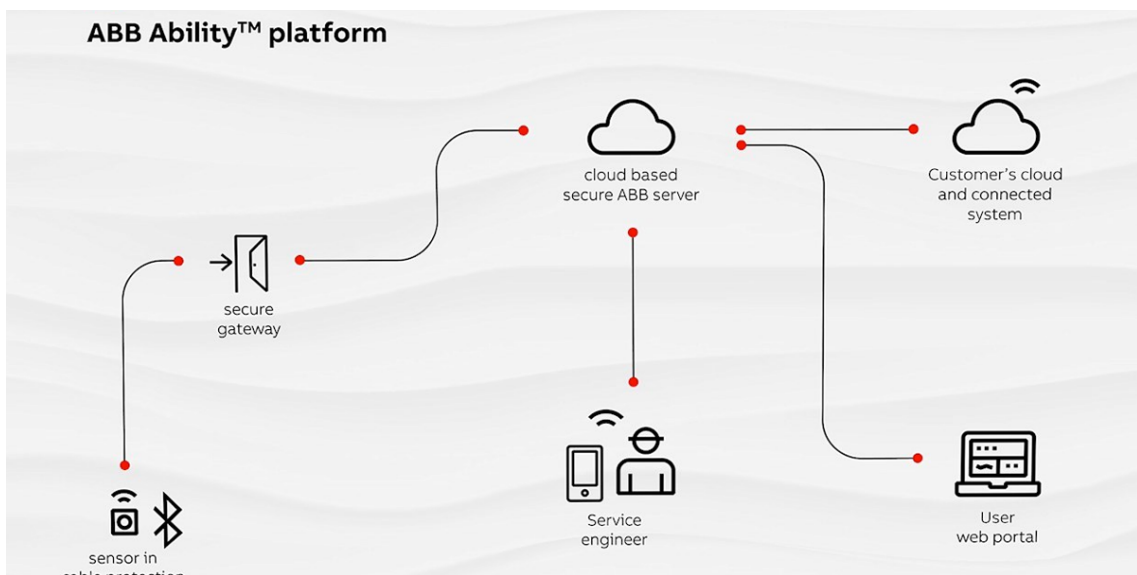
Yhdysvaltojen Keski-Lännessä sijaitsevalla paperitehtaalla Rockwellin automaatiojärjestelmän avulla yritys kykeni päivittämään 50 vuotta vanhan tuotantolaitoksensa. Järjestelmän integroinnin seurauksena tuotantolaitos pystyi nostamaan prosessiensa ajoajan 91 prosenttiin, vähentämään henkilöstö- ja varaosakulujaan, parantamaan järjestelmien tehoa, parantamaan koneiden ROI:ta ja dokumentoimaan elinkaarisäästöjä (Rockwell Automation, 2023).

Automaatiojärjestelmän avulla prosesseissa ilmenevät virheet voidaan ohjata uudelleen siten, että tuotanto ei keskeydy. Etäohjaus mahdollistaa monien rinnakkaisten prosessien seuraamisen, ja järjestelmiä voidaan ohjata, tehostaa ja sulkea yksittäisiä koneita. Näin ollen yksittäisen ongelman tuottama mahdollinen alasajo voidaan välttää järjestelmien optimaalisella ohituksella.

Toisessa Rockwellin tutkimuksessa Green Pay Packaging:in tehdas arvioi automaatiojärjestelmän tuottamia tuotantokehityksiä. Tuotantolaitos, joka on rakennettu 70 vuotta sitten, on ajan saatossa modernisoitu vastaamaan markkinavaatimuksia. Kuitenkin vuosien varrella suoritettut parannukset ovat toimineet, mutta systeemi itsessään vanheni, osat alkoivat olemaan saavuttamattomissa ja tämä muodosti haasteita huoltotoimenpiteille. Kehitysprosessin yhteydessä tehtaalle asennettiin diagnostiikkajärjestelmä sekä yli 800 erilaista sensoria mittaamaan järjestelmien dataa ja prosessitehokkuutta. Datan perusteella tehdas pystyi ajoittamaan työn ennen kuin laitteisto vaatii huoltoa, säästäten yrityksestä aikaa ja rahaa alasajojen välttämisen seurauksena. Teknologioiden integrointi suurempiin tuotantokoneistoihin mahdollisti tuotantolaitoksen saavuttavan 100 prosenttia suuremman tuotannon aikaisempaan verrattuna (Rockwell Automation, 2021).



ABB Ability™ -järjestelmää tutkittiin laitevalmistajan toimesta italialaisessa kunnallisessa Consorzio di Bonifica Veronese (CBV) vedenpuhdistuslaitoksessa. Automaatiojärjestelmän integroinnin osaksi puhdistuslaitoksen toimintaa vähensi laitoksen operointikustannuksia 30 prosentilla ja huoltokustannuksia 40 prosentilla (ABB, 2017). ABB Ability™:n integrointi mahdollisti ennakoivan huollon ennen kriittisiä kuivakausia. Digitaalisen järjestelmän pilvipalveluun tallennettavan datan perusteella vedenpuhdistuslaitos sai reaaliaikaista tietoa ja historiallisia trendejä, joiden avulla laitos kehitti koko energiasysteemiensä tehokkuutta. CBV:n tuottamien tulosten perusteella ABB Ability™ -järjestelmän integrointi paransi prosessien ajotehokkuutta, mahdollistaen energiatehokkuustodistusten saamisen ilman ulkopuolista auditointia ja huomattavan käyttökustannusten laskemisen. (ABB, 2017)



