



# **SUURIEN AINEVAHVUUKSIEN ESILÄMMITTÄMISEN JA HITSAAMISEN ENERGIATEHOKKUUS**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2024

Janne Köymäri

Tarkastajat: Tutkijaopettaja Aki Grönman

Tutkijatohtori Sakari Penttilä

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Janne Köymäri

### **Suurien ainevahvuuksien esilämmittämisen ja hitsaamisen energiatehokkuus**

Energiatekniikan diplomityö

2024

94 sivua, 31 kuvaa, 11 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastajat: Tutkijaopettaja Aki Grönman ja tutkijatohtori Sakari Penttilä

Avainsanat: esilämmitys, energiatehokkuus, jauhekaarihitsaus, kaasu, induktio, tuulivoima

Tuulivoimaloiden runkoja ja meriperustuksia valmistetaan usein hitsaamalla suuria lieriöitä yhteen. Teräksen ainevahvuus näissä lieriöissä on usein merkittävän suuri. Koko ainevahvuuden läpäisevän tunkeuman saavuttamiseksi, on liitoskohtaan työstettävä lähes koko materiaalin läpi leikkaava hitsausrailo. Hitsauslaadun varmistamiseksi hitsausrailo tulee ennen täyteen hitsaamista esilämmittää noin 70–120°C lämpötilaan. Yksittäisen lieriömäisen kapaleen koko piirin kattavan hitsausrailon täyttöhitsaamisessa hitsausmatkaa kertyy useita kilometrejä. Tässä diplomityössä keskityttiin tutkimaan tällaisten hitsausrailojen esilämmittämisen ja hitsaamisen energiatehokkuuksia.

Diplomityön tutkimusaineiston keräämiseksi suoritettiin kenttätutkimuksia, joissa teräskapale lämmitettiin 100°C lämpötilaan eri lämmitysmenetelmillä. Tutkitut lämmitysmenetelmät olivat happi-asetyleeniliekki ja induktiolämmitys. Maakaasun käyttöä polttokaasuna tutkittiin myös eri tapaustutkimusten avulla. Polttokaasukäyttöisten polttimien käyttäminen edustaa yleisintä lämmitysmenetelmää suurien ainevahvuuksien esilämmittämisessä. Induktiolämmitys on uudempi menetelmä, jonka energiatehokkuutta haluttiin tutkia perinteisiin polttokaasuihin verrattuna. Diplomityössä tutkittiin myös hitsaamisen energiatehokkuutta tuottavuuden kontekstissa, eli kulutetun energian suhdetta tuotetun hitsin määrään.

Tutkimusaineiston perusteella induktiomenetelmän laskettiin olevan menetelmistä energiatehokkain. Kulutus oli 25 % happi-asetyleeniä ja 84 % maakaasua pienempi. Hitsaustesteissä pitkällä vapaalangalla saavutettiin 51 % enemmän lisäaineentuottoa tavanomaiseen hitsauspolttimeen verrattuna lähes samalla energiankulutuksella. Energiansäästöpotentiaali laskettiin myös yksittäisen monopile-perustuksen osalta. Tehokkaimman lämmitys-hitsausyhdistelmän laskettiin kuluttavan 71 % vähemmän energiaa eniten kuluttavaan yhdistelmään verrattuna. Kokonaisen monopile-perustuksen kokoonpanossa tämä merkitsisi 278 MWh säästöä energiankulutuksissa.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Janne Köymäri

### **The energy efficiency of preheating and welding high material thicknesses**

Master's thesis

2024

94 pages, 31 figures, 11 tables and 2 appendices

Examiners: Associate professor Aki Grönman and Post-doctoral researcher Sakari Penttilä

Keywords: preheating, energy efficiency, submerged arc welding, gas, induction, wind power

Wind turbine frames and offshore foundations are often manufactured by welding large cylinders together. Material thickness of steel is usually substantially high in these cylinders. A groove needs to be machined for the welding joint to achieve complete welding penetration throughout the material thickness. Before filling the groove by welding it needs to be preheated to a temperature of approximately 70–120°C to ensure welding quality. Filling a single cylinder's circumferential groove by welding accounts for several kilometres of welding. This thesis focuses on studying the energy efficiency of preheating and welding such grooves with different methods.

Field studies with different heating methods were conducted to gather research data. In these studies, a solid steel piece was heated to a 100° temperature. The studied methods were an open flame with oxygen-acetylene and induction. Using natural gas as a fuel was also studied by utilizing different case studies as a reference. Open flame represents the most common method in preheating high material thicknesses. Induction heating depicts a more modern method and its energy efficiency was compared to open flame. Deposit of welding and its relation to energy consumption was seen as energy efficiency of welding.

Induction was rated as the most energy efficient heating method based on the research data. The consumption of induction was 25 % smaller compared to oxygen-acetylene and 84 % smaller compared to natural gas. 51 % increase in welding deposit was achieved with almost equal energy consumption by using a long stick out welding torch compared to a traditional one. Energy saving potential was also calculated for a single offshore foundation assembly. The most energy efficient heating-welding combination was calculated to consume 71 % less energy compared to the most consumptive combination. In case of a single monopile assembly this accounts for 278 MWh savings in energy consumptions.

