TEOLLISTEN KUUMENNUSUUNIEN ENERGIANKULUTUKSEN MITTAROINTI METALLIEN KUUMENNUSPROSESSEISSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

EnTeDI

2026

Heli Hänninen

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen

Dosentti Jussi Saari

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Energiatekniikka

Heli Hänninen

Teollisten kuumennusuunien energiankulutuksen mittarointi metallien kuumennusprosesseissa

Energiatekniikan diplomityö

2026

54 sivua ja 10 kuvaa

Tarkastaja: Professori Esa Vakkilainen ja Dosentti Jussi Saari

Avainsanat: Energianhallinta, energiatehokkuus, energiankulutuksen mittaaminen, metalliteollisuus

Tämä diplomityö käsittelee teollisten kuumennus- ja lämpökäsittelyuunien energiankulutuksen mittarointia metalliteollisuudessa. Työ toteutettiin Componentan Jyväskylän Takomolla, jossa sähköuunien energiankulutuksesta ei ollut käytettävissä uunikohtaista mittaustietoa. Työn tavoitteena oli ottaa käyttöön uunikohtainen energiankulutuksen mittausjärjestelmä ja arvioida mittaustiedon hyödyntämistä energiankäytön hallinnassa.

Työssä otettiin käyttöön ABB InSite Pro M -mittarointijärjestelmä ja analysoitiin energiankulutusdataa suhteessa tuotantomääriin. Tulosten perusteella sähköuunit muodostivat merkittävän osan toimipaikan sähkönkulutuksesta. Energiankulutus jakautui epätasaisesti eri uunien välillä, ja suurin osa kulutuksesta kohdistui tuotannossa eniten käytettyihin uuneihin. Lisäksi havaittiin, että tuotantomäärän kasvaessa ominaiskulutus pieneni ja tuotantomäärän laskiessa se kasvoi.

Työn keskeinen tulos oli uunikohtaisen energiankulutuksen seurannan käyttöönotto. Mittarointi tuottaa tietoa energiankulutuksen jakautumisesta, ominaiskulutuksesta ja tuotantomäärien vaikutuksesta energiankäyttöön. Tämä tieto tukee energiatehokkuuden kehittämistä ja energiankäytön seurantaa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Heli Hänninen

Energy Consumption Measurement of Industrial Heating Furnaces in Metal Heating Processes

Master's thesis

2026

54 pages and 10 figures

Examiners: Professor Esa Vakkilainen and Docent Jussi Saari

Keywords: Energy Management, Energy Efficiency, Energy Consumption Measurement, Metal Industry

This master's thesis examines the measurement of energy consumption in industrial heating and heat treatment furnaces in the metal industry. The study was carried out at Componenta Jyväskylä Forge, where no furnace-specific energy consumption data was available for the electric furnaces. The objective was to implement a furnace-specific energy measurement system and evaluate the utilization of measurement data in energy management.

An ABB InSite Pro M measurement system was implemented, and the collected energy consumption data was analyzed in relation to production volumes. The results showed that electric furnaces accounted for a significant share of the site's electricity consumption. Energy consumption was unevenly distributed between the furnaces, with the highest consumption recorded in the most heavily utilized furnaces. In addition, specific energy consumption decreased as production volumes increased and increased as production volumes decreased.

The main outcome of the study was the implementation of furnace-specific energy consumption monitoring. The measurement system provides information on the distribution of energy consumption, specific energy consumption and the relationship between production volume and energy use. This information supports energy efficiency improvement and energy consumption monitoring.

LYHENNELUETTELO

BAT	Paras käyttökelpoinen tekniikka (Best Available Techniques)
FTP	Tiedonsiirtoprotokolla (File Transfer Protocol)
IEA	Kansainvälinen energiajärjestö (International Energy Agency)
KPI	Suorituskykymittari (Key Performance Indicator)
NDT	Rikkomaton aineenkoetus (Non-Destructive Testing)
RTU	Etäpääteyksikkö (Remote Terminal Unit)
SCU100	ABB I Site Pro M järjestelmän ohjainyksikkö (Sub-distribution Control Unit 100)
SEC	Ominaiskulutus (Specific Energy Consumption)
SMTP	Sähköpostin siirtoprotokolla (Simple Mail Transfer Protocol)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

Ilmoitukset

1 Johdanto ... 9
2 Vastuullisuustavoitteet ja energiankulutuksen hallinta ... 11
3 Metalliteollisuuden energiankäyttö ... 13
3.1 Metalliteollisuus osana teollisuuden energiankulutusta ... 13
3.2 Metalliteollisuuden tuotantoprosessit ... 14
4 Metalliteollisuuden kuumennustarpeet ... 17
4.1 Sähköuunit metalliteollisuudessa ... 18
4.2 Energiankulutus metallien kuumennusprosesseissa ... 19
4.3 Ominaiskulutus metallien kuumennusprosesseissa ... 20
4.4 Kulutuksen keskeiset tekijät ... 21
4.5 Energiatehokkuuden parantamiskeinot ... 22
4.6 Kustannus- ja ympäristövaikutukset ... 24
5 Energiankulutuksen mittaaminen ... 26
5.1 Mittauksen rooli energianhallinnassa ... 26
5.2 Mittausmenetelmät ... 27
5.3 Sähkömarkkinat ja kulutuksen ennustaminen metalliteollisuudessa ... 28
6 Case Takomo ... 31
6.1 Yrityskuvaus, yleinen ongelma ja työn kohde ... 32
6.2 Nykytila ... 33
6.3 Mittarointijärjestelmä ... 34
6.4 Datan siirtäminen ... 36
6.5 Työn tavoitteet ja tutkimusongelma ... 37
6.6 Tutkimusmenetelmät ... 38
6.7 Tulosten pääkohdat ... 39
7 Tulosten läpikäyminen ... 40

7.1 Sähköuunien osuus toimipaikan sähkönkulutuksesta 40
7.2 Energiankulutuksen jakautuminen uuneittain 41
7.3 Tuotantomäärän vaikutus energiankulutukseen 42
7.4 Uuni 6:n tarkastelu 44
8 Yhteenveto ja johtopäätökset 47
8.1 Keskeiset johtopäätökset 47
8.2 Työn rajoitteet 49
8.3 Jatkotutkimusaiheet 50
Lähteet 52

Kuvaluettelo

Kuva 1 Componenta (Componenta 2023b) 31

Kuva 2 SCU100-ohjainyksikkö 34

Kuva 3 Modbus RTU adapteri liitettynä ohjainyksikköön (ABB n.d.) 35

Kuva 4 ABB Energiamittari lähde Quick guide 35

Kuva 5 Sähköuunien osuus kokonaissähkönkulutuksesta suhteessa tuotantomäärään 41

Kuva 6 Uunikohtainen kokonaiskulutus 11.1.-.9.7.2026 42

Kuva 7 Tuotantomäärä ja ominaiskulutus 43

Kuva 8 Sähköuunien kulutus ja ominaiskulutus 44

Kuva 9 Uuni 6: Tuotantomäärä ja ominaiskulutus 45

Kuva 10 Uuni 6: Sähkönkulutus ja ominaiskulutus 46

ILMOITUKSET

Turnitin

Tämän opinnäytetyön alkuperäisyys on tarkistettu Turnitin – samankaltaisuuden tarkastuspalvelun avulla.

Tekoäly

Tämän opinnäytetyön kirjoittaja Heli Hänninen on käyttänyt seuraavia tekoälytyökaluja opinnäytetyön tekemisessä:

1. Microsoft Copilot
    a. Työkalun käytön tarkoitus: Soveltuvien lähteiden etsiminen ja englanninkielisten lähdeaineistojen kääntäminen ja tiivistäminen.
    b. Selvitys työkalun käytöstä: Tekoäly on toiminut apuvälineenä tiedonhakuprosessissa.

Vastuu

Kirjoittaja, Heli Hänninen, ottaa täyden vastuun tämän opinnäytetyön sisällöstä ja on tarkistanut ja muokannut mahdollisen tekoälytyökalujen käytön myötä syntyneen sisällön.

1 Johdanto

Metalliteollisuudessa kuumennus- ja lämpökäsittelyprosessit kuluttavat huomattavia määriä energiaa. Erityisesti taonta ja lämpökäsittely perustuvat korkeisiin lämpötiloihin, joiden saavuttaminen ja ylläpitäminen edellyttävät jatkuvaa energian käyttöä. Energian hinnan vaihtelu, energiatehokkuusvaatimukset sekä ympäristövaikutusten vähentämiseen liittyvät tavoitteet ovat lisänneet yritysten kiinnostusta energiankulutuksen tarkempaan seurantaan. Pelkkä kokonaiskulutuksen tunteminen ei kuitenkaan kerro, missä energiaa käytetään tai mistä kulutus muodostuu. Energiankäytön kehittäminen edellyttää tietoa yksittäisten prosessien ja laitteiden kulutuksesta.

Metalliteollisuudessa kuumennus- ja lämpökäsittelyuunit ovat tyypillisesti tuotannon suurimpia energian kuluttajia. Energiankulutukseen vaikuttavat muun muassa käyttöaste, kuormitus, kuumennusajat, lämpötilatasot sekä tuotannon järjestelyt. Vaikka energiankulutusta seurataan yleisesti toimipaikan kokonaiskulutuksen tasolla, jää yksittäisten prosessien vaikutus helposti piiloon. Ilman tarkkaa mittaustietoa on vaikea arvioida, mitkä laitteet kuluttavat eniten energiaa, miten kulutus muuttuu tuotannon mukaan tai mihin energiatehokkuustoimenpiteet kannattaisi kohdistaa.

Tämä diplomityö tehtiin osana Componentan Jyväskylän Takomon energianhallinnan kehittämistä. Takomolla käytetään useita sähköllä toimivia kuumennus- ja lämpökäsittelyuuneja, joiden energiankulutuksesta ei ennen työn aloittamista ollut käytettävissä uunikohtaista mittaustietoa. Energiankulutusta voitiin tarkastella ainoastaan toimipaikan tasolla, minkä vuoksi yksittäisten uunien energiankäyttöä tai niiden osuutta kokonaiskulutuksesta ei voitu luotettavasti arvioida. Tämä rajoitti mahdollisuuksia tunnistaa suurimpia kulutuskohteita sekä seurata energiankäytön muutoksia tuotannon eri tilanteissa.

Työssä toteutettiin sähköuunien energiankulutuksen mittarointi ABB InSite Pro M -järjestelmällä ja tarkasteltiin mittausdatan hyödyntämismahdollisuuksia energiankäytön hallinnassa. Mittaroinnin käyttöönoton jälkeen energiankulutusta voitiin seurata ensimmäistä kertaa uunikohtaisesti. Mittausdatan avulla selvitettiin energiankulutuksen jakautumista eri uunien välillä, sähköuunien osuutta toimipaikan sähkönkulutuksesta sekä energiankulutuksen

ja tuotantomäärien välistä yhteyttä. Lisäksi arvioitiin, millaista tietoa mittarointi tuottaa energiankäytön seurannan, raportoinnin ja päätöksenteon tueksi.

Työn tutkimusongelma on: Miten uunikohtainen energiankulutuksen mittaus tukee metalliteollisuuden energiankäytön hallintaa?

Tutkimusongelmaa tarkastellaan seuraavien alakysymysten avulla:

1. Miten energiankulutus jakautuu kuumennus- ja lämpökäsittelyuunien välillä?
2. Miten uunikohtaista energiankulutusta voidaan tarkastella suhteessa tuotantomääriin?
3. Mitä hyötyä uunikohtaisen energiankulutuksen mittaus tuottaa energiankäytön seurannassa ja analysoinnissa?

Työ rajataan koskemaan sähköllä toimivia kuumennus- ja lämpökäsittelyuuneja. Kaasu-uunin energiankulutusta ei tarkastella tässä tutkimuksessa, eikä tavoitteena ole muodostaa yksittäisten tuotteiden tarkkoja energiankulutusmalleja. Tarkastelun painopiste on mittarointijärjestelmän käyttöönotossa, mittausdatan käsittelyssä sekä energiankulutuksen analysoinnissa.

Työn aluksi käsitellään energianhallintaa, metalliteollisuuden energiankäyttöä sekä kuumennusprosessien energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä. Tämän jälkeen tarkastellaan energiankulutuksen mittaamista ja mittaustiedon hyödyntämistä. Käytännön osuudessa kuvataan mittarointijärjestelmän käyttöönotto, aineisto ja tutkimusmenetelmät. Lopuksi esitellään mittausten tulokset sekä niiden perusteella tehdyt johtopäätökset.

2 Vastuullisuustavoitteet ja energiankulutuksen hallinta

Teollisuuden energiankulutuksen hallinta kytkeytyy yhä tiiviimmin globaaleihin vastuullisuustavoitteisiin, sillä energiatehokkuus on yksi keskeisistä keinoista vähentää päästöjä ja hillitä ilmastonmuutosta (IEA 2023b). Kansainväliset ja kansalliset ohjauskehykset korostavat teollisuuden roolia ympäristövaikutusten pienentämisessä ja resurssitehokkuuden edistämisessä (United Nations 2015; Ministry of Economic Affairs and Employment of Finland 2024). Näiden velvoitteiden myötä vastuullisuustavoitteet ovat muodostuneet toiminnan lähtökohdaksi. Ne ohjaavat teollisuusyrityksiä vähentämään energiankäyttöä ja muokkaamaan toimintatapoja kohti kestävämpiä ratkaisuja.

Vastuullisuustavoitteet ovat syntyneet vastauksena globaaleihin ympäristö- ja yhteiskunnallisiin haasteisiin, kuten ilmastonmuutokseen, luonnonvarojen ylikulutukseen ja kestämättömään talouskasvuun. Teollisuus on merkittävä energian käyttäjä, minkä vuoksi sen toiminnalla on keskeinen rooli kestävän kehityksen tavoitteiden saavuttamisessa (IEA 2023b). Kansainväliset sopimukset, kuten Yhdistyneiden kansakuntien Agenda 2030 ja Pariisin ilmastosopimus, velvoittavat sekä valtioita että yrityksiä vähentämään ympäristövaikutuksiaan ja edistämään resurssitehokkuutta (United Nations 2015; Ministry of Economic Affairs and Employment of Finland 2024).

Vastuullisuustavoitteiden avulla ohjataan teollisuuden toimintaa kohti energiatehokkuutta, päästöjen vähentämistä ja luonnonvarojen kestävää käyttöä. Näiden tavoitteiden asettaminen ja toteuttaminen eivät ole pelkästään ympäristön kannalta välttämättömiä, vaan ne tukevat myös yritysten kilpailukykyä, riskienhallintaa ja sidosryhmien luottamusta (Fawkes, Oung & Thorpe 2016; IEA 2023b). Energianhallinnan järjestelmällinen kehittäminen ja vastuullisuustavoitteiden integrointi osaksi yritysten strategiaa ovat nousseet keskeisiksi menestystekijöiksi nykyaikaisessa teollisuudessa.

Vastuullisen energiankulutuksen hallinnan keskeisenä tavoitteena on pienentää hiilidioksidipäästöjä sekä varmistaa taloudellinen ja ympäristöllisesti kestävä tuotanto. Suomessa kansallisessa energia- ja ilmastosuunnitelmassa on asetettu vuodelle 2030 keskeisiä tavoitteita: kokonaisenergiankulutuksen enimmäismäärä ei tulisi ylittää 239,6 TWh, uusiutuvan

energian osuus tulisi olla vähintään 62 % sekä kasvihuonekaasupäästöjä vähennettäisiin 50 % vuoden 2005 tasosta. (Ministry of Economic Affairs and Employment of Finland 2024.)

Suomessa teollisuuden osalta vapaaehtoisiin energiatehokkuussopimuksiin osallistuminen on tällä hetkellä tehokkain keino saavuttaa Euroopan Unionin asettamat velvoitteet koskien energiansäästöä. Sopimukset ovat olleet keskeinen ohjauskeino jo yli 30 vuotta. Sopimuskauden 2017–2025 aikana on saavutettu yli 16 TWh vuosittainen energiansäästö. Sopimukset ohjaavat yrityksiä ja julkisia toimijoita järjestelmälliseen energiansäästöön ilman pakkoa ja tiukkaa sääntelyä. (Energiatehokkuussopimukset 2025.)