Kuva 5: ABB Ability pelkistetty toimintakaavio (ABB, 2024)

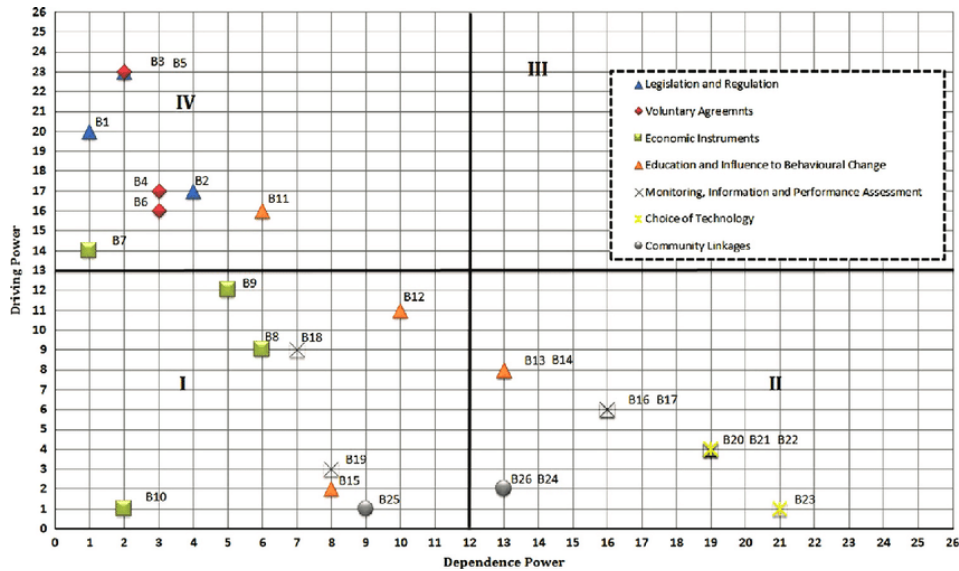
Automaatiojärjestelmät tuottavat Rockwellin havaintojen mukaan suurimman hyödyn valmistavassa teollisuudessa, jossa laitteista voidaan ajaa optimaalisesti ja oikea-aikaisesti, sekä varmistamaa tuotannon ajoaika ennakoivalla huollolla. Tuotannon ajoittaminen oikea-aikaisesti tarjoaa tuotantolaitoksille mahdollisuuden energiatehokkaampaan tuotantoon, minimoimalla tyhjäkäynnin ja energiantuotannon päällekkäisyyden ennakoinnin avulla. ABB Ability™: n (Kuva 6) luoma informaatioverkosto tuotantoprosessien tilanteesta sensorien avulla mahdollistaa prosessityöntekijöiden ja ulkopuolisen järjestelmäoperaattorin jatkuvan kommunikation.

Jatkuva datan kerääminen pilveen mahdollistaa yrityksille kattavan tilannekuvan prosessien kunnosta, mikä CBV-vedenpuhdistuslaitoksen tapauksessa mahdollisti ennakoivien huoltojen avulla ajoajan nostamisen ja prosessien ennakoinnin.

#### **4.5 Muita käytettyjä teknologioita maailmalla**

Maailmalla energiatehokkuuden optimointiin on otettu käyttöön useita erilaisia teknologioita energianhallintajärjestelmien tueksi (Pan et al. 2024). Metsä Fibre -case-tutkimuksessa käydään läpi esimerkiksi Digital Twin -teknologiaa. Intiassa metsäteollisuudessa on hyödynnetty koneavusteista matriisilaskentaa, ja useita tekoälyyn pohjautuvia järjestelmiä on kehitteillä jatkuvasti. Tuotantolaitoksissa pyritään jatkuvasti integroimaan uusia teknologioita aikaisemmin hyväiksi todettujen käytänteiden rinnalle. Metsäteollisuuden monimutkaisten tuotantoprosessien vuoksi yksittäisten järjestelmien hyödyntäminen on haastavaa useiden rinnakkaisten prosessien seurauksena.

Paperiteollisuus edustaa Intiassa merkittävää osaa maan taloudesta. Maa on globaalissa paperituotannossa viidenneksi suurin tuottaja, ja paperinkysynnän odotetaan kasvavan 6–7 prosenttia vuosittain. Kuudenneksi energiaintensiivisimpänä teollisuutena, jossa energiakustannukset ovat 15–30 prosenttia tuotantokustannuksista, Intiassa on otettu käyttöön ISM-MICMAC-analyysi maksimoidakseen energiatehokkuuden (Sonsale et al. 2023). MICMAC-analyysi sisältää kaavion kehittämisen, joka luokittelee tekijät käyttövoiman ja riippuvuusvoiman perusteella. MICMAC-analyysiä käytetään tekijöiden luokitteluun ja tulkitsevien rakennemallitekijöiden validointiin tutkimuksessa niiden tulosten ja johtopäätösten tekemiseksi. Sen avulla yritys kykenee prosessidatan perusteella määrittelemään, kuinka resurssit jakautuvat prosessissa, niiden riippuvuussuhteet sekä mistä voidaan säästää energioresursseja (Ahmad et al. 2019).