## KIITOKSET

Lienee tavanomaista todeta tällaisten töiden yhteydessä, etteivät ne olisivat ikinä nähneet päivänvaloa ilman kirjoittajana saamaa tukea ympäröivältä yhteisöltään. Tällaisten tutkimustöiden tekeminen kuitenkin osoittaa sen aina yhtä todeksi. Työ olisi moneen otteeseen hidastunut tai jäänyt kokonaan tauolle ilman läheisten ja työyhteisön tuomaa tukea ja kannustusta.

Haluan kiittää työn valmistumisesta kaikkia siihen koulun puolesta osallistuneita ja kollegoitani Pemamekillä. Erityinen kiitos LUT:n henkilökunnasta kuuluu työn tarkastajille Aki Grönmanille ja Sakari Penttilälle. Positiivinen ja rakentava palaute kannusti jatkamaan työtä laadukkaasti ja lipsumatta. Pemamekiltä haluan kiittää etenkin Antti Kemppaista, Teemu Tolosta, Pekka Rusia, Arimo Åbergia ja kaikkia muita kenttätutkimuksissa ja pohdinnoissa auttaneita.

Turussa 31.1.2024

*Janne Köymäri*

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset

|            |                          |                   |
|------------|--------------------------|-------------------|
| $A$        | pinta-ala                | [m <sup>2</sup> ] |
| $c$        | ominaislämpökapasiteetti | [J/kgK]           |
| $h$        | hitsausrailon pituus     | [m]               |
| $m$        | massa                    | [kg]              |
| $p$        | piiri                    | [m]               |
| $P$        | teho                     | [W]               |
| $Q$        | lämpömäärä               | [J]               |
| $r$        | säde                     | [m]               |
| $s$        | aika                     | [s]               |
| $t$        | matka                    | [m]               |
| $\Delta T$ | lämpötilaero             | [°C, K]           |
| $U$        | jännite                  | [V]               |
| $V$        | tilavuus                 | [m <sup>3</sup> ] |
| $I$        | sähkövirta               | [A]               |

### Kreikkalaiset

|          |              |                      |
|----------|--------------|----------------------|
| $\alpha$ | kohtauskulma | [°]                  |
| $\rho$   | tiheys       | [kg/m <sup>3</sup> ] |

## Lyhenteet

|     |   |
|-----|---|
| EGD | Euroopan vihreän kehityksen ohjelma (European Green Deal)   |
| SVT | Suomen virallinen tilasto                                   |
| WS2 | kahden hitsauspään hitsaustaso (Welding Station 2)          |
| CET | hiilielkivivalentti   |
| MAG | MAG-hitsaus (Metal Active Gas)                              |
| LSO | Lincoln Electricin pitkälankahitsauspoltin (Long Stick Out) |
| LS  | leukasuutinpoltin   |
| AC  | vaihtovirta (Alternative Current)                           |
| DC  | tasavirta (Direct Current)                                  |
| CC  | tasainen virta -asetus (Constant Current)                   |
| CV  | tasainen jännite -asetus (Constant Voltage)                 |