Energiankulutuksen hallinnassa teollisuusyritysten on tärkeää ottaa käyttöön systemaattiset energianhallintajärjestelmät, jotka perustuvat reaaliaikaiseen mittaamiseen, data-analytiikkaan ja jatkuvaan parantamiseen. Kansainvälinen energiajärjestö IEA määrittelee energianhallinnan olevan organisaation energiankäytön systemaattista seurantaa, ohjausta ja optimointia. Systemaattinen energianhallinta auttaa teollisuusyrityksiä saavuttamaan merkittäviä taloudellisia säästöjä. (Rozite, Mooney & Matthew 2025.)

Yhdistyneiden kansakuntien ympäristöohjelma kokoaa teollisuuden energiatehokkuuden parhaat käytännöt, joiden tavoitteena on juurruttaa energiatehokkuus osaksi organisaatioiden johtamista, päätöksentekoa ja arjen prosesseja. Tällainen toimintamalli rakentuu selkeistä tavoitteista, konkreettisista toimenpideohjelmista ja henkilöstön osaamisen kehittämisestä. Näin saavutetaan merkittäviä kustannussäästöjä, parannetaan kilpailukykyä ja pienennetään toiminnan ympäristövaikutuksia samalla vahvistaen yrityksen vastuullisuusimagoa. (Fawkes et al. 2016.)

Teollisuuden energiankulutuksen hallinta tarvitsee yhä tarkempaa ja systemaattisempaa mittaustietoa, jotta tuotantoprosessien tehokkuutta, kustannusrakennetta ja ympäristövaikutuksia voidaan luotettavasti ohjata. Aiempi tutkimus korostaa reaaliaikaisen kulutusdatan ja yksikköperusteisten tunnuslukujen merkitystä energiatehokkuuden parantamisessa ja poikkeamien tunnistamisessa (IEA 2023b; Rozite et al. 2025). Tästä huolimatta monilla yrityksillä ei ole käytössään riittävän tarkkaa tai prosessikohtaista mittausjärjestelmää, jonka avulla kulutuksen todelliset tekijät ja vaihtelut voitaisiin tunnistaa. Tässä työssä tähän tarpeeseen vastataan ottamalla käyttöön uunikohtainen mittarointi ja tarkastelemalla sen tuottamaa energiankulutustietoa. Tätä taustaa vasten työn tavoitteet ja tutkimusongelma määritellään myöhemmin luvussa 6.5.

3 Metalliteollisuuden energiankäyttö

Metalliteollisuus on teollisuudenaloista energiankäytön kannalta keskeinen, koska sen tuotantoketjuun sisältyy useita energiaintensiivisiä, korkean lämpötilan prosesseja. Energialla on vaikutusta näissä prosessissa sekä tuotteen laatuun että tuotannon kustannuksiin. Käytännössä energian saatavuus, hinta ja käytettävän energian päästöintensiteetti vaikuttavat metalliteollisuuden kilpailukykyyn ja siirtymään kohti vähäpäästöisiä tuotantotapoja. (IEA 2025a.)

Metalliteollisuuden energiankäyttöä tarkastellessa on hyvä huomioida toimialan rooli osana kansallista energiankulutusta ja sähkön loppukäyttöä sekä tuotantoprosessien rakenteet, jotka selittävät energiantarpeen syntymistä. Suomessa metalliteollisuus on merkittävä teollisuuden energiankäyttäjä, sillä teollisuus vastaa kokonaisuutena noin 40 %:sta kansallisesta energian loppukäytöstä. Metallinjalostus ja metallituotteiden valmistus muodostavat tästä huomattavan osan. (Tilastokeskus 2024.) Metalliteollisuuden energiankulutuksella on merkittävä vaikutus sekä kansalliseen energiatasapainoon että sähkön kysyntäprofiiliin.

Metalliteollisuuden energiankäyttöä voidaan tarkastella myös parhaan käyttökelpoisen tekniikan (BAT) näkökulmasta, jossa huomio kohdistuu sekä tuotantoprosesseihin että niitä tukeviin järjestelmiin. Ferrometallien eli rautapohjaisten metallien jalostuksessa suurin energiankulutus syntyy kuumennus- ja uudelleenkuumennusvaiheissa sekä lämpökäsittelyissä, mutta merkittävä osa energiasta kuluu myös uunien ja apujärjestelmien jatkuvaan käyttöön. BAT-ratkaisuilla energiatehokkuutta parannetaan erityisesti kehittämällä uunien rakennetta ja ohjausta, hyödyntämällä lämmön talteenottoa sekä parantamalla mittausta ja automaatiota. Energiankäyttö nähdään koko tuotantoketjun ja sitä tukevien järjestelmien yhteisvaikutuksena. (Aries, Gómez Benavides, Mavromatis, Klein, Chronopoulos & Roudier 2022.)

3.1 Metalliteollisuus osana teollisuuden energiankulutusta

Metalliteollisuuden merkitys korostuu erityisesti sähkön loppukäyttöä tarkastellessa. Tilastokeskuksen mukaan teollisuus on suuri sähkönkäyttäjä Suomessa. Metallin jalostus ja metallituotteiden valmistus muodostavat teollisuuden sisällä yhden keskeisimmistä

sähkönkuluttajaryhmistä. (Tilastokeskus 2024.) Tämä heijastaa toimialan tuotannon prosesseja, jotka suurin osa perustuu sähköä hyödyntäviin laitteisiin, kuten sähköuuneihin, moottorikäyttöihin, pumppuihin ja jatkuvatoimisiin apujärjestelmiin (Motiva 2015).

Metalliteollisuuden energiankäyttö eroaa monista muista teollisuudenaloista sillä, että energiankulutus ei rajoitu yksittäisiin tuotantovaiheisiin, vaan on läsnä koko tuotantoketjussa raaka-aineen valmistuksesta lopputuotteen viimeistelyyn. Korkean lämpötilan prosessien ohella energiaa kuluu materiaalinkäsittelyssä, ilmanvaihdossa, jäähdytyksessä ja tuotantoa tukevissa järjestelmissä. Tämän vuoksi metalliteollisuuden energian tarve on tasaisen korkea ja usein sidoksissa tuotannon käyttöasteeseen ja ajallisiin kuormituksen vaihteluihin. (Motiva 2024.)

Kansallisesta näkökulmasta metalliteollisuuden energiankäytöllä on vaikutusta energian kokonaiskulutukseen sekä sähkön ajalliseen kysyntään. Teollisuuden kuormitusprofiilit eroavat kotitalouksien ja palvelusektorin kulutuksesta, mikä näkyy huipputehoissa ja sähköjärjestelmien mitoituksessa. Metalliteollisuuden rooli suurena ja usein ennakoitavana sähkönkäyttäjänä tekee siitä keskeisen toimijan myös energiajärjestelmien kehittämiseen ja sähkömarkkinoiden toiminnan kannalta. (Motiva 2024.)

Energiankäytön laajuuden vuoksi metalliteollisuus on myös keskeinen kohde energiatehokkuuden parantamiseen tähtääville toimenpiteille. Toimialalla saavutettavat energiansäästöt ja energian käytön optimointi heijastuvat suoraan teollisuuden kokonaisenergiankulutukseen ja sitä kautta kansallisiin energia- ja ilmastotavoitteisiin. (Motiva 2024.)

3.2 Metalliteollisuuden tuotantoprosessit

Metalliteollisuuden prosesseissa lämpötilatasot voivat olla hyvin korkeita, mikä johtaa siihen, että prosessilämpö muodostaa usein keskeisen osan energiankäytöstä. Prosessilämmön tuottamisen tapa vaihtelee: osa prosesseista on perinteisesti polttoainepohjaisia, osa voimakkaasti sähköistyneitä. Sähköistyminen voi kohdistua sekä varsinaiseen prosessiin (esimerkiksi sähköuunien käyttö) että apujärjestelmiin ja lämmön tuotantoon. Kansallisesti sähköistyminen kytkeytyy myös sähköntuotannon rakenteeseen ja päästöintensiteettiin, joka vaikuttaa sähköön perustuvien ratkaisujen ympäristövaikutuksiin. (Motiva 2024.)

Metalliteollisuuden tuotantoprosessit muodostuvat ketjusta, jossa energiaa käytetään sekä materiaalin olomuodon, ominaisuuksien ja lämpötilan muuttamiseen että tuotannon tukijärjestelmien ylläpitämiseen. Energiankäyttö ei rajoitu vain kuumimpiin vaiheisiin, vaan se muodostuu useiden peräkkäisten prosessien ja apujärjestelmien yhteisvaikutuksesta. Keskeistä metalliteollisuudessa on, että prosessilämpö ja sähkökäytöt on usein jatkuvia. Tuotannon kuormitus vaihtelee, mutta merkittävä osa energiasta tarvitaan prosessien ylläpitoon ja olosuhteiden hallintaan. Sähköistämisratkaisujen (esim. lämpöpumppujen hyödyntäminen tai sähköisiin prosessiuuneihin siirtyminen) rooli kasvaa, kun energiatehokkuutta ja päästöjen vähentämistä haetaan lämmöntuotannon ja prosessien muutoksilla. (Motiva 2024.)

Metalliteollisuuden energiankäytön suhteen merkittävimmät tuotantoprosessit liittyvät tyypillisesti kuumennukseen ja lämpökäsittelyyn sekä niitä edeltäviin ja seuraaviin muokkaus- ja viimeistelyvaiheisiin. Prosessilämpöä tarvitaan, koska materiaalin muokattavuus ja halutut ominaisuudet edellyttävät hallittua lämpötilaprofiilia. Samalla energiankulutukseen vaikuttaa varsinaisen kuumennusenergian lisäksi prosessin hallintaan liittyvät apujärjestelmät, kuten puhaltimet ja jäähdytys. (Motiva 2024.)

Taonta on yksi energiaintensiivisimpiä metalliteollisuuden prosesseja, koska muokkaus tehdään yleensä kuumataontana, jolloin aihion lämmitetään muokkauslämpötilaan uuneissa ja lämpötilaa on tarve ylläpitää prosessin ajan. Kuumennus muodostaa taontaketjun energiankäytöstä valtaosan. Tuotanto voi olla eräluonteista, mutta uunit voivat olla käytössä pitkään, jolloin energiankulutus ei seuraa suoraan taottujen kappaleiden määrää. Uunien käyttöaste, lastausten rytmi ja odotusajat vaikuttavat energiankulutukseen. Lämpöä vaativia prosesseja voidaan toteuttaa yhä enemmän sähköisillä ratkaisuilla ja parantaa energiatehokkuutta mittauksen ja ohjauksen avulla. (Motiva 2024.)

Taonnan energiankäyttö ei rajoitu pelkkään uuniin. Myös muokkaamiseen tarvittavat laitteet (esim. puristimet, vasarat ja niiden hydrauliset järjestelmät), kappaleiden siirto, kuumien kappaleiden jäähdytys ja varastointi lisäävät kokonaiskulutusta. Kuumennus ja muokkaus on energiankäytön suhteen keskiössä, mutta merkittävä osa kulutuksesta voi tulla myös tukijärjestelmien ja tuotannon rytmityksen aiheuttamasta kuormasta. (Aries et al., 2022.)

Lämpökäsittelyuunit ovat keskeinen ja hyvin yleinen prosessiryhmä metalliteollisuudessa. Lämpökäsittelyuuneilla tuotetaan lopputuotteen vaaditut ominaisuudet. Energiankäytön kannalta lämpökäsittely korostuu etenkin silloin, kun prosessiaika on pitkä tai kun prosessi

vaatii tarkan lämpötilan ja uunin olosuhteiden hallinnan. Tällöin energiankäyttö jakautuu kuumennusvaiheeseen, lämpötilan ylläpitoon sekä mahdollisiin jäähdytysvaiheisiin. Lisäksi kulutusta syntyy puhaltimista ja kiertojärjestelmistä. Uunien sähköistämisellä voidaan saada energiatehokkuushyötyjä liittyen parempaan lämmönsiirtoon ja ohjattavuuteen. (Motiva 2024.)

Konepaja- ja teknologiateollisuudessa on paljon prosesseja (koneistus, hionta, pintakäsittely), mutta taonta ja lämpökäsittely erottuvat energiankäytössä kahdesta syystä. Ensinnäkin ne vaativat prosessilämpöä, jolloin energian käyttö ei ole vain hetkellinen tehopiikki, vaan usein pitkäkestoinen kuumennus- ja ylläpitovaihe. Toiseksi uuniprosesseissa energiankulutus riippuu voimakkaasti käyttöasteesta ja kuormituksesta: jos uuni pidetään kuumana tai sitä ajetaan vajaakuormalla, ominaiskulutus tuotetta kohti kasvaa. Energiatehokkuuden kehittämisessä mittaamisen ja ohjattavuuden merkitys korostuu. (Motiva 2024.)

Uuniprosesseissa merkittävä osa energiasta kuluu tukijärjestelmistä, jotka ovat välttämättömiä prosessin toiminnan ja laadun kannalta. Näihin kuuluvat muun muassa uunien ilmanvaihto, lämpöhäviöiden hallinta sekä erilaiset jäähdytys- ja kiertojärjestelmät, puhaltimet ja poistoilmavirtojen käsittely. Tuotantoympäristössä paineilma, pumppaus, nostot ja materiaalinkäsittelyt voivat muodostaa jatkuvan peruskuorman. Energiatehokkuuden arvioinnissa on tärkeää tarkastella varsinaisten prosessien ohelle myös tukijärjestelmiä sekä energia- ja materiaalivirtoja ja niihin liittyviä kierrätyksen ja talteenoton mahdollisuuksia. (Aries et al., 2022.)

Merkittävä osa metalliteollisuuden energiankäytöstä liittyy korkean lämpötilan prosesseihin ja prosessilämmön tuotantoon (Motiva 2024). Konepaja- ja teknologiateollisuudessa taonta ja lämpökäsittelyuunit muodostavat tuotantoketjun energiaintensiivisen osan korkeiden lämpötilavaatimusten vuoksi. Siksi niiden energiankulutuksen todentaminen ja erottelu (esim. esilämmitys, kuumennus, ylläpito, jäähdytys sekä apulaitteet) on perusteltu lähtökohta energiankäytön analysoinnille ja energiatehokkuuden kehittämiselle.

4 Metalliteollisuuden kuumennustarpeet

Teollisuudessa kuumennusuuneja käytetään monenlaisissa prosesseissa, joissa materiaalia täytyy lämmittää tai pitää tietyssä lämpötilassa vaaditun ajan. Tällaisia prosesseja metalliteollisuudessa ovat esimerkiksi sulatus, lämpökäsittely ja karkaisu. Näissä prosesseissa uunit mahdollistavat materiaalin ominaisuuksien muuttamisen, kuten kovuuden, sitkeyden tai rakenteen parantamisen. (Kaya, Kılıç & Öztürk 2021, 307.)

Kuumennusuunit muodostavat yhden teollisuuden merkittävimmistä energiankuluttajista, minkä vuoksi niiden energiatehokas ja ympäristövaikutukset huomioiva käyttö on keskeistä (Motiva 2015, 6; Kaya et al. 2021, 307). Erityisesti sähkölämmityksessä on huomioitava myös loistehoon ja kulutushuippuihin liittyvät kustannusvaikutukset (Motiva 2015, 15).

Teollisuusuunit käyttävät energianlähteenään pääsääntöisesti sähköä tai maakaasua. (Kaya et al. 2021, 317.) Käytössä on myös muita polttoaineita sekä höyryllä lämmitettäviä uuneja sekä uuneja, joissa käytetään edellisten yhdistelmiä. Polttoaine voi olla kiinteää, nestemäistä tai kaasumaista. Myös prosessien sivutuotteita hyödynnetään polttoaineina. Uunit voivat olla joko jatkuvatoimisia, jolloin materiaali kulkee uunin läpi prosessin aikana, tai panostyyppisiä, jolloin materiaali käsitellään erissä. (Motiva 2015, 6, 11.)

Metallien käsittelyyn tarkoitetuissa uuneissa lämpötilat ovat usein hyvin korkeita, jopa 1300 ºC, jotta esimerkiksi muokattavuus, faasimuutokset ja metallurginen laatu saavutetaan vaatimusten mukaisesti. Prosessien onnistuminen edellyttää tarkkaa lämpötilan hallintaa sekä tasalaatuista lämmön jakaantumista uunin sisällä. Kuumennusprosessien tavoitteet määrittävät uunin rakenteelliset ratkaisut, kuten eristemateriaalit, poltin- ja vastuselementtien sijoittelun, ilmanvaihdon ja kiertokaasujen ohjauksen. Näillä tekijöillä varmistetaan, että lämpö siirtyy käsiteltävään materiaaliin mahdollisimman tasaisesti ja hallitusti. (Kaya et al. 2021, 307–309.)