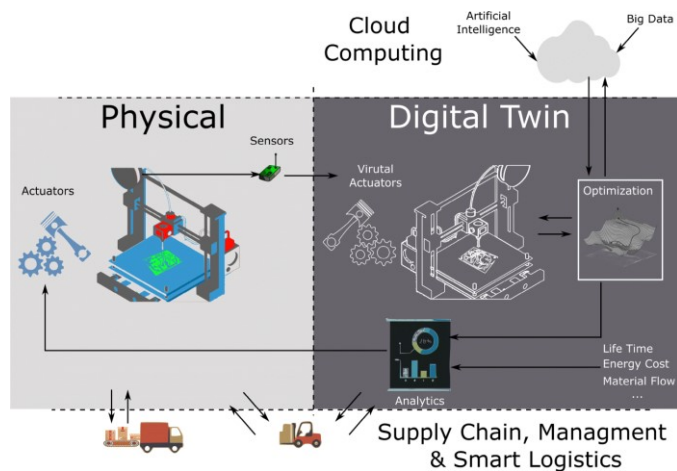


Kuva 6: MICMAC analyysi tuotantolaitoksesta (Tokai, 2015)

Metsä Fibre -case-tutkimuksen pohjalta toisena laajemmin hyödynnettyä teknologiaa on Digital Twin (DT) -teknologia. Digital Twin on digitaalinen esitys todellisesta kokonaisuudesta, kuten laitteesta, koneesta, prosessista tai monimutkaisesta järjestelmästä. Säännöllinen synkronointi DT:n ja sen fyysisen vastineen välillä tarjoaa paremman valvonnan ja suorituskyvyn, optimoidun huollon, lyhyemmän seisokkiajan ja yhdistettyjen tuotteiden verkoston. (Zeb ja Kortelainen, 2021)

DT-teknologia pohjautuu Industrial Internet of Things (IIoT) -järjestelmän yhteensovittamiseen, missä yhdistetään useat prosessimittarit, mukaan lukien koneet ja kontrollijärjestelmät, informaatiojärjestelmiin. Prosesseista saatavat suuret kerätään ja syötetään teollisuusjärjestelmästä rakennettuun digitaaliseen kaksoseen, joka yhdistää ja analysoi datan esimerkiksi tekoälyjärjestelmän avulla. Tämä tuottaa informaatiota systeemin prosessihistorian ja hetkellisen datan perusteella ja muodostaa ennusteita fyysisen vastinkappaleen eli oikean prosessin operaatioista. Tämän avulla oikean prosessin pienempien ongelmien muuttuminen suuremmiksi, kuten tuotantokatkoksiksi, järjestelmävirheiksi tai komponenttien rikkoutumiseksi, voidaan välttää, jolloin prosessille saadaan parempi ajon laatu ja prosessien käyttöikä voidaan pidentää. (Zeb ja Kortelainen, 2021)

Kuvassa seitsemän on esitelty MICMAC-analyysin perusrakenne ja sen komponentit. Kuvassa kahdeksan on luonnos Digital Twin -teknologian prosessikaaviosta, joka mallintamaan kerätyn datan reittejä pilvipalveluun sekä analyysien kautta fyysiseen prosessiin.



Kuva 7: Digital Twin mallinnos (Balderas, Ortiz ja Méndez, 2021)

## 5 Case-tutkielmat

Suomalaisessa metsäteollisuudessa monet tuotantolaitokset ovat vanhoja, vuosikymmenien ikäisiä tehtaita, joihin on vuosien varrella investoitu uusia teknologioita nykyajan vaatimusten täyttämiseksi. Case-tutkimusten avulla saadaan arvokasta tietoa siitä, miten teollisuusprosesseja on päivitetty tuotannon ylläpitämiseksi ja tuotannon seisonnan riskien minimoimiseksi.

Noin miljardin euron vuosittaisella liikevaihdolla toimivan tuotantolaitoksen seisakin aiheuttamat tuotantotappiot voivat nousta 100000–3000000 euron suuruisiksi päivässä. Yksittäisten laitteiden rikkoutuminen voi olla huomattavasti pienempi, mutta tuotannon keskeyttäminen korjauksen ajaksi kasvattaa kuluja merkittävästi. Stora Enso (2022) ilmoitti, että yrityksen vuotuiset energiakustannukset ovat 7 prosenttia liikevaihdosta, mikä tarkoittaa, että energiatehokkuuden parantaminen 10–30 prosentilla uudenlaisien teknologioiden avulla voisi johtaa merkittäviin kustannussäästöihin (Stora Enso, 2022). Seuraavissa kahdessa kappaleessa tarkastellaan, millaisia energiatehokkuuden optimointiratkaisuja kahden eri aikakauden ja lopputuotteen metsäteollisuuslaitokset Suomessa ovat ottaneet käyttöön.

## 5.1 UPM Plywood Pellos

Kandidaatintyössäni ensimmäinen case-tutkielma oli UPM Plywoodin havuvaneritehdas. Tehdas on vuonna 1963 perustetun Pellos Oy:n pohjalta kehittynyt Euroopan suurin havuvanerituottaja. Se on erinomainen esimerkki suomalaisesta metsäteollisuuslaitoksesta, sillä sitä on laajennettu useiden aikakausien aikana kohtaamaan kasvavaa kysyntää markkinoilla. Vaikka suuri osa suomalaisista metsäteollisuuden toimijoista on laajentunut vanhoista tehtaista nykypäivän kokoluokkiin, käytettävä teknologia ja ohjausjärjestelmät edustavat useiden eri aikakausien kehitystä. Tilannekuvan muodostamiseksi suomalaisesta metsäteollisuuden optimointiprosesseista on merkittävää tutkia vanhojen laitosten tuotannon optimointia pitkän kokemuksen pohjalta.