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Johdanto.....   | 9  |
| 1.1   | Tutkimusongelma .....   | 9  |
| 1.2   | Tutkimuksen tavoitteet ja työn rajaukset .....  | 9  |
| 1.3   | Tutkimuksen sisältö .....   | 10 |
| 2     | Euroopan energiakentän kehittyminen 2020-luvulla.....   | 11 |
| 2.1   | EU- ja valtiotasolla säädettyjen asetusten vaikutukset .....  | 11 |
| 2.2   | Venäjän ja Ukrainan välisen sodan vaikutukset .....   | 13 |
| 3     | Tuulivoiman tuotanto ja kehitys Euroopassa .....  | 14 |
| 3.1   | Tuulivoiman tuotanto Euroopan Unionin alueella.....   | 14 |
| 3.1.1 | Tuulivoimatuotannon taloudellinen merkitys EU-alueelle.....   | 15 |
| 3.1.2 | Suunniteltu tuotantokapasiteetti EU-alueelle ja globaaleille markkinoille.....                          | 16 |
| 3.2   | Tuulivoiman valmistamisen päästöt .....   | 16 |
| 3.3   | Tuulivoimaloiden teknologioiden kehittyminen.....   | 17 |
| 3.4   | Pemamek Oy:n liiketoiminta tuulivoimateollisuudessa .....   | 18 |
| 3.5   | Kokoluokkien kasvamisen ja valmistettavuuden kehittymisen vaikutukset Pemamek Oy:n liiketoimintaan..... | 20 |
| 4     | Suurien lieriökappaleiden hitsaamisessa käytetyt teknologiat .....                                      | 24 |
| 4.1   | Materiaalin esilämmitys ennen hitsausprosessia .....  | 24 |
| 4.1.1 | Kaasupolttimilla toteutettava esilämmitys.....  | 26 |
| 4.1.2 | Induktiokelojen hyödyntäminen esilämmitysprosessissa .....  | 29 |
| 4.1.3 | Esilämmitystarpeen laskeminen .....   | 31 |
| 4.2   | Hitsauksen laatuvaatimukset.....  | 32 |
| 4.3   | Suurien ainevahvuuksien hitsauksessa käytettyjä hitsausmenetelmiä.....                                  | 32 |
| 4.3.1 | DC virtalähteet.....  | 34 |
| 4.3.2 | Hitsaus digitaalisesti ohjatuilla invertterivirtalähteillä .....  | 35 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.3.3 | Pitkälankahitsaus .....   | 36 |
| 5     | Energiatehokkuuslaskennan lähtökohdat .....                     | 38 |
| 5.1   | Energiatehokkuus tutkimuksen kontekstissa .....                 | 38 |
| 5.2   | Laskennassa käytettävät mittausparametrit .....                 | 39 |
| 5.3   | Kaasuesilämmityksen referenssikohde .....                       | 41 |
| 5.3.1 | Työkappaleen ja käytetyn teknologian parametrit.....            | 41 |
| 5.3.2 | Arvioidun polttoainemäärän energiasisältö .....                 | 42 |
| 5.3.3 | Railoon kohdistetun lämmön hajaantuminen .....                  | 43 |
| 5.3.1 | Energiasisällön suhteuttaminen optimilämmitystilanteeseen ..... | 45 |
| 6     | Kenttätutkimukset.....  | 47 |
| 6.1   | Hitsaustestien toteutus .....                                   | 47 |
| 6.2   | Kaasulämmitystestien toteutus .....                             | 49 |
| 6.3   | Induktiolämmitystestien toteutus.....                           | 55 |
| 6.4   | Tutkimuksissa käytetyt mittalaitteet .....                      | 58 |
| 7     | Kenttätutkimusten tulokset.....                                 | 61 |
| 7.1   | Hitsaus .....   | 61 |
| 7.2   | Kaasuesilämmitys .....  | 63 |
| 7.3   | Induktioesilämmitys.....  | 67 |
| 8     | Energialaskurin luominen.....                                   | 70 |
| 8.1   | Hitsausrailon geometrian tilavuuslaskenta .....                 | 70 |
| 8.2   | Hitsauskonfiguraatioiden sovittaminen laskuriin .....           | 73 |
| 8.3   | Lämmitysmenetelmien sovittaminen laskuriin.....                 | 77 |
| 8.4   | Lämmitysmenetelmien tehokkuusvertailu.....                      | 80 |
| 8.5   | Energiansäästöpotentiaali monopile-valmistuksessa.....          | 82 |
| 9     | Johtopäätökset .....  | 86 |
|       | Lähteet .....   | 90 |

## Liitteet

Liite 1. Kaasulämmitystestien lämmityskäyrät Graphtec-dataloggerissa

Liite 2. Induktiolämmitystestien lämmityskäyrät Graphtec-dataloggerissa



# 1 Johdanto

Maailmassa on alkanut globaali vihreä siirtymä, johon etenkin Eurooppa on sitoutunut vahvasti. Vihreän siirtymän ydintarkoituksena on siirtyä fossiilisten polttoaineiden käyttämisestä kestävämpiin energiantuotantomuotoihin. Kestävämpien energiantuotantomuotojen esiinmarssin hidasteena on kuitenkin puutteellinen infrastruktuuri ja voimalaitosten vähäinen määrä. Kivihiilellä, öljyllä ja maakaasulla toimivia lauhdevoimalaitoksia on ollut Euroopassa olemassa jo pitkään, mutta tuulivoimaloita, aurinkopaneeleita ja vedynjalostuslaitoksia ei ole olemassa vastaavaa määrää. Tähän kysyntään pyritään osittain vastaamaan rakentamalla voimakkaasti lisää maa- ja merituulivoimaloita. On siis aiheellista tutkia, kuinka energiatehokkailla prosesseilla tuulivoiman tuotantolaitoksia pystytään valmistamaan.

## 1.1 Tutkimusongelma

Poliittisesti säädetyillä paketeilla ja direktiiveillä pystytään kannusteiden ja pakotteiden avulla ohjaamaan energiantuotantoa kestävämpään suuntaan. Tuulivoiman kasvanut ja edelleen kasvava tuotantokapasiteetti on osittain seurausta näiden pakettien voimaan astumisesta energiantuottajien ja valtioiden keskuudessa. Kapasiteettia on kuitenkin lisättävä vielä erittäin merkittävästi, jos Euroopassa aiotaan päästä direktiivien ja energiaohjelmien asettamiin tavoitteisiin. Tässä tutkimuksessa pyritäänkin selvittämään, kuinka merkittävä rooli eri valmistusteknologioilla voi olla tuulivoimalan – tai suuren lieriökappaleen – valmistamisen kokonaisenergiankulutuksen kannalta. Jokaisella teknologialla on tälle ominainen ominaisenergiankulutus, minkä vuoksi eri teknologioiden yhdistelmillä voidaan saavuttaa toisiaan vastaavia lopputuloksia hyvin erilaisilla loppuenergiankulutuksilla. Tutkimus pyrkii siis vastaamaan kysymykseen loppuenergiankulutuksen riippuvuudesta valmistusteknologiaan.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja työn rajaukset