Korkeat prosessilämpötilat ja pitkät kuumennusajat asettavat uuneille myös energiataloudellisia haasteita. Lämmönsiirto-olosuhteet muuttuvat käsiteltävä materiaalin geometrian, kuormituksen ja uunin käyttöasteen mukaan. Tämä heijastuu sekä uunin lämpötilajakaumiin että hyötysuhteeseen. Tämän vuoksi energiankulutuksen mittarointi muodostaa keskeisen perustan uunin energiatehokkuuden hallinnalle. Mittaamisen tavoitteena on tehdä uunin

energiavirroista läpinäkyviä, jotta kokonaiskulutus ja sitä selittävät tekijät voidaan luotettavasti tunnistaa. (Motiva 2015.)

Kulutusmittaukset kuten polttoaineen tai sähkönkulutuksen mittaus sekä mittaukset puhaltimille, vastuksille ja apujärjestelmille mahdollistavat uunikohtaisen energiataseen laatimisen ja kulutuksen jakautumisen tarkastelun eri prosessin vaiheille. Näin voidaan havaita, missä kohtaa energiaa hukataan, mitkä kuormitustilanteet nostavat kulutusta ja miten muutokset prosessin ohjauksessa, täyttöasteessa tai polttimien toiminnassa vaikuttavat uunin kokonaisenergiankäyttöön. (Motiva 2015.)

Mittarointia tarvitaan myös kulutuksen normalisointiin tuotantomäärään nähden eli ominaiskulutuksen (esim. kWh/t tai kWh/kpl) määrittämistä varten. Näin eri ajotilanteita ja kuormitusvaihteluita voidaan vertailla keskenään ja energiatehokkuustoimien vaikutukset voidaan arvioida systemaattisesti. Ominaiskulutus mahdollistaa uunien, vuorojen ja ajotapojen vertailun. Se mahdollistaa myös energiatehokkuustoimenpiteiden vaikutusten seurannan osana laajempaa energiakulutusanalyysia. (Motiva 2015.)

Kulutusmittaukset ovat siis keskeinen osa jatkuvaa parantamista. Ne ohjaavat oikeisiin toimenpiteisiin, mahdollistavat päätöksenteon dataperusteisesti ja auttavat paljastamaan poikkeamia. (Motiva 2015.) Näiden keinojen avulla energiatehokkuutta voidaan hallita johdonmukaisesti.

4.1 Sähköuunit metalliteollisuudessa

Sähkölämmitteiset uunit ovat metalliteollisuudessa yleisiä erityisesti lämpökäsittelyissä ja esilämmityksessä, joissa säätötarkkuus ja toistettavuus korostuvat. Sähköuunit yltävät tyypillisesti korkeaan hyötysuhteeseen, ja niiden ohjattavuus on polttoainepohjaisiin ratkaisuihin verrattuna tarkka ja vakaa muun muassa portaattoman tehosäädön ansiosta. Uunit altistuvat samoille lämpö- ja kuormitusvaihteluille kuten muutkin uunit. Kuorman geometria, uunin täyttöaste, ovien käyttö ja käyttöaste vaikuttavat lämmönsiirtoon, lämpötilajakaumiin ja kokonaiskulutukseen. Mittaroinnin rooli korostuu sekä ajon aikaisessa ohjauksessa että energiatehokkuuden kehittämisessä. (Motiva 2015.)

Sähkölämmitysmenetelmät sähkölämmitteisissä uuneissa jaetaan suoraan ja epäsuoraan lämmittämiseen. Suorassa menetelmässä sähkö aiheuttaa suoraan kappaleiden

lämpenemisen esimerkiksi induktion, suoran valokaaren, suoran vastuskuumennuksen ja mikroaaltolämmityksen avulla. Epäsuora lämmitys perustuu vastuksen tai muun väliaineen lämmitykseen. Väliaineesta energia siirtyy kappaleeseen säteilyn, konvektion tai johtumisen välityksellä tai näiden yhdistelmänä. Epäsuora vastuskuumennus, infrakuumennus ja plasmakuumennus ovat esimerkkejä epäsuorasta lämmityksestä. (Motiva 2015, 15.)

Epäsuora vastuskuumennus on metalliteollisuuden lämpökäsittelyissä yleisesti käytetty menetelmä. Se tarjoaa korkean säätötarkkuuden ja hyvän toistettavuuden. Vastusuunissa lämpö tuotetaan sähkövastuksilla, joista energia siirtyy kappaleeseen säteilyn ja konvektion avulla. Uunitila on usein jaettu eri vyöhykkeisiin tasaisen lämpötilajakauman ja säätötarkkuuden varmistamiseksi. (Motiva 2015.)

4.2 Energiankulutus metallien kuumennusprosesseissa

Metallien kuumennusprosesseissa energiankulutuksen taso määräytyy käsiteltävän materiaalin massan, tavoitelämpötilan, lämpötilaprofiilin sekä uunin ja ominaisuuksien perusteella. Myös ajotapa vaikuttaa energiankulutukseen. Kokonaiskulutukseen vaikuttavat sekä prosessin fysikaaliset lähtökohdat (lämpökapasiteetti, faasimuutokset, geometrian aiheuttava lämmönsiirtokerroin) että järjestelmä- ja käyttötason tekijät (uunitilan eristeet, lämpöhäviöt, ovien avaukset, kiertokaasujen ohjaus, vastusten ja polttimien asemointi) (Kaya et al. 2021, 307–309; Motiva 2015.) Sähkölämmitteiset uunit tarjoavat korkean hyötysuhteen ja lämpötilaa voidaan säätää nopeasti. (Motiva 2015, 15).

Kuumennusprosessien energiankulutuksen hallinta edellyttää prosessin fysikaalisten lainalaisuuksien ymmärtämistä sekä uunien lämpöhäviöiden ja käyttöasteen systemaattista tarkastelua. Eristeiden kunto, lämpövuotojen minimointi ja tasainen kuormitus ovat keskeisiä tekijöitä, jotka vaikuttavat energian kokonaiskulutukseen ja uunin hyötysuhteeseen. Pienetkin puutteet voivat nostaa energiantarvetta merkittävästi, mikä korostaa kunnossapidon roolia energiatehokkuustavoitteissa. Reaaliaikainen energiankulutuksen mittaaminen sekä ominaiskulutuksen määrittäminen muodostavat perustan uunien tietopohjaiselle ohjaukselle, prosessipoikkeamien tunnistamiselle ja energiainvestointien arvioinnille. (Motiva 2015.)

4.3 Ominaiskulutus metallien kuumennusprosesseissa

Ominaiskulutus (SEC eli specific energy consumption) on teollisuustuotannossa tyypillinen mittari. Se kuvaa, kuinka paljon energiaa kuluu yhden tuotantoyksikön valmistamiseen. Se määritellään jakamalla käytetty energia tuotettujen tuotteiden määrällä.

$$SEC = \frac{Energiankulutus}{Tuotantomäärä}$$

Sitä käytetään paljon, sillä se on helppo ja suoraviivainen tapa raportoida energiankäyttöä. Ominaiskulutus voidaan laskea eri tavoilla riippuen käyttötarkoituksesta: joko koko tuotantomäärälle, yksittäisille tuotteille tai tietyille energialajeille. (Lawrence, Thollander, Andrei & Karlsson 2019.) Se voidaan ilmaista esimerkiksi yksiköissä MWh/t tai kWh/kpl.

Ominaiskulutuksen avulla voidaan vertailla erilaisten kuormitusten, uunien, tuotteiden ja ajotapojen vaikutusta kulutukseen, koska se irrottaa kulutuksen tuotantomäärän vaihtelusta. Ominaiskulutus voi paljastaa myös poikkeamat tuotannossa. Se ei suoraan kerro prosessin tehokkuudesta mitään, sillä ominaiskulutukseen vaikuttaa joukko muita muuttujia, mutta se vaaditaan vertailujen tekemiseen. (Motiva 2015.)

Kansainväliset standardit suosittelevat ominaiskulutuksen käyttöä energiatehokkuuden mittarina ja vertailun apuvälineenä. Se tekee mahdolliseksi energiankäytön vertailevan tarkastelun prosessi- ja tehdastasolla sekä kansallisella ja kansainvälisellä tasolla. Jotkut yritykset julkaisevat karkeita ominaiskulutuksen tietoja myös vastuullisuusraporteissaan. Ominaiskulutus on mittarina helppokäyttöinen, mutta sen käyttöön liittyy myös haasteita. Tuoteryhmien ja energialähteiden valinnan mielivaltaisuus ja tuotantoprosessien väliset erot voivat vaikuttaa tulosten vertailukelpoisuuteen. (Lawrence et al. 2019.)

Ominaiskulutusta muovaavat useat yleiset tekijät. Laitteiston ja tuotantolaitoksen ikä voivat muuttaa arvoa, sillä uudempi teknologia on yleensä energiatehokkaampaa. Myös tehtaan sijainti ja ympäristöolosuhteet vaikuttavat energiantarpeeseen esimerkiksi lämmitystarpeen kautta. Laitoksen ja prosessin koko sekä tuotantonopeus vaikuttavat myös ominaiskulutukseen. (Lawrence et al. 2019.)

Uunin kuormitusasteella on myös huomattava vaikutus prosessin ominaiskulutukseen. Mitä paremmin uunin kapasiteetti saadaan hyödynnettyä, sitä alhaisemmaksi energiankulutus tuoteyksikköä kohti yleensä muodostuu. Tämä korostuu erityisesti kappaletavarauuneissa,

joissa käsiteltävän tuotemäärän vaihtelut voivat olla suuria. Energiankulutusta voidaan vähentää kohdistamalla lämmitys ja ilmankierto vain niihin uunin osiin, joissa tuotetta käsitellään, tai vaihtoehtoisesti säätämällä uunin toimintaa tuotannon määrän mukaan. (Motiva 2015, 53.)

Myös panostoimisissa uuneissa kuorman koolla on selkeä vaikutus. Jatkuvakäyttöisyyden on osoitettu pienentävän energiankulutusta myös panosuuneissa, koska uunin rakenteet varastoivat lämpöä ja näin pienentävät lämmitystarvetta seuraavissa käsittelyissä. Prosessin käynnistäminen kuumalla uunilla on selvästi energiatehokkaampaa kuin kylmän uunin käynnistäminen. Kuuman uunin hyödyntäminen tuo säästöjä jopa pienemmillä kuormilla. Uunin sisäisen massan vähentäminen pienentää myös lämmitykseen tarvittavaa energiaa. Uunin arinat, kuljettimet ja muut rakenteet on hyvä suunnitella kevyemmiksi, jos mahdollista. Näin voidaan parantaa prosessin kokonaisenergiatehokkuutta. (Motiva 2015, 53.)

Luotettava energiankulutusanalyysi edellyttää järjestelmällistä mittaamista ja energiankulutuksen seurantaa. Ilman tarkkaa dataa tuotannon olosuhde- ja prosessimuutosten todellisia vaikutuksia on vaikea erottaa. Prosessilämmityksen energiankäyttöön ja hyötysuhteeseen vaikuttavat muun muassa lämmönsiirron olosuhteet, järjestelmän suunnittelu ja ajokäytännöt. (U.S. Department of Energy, 2016.)

4.4 Kulutuksen keskeiset tekijät

Teollisten metallien käsittelyyn ja kuumennukseen tarkoitettujen uunien energiankulutus määräytyy lämpöteknisten perusmekanismien, uunin teknologisten ratkaisujen, käytön ja operoinnin yhteisvaikutuksesta. Energiankäyttö ei siis muodostu yhden tekijän seurauksena, vaan uunin rakenteelliset ominaisuudet, kuorman käyttäytyminen ja ohjauksen toteutus muodostavat uunin energiankulutuksen. (Motiva 2015.)

Uunin energiantarve perustuu ensisijaisesti siihen, kuinka paljon lämpöenergiaa tarvitaan metallikuorman lämmittämiseen ja mahdollisiin faasimuutoksiin. Suuri osa energiankäytöstä menee myös uunin rungon ja sisärakenteiden lämpökapasiteetin nostamiseen. Lisäksi lämpöhäviöt sekä poistoilman ja vuotoilman aiheuttamat lämpövirrat kasvattavat energian tarvetta. Panoskäyttöinen uuni lämmittää oman massansa uudelleen jokaisen erän alussa ja jäähtyy taas tuotantoerän valmistuttua. Tämä toistuva lämpeneminen ja jäähtyminen lisää

energiankulutusta. Jatkuvakäyttöisessä uunissa lämpötila pysyy tasaisempana, jolloin uunin rakenteet eivät pääse jäähtymään ja tämä voi pienentää energiankulutusta suhteessa tuotantoon. (Motiva 2015.)

Kuorman geometrian ja kuorman asettelun vaikutus energiankulutukseen on merkittävä, sillä kappaleiden sijoittelu ja virtausreitit määräävät, miten konvektio ja säteily pääsevät lämmittämään kuormaa. Epätasainen virtaus, liian tiivis kuorma ja säteilykatveet heikentävät lämmönsiirtoa ja pidentävät lämmitysvaihetta, ja näin nostavat prosessin kokonaisenergiantarvetta. Liian tiivis kuorma aiheuttaa epätasaisen lämpövirtauksen ja lämpö ei pääse siirtymään optimaalisesti. Myös uunien ovien ja täyttöaukkojen avaaminen ja auki pitäminen lastausten yhteydessä vaikuttaa energian tarpeeseen. Lämpöä siirtyy avoimesta aukosta uunin ulkopuolelle konvektion ja säteilyn kautta, ja kylmää ilmaa virtaa tilalle. (Bisht, Gopalakrishnan, Dahal, Li & Liu 2024.)

Uunin energiankulutus määräytyy useiden samanaikaisesti käynnissä olevien tekijöiden yhteisvaikutuksesta. Näiden muuttujien hallinta määrittää, millaiseksi uunin ominaiskulutus muodostuu todellisissa tuotanto-olosuhteissa. Keskeisimpänä ovat kuorman lämmitys, uunin rakenteiden lämpeneminen ja erilaiset säteilyhäviöt, joihin muun muassa kuorman asettelu ja ovien käyttö liittyvät.

4.5 Energiatehokkuuden parantamiskeinot

Kuumennusuunien energiatehokkuutta voidaan parantaa optimoimalla prosessiparametrit siten, että lämmitys- ja sen jälkeisen tasalämpöisyyden saavuttamiseen tarvittavan jakson kesto sekä vyöhykelämpötilat mitoitetaan tavoiteominaisuuksien mukaan. Tavoiteominaisuuksia metalliteollisuudessa ovat esimerkiksi metallurginen laatu tai haluttu kovuus. Prosessiparametrien hienosäätö tuotantodatan perusteella parantaa energiatehokkuutta. Tässä yhteydessä tuotantodatalla tarkoitetaan prosessista mitattuja ja tuotannosta kirjattuja tietoja, kuten tuotetyyppiä ja massaa, kuorman asettelua, uunin vyöhykkeiden asetus- ja toteumalämpötiloja, virtausmittoja sekä sähkönsyötön määriä (kW, kWh). Kun tuotekohtaisia ominaiskulutuslukuja seurataan järjestelmällisesti eri kuormausasetelmissa, voidaan tunnistaa energiankulutuksen kannalta optimaaliset ajotavat ilman laatuongelmia. (Motiva 2015; Bisht et al. 2024)

Lämpöhäviöitä voidaan pienentää ylläpitämällä eristeiden kuntoa ja lisäämällä lämmöneristystä tarkoituksenmukaisilla materiaaleilla sekä minimoimalla vuotoilma. Myös ovien ja täyttöaukkojen aukiolon hallinta vähentää tarpeetonta lämpövuotoa ja pienentää energiankulutusta. Kiertokaasujen ohjauksen kehittäminen, kuten puhaltimien taajuussäätö tai virtausreittien optimointi, tehostaa konvektiivista lämmön siirtymistä kuormaan. Se lyhentää tasalämpöisyyden saavuttamiseen tarvittavaa aikaa ja pienentää uunin energiantarvetta suhteessa tuotantomäärään. (Motiva 2015; Bisht et al. 2024.)

Lisäksi uunin sisäpintojen pinnoituksella voidaan täydentää edellä kuvattuja keinoja. Korkean emissiivisyyden omaavat pinnoitteet pyrkivät absorboimaan kaiken energian ja vapauttamaan sen säteilynä takaisin uuniin. Heijastavat eli matalan emissiivisyyden omaavat pinnoitteet suuntaavat energian takaisin uuniin ja näin vähentävät lämpöhäviöitä uunin seinämiltä. (Motiva 2015.) Pinnoitteella voidaan siis vaikuttaa säteilyn käyttäytymiseen. Pinnoitus ei korvaa eristeiden kunnossapidon tarvetta tai vuotoilman minimointia, vaan on lisätoimi muiden energiatehokkaiden keinojen tukena.