UPM Plywood Pelloksen energiakäyttöpäällikkö Sami Kuva kertoo 14. kesäkuuta 2024 pidetyssä haastattelussa, että Pelloksen energiakulutuksen optimoinnin perustuu kuorman tasaukseen sekä voimalaitoksen, että tuotantoprosessien väliseen kommunikaatioon prosessin tarpeista. Tehtaan voimalaitos tuottaa turbiinin avulla kolmanneksen tarvittavasta sähköenergiasta, joten suurin osa prosessien vaatimasta energiasta tulee ulkopuolisista lähteistä. Prosessien vaatima höyry tuotetaan leijupetikattilalla vanerituotantoprosesseista syntyvällä sivutuote puuhakkeella. Kuorman tasauksen avulla energiantuotantoa kyetään optimoimaan vastaamaan prosessien tarpeita, eikä erillisen tekoölyyn perustuvan ennustavan järjestelmän hankkiminen ole taloudellisesti kannattavaa. Sähköä tuottavan turbiinin sähköntuotanto on lineaarisesti riippuvainen prosessin kuormasta, minkä seurauksena laajemman EMS-järjestelmän lisääminen prosessiin ei ole kriittistä. (Kuva, 2024)

Vuosien aikana tehtyjen selvitysten perusteella tuotannonvaihtelun rajallisen säätelyn vuoksi tekoölyintegraatiolla toimivan EMS-järjestelmän tuottaman kustannussäästön takaisinmaksuajan on pitkä, mikä johtaa siihen, ettei EMS-järjestelmän hankintaa kannata akuutisti harkita. Voimalaitoksen tuotantoprosesseissa hyödynnetään kuormantasaukseen Valmet DNA:n EMS-järjestelmää, jonka tuottamaa dataa käytetään voimalaitosoperaattorien manuaalisten säätöjen ja automaattisten raja-arvojen määrittämiseen.

UPM Pelloksen tuotannossa syntyy energiahäviöitä puuviulujen kuivausprosessin aikana höyrykäyttöisissä kuivureissa. Energiahäviöt syntyvät, kun voimalaitos tuottaa vakio-kuormaa ja kuivurissa tapahtuu ulkopuolinen häiriö. Ulkopuolisilla häiriöillä tuotantoprosesseissa tarkoitetaan esimerkiksi laiterikkoa, minkä seurauksena kuivausprosessi joudutaan ajamaan äkisti alas, jolloin kuivuri ei toimi enää lämpönieluna tuotetulle höyrylle.

Häiriön seurauksena kuivurit joudutaan sulkemaan, mutta polttoprosessiin perustuva höyryntuotanto jatkaa höyryn tuottamista häiriötä edeltäneellä tasolla. Prosessiin ajettavat kuormat joudutaan ajamaan hautomoaltaisiin, kiertoveden lämmitykseen sekä muihin prosessien esilämmityksiin. Satunnaisissa tapauksissa kuorma voi laskea alle kattilan minimikuorman, jolloin osa voimalaitoksella tuotetusta höyrystä joudutaan ajamaan ulospuhalluksena ulkoilmaan. Ulospuhalluksessa prosessi menettää höyryn muodossa lämpöenergiaa sekä puhdistetun prosessiveden. (Kuva, 2024)

Energiatohokkuuden optimoinnin tarve syntyy kuorman optimoinnista ja ennakoinnista. Energiahäviöt prosessissa syntyvät, kun tuotettu höyry joudutaan siirtämään muuhun kuin kuivuriin. Veden höyrystäminen korkeaan lämpötilaan vaatii suuren määrän energiaa, jota kaikkea ei voida siirtää suoraan vaihtoehtoisin kohteisiin, kuten hautomoaltaan lämmittämiseen tai muiden kiertovesien esilämmittämiseen. Suurimpana tarpeena voimalaitoksen ja tuotannon välillä energiatohokkuuden parantamisessa on kuorman ennakoinnin tuoma jousto höyryntuotantoprosessiin. Minimoidakseen prosesseissa tapahtuvat kuormanvaihtelut, olisi merkityksellistä voida ennakoida kuormanvaihtelua erilaisilla sensoreilla.

## 5.2 Metsä Board Äänekoski

Työn toisena case-tutkielmana toimi vuonna 2015 rakennettu Äänekosken Metsä Fibre Biotuotetehdas. Tehdas edustaa suomalaisen metsäteollisuuden uutta sukupolvea sekä kehittyviä biotuotetuotantoprosesseja. Case-tutkielmana tehdas on erinomainen tutkimuskohde, sillä se on rakennettu vastaamaan nykypäivän prosesseja, joissa suunnittelutyössä on otettu huomioon laatutekijät. Tehtaan infrastruktuuriin on investoitu suuria summia optimoidun tuotannon mahdollistamiseksi erilaisten tuotannonohjausvälineiden avulla, minkä seurauksena tehtaan selluntuotanto on tasaista sekä laadullisesti että määrällisesti.

Metsä Fibre Äänekosken tuotantoinsinööri Hannu Loiri kertoo 26. kesäkuuta 2024 pidetyssä haastattelussa, että tehtaan prosesseissa on otettu vahvasti huomioon automaation merkitys tuotannon laadulliseen, määrälliseen ja kustannustehokkuuteen. Tuotannossa uuden sukupolven älyratkaisuista Digital Twin ja yläratkaisut, kuten Valmet DNA, ovat keskeisessä asemassa tuotannon optimoinnissa. Niiden avulla prosessien parametrejä voidaan säätää prosessin toiminnan ylläpitämiseksi operaattorin valvonnassa. Sensorien merkitys jatkuvassa informaatiovirrassa on suuri, minkä vuoksi datan käsittelyä on suoritettava jatkuvasti tuotannon optimoidun käynnin ylläpitämiseksi (Loiri, 2024).