Tutkimuksen ensimmäisenä tavoitteena on määritellä energiatehokkain hitsausmenetelmä suurien ainevahvuuksien hitsaamiseen. Tavoitteen saavuttamiseksi on tutkittava eri hitsausmenetelmiä, jotta pystytään määrittelemään, kuinka suuria energiankulutuksen eroja

tuulivoimaloiden runkojen ja jalustojen hitsausprosesseissa voi esiintyä. Tämän tutkimustiedon avulla valmistajia pystyttäisiin ohjaamaan valitsemaan energiatehokkaimpia menetelmiä investointipäätöksensä tueksi. Tällä hetkellä aiheesta on haastavaa löytää tutkimustietoa. Tutkimus tulee kuitenkin rajata jauhekaarihitsauksen variaatioihin, sillä se on käytetyimpiä hitsausmenetelmiä hitsattaessa suuria ainevahvuuksia, eikä muiden hitsausmenetelmien energiatehokkuuksien tutkiminen palvelisi välttämättä työn tavoitteita.

Toisena tavoitteena on tutkia kahden eri esilämmitysmenetelmän tehokkuuksia ja niiden energiankulutuksia. Suuria ainevahvuuksia hitsattaessa teräsmateriaalin esilämmittäminen on välttämätöntä, jotta voidaan välttyä liian suurista lämpötilaeroista ja kosteudesta aiheutuvista ongelmista hitsauksen lopputuloksessa. Tutkittavat menetelmät ovat happi-asetyleenilikillä toteutettava kaasulämmitys ja induktiolämmitys. Myös näistä menetelmistä on löydettävissä vähän tietoa etenkin tämän tutkimuksen teollisessa kontekstissa. Menetelmät poikkeavat toisistaan paljon toimintatavoiltaan ja käyttöhistorialtaan. Kaasuliekkiä on käytetty jo pitkään teollisuudessa erilaisiin lämmitystehtäviin ja induktiolämmittimet ovat alkaneet korvata näitä esimerkiksi korjaamo-olosuhteissa. Tällä tutkimuksella haetaan näyttöä saman muutoksen toteuttamisesta suurempien työkappaleiden mittakaavassa. Kenttätutkimukset toteutetaan vain happi-asetyleenikäyttöisen palokaasumenetelmän ja induktiolämmityksen välillä, sillä eri palokaasujen tutkimista varten olisi resursoitava lisää laitteistoa.

### 1.3 Tutkimuksen sisältö

Tutkimuksen alussa tutustutaan tuulivoiman kysyntää kasvattaneisiin tekijöihin ja tuulisähkön tuotantovolyymeihin. Tämän jälkeen perehdytään tuulivoimaloiden kokoluokkien kasvun syihin ja mitä vaikutuksia tällä on tämän tutkimuksen toimeksiantajan Pemamek Oy:n liiketoimintaan. Pemamekin yhtenä suurena tuotesegmenttinä on valmistaa laitteita suurten lieriökappaleiden hitsausprosesseihin. Toimeksiantoesittelyn jälkeen työssä perehdytään syihin esilämmityksen taustalla ja erilaisiin esilämmitys- ja hitsausprosesseihin. Ennen kenttätutkimuksien tulosten analysointia perehdytään kaasuesilämmityksen tapaustutkimukseen, joka toimii osittain referenssinä tämän tutkimuksen tuloksille. Tutkimuksen lopuksi luodaan energiankulutuslaskuri, jonka avulla voidaan lähtötietoparametrien avulla arvioida eri hitsausprosessien ja esilämmitysmenetelmien energiankulutuksia erilaisilla railogeometrioilla ja työkappalehalkaisijoilla.