Lämmön talteenoton ja uudelleen käytön ratkaisut tarjoavat merkittävän säästöpotentiaalin erityisesti jatkuvatoimisissa uuneissa, joissa poistoilman tai uunikaasujen lämpö voidaan hyödyntää esilämmitykseen tai muiden prosessien tarpeisiin. Jatkuvatoimisissa uuneissa poistoilma ja uunikaasut virtaavat tasaisesti, jolloin lämmönvaihtimet voidaan mitoittaa tasaiselle kuormitukselle. Lämmöntalteenoton kannattavuus riippuu lämpötilatasoista, käyttöajasta ja lämmön kysynnän ja tarjonnan synkronoinnista, minkä vuoksi investointipäätökset arvioidaan tapauskohtaisesti. (Motiva 2015.)

Sähkötehon hallinta ei paranna uunin hyötysuhdetta, mutta se voi silti pienentää energiankulutusta ja siihen liittyviä kustannuksia. Sähkötehon hallinnan toimenpiteisiin kuuluvat loistehon kompensointi ja tehopiikkien hallinta. Loisteho syö sähköjärjestelmän kapasiteettia ja synnyttää lämpöä, jota ei voida hyödyntää. Loistehoa voidaan vähentää käytännössä esimerkiksi valitsemalla oikein mitoitettuja moottoreita ja estämällä laitteiden ja koneiden turha tyhjäkäynti. Muita keinoja loistehon kompensointiin on kondensaattoripankin käyttäminen synkronoimattomien moottoreiden ylimagnetisointi. Loistehon liiallinen kompensointi ei ole tarkoituksen mukaista. On tärkeää huomioida loistehon tehdaskohtainen raja, jonka ylittyessä loistehosta joutuu maksamaan sopimuksen mukaan. (Motiva, 2015, 56–57.)

Huipputehon minimoinnilla ehkäistään hetkellisten tehopiikkien aiheuttamia tarpeettoman korkeita liittymätehoja ja niiden ylityksiä. Teollisuudessa on käytössä erilaisia tehonseuranta- ja ohjausjärjestelmiä, joilla näitä kuormituspiikkejä pyritään ehkäisemään. Esimerkiksi useita uuneja käyttävässä teollisuuslaitoksessa voidaan uunien lämmitys ohjelmoida siten, ettei tietty tehotaso ylity. (Motiva, 2015, 57.) Näiden toimien yhteisvaikutuksesta ominaiskulutus sekä teho- ja siirtomaksut voivat pienentyä.

Toimintamallien ja energianhallinnan näkökulmasta pysyvät säästöt syntyvät silloin, kun tavoitteet, mittarit ja vastuut on selkeästi määritelty, reaaliaikainen mittaaminen ja data-analytiikka tukevat päätöksentekoa, ja jatkuvan parantamisen käytännöt on vakiinnutettu osaksi päivittäistä toimintaa. (IEA 2025b; Fawkes et al. 2016.) Kokemukset teollisuudesta osoittavat, että systemaattinen energianhallinta tuottaa merkittäviä ja nopeasti realisoituvia säästöjä. IEA:n (2025b) analyysien mukaan energianhallinnan kehittämiseen liittyvät toimenpiteet ovat useissa tapauksissa johtaneet yli 10 % energiansäästöihin jo kolmen ensimmäisen käyttövuoden aikana. Lisäksi raportit kuvaavat esimerkkejä, joissa yksittäiset organisaatiot ovat saavuttaneet 30 prosentin tai sitä suurempia säästöjä usein matalin tai jopa olemattomin kustannuksin (IEA 2015).

4.6 Kustannus- ja ympäristövaikutukset

Metallien kuumennusprosessien energiankäyttö heijastuu suoraan sekä tuotannon kustannuksiin että ympäristövaikutuksiin. Uunin ominaiskulutuksen pieneneminen alentaa ostettavan energian määrää, vähentää teho- ja siirtomaksujen riskiä kuormitushuippujen tasoittuessa ja pienentää tuotekohtaista hiilijalanjälkeä, koska energiankulutuksen pienentyessä myös energiaan liittyvät päästöt vähenevät. Kun lämpöhäviöitä vähennetään ja lämmönsiirtoa tehostetaan, sama tuotantomäärä saavutetaan pienemmällä nettoenergiapanoksella. Tämä näkyy alempina energiakustannuksina sekä matalampina päästöinä tuotantoyksikköä kohden. (Motiva 2015.)

Energianhallinnan konkreettinen arvo kustannuksille ja ympäristölle syntyy, kun mittaaminen, ohjaus ja vastuut kytketään yhteiseksi toimintatavaksi. Uunikohtainen mittarointi, reaaliaikainen seuranta ja selkeästi määritellyt KPI-mittarit mahdollistavat sen, että prosessin asetuksia ja ajotapaa muutetaan mitatun vaikutuksen perusteella. Ovien ja täyttöaukkojen aukioloa sekä kappaleiden asettelua voidaan myös muuttaa, kun muutosten vaikutusten

seuranta on helppoa. Kun tasaantumisaika lyhenee ja lämpöä karkaa vähemmän rakenteisiin tai uunin ulkopuolelle, ohjautuu lämpö tehokkaammin kuormaan. Tämän seurauksena ominaiskulutus laskee, myös päästöt pienevät välittömästi riippumatta käytetystä polttoaineesta. Tämä näkyy suoraan alentuneina kustannuksina sekä pienempinä ympäristövaikutuksina. (Motiva 2015.)

Energianhallinta vaikuttaa ympäristövaikutuksiin myös epäsuorasti ajon vakauden kautta. Tehopiikkien pienentäminen, porrastettu tehonnosto ja kuormien ajoitus sopimustehon ja hinnan ohjaamana tasoittavat sähkön käyttöä, pienentävät verkko- ja kojeistohäviöitä ja vähentävät tarvetta ylläpitää ylilämmittämisen vaatimaa varmuusmarginaalia. Vakaampi ajotapa lyhentää lämmitys- ja tasoittumisjaksoja ja parantaa toistettavuutta, mikä vähentää uudelleen lämmityksiä ja laatupoikkeamia ja niiden aiheuttamaa lisäenergiankulutusta ja päästöjä. (Motiva 2015.) IEA:n (2025b) analyysin mukaan energianhallintaohjelmat tuottavat merkittävät säästöt jo ensimmäisten vuosien aikana hyvin pienin investoinnein. Nämä säästöt realisoituvat ensin kulutustasolla ja muuttuvat suoraan kustannus- ja päästövähennyksiksi (IEA 2025b).

Kokonaisuutena energianhallinta muodostaa yhteyden teknisten parannusten ja ympäristötavoitteiden välille. Mittaamiseen perustuva ohjaus laskee ominaiskulutusta, ominaiskulutuksen lasku alentaa päästöjä ja kuormituksen tasoitus vähentää sekä teho- ja siirtomaksuja että laitteistojen häviöitä. Kunnossapito vahvistaa tätä ketjua: eristeiden ja vuorausten kunnon ylläpito, ovien ja aukkojen tiiviyden varmistaminen sekä sähkövastusten kunnonvalvonta pitävät lämmönsiirto-olosuhteet vakaina. Näiden tekijöiden seurauksena yrityksen taloudellinen kilpailukyky vahvistuu ja ilmastovaikutukset pienenevät samanaikaisesti, mikä tukee yrityksen omia tavoitteita sekä kansallisia energiatehokkuustavoitteita. (IEA 2025b; Motiva 2015.)

5 Energiankulutuksen mittaaminen

Metalliteollisuuden kuumennusuunit ovat energiaintensiivisiä prosessilaitteita, joiden tehokas käyttö edellyttää tarkkaa ja luotettavaa energiankulutuksen mittaamista. Viimeaikainen tutkimus viittaa siihen, että metalliteollisuuden kuumennus- ja lämpökäsittelyuunien prosesseista kerättävä data, dataa hyödyntävät mallit ja kehittyneet mittarointiratkaisut tarjoavat hyviä mahdollisuuksia energiankulutuksen pienentämiseen. Mallit, jotka laskevat energiankulutukseen vaikuttavien tekijöiden osuuksia, kuten panoslämpötila, tuotantotahti ja teräslaji, helpottavat syy-seuraussuhteiden ymmärtämistä. Tämä auttaa ohjaamaan käytännön optimointia teollisuusympäristössä. (Bao et al. 2022.)

Kuumennusuunien energiankulutuksen luotettava mittaaminen luo perustan prosessien optimoinnille, sillä ilman tarkkaa mittausdataa energiatehokkuutta parantavat toimenpiteet saattavat jäädä tehottomiksi. Uunitasoinen energiankulutuksen seuranta tukee sekä päivittäistä operointia sekä strategista päätöksentekoa, kuten investointitarpeiden arviointia ja energiankäytön ennustamista.

5.1 Mittauksen rooli energianhallinnassa

Uunikohtainen energiankulutuksen mittaaminen muodostaa perustan energiankulutuksen hallinnalle sekä energiatehokkuuden systemaattiselle kehittämiselle. Mittarointi tukee päivittäistä ohjausta siten, että vyöhykkeiden asetusarvoja, puhallinnopeuksia ja kuorman asettelua voidaan säätää mitatun vaikutuksen perusteella sen sijaan että muutokset tehtäisiin oletusten varassa. Käytännössä esimerkiksi vyöhykesäädöt ja virtausreitit optimoidaan kohti lyhyempää tasoittumisjaksoa eli tasalämpöisyyden saavuttamista ja parempaa lämmönsiirtoa kuormaan. Nämä tekijät pienentävät nettoenergiapanosta suhteessa tuotantoon. (Motiva 2015; Bisht et al. 2024.)

Datasta on hyötyä myös jatkuvassa parantamisessa: tuotekohtaisen ominaiskulutuksen trendiseuranta eri kuormausasetelmilla ja ajotavoilla auttaa tunnistamaan parhaat käytännöt sekä kohdistamaan muutoskokeilut sinne, missä säästöpotentiaali on suurin. Ennen-jälkeen-vertailussa voidaan esimerkiksi muuttaa ovien aukioloaikaa tai virtausreittejä ja todentaa

vaikutus lämmitysvaiheen kestoon sekä ominaiskulutukseen. Prosessilämmitystä koskevat analyysit osoittavat, että pienetkin muutokset käyttöparametreissa heijastuvat suoraan lämmönsiirtoon ja energiatehokkuuteen. (Bisht et al. 2024; Motiva 2015.)

Mittaroinnin liittäminen energianhallinnan rakenteisiin, kuten tavoitteisiin, mittareihin ja reaaliaikaiseen seurantaan, tuottaa pysyvämpiä hyötyjä. Se auttaa arvioimaan ja muokkaamaan ohjaustoimia todetun vaikutuksen perusteella. Selkeä vastuunjako, sovitut KPI- (Key Performance Indicator) suorituskykymittarit ja muutosten dokumentoitu käsittely varmistavat, että parannukset vakiintuvat osaksi päivittäistä työtapaa. Näin tulokset säilyvät, vaikka kuormitusprofiili muuttuu. (IEA 2025b; Motiva 2015.)

Mittaroinnin tärkein hyöty on energiankäytön muuttuminen näkyväksi ja mitattavaksi. Uunikohtainen kulutusdata mahdollistaa energiankulutuksen seurannan, ominaiskulutuksen laskennan sekä energiatehokkuustoimenpiteiden vaikutusten arvioinnin. Mittaustiedon avulla voidaan tunnistaa poikkeamia, vertailla eri käyttötilanteita ja kohdistaa kehitystoimia suurimman kulutuksen kohteisiin. Mittarointiin liittyy kuitenkin haasteita, sillä energiankulutuksen tulkinta edellyttää tuotantotiedon huomioimista. Kuormitusasteen vaihtelut, erilaiset ajotavat sekä tuotannon ja energiankulutuksen ajallinen eritahtisuus voivat vaikeuttaa kulutuksen vertailua ja analysointia. (U.S. Department of Energy 2016; Motiva 2015.)

5.2 Mittausmenetelmät

Sähkölämmitteisten kuumennusuunien energiankulutuksen mittaamisen tavoitteena on tuottaa ajallisesti ja toiminnallisesti riittävän tarkkaa mittaustietoa, jonka avulla uunien energiankäyttöä voidaan tarkastella. Mittauksen tarkoitus ei ole ainoastaan kokonaiskulutuksen kirjaaminen, vaan kulutuksen jakautumisen ymmärtäminen suhteessa kuormitukseen, ajotapaan ja käyttöasteeseen. Keskeistä on uunitasoisen energiansyötön seuranta siten, että mitattua dataa voidaan hyödyntää lämpötaseen tarkastelussa ja energiahäviöiden tunnistamisessa. (U.S. Department of Energy 2016.)

Käytännössä sähkölämmitteisten kuumennusuunien energiankulutuksen mittaus perustuu uunin kokonaissyötön jatkuvaan mittaamiseen, jolloin saadaan tieto uunin kokonaistehosta ja energiankulutuksesta eri ajanjaksoilla. Tämän mittaustiedon avulla voidaan tarkastella energiankäytön vaihtelua eri tuotanto- ja ajotilanteissa. Mikäli tavoitteena on analysoida

kulutuksen muodostumista yksityiskohtaisemmin, mittausta voidaan kohdentaa myös uunin keskeisiin alajärjestelmiin, kuten lämmitysvyöhykkeisiin. Tällainen kohdennettu mittaus tukee energiankäytön analyyttista tarkastelua erityisesti silloin, kun arvioidaan ajotapojen ja ohjausmuutosten vaikutusta energiankulutukseen. (Motiva 2015; U.S. Department of Energy 2016.)

Jotta mittausdata tukee käytännön analyysiä, mitattu energiankulutus on kytkettävä tuotannon kontekstiin. Prosessilämmityksessä uunien lämmitys, varsinainen tuotanto ja mahdolliset alasajot eivät usein noudata kalenterivuorokautta. Tämän vuoksi mittaustietoa on usein tarkasteltava tuotantopäivän tai prosessijakson mukaisilla aikarajauksilla. Tällainen datan käsittelytapa helpottaa kuormitusasteen ja ajotavan vaikutusten tarkastelua energiankulutukseen. (U.S. Department of Energy 2016.)

Mittausmenetelmiä täydennetään usein mittatietoon perustuvalla jälkianalyysillä, jonka avulla voidaan arvioida energiankulutukseen vaikuttavien tekijöiden merkitystä. Tutkimusten mukaan mittaukseen kytketty analyyttinen tarkastelu voi tukea keskeisten kulutustekijöiden tunnistamista kuumennusprosesseissa ja auttaa kohdistamaan energiatehokkuuden kehittämistoimia tehokkaammin. (Bisht et. al 2024.) Mittausmenetelmät muodostavat teknisen perustan energiankulutuksen analysoinnille, mutta varsinainen hyöty syntyy datan huolellisesta tulkinnasta suhteessa prosessin muuttujiin.

5.3 Sähkömarkkinat ja kulutuksen ennustaminen metalliteollisuudessa

Sähkömarkkinat muodostavat järjestelmän, jossa sähkön tuotanto ja kulutus tasapainotetaan jatkuvasti markkinaehtoisen hinnoittelun ja teknisten ohjausmekanismien. Eurooppalaisilla sähkömarkkinoilla keskeisiä kauppapaikkoja ovat vuorokausi- ja päivänsisäiset markkinat, joissa sähkön hinnat määräytyvät kysynnän ja tarjonnan perusteella vallitsevan markkinan mukaisesti (Nord Pool 2025). Markkinamallin tavoitteena on varmistaa, että tuotanto ja kulutus kohtaavat ajallisesti ja määrällisesti siten, että sähköjärjestelmän tasapaino säilyy (ACER 2020).

Perinteisesti sähkön kaupankäynti ja taseselvitys on toteutettu tunnin pituisin aikajaksoin, vaikka sähkön tuotanto ja kulutus vaihtelevat todellisuudessa jatkuvasti lyhyemmillä aikaväleillä (ACER 2020). Erityisesti uusiutuvan sähkön tuotannon lisääntyminen on lisännyt

tätä vaihtelua. Tuuli- ja aurinkovoiman tuotanto muuttuu nopeasti sääolosuhteiden mukaan, mikä on korostanut epäsuhtaa markkinajaksojen ajallisen jaksotuksen ja sähköjärjestelmän fysikaalisen käyttäytymisen välillä. (IEA 2023a.)