Tehtaalla älykkäiden sensorien verkosto mittaa prosesseissa käytettyjen laitteiden, esimerkiksi rullien parametrejä, kuten värähtelyä ja ominaisarvoja. Datan perusteella tutkitaan laitteiston kuntoa ja mahdollisia huoltotarpeita. Älysensoreiden avulla laitteistojen huollon ajoitus voidaan optimoida siten, että prosessin ajoajan keskeytys on mahdollisimman pieni, tai prosessi voidaan keskeyttää ennakoivasti. Älykkäiden sensorien mahdollistama ennakoiva huolto ja optimoitu prosessiajo luovat tuotantoprosesseihin optimaalisen ajoajan. (Loiri, 2024)

Äänekosken tuotantoprosesseista on rakennettu digitaalinen kaksosen, jonka avulla tuotantoprosessien parametrejä voidaan jatkuvasti optimoida laskennallisten kokeiluiden avulla. Rakennetun digitaalisen kaksosen pohjalta prosessioperaattori saa DT:lle annettujen mitattujen parametrien pohjalta lasketut arvot, jotka operaattori syöttää tarkastamisen jälkeen laitteistolle. Loirin (2024) mukaan digitaalisen kaksosen avulla prosessien laadullinen ja määrällinen tehokkuus on onnistuttu kasvattamaan merkittävästi. Ihmisen ohjauksessa prosessien ohjausarvot syntyvät huomattavasti pienemmän ennakoinnin ja laskennan perusteella, minkä seurauksena digitaalisen kaksosen tekemät laskelmat tarjoavat mahdollisuuden käyttää prosesseille optimaalisia arvoja ilman inhimillisiä virheitä ja oletuksia. (Loiri, 2024)

Loirin (2024) mukaan älyratkaisujen käyttöönotto ei ole ollut täysin ongelmaton. Laskennallisten ohjelmistojen data perustuu täysin syötettyihin mitattuihin parametreihin, mikä tekee sensoreiden ja mittareiden toimintavarmuudesta elintärkeää luotettavalle laskentatulokselle. Aikaisemmin Digital Twin on antanut heitteleviä arvoja, jotka ovat johtuneet antureiden hetkellisistä vioista. Tämän seurauksena Äänekoskella älyratkaisut toimivat nykyään ihmisten apujärjestelminä eikä itse operoinnissa. Tavoitteena tehtaalla on siirtyminen yhä enemmän kohti automatisoidumpaa tuotantoa kehittyvien teknologioiden avulla (Loiri, 2024).

## 6 Johtopäätökset

Empiiristen tutkimustulosten ja yritysten tekemien selvitysten pohjalta voidaan todeta, että Teollisuus 4.0 -sukupolven tekoäly-, koneoppimis-, automaatio- ja energianhallinta-järjestelmät tuovat merkittäviä suoria ja oheishyötyjä teollisuuden tuotantoprosesseihin. Näitä teknologioita sovelletaan laajasti eri teollisuudenaloilla, ja ne ovat osoittautuneet tehokkaiksi työkaluiksi energiatehokkuuden parantamisessa. Esimerkkeinä tästä Metsä Fibre Äänekoski ja SCA Munksundin kaltaiset tuotantolaitokset ovat hyödyntäneet näitä ratkaisuja prosesseissaan, mikä osoittaa teknologian tehokkuuden käytännössä.

Energiatehokkuuden optimointi älyratkaisuilla teollisessa ympäristössä on monipuolinen ja jatkuvasti kehittyvä alue. Erilaisten älyteknologioiden hyödyntäminen on mahdollistanut merkittäviä energiansäästöjä ja prosessien tehokkuuden parantamista. Teollisuuden käyttöönottamat teknologiat eivät ole pelkästään kehittäneet yritysten energiatehokkuutta, vaan myös edistäneet prosessikohtaisia tehokkuusmittareita. Prosesseista saatujen datojen sekä niiden käsittelyn avulla yritykset voivat löytää lukuisia uudenlaisia suoria ja oheishyötyjä tuotannostaan (Tan et al. 2017).

Teknologioiden käyttöönotto vaatii investointeja, mutta säästöt energiakustannuksissa ja parantunut tehokkuus tekevät niistä houkuttelevia pitkällä aikavälillä. Globaalisti monet teollisuusyritykset ovat jo hyödyntäneet näitä ratkaisuja ja saavuttaneet huomattavia tuloksia. Taloudellisesta näkökulmasta energiatehokkuuden kehittäminen erilaisilla järjestelmillä, oheishyödyt mukaan lukien, tarjoaa merkittävänä potentiaalina yrityksen näkökulmasta, sillä energiahankinnat ovat keskimäärin 5–15 prosenttia yritysten vuosittaisesta liikevaihdosta.

Tekoälyn ja koneoppimisen rooli ennusteiden tekemisessä ja tuotannon ajoittamisessa kasvaa jatkuvasti. Vaikka tekoälyn päätöksentekoa valvotaan tänä päivänä ihmisten toimesta, teknologian kehittyminen ja datan parempi käsittely vähentävät ennakkoluuloja automatisoidun tuotannon suhteen. Tulevien vuosien aikana tekoälyn laskentateho ja virheettömyys päätöksenteossa kasvavat jatkuvasti kehittyvän datan myötä, minkä seurauksena teknologiat avaavat mahdollisuuksia prosessien laaja-alaiselle automaatiolle.