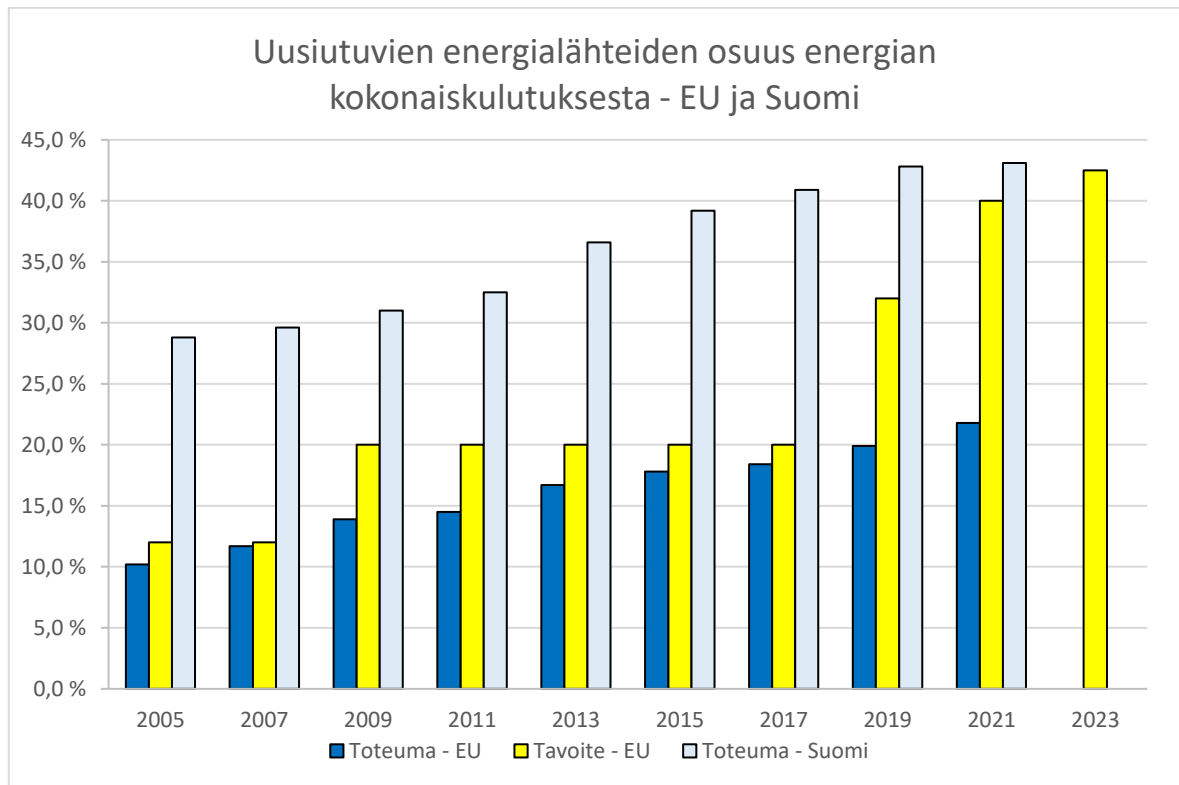
## 2 Euroopan energiakentän kehittyminen 2020-luvulla

Energia on aina näytellyt suurta roolia Euroopan maiden välisten integraatioiden kannalta, vaikka maat ovatkin olleet usein vastahakoisia löytämään yhteistä säveltä energiapolitiikan linjasta. Selkeämpi energiapolitiikan suuntaus on ilmaantunut Euroopan Unionin politiikkaan vasta viimeisen kahden vuosikymmenen aikana, missä perimmäisenä tarkoituksen on ollut asteittain luopua haitallisista fossiilisista polttoaineista kohti kestävämpiä energiamuotoja. (Crnčec, Penca & Lovec 2023.)

### 2.1 EU- ja valtiotasoilla säädettyjen asetusten vaikutukset

Euroopan energiakenttään on 2010- ja 2020-luvuilla osaltaan paljon vaikuttaneet Euroopan Unionin tasolla laaditut erilaiset ohjelmat ja asetukset, joita ovat esimerkiksi Euroopan vihreän kehityksen ohjelma (European Green Deal, EGD) ja uusiutuvan energian direktiivi 2018/2001/EU. EGD koostuu erilaisista poliittisista paketeista ja sen päätavoitteena on ohjata poliittista päätöksentekoa jäsenmaissa kohti vihreää siirtymää ja ilmastoneutraalia Euroopan Unionia 2050 mennessä. Direktiivi 2018/2001/EU velvoittaa jäsenmaita enemmän lainsäädännöllisellä tasolla. (Euroopan unionin neuvosto 2022; Työ- ja elinkeinoministeriö 2023.)

Uusiutuvan energian direktiivi sai alkunsa vuonna 2009, jolloin EU:n yhteiseksi tavoitteeksi uusiutuvien lähteiden osuudesta energian kokonaiskulutuksesta asetettiin 20 % (kuva 1) vuoteen 2020 mennessä. Tämän saavuttaakseen jäsenvaltiot asettivat omat kansalliset tavoitteensa. Direktiivi revisioitiin ja saatettiin osaksi kansallista lainsäädäntöä vuonna 2018 vihreän siirtymän nopeuttamiseksi. Revisiossa sovittiin uudesta 32 %:n tavoitteesta vuoteen 2030 mennessä. Jäsenmaat ovat vapaita pyrkimään näihin tavoitteisiin heille parhaiten soveltuvien energiainvestointien avulla. Suomen kansalliseksi tavoitteeksi asetettiin 51 %, mikä on jäsenmaiden kärkipäätä. 2021 heinäkuussa ehdotettiin jälleen uutta revisiota, jossa tavoite nostettaisiin samalla aikajänteellä 40 %:iin, osana 55-valmiuspakettia. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2023; European Commission 2023.)



Kuva 1. EU:n yhteisessä tavoitteessa ja toteumassa uusiutuvien energialähteiden osuudesta energian kokonaiskulutuksesta on suuria eroja kansallisiin – kuten Suomen – arvoihin (Eurostat 2023b)

55-valmiuspaketti on yksi merkittävistä paketeista aiemmin mainitussa Euroopan vihreän kehityksen ohjelmassa. Heinäkuussa 2021 ehdotettu revisio (40 %) ei ehtinyt lainsäädäntöön asti, kun vajaata vuotta myöhemmin Venäjän hyökättyä Ukrainaan, EU halusi lainsäädännön avulla päästä voimakkaammin irtautumaan fossiilisesta tuontienergiasta. Komissio ehdotti tavoitteeksi 45 %:ia, mutta jäsenmaat pääsivät väliaikaiseen sopimukseen 42,5 %:n tavoitteesta. (European Commission 2023.)