Tämän kehityksen seurauksena Euroopan unionin sähkömarkkinasääntely on ohjannut markkinoita kohti lyhyempää aikajaksotusta. Siirtyminen 15 minuutin markkina-aikayksikköön sekä taseselvityksessä että vuorokausimarkkinoilla on toteutettu vaiheittain vuosina 2024–2025. Aiempi yhden tunnin hinnoittelu on korvattu tarkemmalla ajallisella resoluutiolla. (Nord Pool 2025.)

Muutoksen tavoitteena on parantaa markkinahintojen kykyä heijastaa tuotannon ja kulutuksen todellista vaihtelua, vähentää rakenteellisia epätasapainoja ja tehostaa sähköjärjestelmän tasapainotusta (ACER 2020). Lyhyempi hinnoitteluaika lisää hintasignaalien ajallista tarkkuutta ja kasvattaa hinnoittelujaksojen määrän nelinkertaiseksi vuorokaudessa. Tämä asettaa uusia vaatimuksia sähkönkulutuksen mittaukselle ja ennustamiselle erityisesti suurten sähkönkäyttäjien näkökulmasta (Nord Pool 2025).

Metalliteollisuudessa sähkönkulutuksen ennustaminen voi olla haasteellista, koska kulutus kytkeytyy tuotannon kuormitukseen, prosessien käyttöasteeseen sekä ajallisesti epäsymmetrisiin kuumennus- ja ylläpitovaiheisiin. Toimialalle on tyypillistä laaja prosessikirjo, johon kuuluvat esimerkiksi sulatus-, muokkaus-, koneistus- ja pintakäsittelyprosessit. Monissa prosesseissa energiankulutus ei seuraa lineaarisesti tuotantomäärää, vaan muodostuu useista osittain päällekkäisistä kuormista, jotka voivat sisältää pitkiä käynti- ja ylläpitovaiheita. (Motiva 2024; IEA 2025a.)

Kaikkia tuotantoprosesseja ei voida joustavasti säätää lyhyellä aikavälillä, mutta kulutuksen ajoitukseen ja kuormitusprofiiliin voidaan vaikuttaa tuotantosuunnittelun, kuormien porrastamisen ja käyttöasteen hallinnan kautta. Kun sähkön hinnoittelun ajallinen resoluutio on lyhentynyt 15 minuuttiin, korostuu tarve ennakoida kulutuksen ajallinen jakauma aiempaa tarkemmin verrattuna pelkkään päivätason tai tuntitason ennustamiseen. Luotettava sähkönkulutuksen ennustaminen perustuu mittausdatan ja tuotantotiedon yhdistämiseen, minkä avulla kulutuksen kehitystä voidaan arvioida eri tuotantotilanteissa ja kuormitustasoilla. (Motiva 2024; IEA 2025a.)

Yritystasolla sähkönkulutuksen ennustaminen tukee ennen kaikkea kustannusten hallintaa ja tuotannon suunnittelua. Ennusteen avulla energiaintensiivisiä prosesseja voidaan ajoittaa

markkinahintojen kannalta edullisempiin ajankohtiin siinä määrin kuin tuotantoprosessit sen sallivat. Lisäksi kulutuksen ennustaminen helpottaa tehopiikkien hallintaa ja pienentää riskiä ylittää sopimustehoa tai altistua epäsuotuisille tasekustannuksille. Ennustettava ja hallittu kulutusprofiili parantaa myös investointipäätösten laatua, koska energiatehokkuustoimenpiteiden vaikutuksia voidaan arvioida vertaamalla toteutunutta kulutusta ennustettuun referenssitasoon. Näin ennustaminen tukee energianhallintaa osana yrityksen operatiivista ja taloudellista päätöksentekoa. (Motiva 2024; IEA 2025a.)

Kansallisella tasolla teollisuuden parantunut kulutuksen ennustettavuus tukee sähköjärjestelmän kokonaisvakautta ja markkinoiden tehokasta toimintaa. Suuret teolliset sähkönkäyttäjät vaikuttavat merkittävästi sähkön kysyntäprofiileihin, ja ennustettavampi kulutus vähentää tarvetta jälkikäteiselle tasapainotukselle kantaverkossa. Kun tuotannon ja kulutuksen ennusteet vastaavat paremmin toteutumaa, vähenevät rakenteelliset epätasapainot ja niiden hallinnasta aiheutuvat kustannukset. Tämä parantaa markkinoiden kykyä heijastaa todellista kysynnän ja tarjonnan tasapainoa myös lyhyissä 15 minuutin jaksoissa (ACER 2020; Nord Pool 2025).

Sähkömarkkinoiden näkökulmasta kulutuksen ennustaminen tukee hintasignaalien toimivuutta ja markkinapohjaista ohjausta. Kun markkinaosapuolet pystyvät ennakoimaan kulutuksensa luotettavasti, markkinoilla tarjotut ja kysytyt energiamäärät vastaavat paremmin todellista tarvetta. Tämä parantaa vuorokausi- ja päivänsisäisten markkinoiden tehokkuutta ja vähentää tarvetta tasapainotusmarkkinoiden käyttöön. Lyhyempään aikajaksoon perustuvassa markkinamallissa ennustamisen rooli korostuu, koska jokainen 15 minuutin jakso muodostaa itsenäisen hinnoitteluyksikön. Tästä näkökulmasta kulutuksen ennustaminen ei ole pelkästään yrityskohtainen optimointityökalu, vaan olennainen osa koko sähkömarkkinan toimivuutta (ACER 2020; Nord Pool 2025).

6 Case Takomo

Componenta on suomalainen metalliteollisuuden konserni, joka valmistaa vaativia metallikomponentteja ajoneuvo-, kone- ja laitevalmistuksen tarpeisiin. Konsernin toiminta kattaa useita metallinjalostuksen prosesseja, kuten valimotoiminnan, taonnan ja koneistuspalvelut (Kuva 1). Componentalla on sekä kotimaisia että kansainvälisiä asiakkaita osana globaaleja toimitusketjuja. Kaikki Componentan tuotantoyksiköt sijaitsevat Suomessa (Componenta 2024b).

Kuva 1 Componenta (Componenta 2023b)

Takomo on Jyväskylässä sijaitseva taontaan erikoistunut tuotantoyksikkö ja se on osa Componentan Manufacturing -liiketoimintaa. Takomolla valmistetaan mittatilauksena kupari- ja terästakeita ja rouhintasorvattuja taeaihioita. Takomon tuotantoketjuun kuuluvat materiaalin sahaus, kuumennus, taonta, lämpökäsittely ja koneistus sekä NDT-testaus ja luokitukset. Takomolla valmistetaan mittatilauksena taeaihioita sekä erityisvaativia ja suurikokoisia komponentteja, joita hyödynnetään muun muassa alusten potkurilaitteistoissa, tuulivoimaloissa,

teollisuusvaihteissa ja porauslaitteistoissa. (Componenta 2024a.) Prosessit ovat energiaintensiivisiä erityisesti kuumennuksen ja lämpökäsittelyn osalta, mikä tekee energiatehokkuudesta ja energiankäytön hallinnasta keskeisiä tekijöitä yksikön toiminnassa.

6.1 Yrityskuvaus, yleinen ongelma ja työn kohde

Yksikön taonta- ja lämpökäsittelyprosesseissa hyödynnetään useita eri uunityyppejä, joiden energiankulutus muodostaa merkittävän osan toimipisteen energiankulutuksesta. Käytössä on yksi kaasua energialähteenään käyttävä uuni ja viisi sähköä hyödyntävää uunia. Kaasuuunin energiankulutukseen emme tässä työssä kiinnitä huomiota, mutta siinä lämmitetyt kappaleet tulee huomioida, kun tarkastellaan kokonaistuotantomääriä. Sähkökäyttöiset uunit ovat keskenään erilaisia ja niillä on omat käyttötarkoitukset prosessissa.

Ennen mittarointijärjestelmän käyttöönottoa yksittäisten kuumennus- ja lämpökäsittelyuunien energiankulutuksesta ei ollut käytettävissä jatkuvaa mittaustietoa. Energiankulutusta voitiin tarkastella ainoastaan koko toimipaikan tasolla, minkä vuoksi yksittäisten uunien kulutusta ja niiden osuutta kokonaisenergiankäytöstä ei voitu luotettavasti arvioida. Tämä rajoitti mahdollisuuksia tunnistaa suurimmat energiankulutuskohteet sekä seurata energiankäytön muutoksia tuotannon eri tilanteissa.

Tämän työn kohteena on sähköllä toimivien kuumennus- ja lämpökäsittelyuunien energiankulutuksen mittaaminen sekä mittaustiedon hyödyntäminen energiankäytön analysoinnissa. Tavoitteena on tuottaa luotettavaa uunikohtaista energiankulutustietoa, jonka avulla voidaan tarkastella energiankulutuksen jakautumista eri uunien välillä sekä muodostaa käsitys energiankulutuksen ja tuotantomäärien välisestä yhteydestä siellä, missä tuotantotiedot ovat käytettävissä. Samalla luodaan lähtötaso energiankäytön seurannalle ja tuleville energiatehokkuuden kehittämistoimenpiteille.

Työ rajataan koskemaan sähköllä toimivia kuumennus- ja lämpökäsittelyuuneja. Kaasu-uunin energiankulutusta ei tarkastella tässä tutkimuksessa, vaikka sen kautta kulkevat tuotantomäärät huomioidaan kokonaistuotannon tarkastelussa. Työssä ei myöskään arvioida yksittäisten energiatehokkuusinvestointien vaikutuksia energiankulutukseen eikä muodosteta tuotekohtaisia energiankulutusmalleja. Tarkastelun painopiste on mittarointijärjestelmän

käyttöönotossa, mittausdatan käsittelyssä sekä sen tuottaman tiedon hyödyntämisessä energiankäytön hallinnan tukena.

6.2 Nykytila

Uunien käyttöä ja tuotantomääriä raportoidaan tällä hetkellä käsin laadittavien uunikarttojen ja Excel-pohjaisen taontaraportin avulla. Uunikartta toimii taontasuunnitelmana. Uunikartalle suunnitellaan, mitä kuhunkin uuniin lastataan ja kuinka monta kappaletta kuhunkin erään sisältyy. Uunikartta laaditaan aina tuotantoa edeltävänä päivänä, uunit lastataan suunnitelman mukaisesti ja lämmitys aloitetaan edellisenä iltana noin klo 17–18. Lämmitystä jatketaan tyypillisesti noin kymmenen tuntia taontalämpötilan saavuttamiseksi.

Päivän toteuma dokumentoidaan taontaraporttiin, johon kirjataan taotut määrät kilogrammoina. Raportissa käytetään tällä hetkellä laskennallisia kilogrammoja, vaikka todelliset sahatut massat voivat poiketa näistä. Tavallisesti poikkeama saattaa olla joitakin kymmeniä kiloja ylöspäin esimerkiksi hukkapalojen hyödyntämisen vuoksi. Jotta kulutus per tuotettu yksikkö vastaisi todellista tilannetta, on aiheellista arvioida, tulisiko raportointi siirtää laskennallisista kiloista sahattuihin todellisiin kiloihin. Toinen vaihtoehto on poimia työlle kerätyt massat toiminnanohjausjärjestelmästä.

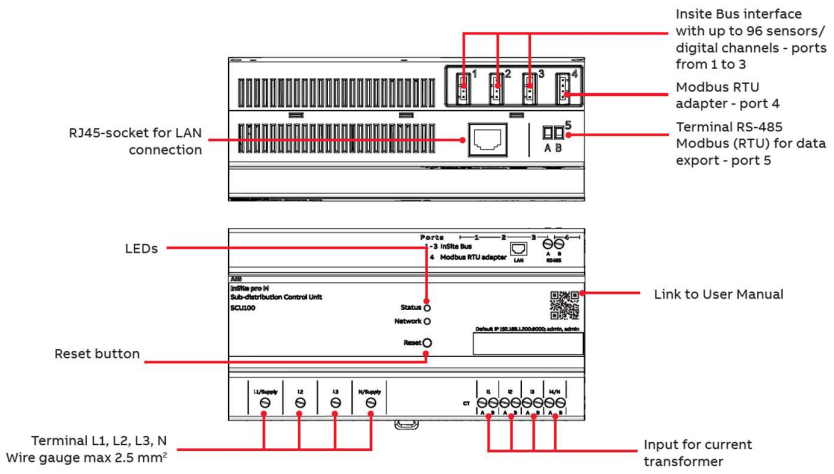
Tarkan kulutusdatan saamista mutkistaa se, että yksittäisiä kappaleita saatetaan kuumentaa useita kertoja haluttujen ominaisuuksien ja vaatimusten täyttämiseksi. Useimmiten kappale palautuu samaan uuniin, jossa kuumennus aloitettiin, mutta useiden etenkin suurten kappaleiden kohdalla lämmitystä voidaan jatkaa toisessa uunissa tuotannon sujuvuuden varmistamiseksi. Tämä heikentää yksiselitteisen, tuotantomääräkohtaisen energiankulutuksen kohdistuksen tarkkuutta. Raportointia voidaan kehittää tarkemmaksi, mutta kehityksessä on punnittava, missä määrin lisätarkkuus kasvattaa raportointiin tarvittavaa aikaa ja resursseja suhteessa saatavaan hyötyyn. Tuotannon kuumennusjärjestystä ei ole myöskään tarkoituksenmukaista muuttaa pelkästään raportoinnin sujuvuuden vuoksi.

Mittaroinnin asennus valmistui 9.1.2026, joten analysoitava tuotanto- ja energiankulutusdata otetaan tarkasteluun 12.1.2026 alkaen. Ensimmäisessä vaiheessa päästään tarkastelemaan kuumennusuunien sähkönkulutusta suhteessa yksikön kokonaissähkönkulutukseen. Alussa tarkastellaan myös uunikohtaista kulutusta suhteessa tuotantomäärään siinä tarkkuudessa

kuin tämänhetkinen raportointimalli mahdollistaa. Tuotantokohtainen kulutusanalyysi aloitetaan uunista, jossa tehdään taonnan jälkeiset lämpökäsittelyt.

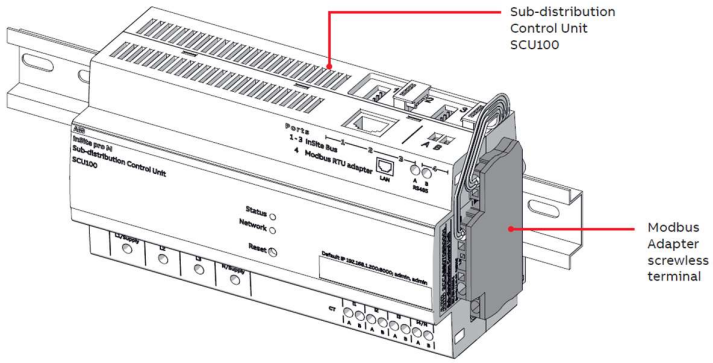
6.3 Mittarointijärjestelmä

ABB InSite Pro M -mittarointijärjestelmä rakentuu SCU100-ohjainyksikön (Kuva 2) varaan. Ohjainyksikkö toimii koko järjestelmän keskitettynä tiedonkeruuyksikkönä. Sen tehtävänä on vastaanottaa ja käsitellä siihen liitettyjen laitteiden tuottamat mittaustiedot. Järjestelmä tukee erilaisten mittauskomponenttien, kuten virta-antureiden, energiamittareiden ja I/O-moduulien liittämisen käyttötarpeen mukaan. (ABB n.d.)



Kuva 2 SCU100-ohjainyksikkö

Tässä työssä yksittäisten kuormien energiankulutus mitataan ABB M4M 20 -energiamittareilla, jotka on liitetty SCU100-yksikköön Modbus RTU-väylän (Kuva 3) kautta. Modbus-liikenne on toteutettu MA100-adaptereilla, mikä mahdollistaa useiden energiamittareiden kytkemisen samaan väylään. Käytetty mittarityyppi on ABB M4M 20 (Kuva 4). Järjestelmä ei sisällä erillisiä I/O-moduuleja, koska mittaus perustuu suoraan laitetasoiseen energiankulutuksen mittaukseen.



Kuva 3 Modbus RTU adapteri liitettynä ohjainyksikköön (ABB n.d.)