Digital Twin -järjestelmät, joissa yhdistyvät tekoäly ja laskennallinen optimointi, tarjoavat merkittävää hyötyä tuotantoprosessien ja prosessinohjauksen hallintaan. Digital Twin -järjestelmien avulla tuotantolaitokset voivat koeajaa tuotantoparametreja virtuaalisesti ennen niiden syöttämistä fyysiselle koneistolle, mikä mahdollistaa jatkuvan



prosessein optimoinnin ja paremman resurssien hallinnan. Esimerkiksi Metsä Fibre Ääneskoski on hyödyntänyt Digital Twin -teknologiaa parantaakseen energiatehokkuuttaan sekä tuotannon laatua ja määrää. DT mahdollistaa tuotantolaitoksille entistä tarkemman ohjauksen ja optimoinnin riippumatta lähtöarvoista.

Tämä kandidaattityö tarjoaa pohjan syvemmälle tutkimukselle, jonka pyrkimyksenä on kartoittaa Teollisuus 4.0 -älyteknologioiden vaikutuksia yksilöllisille teollisuussektoreille. Älyteknologioiden mahdollistamat energiatehokkuusparannukset ovat hyvin prosessikohtaisia, mutta yleisesti ne tarjoavat merkittäviä kehittymismahdollisuuksia yritysten tuotantoprosesseille. Uutta tutkimusta tarvitaan jatkuvasti nopeasti kehittyvän alan, tuloksista kertyvän datan kasvamisen ja teknologisten läpimurtojen vuoksi. Teollisuus 4.0 -teknologiat tulevat jatkuvan kehityksen ja tutkimuksen myötä ottamaan yhä suuremman aseman teollisuusyritysten tuotannonohjauksessa, minkä seurauksena aiheen tutkimus on hyvin merkittävässä asemassa (Loiri, 2024).

## **6.1 Voimassaolo ja luotettavuus**

### *6.1.1 Tutkimuksen rajoitteet*

Työn aihe haluttiin pitää yleismaailmallisena katsauksena markkinoilla oleviin teknologioihin ja niiden mahdollistamiin kehitystuloksiin, eikä syventyä yksittäisiin teknologioihin sen syvällisemmin. Näistä aiheista rakennettiin yleiskuva, jota lukijan on helppo lähestyä. Lisätutkimusta teknologioista voitaisiin tehdä, mikäli yritykset antaisivat mittausdatansa avoimeen käyttöön. Erilaisiin energianhallintajärjestelmiin syventyminen voisi tarjota tarkempaa tietoa eri laitevalmistajien markkinavaihtoehdoista, jolloin niiden eroavaisuudet tuotannon optimoinnissa voitaisiin kartoittaa tarkemmin ja laatia parempia suosituksia.

### *6.1.2 Case-tutkielman luotettavuusanalyysi*

Case-tutkielmien kohdalla tuloksia kyettiin saamaan vain kahdesta suomalaisesta metsäteollisuusyrityksestä, minkä seurauksena hyvin kattavaa asiantuntijahaastattelua ei saatu kerättyä. Työn tarkoituksena oli erityisesti kartoittaa kahden eri aikakauden tuotantolaitoksen eroavaisuuksia, eikä rakentaa globaalia kuvaa. Kansainvälistä tutkimusta on käsitelty laitevalmistajien raporteihin pohjautuvissa case-tutkielmissa yksittäisten teknologioiden kohdalla.

Äänekosken tehdas on tehnyt tutkimuksia ja laskelmia vertaamalla nykyhetkeä älyratkaisuiden implementoinnin jälkeen tehtaan käynnistämishetken arvoihin. Näiden pohjalta voimme lueteltavasti sanoa, että tulokset ovat konkreettisia ja todenmukaisia haastattelutulosten rinnalle.

Työssä on pääasiassa käytetty haastattelutuloksia, eikä älyratkaisujen tuottamista hyödyistä ollut tarjolla yrityksen ulkoiseen käyttöön dataa. Tieteellisen materiaalin vähäisyyden vuoksi aineiston luotettavuuden arviointi on hankalaa, mutta yrityksen raportoimat kehitykset voidaan pitää todisteena järjestelmien toimivuudesta. Haastattelussa saatujen tietojen lähde perustuu käyttöinsinöörin kertomiin kehityksiin teollisuuslaitoksella sekä yrityksen tekemien mittauksen antamaan dataan perustuvien analyysien tuloksiin. Inhimilliset tulkitsemisvirheet ja esimerkiksi prosessien kehityksen aikana tehtyjen prosessirakenteellisten muutosten vaikutus ovat mahdollisesti vaikuttanut mittausdatan antamiin tuloksiin. Kokonaisuudessaan haastatteluiden perusteella voidaan kuitenkin luoda yleiskuva siitä, että älyjärjestelmät ovat tuottaneet huomattavaa kehitystä, vaikka tarkat prosentuaaliset kehitykset ovat yrityksen salaista tietoa.

### *6.1.3 Kirjallisuuden luotettavuusanalyysi*

Työssä käytettyjen kirjallisuuslähteiden sekä laitevalmistamien tutkimusraporttien luotettavuutta on tärkeää arvioida kriittisesti, sillä älyratkaisujen kehitys tapahtuu jatkuvasti kiihtyvällä nopeudella. Kirjallisuuskatsauksissa on onnistuttu löytämään tuoreita tutkimuksia uusista teknologioista, mutta konkreettisten numeraalisten tutkimustulosten määrä on ollut rajallinen.