Vuonna 2009 asetettu tavoite 20 %:n osuudesta saavutettiin, kun energian kokonaiskulutus uusiutuvista lähteistä nousi saman vuoden 13,9 % tasosta 21,8 %:n tasoon vuonna 2021 (kuva 1). Ruotsilla oli suurin kansallinen osuus (62,6 %) ennen Suomea (43,1 %) (Eurostat 2023b.) Uusiutuvien osuutta (21,8 %) energian kokonaiskulutuksesta ei tule sekoittaa jäsenmaissa yhteensä tuotettuun energian osuuteen. Vuonna 2021 EU:n tuottamasta energiasta 40,9 % tuli uusiutuvista lähteistä ja 31,3 % ydinvoimasta. Suuri ero kulutetun ja tuotetun energian välillä selittyy tuonnin ja viennin suhteesta. Suhteesta muodostuvasta

energiajakaumasta käy ilmi, että vuonna 2021 EU toi kuluttamastaan energiasta 56 % ja tuotti itse 44 %. (Eurostat 2023c.)

## 2.2 Venäjän ja Ukrainan välisen sodan vaikutukset

Venäjän hyökkäämistä Ukrainaan alkukevällä 2022 voidaan luonnehtia geopolitiittiseksi kriisiksi tai konfliktiksi, mikä synnytti laajan energiakriisin koko Euroopan alueelle. Venäjä oli jo pitkään ollut valtava energian nettotuojana Euroopalle ja sen merkitys oli vain korostunut alati kasvaneiden maakaasun tuontimäärien myötä. Suomen tapauksessa juuri maakaasun tuonnin vähentymisellä ei ollut merkittäviä vaikutuksia sähköntuotantoon, mutta toisilla alueille Euroopassa merkitykset olivat mittavampia. (SVT 2023; Liu, Xie & Wang 2023.)

Vuonna 2021 Eurooppaan tuodusta maakaasusta 39,7 % oli peräisin Venäjältä. Seuraavana vuonna tuonti putosi 22,9 %:iin, merkiten huomattavaa vajausta koko maakaasun toimintaketjussa. Sähköenergian polttoaineena maakaasuun vahvasti tukeutuvissa maissa toimitusten vähentyminen ja hintojen nousu merkitsi jo käytöstä poistettujen kivihiili- ja öljyvoimalaitosten uudelleen käynnistämistä – merkiten kasvihuonekaasujen taittumista kasvuun. (Liu et al. 2023.)

Tutkimuksessaan Liu et al. (2023) alleviivaavat maakaasun merkittävästi pienempää vaikutusta kasvihuonepäästöihin öljyyn ja kivihiileen verrattuna. Euroopan tavoitteessa olla ilmastoneutraali vuoteen 2050 mennessä, öljyn ja kivihiilen käytön korvaaminen maakaasulla oli tätä tavoitetta edistävä vaikutus sen vähäpäästöisen luonteen vuoksi – huolimatta sen fossiilisesta alkuperästä. Voidaankin päätellä maakaasun olleen paremmin Euroopan ilmastotavoitteita tukenut energiamuoto, kuin muut fossiiliset energiamuodot. (Liu et al. 2023.)

Rajusti vähentynyt maakaasun tuonti pakottaa vihreän siirtymän käyttöönottoa vielä voimakkaammin – niin päästöjen vähentämisen, kuin energiaomavaraisuuden vuoksi. Tuulivoiman suunnitellut tuotantokapasiteetit eivät välttämättä riitä sellaisinaan muuttuneessa tilanteessa ja rajoittunut kaasun saanti pakottaa valmistajia harkitsemaan esimerkiksi kaasuesilämmityksen kustannuksia ja tehokkuutta. (Summerfield-Ryan & Park 2023; Liu et al. 2023.)

### 3 Tuulivoiman tuotanto ja kehitys Euroopassa

Euroopan Unionin alueella 24 % kaikesta kulutetusta energiasta on sähköä. Vuonna 2021 sähköä tuotettiin jäsenmaissa eniten uusiutuvista energialähteistä (38 %) ennen fossiilisia polttoaineita (36 %) ja ydinvoimaa (25 %). Suurimmat osuudet uusiutuvien energialähteiden kesken jakautuivat vesi- ja tuulivoiman kesken (molemmat 13 %). Tuulivoiman osuus jäsenvaltion sähköntuotannosta vaihtelee voimakkaasti. Tanska on investoinut voimakkaasti tuulivoimaan ja sillä on suurin osuus (48,6 %), kun taas usealla maalla osuus on nolla tai lähes nolla. (Eurostat 2023c.) Tanskan suuri kapasiteetti tuulivoimassa näkyy myös heidän tuulivoimateknologiaansa valmistavan teollisuuden mittakaavassa.