Kuva 4 ABB Energiamittari lähde Quick guide

Kokonaisuus sisältää integroidun verkkopalvelimen, jonka kautta voidaan hallita ja määritellä laitteiden hierarkioita, ryhmittelyä ja määrityksiä. Web-käyttöliittymässä käyttäjä voi tarkastella mittausarvoja reaaliaikaisesti sekä käsitellä tallennettua mittausdataa. Järjestelmä tukee myös vienti- ja tuontitoimintoja, jotka mahdollistavat mittaustietojen siirtämisen ulkoisiin analyysityökaluihin. (ABB n.d.)

Järjestelmään sisältyy myös sähköposti- ja FTP-lähetystoiminnallisuus, jonka avulla mittaustietoja voidaan siirtää automaattisesti järjestelmän ulkopuolelle jatkoanalyysia varten. Näiden toimintojen avulla on mahdollista luoda säännöllinen ja ajastettu datan vieminen

ilman manuaalisia toimenpiteitä. (ABB n.d.) Tämä tukee erityisesti pitkäaikaista energiankulutuksen seurantaa sekä analytiikan integrointia ulkoisiin raportointijärjestelmiin.

Mittausdata tallennetaan ohjainyksikön sisäiseen muistiin useilla eri aikatasoilla, mikä mahdollistaa sekä hetkellisten arvojen että pidemmän aikavälin energiankulutuksen tarkastelun. Järjestelmä tuottaa sekä raakadataa että valmiiksi laskettuja ja ajallisesti jäsenneltyjä mittaustietoja, kuten tunti- ja päivätason energiankulutusta. Tämä tukee erilaisten raportointitarpeiden toteuttamista. (ABB n.d.)

6.4 Datan siirtäminen

ABB InSite Pro M -mittarointijärjestelmä sisältää integroidut toiminnot mittausdatan siirtämiseksi järjestelmän ulkopuolelle. Datan siirto tapahtuu web-käyttöliittymän kautta määriteltävien vientiasetusten avulla, ja se voidaan toteuttaa toimimaan automaattisesti tietyin aikasyklein. Järjestelmä tukee mittaustiedon jatkokäsittelyä ja raportointia ulkoisissa analyysityökaluissa, kuten taulukkolaskentajärjestelmissä. Vientitoiminnot perustuvat järjestelmän tallentamaan mittaus- ja energiadataan, ja niiden avulla voidaan kerätä pitkän aikavälin seurantaan soveltuva aineisto. (ABB n.d.)

Mittarointijärjestelmä tukee mittausdatan lähettämistä sähköpostitse liitetiedostona. Web-käyttöliittymässä käyttäjä voi määritellä sähköpostipalvelimen (SMTP) asetukset, vastaanottajien sähköpostiosoitteet sekä ajastukset, jolla raportit muodostetaan ja lähetetään automaattisesti. (ABB n.d., 63) Sähköpostiviennin avulla mittaustietoa voidaan jakaa säännöllisesti ilman erillistä tiedonsiirtoratkaisua.

FTP-toiminto tukee mittausdatan siirtämistä ennalta määritellylle palvelimelle. InSite Pro M -järjestelmässä FTP-asetukset määritellään web-käyttöliittymässä, jossa käyttäjä syöttää palvelimen osoitteen, kirjautumistiedot sekä tiedonsiirtoon käytettävän hakemistorakenteen. Datan siirto voidaan ajastaa säännölliseksi, mikä tukee mittaustiedon jatkuvaa ja systemaattista keruuta. FTP-vienti tarjoaa keinon mittausdatan siirtämisen ulkoiselle palvelimelle jatkokäyttöä varten. (ABB n.d.) FTP-pohjaisen tiedonsiirron etuna on sen riippumattomuus yksittäisistä käyttäjistä sekä mahdollisuus keskitettyyn datan hallintaan. Tässä työssä mittarointijärjestelmän rooli on tuottaa luotettavaa dataa ja siirtää se järjestelmän ulkopuolelle.

Varsinainen analyysi, aikarajaukset ja tuotantopäivien määrittely toteutetaan järjestelmän ulkopuolella.

Järjestelmän tavoitteena oli siirtää energiankulutustiedot automaattisesti sähköpostin kautta jatkokäsittelyä varten. Käyttöönoton yhteydessä automaattisen tiedonsiirron määrittämistä ja käyttöönottoa selvitettiin laitevalmistajan ohjeiden mukaisesti. Automaattista tiedonsiirtoa ei saatu toimimaan työn aikana, minkä vuoksi mittausdata kerättiin manuaalisesti järjestelmän käyttöliittymästä analysointia varten. Tämä ei estänyt mittausdatan hyödyntämistä, mutta lisäsi datan keruuseen liittyvää työmäärää ja rajoitti raportoinnin automaatiotasoa.

6.5 Työn tavoitteet ja tutkimusongelma

Teollisuuden energiatehokkuuden kehittäminen edellyttää luotettavaa tietoa energiankulutuksen muodostumisesta sekä kulutukseen vaikuttavista tekijöistä. Takomon kuumennus- ja lämpökäsittelyuunit muodostavat merkittävän osan tuotannon sähkönkulutuksesta, mutta ennen tämän työn aloittamista uunikohtaista energiankulutustietoa ei ollut käytettävissä. Energiankulutusta voitiin tarkastella ainoastaan koko toimipaikan tasolla, mikä rajoitti mahdollisuuksia tunnistaa yksittäisten uunien kulutuskäyttäytymistä, ominaiskulutusta ja mahdollisia energiatehokkuuden kehittämiskohteita.

Tämän työn tavoitteena on toteuttaa kuumennus- ja lämpökäsittelyuunien energiankulutuksen mittarointi, luoda menettely mittausdatan keräämiseksi sekä arvioida millaista tietoa mittaroinnin avulla voidaan tuottaa energiankäytön hallinnan tueksi. Lisäksi tavoitteena on tarkastella uunikohtaista energiankulutusta suhteessa tuotantomääriin sekä muodostaa lähtötaso energiatehokkuuden kehittämistä ja tulevia investointeja varten.

Työn tutkimusongelma on

> Miten uunikohtainen energiankulutuksen mittaus tukee metalliteollisuuden energiankäytön hallintaa?

Tutkimusongelmaa tarkastellaan seuraavien alakysymysten avulla:

1. Miten energiankulutus jakautuu kuumennus- ja lämpökäsittelyuunien välillä?

2. Miten uunikohtaista energiankulutusta voidaan tarkastella suhteessa tuotantomääriin?
3. Mitä hyötyä uunikohtaisen energiankulutuksen mittaus tuottaa energiankäytön seurannassa ja analysoinnissa?

Työ rajataan koskemaan sähköllä toimivia kuumennus- ja lämpökäsittelyuuneja. Tarkastelu perustuu mittarointijärjestelmän käyttöönoton jälkeen kerättyyn energiankulutusdataan sekä tuotantomääriin. Työssä ei tarkastella kaasulämmitteisen uunin energiankulutusta eikä pyritä muodostamaan yksittäisten tuotteiden tarkkoja energiankulutusmalleja, vaan painopiste on uunitasoisen kulutuksen seurannassa ja analysoinnissa.

6.6 Tutkimusmenetelmät

Tämä työ on tapaustutkimus, jonka tutkimuskohteena on metalliteollisuuden kuumennus- ja lämpökäsittelyuunien energiankulutuksen mittarointi ja mittarointidatan hyödyntäminen energiankäytön tarkastelussa. Tutkimus toteutettiin käytännön kehitystyönä tuotantoympäristössä, jossa tavoitteena oli ottaa käyttöön uunikohtainen energiankulutuksen mittaus sekä muodostaa menettely mittaustiedon keräämiseksi, käsittelemiseksi ja analysoimiseksi.

Tutkimuksen aineisto koostuu ABB InSite Pro M -mittarointijärjestelmän keräämästä energiankulutusdatasta sekä tuotannon raportointijärjestelmistä saatavista tuotantotiedoista. Mittarien asennus valmistui tammikuussa 2026, minkä jälkeen uunikohtainen kulutuksen seuranta tuli mahdolliseksi. Tarkastelu kohdistuu sähköllä toimiviin uuneihin.

Mittausdata siirrettiin käyttöliittymästä käsin ulkoiseen analysointiympäristöön jatkokäsittelyä varten. Kulutustietoja käsiteltiin taulukkolaskentatyökalun avulla ja muodostettiin kulutusraportteja sekä tarkasteltiin kulutuksen käyttäytymistä eri aikajaksoilla. Analysoinnissa huomioitiin tuotantoympäristön erityispiirteet, joissa lämmitys aloitetaan useimmiten edellisenä iltana ja varsinainen tuotanto tapahtuu seuraavan työpäivän aikana. Tämän vuoksi energiankulutusta tarkasteltiin tuotantovuorokauden näkökulmasta pelkän kalenterivuorokauden sijaan.

Tutkimuksen analyysi perustuu kuvailevaan analyysiin, jossa tarkastellaan uunien energiankulutuksen jakautumista, kulutuksen kehitystä sekä energiankulutuksen suhdetta tuotantomääriin. Energiankulutusta tarkastellaan ominaiskulutuksen avulla suhteuttamalla

energiankulutus tuotettuihin kilogrammoihin. Lisäksi arvioidaan, millaista tietoa uunikohtainen mittaus tuottaa energiankäytön seurannan ja hallinnan tueksi.

Tutkimuksen tavoitteena ei ole todentaa yksittäisten energiatehokkuustoimenpiteiden vaikutuksia energiankulutukseen eikä muodostaa yksityiskohtaisia energiankulutusmalleja. Työn painopiste on uunikohtaisen energiankulutuksen mittaamisessa, mittausdatan käsittelyssä sekä sen tuottaman tiedon hyödyntämisessä metalliteollisuuden energiankäytön hallinnassa.

6.7 Tulosten pääkohdat

Mittarointijärjestelmän käyttöönoton jälkeen yksikön sähköuunien energiankulutusta voidaan tarkastella uunikohtaisesti. Mittausdatan perusteella sähköuunit muodostivat tarkastelujaksolla merkittävät osan toimipaikan sähkönkulutuksesta. Sähköuunien osuus vaihteli kuukausittain 66–74 prosentin välillä, mikä osoittaa, että kuumennus ja lämpökäsittelyprosessit ovat toimipaikan suurimpia sähkönkulutuskohteita.

Uunikohtainen tarkastelu osoittaa energiankulutuksen jakautuvan epätasaisesti eri uunien välillä. Suurin osa kulutuksesta kohdistuu uuneihin 2, 3 ja 6. Mittaroinnin ansiosta yksittäisten uunien jatkuva energiankulutuksen seuranta on mahdollista ensimmäistä kertaa.

Tulokset osoittavat yhteyden tuotantomäärän ja ominaiskulutuksen välillä. Tuotantomäärän kasvaessa ominaiskulutus pienenee ja tuotantomäärän laskiessa se kasvaa. Sama ilmiö näkyy sekä sähköuunien kokonaisuuden tarkastelussa että uuni 6:n erillisessä analyysissä. Havainto korostaa käyttöasteen merkitystä energiankulutuksen kannalta.

Työn keskeinen tulos on uunikohtaisen mittaroinnin käyttöönotto ja sitä kautta saavutettu mahdollisuus seurata energiankulutusta aiempaa tarkemmin. Mittausjärjestelmästä saadaan uunikohtaista tietoa energiankulutuksesta ja energiatehokkuustoimenpiteiden vaikutuksista sekä tietoa kunnossapito- ja investointitarpeiden arviointiin. Lisäksi energiankulutuksen muutokset voivat auttaa havaitsemaan poikkeamia uunien toiminnassa ja tukea kunnossapidon suunnittelua.

7 Tulosten läpikäyminen

Tässä luvussa tarkastellaan mittarointijärjestelmän käyttöönoton jälkeen kerättyä energiankulutusdataa ja sen perusteella tehtyjä havaintoja. Mittausdata kerättiin uunikohtaisilta energiamittareilta ja siirrettiin järjestelmästä jatkokäsittelyä varten taulukkolaskentaohjelmaan. Automaattista tiedonsiirtoa järjestelmästä ei saatu toimimaan työn aikana, joten aineisto ladattiin manuaalisesti järjestelmän käyttöliittymästä.

Mittarointijärjestelmä tallentaa energiankulutustiedot kalenterivuorokausittain, mutta tuotannon energiankulutus ei noudata samaa rytmiä. Kappaleiden esikuumennus aloitetaan tyypillisesti edellisenä iltana ja varsinainen tuotanto tapahtuu seuraavan työpäivän aikana. Lisäksi lämpökäsittelyprosessi vie aikaa muutaman vuorokauden. Tämän vuoksi mittausdataa tarkastellaan tarkoituksenmukaisina kokonaisuuksina eikä kalenterivuorokausien perusteella.

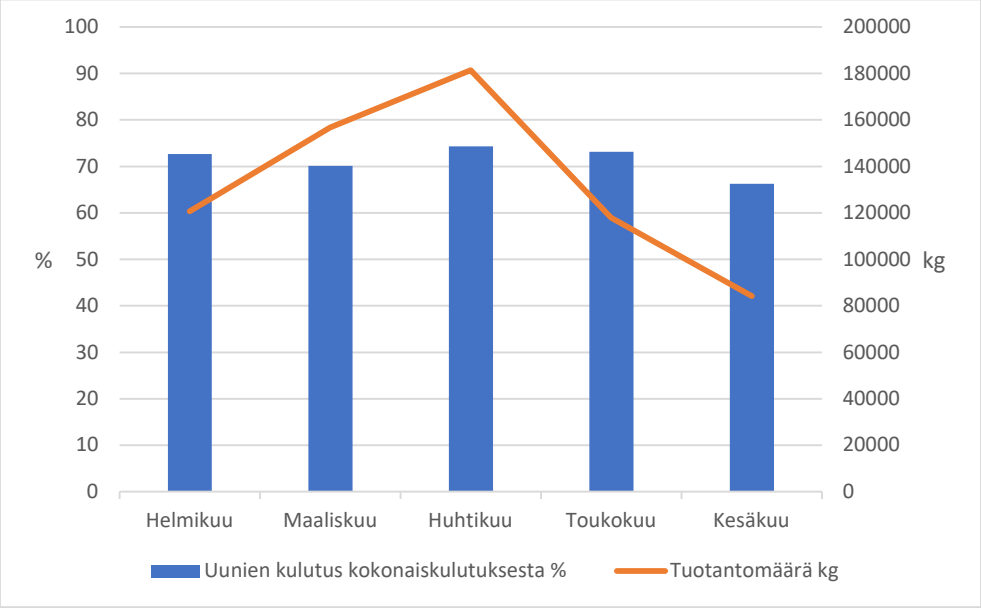
Analyysi aloitetaan tarkastelemalla sähköuunien osuutta toimipaikan kokonaisenergiankulutuksesta. Tämän jälkeen vertaillaan uunikohtaista energiankulutusta sekä tarkastellaan energiankulutuksen ja tuotantomäärien yhteyttä ominaiskulutuksen kautta. Uuni 6 energiankulutusta käsitellään tarkemmin, koska sen osalta on käytettävissä luotettavin tuotantomäärätieto.

7.1 Sähköuunien osuus toimipaikan sähkönkulutuksesta

Tarkastelujaksolla sähköuunien osuus toimipaikan kokonaissähkönkulutuksesta vaihteli 66–74 prosentin välillä. Tuloksen perusteella kuumennus- ja lämpökäsittelyprosessit muodostavat toimipaikan merkittävimmän sähkönkäyttökohteen. Ennen mittarointia sähkönkulutusta voitiin tarkastella ainoastaan toimipaikan tasolla, minkä vuoksi yksittäisten prosessiuunien vaikutus kokonaiskulutukseen jäi epäselväksi. Uunikohtainen kulutuksen mittaus auttaa nyt energiankäytön tehokkaassa seurannassa ja suurimpien kulutuskohteiden tunnistamisessa.