Laitevalmistajien ja teollisuusyritysten yhteistyössä tuottamien raporttien luotettavuus on otettava kriittisesti huomioon, sillä tulokset julkaisevalla laitevalmistajalla voi olla kaupallisia intressejä kertoa tuloksista myönteisessä valossa. Saatavien tulosten osalta onnistumiset ovat hyvin todennäköisesti todellisia, mutta epäonnistuneiden kokeiden tulokset saattavat jäädä vähemmälle raportoinnille.

Älyratkaisut ja tekoälytutkimus kehittyvät jatkuvasti, ja niiden raportointi kasvaa vuosi vuodelta. Kandidaatityössä käytettyjen lähteiden julkaisuajat on pyritty saamaan mahdollisimman ajankohtaiseksi, minkä seurauksena tutkimuksesta saadut tulokset voidaan pitää lähes ajantasaisena tietona. Energiatehokkuus ei itsessään ole metsäteollisuudessa uusi asia, minkä vuoksi teoriaosion ja yleismaailmallisten asioiden tieteellinen pohja on pyritty kattamaan useiden vuosien tutkimusmateriaalin perusteella.

## 7 Suositukset

Tässä osiossa tarkastellaan tutkielman pohjalta muodostuneita suosituksia, joita teollisuusyritykset voivat hyödyntää energiatehokkuuden tehostamiseksi ja kilpailukyvyn parantamiseksi. Lisäksi käsitellään kandidaattityön rajoitteita ja annetaan ehdotuksia tulevaisuuden tutkimukselle samankaltaisista aiheista.

Älyratkaisut tarjoavat laajoja mahdollisuuksia teollisuuden prosessien energiatehokkuuden parantamiseen. Näiden teknologioiden käyttöönotto voi auttaa yrityksiä vähentämään energiankulutustaan, pienentämään kustannuksiaan ja vähentämään ympäristövaikutuksiaan. Sähköistymisen edistäminen ja uusien teknologioiden integrointi teollisiin prosesseihin ovat keskeisiä askeleita kohti kestäväää ja energiatehokasta tulevaisuutta. On tärkeää, että yritykset tunnistavat prosessinsa kriittiset osa-alueet ja kohdistavat investoinnit näihin alueisiin säästöjen ja parannusten maksimoimiseksi.

Tekoälyn ja koneoppimisen tulevaisuuden potentiaali on hyvin merkittävä. Näiden teknologioiden avulla kerätyn datan prosessoinnista saadut ennusteet ja mallinnukset tarjoavat yrityksille laajan käsityksen tuotantoprosessien kunnosta ja parannusmahdollisuuksista. Älyratkaisut voivat käsitellä prosessikohtaisia tietoja huomattavasti tehokkaammin kuin fyysinen ihminen, mikä parantaa tehtaan kustannus- ja energiatehokkuutta merkittävästi.

Uusien teknologioiden implementointi osaksi tuotantoa on yrityksille merkittävä investointi tuotantoprosessien kompleksisuuden ja yksilöllisten ominaisuuksien vuoksi. Ideaalitulanteessa älyratkaisuilla katettaisiin lähes jokainen prosessikomponentti, mikä mahdollistaisi maksimaalisen datankeräyshyödyn tuotannossa. Case-tutkimusten perusteella suurimpia tuotantoteknisiä kehitysaskleita on saavutettu implementoimalla älyratkaisuja kuten IIoT, osaksi koneistojen kunnonvalvontaa. Tällä tavoin älynsensoreiden avulla yritysten ajoajat ovat olleet huomattavasti korkeampia, mikä luo merkittävää taloudellista hyötyä. Energianhallintaohjelmistojen tuomat tehokkuusparannukset sekä mahdolliset taloudelliset potentiaalit energian ulosmyynnille antavat tuotantolaitoksille merkittävää joustomahdollisuutta ja resurssien ideaalista ohjausta.

Erityisesti Suomessa, missä tuotantokustannukset ovat kansainvälisesti korkealla tasolla, tuotantoprosessien optimointitarve on merkittävässä asemassa. Suomalaisen sähkömarkkinan korkea uusiutuvien sähkötuotantomuotojen, kuten tuuli- ja aurinkoenergian vuoksi, hintavaihtelun muodostama tuotannon ajoittamisen potentiaali

on kannattavaa ottaa huomioon tuotantoprosesseissa. Mikäli tuotantolaitos ei kata kaikkea energiatarvettaan omilla voimalaitoksillaan, on energianhallintaohjelmistojen ja älyratkaisuiden mahdollistama tuotannon ajoittaminen merkittävässä asemassa tuotantokustannusten minimoimisessa.

Älyratkaisut tarjoavat yrityksille mahdollisuuden kilpailla kustannustehokkaasti tulevaisuuden kiristyvillä maailmanmarkkinoilla, ja Teollisuus 4.0 -teknologioiden merkitys tuotannossa tulee kasvamaan entisestään tulevina vuosikymmenin. Yritysten tulee tarkastella omia tuotantoprosessejaan ja arvioida, miten Teollisuus 4.0 -teknologiat voivat auttaa parantamaan kustannustehokkuutta ja energiatehokkuutta prosesseissa pitkällä aikavälillä.