Tuulivoimateollisuudella on korkeat kannustimet sähkötehon kasvattamiselle ja hyötysuhteen parantamiselle, jotta eri maanosissa asetettuihin tavoitteisiin olisi mahdollista päästä. Nykytiedon valossa parhaat keinot näiden parantamiseen piilevät tuulivoimaloiden fyysisen koon kasvattamisessa. Roottorin halkaisijan kolminkertaistaminen johtaa sähkötehon yhdeksänkertaistumiseen – vastaavalla tavalla, kuin tuulennopeuden kaksinkertaistaminen johtaa tehon kahdeksänkertaistumiseen. Vaihtoehtoina tuulivoimaoperaattorille on pyrkiä sijoittamaan puistot mahdollisimman korkeille ja tuulisille paikoille, tai kasvattaa voimaloiden korkeutta ja roottoreiden halkaisijaa. (Burton, Jenkins, Bossanyi, Sharpe & Graham 2021, 5–8.)

#### 3.1 Tuulivoiman tuotanto Euroopan Unionin alueella

Tuulivoiman tuotantokapasiteetti on ollut jatkuvassa kasvussa jo pitkään, kun tarkastellaan koko EU aluetta yhtenä kokonaisuutena. Variaatioita löytyy paljon jäsenmaiden väliltä ja osalla maista ei ole vielä yhtään omaa tuotantokapasiteettia. Vuonna 2012 tuulivoiman kapasiteetti on ollut yhteensä 97 GW, ja vuonna 2021 vastaava lukema on jo 188 GW, eli kasvua on tullut vajaan kymmenen vuoden aikana n. 94 %. Monet jäsenmaat ovat tällä aikavälillä kasvattaneet omaa kapasiteettia yli sadan prosentin (Saksa 106 %) ja osa vielä huomattavasti enemmän (Ruotsi 236 %). Vuonna 2021 suurimmat tuulivoimakapasiteetin jäsenmaat olivat järjestyksessä Saksa (63,8 GW), Espanja (27,9 GW) ja Ranska (18,7 GW). (Eurostat 2023a.)

Suomen osalta ei ole järkevää tarkastella prosentuaalista kasvua samalla aikavälillä, sillä Suomen lähtökohdat kapasiteetin osalta ovat olleet huomattavasti vaatimattomammat. Vuonna 2012 Suomen tuulivoimakapasiteetti on ollut vain 257 MW, kun se vuonna 2021 on ollut jo 3257 MW. Prosentuaalista kasvua tulisi siis 1167 %. Suomen tuulivoimakapasiteetti on kuitenkin huomattavasti länsinaapuriamme Ruotsia jäljessä, sillä Ruotsin kapasiteetti on samana vuonna ollut 12 116 MW. (Eurostat 2023a.)

Vuosina 2022 ja 2023 Suomen tuulivoimakapasiteetti on jatkanut voimakasta kasvuaan. Vuonna 2022 kapasiteetti on voimakkaan rakentamisen vuoksi kasvanut 2430 MW ja vuonna 2023 1278 MW. Näin ollen kokonaiskapasiteetti on ollut vuosien 2022 ja 2023 loppuissa 5677 MW ja 6944 MW. Kapasiteetti on siis onnistuttu yli kaksinkertaistamaan kahdessa vuodessa. Tuulivoima tuotti sähköä vuonna 2022 yhteensä 11 562 GWh ja kasvua vuoteen 2021 verrattuna tuli 41,4 %. Tämä tarkoittaa noin 3385 GWh kasvua vuodessa. (SVT 2023; STY 2023a; STY 2023b.)

### 3.1.1 Tuulivoimatuotannon taloudellinen merkitys EU-alueelle

Vuonna 2022 julkaistun tutkimuksen (Euroopan komissio 2022a) mukaan EU:n alueella uusiutuvan energian kaikki sektorit ovat tuottaneet bruttoarvonlisäystä vuonna 2018 yhteensä 125,6 miljardia euroa. Tuulivoimalla on ollut suurin vaikutus tähän bruttoarvonlisäykseen vastaten 30,5 %:a koko arvonlisäyksestä, eli yhteensä 38,3 miljardia euroa. Tuulivoimasektori oli myös suurin työllistäjäsektori, työllistäen yhteensä 229 000 työntekijää EU-alueella.

Työllistäjäsektorit ovat jaettu tutkimukseen ja projektisuunnitteluun, rakentamiseen ja operaatioihin, resurssihankintaan ja lisäksi valmistukseen. Tämän tutkimuksen toimeksiantaja Pemamek Oy kuuluisi näistä kategorioista valmistussektoriin. Samalla kun tuotantokapasiteetit ovat kasvaneet merkittävästi vuoden 2018 tasoista globaalisti, on positiivisia vaikutuksia nähty oletettavasti myös bruttoarvonlisäyksissä ja työllistävässä vaikutuksissa – peilaten vuoden 2018 statistiikkaan. (Euroopan komissio 2022a.)

IEA:n laskelmien (2023) mukaan tuuli- ja aurinkosähköön tehdyt panostukset EU:n alueella vuosina 2021–2023 tullaan näkemään säästöinä sähkönhinnoissa koko markkina-alueella. Ilman näitä panostuksia, sähkön kuluttajahinta olisi ollut vuonna 2021 3 %, vuonna 2022 8

% ja vuonna 2023 15 % vertailuhintoja korkeampi, merkiten yhteensä n. 100 miljardia euroa korkeampia sähkön kuluttajahintoja koko alueella.