Sähköuunien osuuden havaittiin kasvavan suurimpien tuotantomäärien aikana (Kuva 5). Tämä viittaa siihen, että tuotannon volyymi vaikuttaa merkittävästi uunien energiankäyttöön. Tuotantomäärän ollessa suurimmillaan huhtikuussa myös sähköuunien osuus

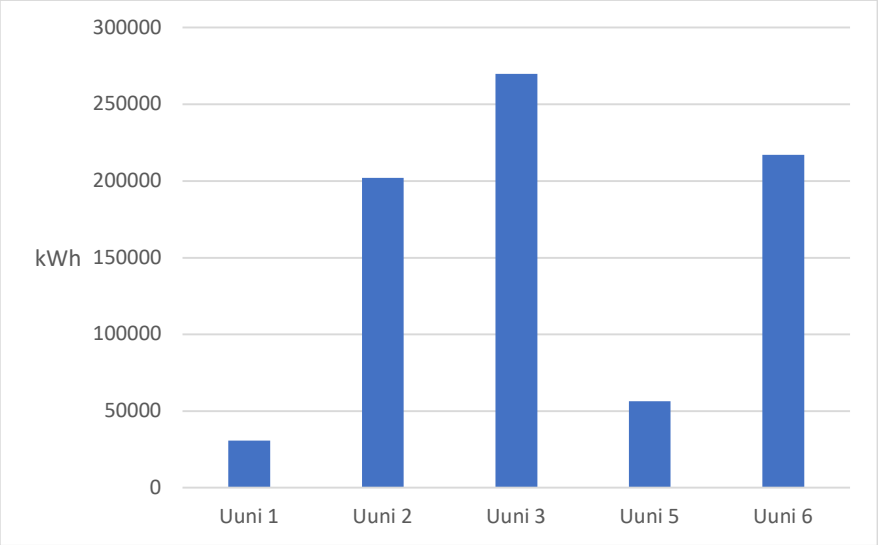
kokonaissähkönkulutuksesta saavuttaa korkeamman tason. Vastaavasti tuotantomäärän laskiessa kesäkuussa myös sähköuunien suhteellinen osuus kokonaissähkönkulutuksesta pienenee. Tarkastelujakso on kuitenkin suhteellisen lyhyt, minkä vuoksi tulosta tulee pitää suuntaa antavana.



Kuva 5 Sähköuunien osuus kokonaissähkönkulutuksesta suhteessa tuotantomäärään

7.2 Energiankulutuksen jakautuminen uuneittain

Uunikohtainen energiankulutuksen tarkastelu (Kuva 6) osoittaa, miten sähkönkulutus jakautuu epätasaisesti eri sähköuunien välillä. Suurin osa kulutuksesta kohdistuu uuneihin 2, 3 ja 6. Tämä havainto tukee näiden uunien suurta käyttöastetta sekä kapasiteettia tuotannossa. Energiankäytön tarkempi tarkastelu kannattaa kohdistaa jatkossa näihin suurimpiin kulutuskohteisiin.

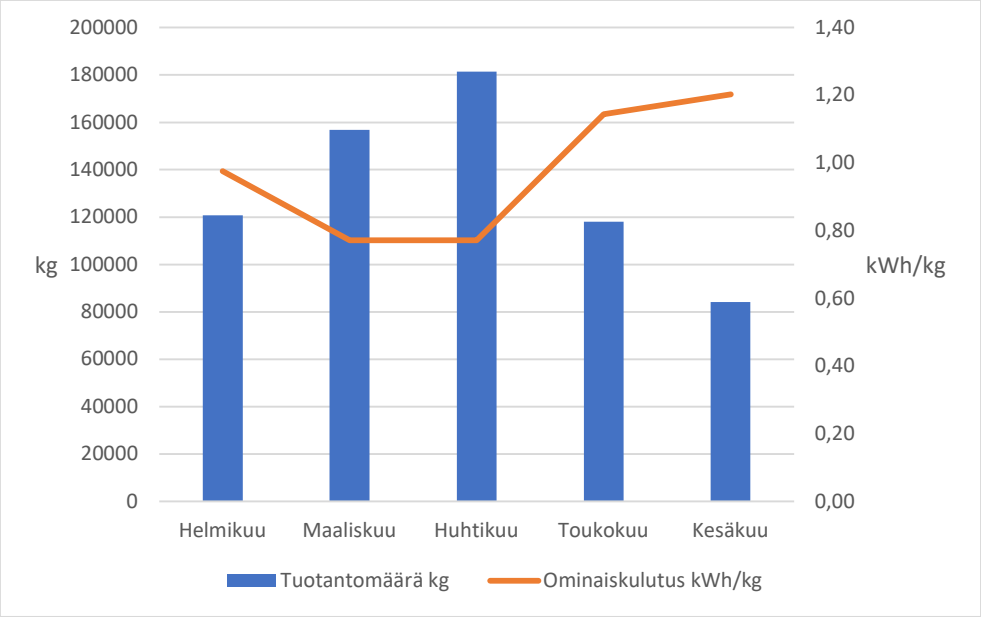


Kuva 6 Uunikohtainen kokonaiskulutus 11.1.-.9.7.2026

Mittaroinnin keskeinen hyöty näkyy erityisesti tässä tarkastelussa. Aiemmin käytettävissä oleva toimipaikkakohtainen sähkönkulutustieto ei mahdollistanut yksittäisen uunien vertailua. Mittaroinnin avulla voidaan jatkossa seurata esimerkiksi kunnossapitotoimenpiteiden, käyttöasteiden muutosten tai energiatehokkuustoimien vaikutuksia yksittäisten uunien energiankulutukseen.

7.3 Tuotantomäärän vaikutus energiankulutukseen

Tarkastelujakson perusteella tuotantomäärän ja ominaiskulutuksen välillä havaittiin selkeä yhteys (Kuva 7). Tuotantomäärän kasvaessa ominaiskulutus pieneni ja tuotantomäärän laskiessa ominaiskulutus kasvoi. Erityisesti huhtikuussa tuotantomäärä oli suurimmillaan, kun ominaiskulutus saavutti tarkastelujakson alhaisimpia arvoja.



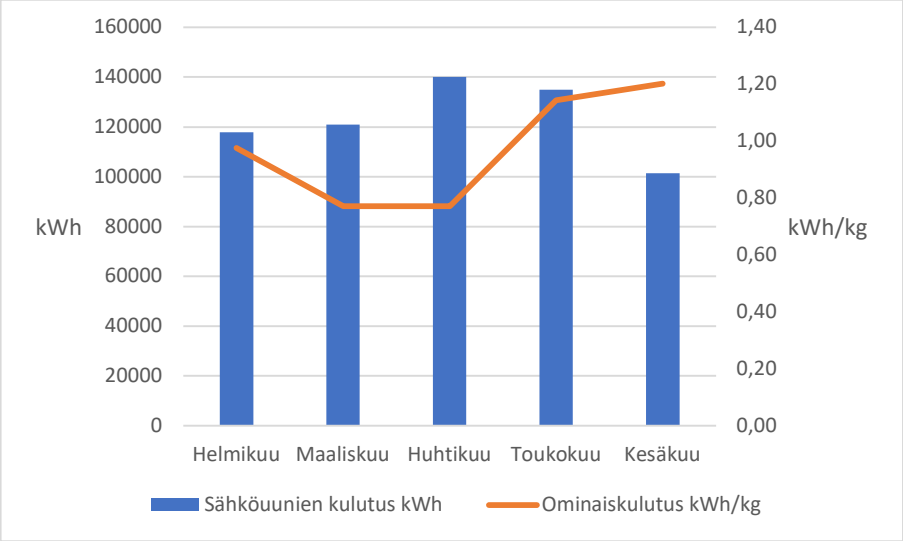
Kuva 7 Tuotantomäärä ja ominaiskulutus

Tulos on looginen kuumennusprosesseissa, joissa osa energiankulutuksesta muodostuu tuotantomäärästä riippumattomasta peruskuormasta. Toukokuussa ja erityisesti kesäkuussa tuotantomäärä laski selvästi samalla, kun ominaiskulutus nousi yli 1,1 kWh/kg tasolle. Ominaiskulutuksen kasvu tuotantomäärän pienentyessä osoittaa, että osa uunien energiankulutuksesta muodostuu tuotantomäärästä riippumattomasta peruskuormasta. Energiaa tarvitaan esimerkiksi uunien lämpötilan ylläpitoon ja käyttövalmiuden ylläpitämiseen riippumatta siitä, miten paljon tuotantoa uunien kautta kulkee. Kun tuotantomäärä kasvaa, tämä energiankulutus jakautuu suuremmalle tuotantomäärälle.

On huomioitava, että tarkastelu perustuu koko kuumennusuunien kokonaisuuteen. Tuotantomääriin sisältyy nykyisellä raportointitavalla myös kaasu-uunin kautta kulkeva tuotanto, minkä vuoksi ominaiskulutus ei kuvaa sähköuunien todellista ominaiskulutusta. Tulosta voidaan siten käyttää suuntaa antavana mittarina tuotannon volyymin ja energiankäytön välisestä yhteydestä. Se on myös hyvä seurantaluku tässä toimipaikassa niin kauan kuin uunien määrä ja käyttöaste pysyvät nykyisellään.

Vaikka sähköuunien kokonaiskulutus vaihteli kuukausittain melko maltillisesti, ominaiskulutuksessa havaittiin (Kuva 8) huomattavasti suurempaa vaihtelua. Tämä osoittaa, ettei energiankulutuksen tarkastelu pelkän kokonaiskulutuksen perusteella anna riittävää kuvaa

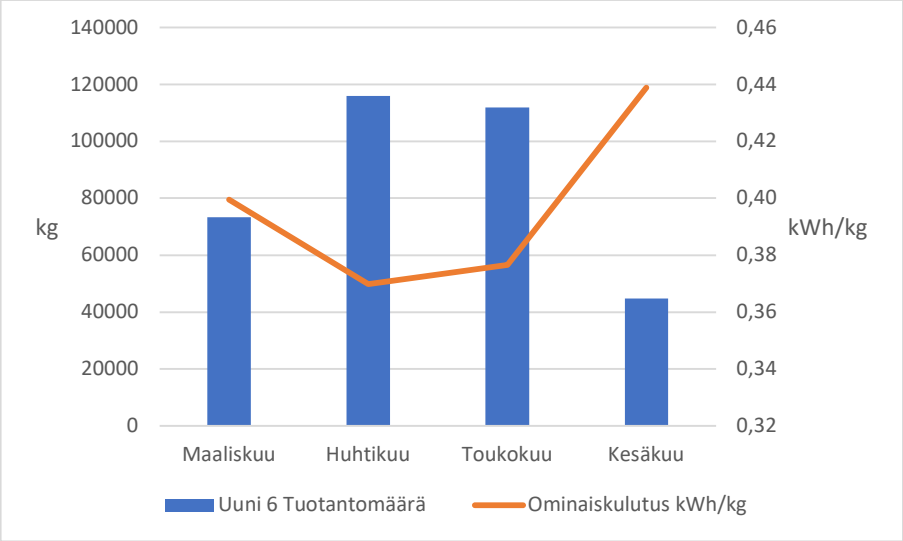
energiatehokkuudesta. Ominaiskulutus reagoi voimakkaasti tuotantomäärien muutoksiin ja soveltuu siksi paremmin eri ajanjaksojen vertailuun.



Kuva 8 Sähköuunien kulutus ja ominaiskulutus

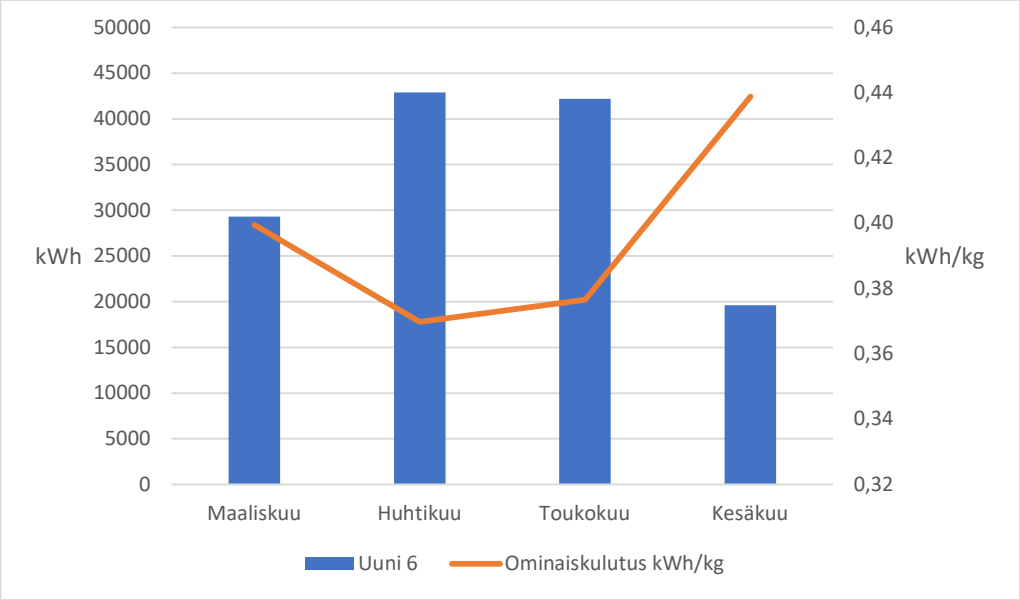
7.4 Uuni 6:n tarkastelu

Uuni 6:n tarkastelu tarjoaa muita uuneja luotettavamman näkymän energiankulutuksen ja tuotantomäärän väliseen yhteyteen, koska lämpökäsittelyprosessi mahdollistaa tuotantomäärien kohdistamisen kyseiseen uuniin tarkasti. Tulokset osoittivat saman ilmiön kuin sähköuunien kokonaistarkastelussa. Tuotantomäärien kasvaessa ominaiskulutus pieneni ja päinvastoin. Huhtikuussa havaittiin samanaikaisesti korkein tuotantomäärä ja alhaisin ominaiskulutus (Kuva 9). Tulos viittaa siihen, että uunin energiankäyttö tehostuu, kun uunin kapasiteettia hyödynnetään paremmin.



Kuva 9 Uuni 6: Tuotantomäärä ja ominaiskulutus

Uuni 6:n sähkönkulutuksen ja ominaiskulutuksen vertailu tuo esiin eron kokonaiskulutuksen ja energiatehokkuuden välillä. Sähkönkulutus oli suurimmillaan huhtikuussa ja toukokuussa, jolloin myös tuotantomäärät olivat korkeita ja ominaiskulutus alhaisella tasolla (Kuva 10). Kesäkuussa sähkönkulutus laski selvästi, mutta samalla ominaiskulutus nousi tarkastelujakson korkeimmaksi. Havainto osoittaa, että energiankulutuksen tarkastelu pelkästään kokonaiskulutuksen perusteella voi johtaa virheellisiin johtopäätöksiin energiatehokkuudesta. Energiankäyttöä on tarkasteltava suhteessa tuotantomäärään, jolloin käyttöasteen vaikutus tulee näkyviin. Tämän vuoksi ominaiskulutus soveltuu kokonaiskulutusta paremmin eri ajanjaksojen ja käyttötilanteiden vertailuun.



Kuva 10 Uuni 6: Sähkönkulutus ja ominaiskulutus

Tulosten perusteella uunikohtainen mittarointi tuottaa sellaista tietoa, mitä ei ole aiemmin ollut käytettävissä. Mittarointi mahdollistaa energiankulutuksen kohdistamisen yksittäisille uuneille sekä energiankulutuksen tarkastelun suhteessa tuotantomääriin. Mittaustiedon avulla energiankäytön kehittäminen voidaan jatkossa perustaa mitattuun tietoon aiempaa tarkemmin.

Tulokset osoittavat, että käyttöasteella on merkittävä vaikutus ominaiskulutukseen. Havainto tukee kirjallisuudessa esitettyä näkemystä käyttöasteen merkityksestä kuumennusprosessien energiatehokkuudessa. Tuloksen perusteella uunin käyttöasteella voidaan arvioida olevan merkittävä vaikutus energiankulutukseen tuotettua yksikköä kohden. (Motiva 2015).

8 Yhteenveto ja johtopäätökset

Teollisuuden energiankäytön kehittäminen edellyttää luotettavaa mittaustietoa, missä ja miten energiaa käytetään (Motiva 2015). Tässä työssä tarkasteltiin kuumennus- ja lämpökäsittelyuunien energiankulutuksen mittarointia sekä mittaustiedon hyödyntämismahdollisuuksia energiankulutuksen hallinnassa. Työn keskeiset johtopäätökset, rajoitteet ja kehitysmahdollisuudet esitetään seuraavissa alaluvuissa.

8.1 Keskeiset johtopäätökset

Työn tavoitteena oli toteuttaa kuumennus- ja lämpökäsittelyuunien energiankulutuksen mittarointi, luoda menettely mittausdatan keräämiseksi sekä arvioida, millaista tietoa mittaroinnin avulla voidaan tuottaa energiankäytön hallinnan tueksi. Tavoitteena oli muodostaa lähtötaso energiatehokkuuden kehittämistä ja tulevia investointeja varten sekä tarkastella energiankulutusta suhteessa tuotantomääriin.