Rajoitteena tälle tutkimukselle on se, että työ perustui pääasiassa olemassa oleviin laitevalmistajien tutkimusraportteihin ja yksittäisiin case-tutkimuksiin, joten universaalimmat johtopäätökset voivat vaatia lisätutkimuksia. Tulevissa tutkimuksissa voitaisiin syventyä tarkemmin eri teollisuustoimialojen erityispiirteisiin ja siihen, miten älyratkaisut voidaan muokata vastamaan tuotantoprosessien tarpeita.

## Lähteet

ABB 2017. ABB reduces operational costs of Italian water company with energy management solution by 30 percent. Saatavilla: <https://new.abb.com/news/detail/1580/abb-reduces-operational-costs-of-italian-water-company-with-energy-management-solution-by-30-percent> Viitattu: 5.7.2024.

ABB 2024, Energy management for UPM-Kymmene paper manufacturer, ABB. Saatavilla: <https://new.abb.com/industrial-software/industry-software-best-practices/pulp-and-paper-old/energy-management-for-upm-kymmene-paper-manufacturer>. Viitattu: 26.7.2024

Arana-Landín, G., Uriarte-Gallastegi, N., Landeta-Manzano, B. & Laskurain-Iturbe, I., 2023a. 'Energy Efficiency Measures in Industrial Processes: A Case Study in the Automotive Industry', *Energies*, vol. 16, no. 5, art. 2124. Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/en16052124> Viitattu: 16.6.2024.

Arana-Landín, G., Uriarte-Gallastegi, N., Landeta-Manzano, B. & Laskurain-Iturbe, I., 2023b. 'The Contribution of Lean Management—Industry 4.0 Technologies to Improving Energy Efficiency', *Energies*, vol. 16, no. 5, art. 2124. Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/en16052124> Viitattu: 26.6.2024.

Balderas, D., Ortiz, A., Méndez, E. et al., 2021. 'Empowering Digital Twin for Industry 4.0 using metaheuristic optimization algorithms: case study PCB drilling optimization', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 113, pp. 1295–1306. Saatavilla: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06649-8>.

Gupta, V.P., 2021. 'Smart Sensors and Industrial IoT (IIoT): A Driver of the Growth of Industry 4.0', in Gupta, D., Hugo, C.C., Albuquerque, V., Khanna, A. & Mehta, P.L. (eds.), *Smart Sensors for Industrial Internet of Things, Internet of Things*, Springer, Cham. Saatavilla: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-52624-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-52624-5_3) Viitattu: 16.7.2024.

Junttila, J. and Parkkinen, M.-L., 2008. Networking. ABB Review, Special Report, November, pp. 73-76.

Kuva, S., 2024. UPM Plywood Pellos henkilökohtainen haastattelu 11.6.2024.

Loiri, H., 2024. Metsä Fibre Äänekoski henkilökohtainen haastattelu 26.6.2024.

Martin, N., Worrell, E., Schipper, L. & Blok, K., 1994. International comparisons of energy efficiency, workshop proc. Berkeley: CA, Utrecht University.

Monteiro, N.J., Silva de Oliveira, R.M.E., Gouvea da Costa, S.E., Deschamps, F. & de Lima, E.P., 2023. 'Systematic literature review about energy and Industry 4.0: A

manufacturing perspective', Springer, pp. 187-196. Saatavilla: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-36121-0\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-031-36121-0_23).

Narciso, D.A.C. & Martins, F.G., 2020. 'Application of machine learning tools for energy efficiency in industry: A review', Energy Reports, vol. 6, pp. 1181-1199. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.04.035> Viitattu: 16.6.2024.

Rockwell Automation, 2023, Remote monitoring and support help paper mill achieve 91 percent availability, Rockwell Automation. Saatavilla: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/company/news/case-studies/remote-monitoring-and-support-help-paper-mill-achieve-91-percent.html>. Viitattu 10.7.2024.

Rockwell Automation 2021, Green Bay Packaging: A sustainable, world-class paper mill, Rockwell Automation. Saatavilla: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/company/news/case-studies/green-bay-packaging-sustainable-paper-mill.html>. Viitattu 16.8.2024.

Schoeneberger, C.A., McMillan, C.A., Kurup, P., Akar, S., Margolis, R. & Masanet, E., 2020. 'Solar for industrial process heat: A review of technologies, analysis approaches, and potential applications in the United States', Energy, vol. 206, art. 118083. ISSN 0360-5442. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118083> Viitattu 8.7.2024.

Sonsale, A.N., Yashpal, Pohekar, S.D. & Purohit, J.K., 2023. 'Drivers to energy efficiency measures in recycled paper and pulp industry in India: An interpretive structural modelling-based framework', Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 55, art. 102961. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102961> Viitattu: 9.7.2024.

Stora Enso, 2022. Osavuositiedot 2022. Saatavilla: <https://www.storaenso.com/fi-fi/newsroom/regulatory-and-investor-releases/2024/2/stora-enson-vuoden-2023-vuosikertomus-julkaistu> Viitattu: 8.8.2024.

Valmet, 2023. Valmet DNA Energy Management. [tuote-esite] Saatavilla: <https://www.valmet.com/automation/energy/applications/energy-management/> Viitattu: 16.6.2024

Zeb, A. & Kortelainen, J., 2021. 'Industrial IoT solutions for digital twins: An overview', VTT Research Report, no. VTT-R-00782-21. VTT Technical Research Centre of Finland. Saatavilla: <https://cris.vtt.fi/en/publications/industrial-iot-solutions-for-digital-twins-an-overview>.