Työlle asetetut tavoitteet saavutettiin osittain. Työn alkuperäisenä tavoitteena oli automatisoida mittausdatan kerääminen siten, että energiankulutustiedot siirtyisivät automaattisesti mittarointijärjestelmästä tuotantotiedon ulkoiseen raportointityökaluun. Työn aikana automaattista tiedonsiirtoa ei saatu toimimaan suunnitellulla tavalla, minkä vuoksi data kerättiin manuaalisesti. Vaikka tavoite tiedonsiirron automatisoinnista ei toteutunut, saatiin mittarointi käyttöön ja uunikohtainen kulutuksen seuranta mahdollistettua.

Käyttöön otettu mittarointi jää tuotannon käyttöön. Mittarit keräävät jatkuvasti uunikohtaista kulutustietoa, jota voidaan hyödyntää tulevassa energiankulutuksen seurannassa. Energiankäytön pitkäjänteinen tarkastelu on nyt mahdollista ja se tukee energiatehokkuustoimenpiteiden, kunnossapitotoimien ja investointien vaikutusten arviointia tulevaisuudessa.

Tulosten perusteella sähköuunit muodostavat merkittävän osan toimipaikan sähkönkulutuksesta. Mittaroinnin avulla energiankulutus voidaan kohdistaa yksittäisille uuneille, jolloin suurimmat kulutuskohteet ja niiden osuus kokonaiskulutuksesta voidaan tunnistaa aiempaa paremmin.

Energiankulutus jakautui tarkastelujaksolla epätasaisesti eri uunien välillä. Suurin osa sähköuunien energiankulutuksesta kohdistui uuneihin 2, 3 ja 6, kun taas muiden uunien osuus jäi selvästi pienemmäksi. Erot selittyvät uunien erilaisilla käyttötarkoituksilla, kapasiteeteilla ja käyttöasteilla. Mittaroinnin avulla energiankulutuksen jakautuminen voitiin tunnistaa ensimmäistä kertaa uunikohtaisella tasolla.

Työssä havaittiin selkeä yhteys tuotantomäärän ja ominaiskulutuksen välillä. Tuotantomäärän kasvaessa ominaiskulutus pieneni ja päinvastoin tuotantomäärän laskiessa kasvoi. Sama ilmiö näkyi kaikkien sähköuunien kokonaistarkastelussa sekä uuni 6:n yksityiskohtaisemmassa analyysissä. Käyttöaste ja kuormitus vaikuttavat siis merkittävästi kuumennusprosessien energiankäyttöön.

Työssä käyttöön otettu mittarointi antaa mahdollisuuden energiankulutuksen pitkäjänteiseen seurantaan ja vertailuun tulevaisuudessa. Tämä on hyvä lähtötaso tulevalle kehitystyölle. Jatkossa kerättävää mittausdataa voidaan hyödyntää esimerkiksi ominaiskulutuksen seurannassa, energiatehokkuustoimenpiteiden vaikutusten arvioinnissa sekä energiankäytön poikkeamien tunnistamisessa. Mitä pitemmältä ajanjaksolta tietoa kertyy, sitä paremmin energiankulutuksen kehitystä voidaan verrata tuotantomääriin ja tuotannon muutoksiin.

Tutkimusongelmana oli selvittää, millaista tietoa uunikohtainen energiankulutuksen mittaus tuottaa metalliteollisuudessa energiankäytön hallinnan tueksi. Työn perusteella mittarointi tuottaa tietoa energiankulutuksen jakautumisesta, ominaiskulutuksesta sekä tuotantomäärien vaikutuksesta energiankäyttöön. Näiden tietojen avulla energian käyttöä voidaan seurata aiempaa tarkemmin ja päätöksenteko voidaan perustaa mitattuun tietoon arvioiden sijaan.

Työssä saadut tulokset ovat samansuuntaisia aiemman tutkimuksen kanssa. Kirjallisuudessa on korostettu mittaamisen merkitystä energianhallinnan perustana sekä käyttöasteen vaikutusta kuumennusprosessien ominaiskulutukseen (Motiva 2015; Lawrence et al. 2019). Tässä työssä tehdyt havainnot tukevat näitä näkemyksiä. Erityisesti tuotantomäärän ja ominaiskulutuksen välinen yhteys näkyi selvästi tarkastelujaksolla, mikä tuo esiin käyttöasteen merkitystä kuumennusuunien energiankäytössä.

Laajemmasta näkökulmasta tarkasteltuna työn merkitys liittyy teollisuuden energiatehokkuuden kehittämiseen. Teollisuuden energiankäyttöä koskevat tavoitteet, kustannuspaineet ja päästövähennysvaatimukset edellyttävät aiempaa tarkempaa tietoa energiankulutuksen muodostumisesta. Käytännön kehitystyötä on vaikea kohdistaa oikein ilman luotettavaa

mittaustietoa. Energiankulutuksen mittaus tuottaa tätä tietoa päätöksenteon tueksi. (Motiva 2015; IEA 2025b.)

Työn aikana havaittiin myös kehityskohteita, joista merkittävin liittyy tiedonsiirron automatisointiin. Mittausdata saatiin kerättyä ja analysoitua, mutta automaattinen tiedonsiirtyminen mittarointijärjestelmästä raportointityökaluun ei toteutunut. Automaattinen tiedonsiirto vähentäisi manuaalista työtä ja mahdollistaisi tiedon hyödyntämisen tehokkaammin osana päivittäisiä töitä.

Jatkon kannalta kiinnostava tutkimusaihe olisi mittausdatan yhdistäminen suoraan tuotantotietoihin esimerkiksi toiminnanohjausjärjestelmän kautta. Tällöin ominaiskulutuksen seuranta voitaisiin toteuttaa ilman manuaalisia käsittelyvaiheita. Pidemmän aikajänteen mittausaineisto tekee mahdolliseksi myös energiankulutuksen, käyttöasteen, tuotantomäärien ja kunnossapitotoimenpiteiden välisten yhteyksien tarkemman tarkastelun.

8.2 Työn rajoitteet

Työn keskeinen rajoite liittyy tuotantotiedon ja energiankulutuksen väliseen kohdistamiseen. Uunien tuotantomääräinen energiankulutuksen analysointi toisi lisää tietoa siitä, miten energiaa kuluu prosessin eri vaiheissa, mutta nykyisellä tuotantotavalla tarkan datan kerääminen ei onnistu. Sama kappale voidaan kuumentaa taonnan aikana useammassa eri uunissa ja välikuumennusten tarve vaihtelee kappaleittain. Tämän vuoksi energiankulutusta ei voida kohdistaa luotettavasti yksittäisille kappaleille tai tuotantoerille uunikohtaisella tasolla.

Uuni 6 poikkeaa käyttötavaltaan muista uuneista. Siinä suoritettava lämpökäsittelypanos ladataan kerran eikä kappaleita siirretä pois uunista kesken käsittelyn. Tuotantomäärä voidaan siis määrittää riittävällä tarkkuudella ominaiskulutuksen laskentaa varten.

Tarkempi energiankulutuksen kohdistaminen edellyttäisi nykyistä yksityiskohtaisempaa tietoa kappaleiden kulusta tuotantoprosessissa. Tarkemman tiedon kerääminen lisäisi käytännössä manuaalisen raportoinnin määrää tuotannossa ja siten kasvattaisi mahdollisesti työaikaa. Tämän vuoksi tarkemman tiedon tarpeen ja sen keräämisestä aiheutuvan työmäärän välistä tasapainoa on arvioitava tapauskohtaisesti. Tuotannon kannalta tiedon keruun lisäämisen on aina oltava hyvin perusteltua ja sen on oltava taloudellisesti kannattavaa.

8.3 Jatkotutkimusaiheet

Työssä käyttöönotetuilla kulutusmittareilla voidaan seurata uunikohtaista sähkönkulutusta. Energiadatan hyödyntämistä voidaan edelleen kehittää yhdistämällä sitä tarkemmin tuotannonohjausjärjestelmistä saatavaan tietoon. Toimipaikalle tuleva uusi tuotannonohjausjärjestelmä tarjoaa tähän mahdollisuuden. Jatkossa olisi perusteltua selvittää, miten tuotantotiedot ja energiankulutusdata voitaisiin yhdistää automaattisesi samaan raportointijärjestelmään siten, että energiankulutusta voitaisiin tarkastella entistä tarkemmin suhteessa yksittäisiin tuotantoeriin ja tuotantomääriin.

Yksi mahdollinen kehityssuunta olisi lisätä tuotannonohjausjärjestelmään erillinen tuotantovaihe, esimerkiksi ”esilämmitys”. Tällöin kappaleiden siirtyminen kuumennusuuneihin kirjattaisiin järjestelmään jo ennen varsinaista taontaa. Näin energiankulutusdata voitaisiin yhdistää tarkemmin uunissa käsiteltyihin tuotantoeriin ja niiden massoihin. Tämän avulla olisi mahdollista muodostaa nykyistä luotettavampia ominaiskulutuslukuja sekä tarkastella energiankäytön vaihtelua eri tuotteiden, kuormitusten ja tuotantotilanteiden välillä.

Toinen merkittävä jatkokehityskohde on raportoinnin automatisointi. Työn aikana mittausdata jouduttiin keräämään manuaalisesti, koska automaattista tiedonsiirtoa ei saatu toimimaan suunnitellulla tavalla. Automaattinen tiedonsiirto sekä raporttien automaattien muodostaminen vähentäisivät manuaalista työtä, parantaisivat tiedon saatavuutta ja mahdollistaisivat energiankulutuksen seurannan osana päivittäistä johtamista.

Mielenkiintoinen tutkimusaihe olisi myös tuotannon käytännön seuranta energiankulutuksen näkökulmasta. Tutkija voisi seurata tuotantoa paikan päällä ja kerätä havaintoja esimerkiksi taontavaiheiden kestosta, uudelleen kuumennusten määrästä, uunien ovien käyttöajoista, odotusajoista sekä kuormien täyttöasteista. Näitä havaintoja voitaisiin verrata samanaikaisesti kerättyyn sähköenergiankulutusdataan. Tällainen tutkimus auttaisi tunnistamaan käytännön tuotantotilanteita, jotka vaikuttavat eniten energiankulutukseen, ja tarjoaisi tarkempaa tietoa energiatehokkuuden ja taloudellisten tuotantotapojen kehittämisen tueksi.

Tulevaisuudessa mittausdatan, tuotantotiedon ja automaattisen raportoinnin yhdistäminen voisi tarkentaa energiankulutuksen seurantaa. Kun energiankulutus voitaisiin yhdistää automaattisesti tuotannon tapahtumiin ja tuotantomääriin, kulutuksen muodostumista olisi mahdollista tarkastella nykyistä yksityiskohtaisemmin. Tällöin voitaisiin seurata esimerkiksi

tuotantoerien, kuumennusjaksojen ja yksittäisten uunien ominaiskulutuksen vaihtelua. Tuotannon työntekijät voisivat seurata, miten tuotantomäärät, uunien käyttö ja ajotavat vaikuttavat energiankulutukseen. Pidemmällä aikavälillä tämä tieto auttaisi arvioimaan ja tunnistamaan energiatehokkaita toimintatapoja.

Lähteet

Acer. (2020). Harmonisation of Imbalance Settlement. Agency for the Cooperation of Energy Regulators. Viitattu 28.4.2026. Saatavissa: https://www.acer.europa.eu/electricity/market-rules/electricity-balancing/harmonisation-of-imbalance-settlement

Aries, E., Gómez Benavides, J., Mavromatis, S., Klein, G., Chronopoulos, G. & Roudier, S. (2022). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Ferrous Metals Processing Industry. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Viitattu 28.4.2026. Saatavissa: https://doi.org/10.2760/196475

Componenta. (2023a). Takomo. Viitattu. 30.4.2026. Saatavissa: https://www.componenta.com/tuotteet-ja-palvelut/takomo/

Componenta (2023b) Yritys. Viitattu 30.4.2026. Saatavissa: https://www.componenta.com/yritys/

Energiatehokkuussopimukset. (2025.) Energiatehokkuussopimukset 2026–2035. Viitattu 9.1.2026. Saatavissa: https://energiatehokkuussopimukset.fi/

Bao, X., Xu, J., Chen, C., Chen, X., Zhang, H-g., Shen, Y-m & Zhai, W. (2023). Mechanism and application of an online intelligent evaluation mode for energy consumption of a reheating furnace. Journal of Steel Research International. 30:102-111. Viitattu 10.2.2026. Saatavissa: https://doi.org/10.1007/s42243-022-00801-8

Bisht, P.S., Gopalakrishnan, B., Dahal, R., Li, H. & Liu, Z. (2024). Parametric Energy Efficiency Impact Analysis for Industrial Process Heating Furnaces Using Manufacturing Energy Assessment Software for Utility Reduction. Processes, 12, 737. Viitattu 30.1.2026. Saatavissa: https://doi.org/10.3390/pr12040737

Fawkes, S., Oung, K. & Thorpe, D. (2016). Best Practices and Case Studies for Industrial Energy Efficiency Improvement. Copenhagen Centre on Energy Efficiency. Saatavissa: ISBN:978-87-93130-81-4.

IEA. (2023a). Electricity Market Report 2023. International Energy Agency. Viitattu 29.4.2026. Saatavissa: https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-2023

IEA. (2023b). Finland 2023 – Executive Summary. International Energy Agency. Viitattu 19.12.2025. Saatavissa: https://www.iea.org/reports/finland-2023/executive-summary

IEA. (2025a). Energy Efficiency 2025. International Energy Agency. Viitattu 24.4.2026. Saatavissa: https://iea.blob.core.windows.net/assets/23a80bb2-6985-4507-ab99-c1d700f6548b/EnergyEfficiency2025.pdf

IEA. (2025b). Energy Management for Industry – Driving Efficiency Implementation. International Energy Agency. Viitattu 6.2.2026. Saatavissa: https://iea.blob.core.windows.net/assets/1247db6a-69ea-46d8-8156-1a79845c9629/Energy_Management_for_Industry.pdf

Kaya, D., Kılıç, F.C. & Öztürk, H.H. (2021). Energy Management and Energy Efficiency in Industry – Practical Examples. Springer. Viitattu 17.10.2025 Saatavissa: https://doi.org/10.1007/978-3-030-25995-2

Lawrence, A., Thollander, P., Andrei, M. & Karlsson, M. (2019). Specific Energy Consumption/Use (SEC) in Energy Management for Improving Energy Efficiency in Industry: Meaning, Usage and Differences. Energies 2019. Viitattu 28.1.2026. Saatavissa: https://doi.org/10.3390/en12020247

Ministry of Economic Affairs and Employment of Finland. (2024). Finland´s Integrated National Energy and Climate Plan Update. Publications of the Ministry of Economic Affairs and Employment 2024:30. Viitattu 19.12.2025. Saatavissa: https://commission.europa.eu/document/download/069886e9-7a50-4df1-b523-9eb7bf7308c3_en?filename=FI_FINAL%20UPDATED%20NECP%202021-2030%20%28English%29.pdf

Motiva. (2024). Sähköistämällä energiatehokkuutta teollisuudessa: kirjallisuusselvitys. Helsinki: Motiva Oy. Viitattu 28.4.2026. Saatavissa: https://www.motiva.fi/tietopankki/sahkoistamalla-energiatehokkuutta-teollisuudessa-kirjallisuusselvitys/

Motiva. (2015). Teollisuusuunien energiatehokkuus. Helsinki: Motiva Oy. Viitattu 17.10.2025. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/9813/Energiatehokas_teollisuusuuni_opas.pdf

Nord Pool. (2025). Transition to 15-minute Market Time Unit (MTU). Viitattu 29.4.2026. Saatavissa: https://www.nordpoolgroup.com/en/trading/transition-to-15-minute-market-time-unit-mtu/

Rozite, V., Mooney, E. Matthew, C. (2025). Industrial facilities could save billions by implementing energy management. International Energy Agency. Viitattu 9.1.2026. Saatavissa: https://www.iea.org/commentaries/industrial-facilities-could-save-billions-by-implementing-energy-management

Tilastokeskus. (2024). Energian hankinta ja kulutus. Suomen virallinen tilasto. Viitattu 28.4.2026. Saatavissa: https://stat.fi/tilasto/ehk

United Nations. (2015). Transforming our world: the Agenda for Sustainable Development. Viitattu 19.12.2025. Saatavissa: https://sdgs.un.org/2030agenda

U.S. Department of Energy. (2016.) Improving Process Heating System Performance: A Sourcebook for Industry. 3. painos. Washington. Viitattu 28.1.2026. Saatavissa: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/04/f30/Improving%20Process%20Heating%20System%20Performance%20A%20Sourcebook%20for%20Industry%20Third%20Edition_0.pdf