### 3.1.2 Suunniteltu tuotantokapasiteetti EU-alueelle ja globaaleille markkinoille

IEA:n uusiutuviin energiamarkkinoihin keskittyvästä selvityksestä (2023) käy ilmi, että globaalilla tasolla panostukset maatuulivoiman kapasiteetin kasvattamiseen pienenevät vuoden 2020 ennätysvuoden jälkeen kaksi vuotta peräkkäin vuosina 2021–2022. Tähän vaikutti merkittävästi Covid-rajoitukset, mitkä rajoittivat etenkin Kiinassa projektien käyttöönottoa. Vuonna 2023 kapasiteettilisäysten odotetaan saavuttavan uusi ennätys, kun lisäystä on povattu 70 % enemmän kuin vuonna 2022, merkiten 107 GW lisää kapasiteettia globaalisti.

Kiina on merkittävästi kasvattamassa asemaansa johtavana tuulivoiman tuottajamaana. Peilaten EU:n vuoden 2021 rakennettuun tuulivoimakapasiteettiin 188 GW (Eurostat 2023a), Kiinan odotetaan kasvattavan maatuulivoimakapasiteettiaan vuosina 2023 ja 2024 yhteensä 121 GW, kun se vuonna 2022 oli vielä 30,9 GW. EU:n alueelle maatuulivoiman kasvua odotetaan vuosille 2021–2023 yhteensä 46,9 GW, ollen merkittävästi jäljessä. (IEA 2023.)

Myös muita maita on ilmoittanut aikeistaan kasvattaa tuulivoiman tuotantokapasiteettiaan. Japanin hallitus on ilmoittanut aikomuksestaan rakennuttaa merituulivoimakapasiteettia 30–45 GW vuoteen 2040 mennessä, saavuttaakseen hiilineutraaliuden vuoteen 2050 mennessä (Euroopan komissio, 2022b).

## 3.2 Tuulivoiman valmistamisen päästöt

Tuulivoimalan rakentaminen ja sillä energian tuottaminen on laaja prosessi, jossa syntyy yhteiskunnallisia kustannuksia, päästöjä ja haittavaikutuksia – kuten kaikkien muidenkin energiamuotojen kohdalla. Tuulivoimalla on kuitenkin Summerfield-Ryanin ja Parkin mukaan huomattavasti pienempi kokonaishiilijalanjälki, kuin millään perinteisellä fossiilisella energiamuodolla. Tuulivoimalamarkkinat eivät kuitenkaan ole onnistuneet vielä sisäistämään tuulivoiman markkina-arvoon sen sisältämiä lukuisia yhteiskunnallisia positiivisia ulkoisvaikutuksia, joista vähäpäästöisyys on yksi merkittävimmistä. Markkinat ovat ajautuneet tilanteeseen, jossa yhteiskunnallisesti mitattuna parempi energiamuoto joutuu kamppailemaan markkina-asetaan perinteisiä energiamuotoja – kuten kivihiiiltä ja öljyä – vastaan,



huolimatta niiden raskaista yhteiskunnallisista kustannuksista. (Summerfield-Ryan & Park 2023.)

Tutkimustiedon mukaan (Burton et al. 2021, 5–8) tuulivoimalan elinkaaren aikana tuottaman energian määrä on sen valmistamiseen ja asentamiseen kulutetun energian määrää merkittävästi suurempi. Kolmen megawatin tuulivoimalan energiatasetta analysoitaessa havaittiin, että keskimäärin odotettavissa oleva aika valmistukseen kulutetun energiamäärän tuottamiseksi oli noin kuudesta seitsemään kuukautta. Kulutettua energiamäärää laskettaessa huomioitiin eri komponenttien ja kokoonpanojen valmistaminen, voimalan operoiminen, kuljetukset, purkaminen ja hävittäminen.

Merituulivoimaloiden energiatase oli vastaava maatuulivoimaloihin verrattuna. Merellä saavutetaan suuremmat keskimääräiset tuulen nopeudet, jonka avulla saavutetaan suurempi sähkötehon tuotto – riittäen kompensoimaan korkeampia voimaloiden ostohintoja, korkeampia operatiivisia kustannuksia ja valmistuskustannuksia. (Burton et al. 2021, 5–8.)

### 3.3 Tuulivoimaloiden teknologioiden kehittyminen

Tuulivoimaloiden roottoreiden halkaisijat ovat kasvaneet tasaisesti ainakin viimeiset 25 vuotta. Roottoreiden kasvaessa kasvaa samalla myös napakorkeus ja tuulivoimalan kokonaiskorkeus. Kehityksen taustalla on sähkötehon kasvattaminen ja hyötysuhteen parantaminen. Pieniä parannuksia hyötysuhteen parantamiseen on saavutettavissa esimerkiksi roottoreiden aerodynamiikan kehityksillä, mutta huomattavin parannus tehossa saavutetaan edelleen kasvattamalla roottoreiden pyyhkäisyypinta-alaa ja altistamalla roottorit nopeammille tuulennopeuksille. (Burton et al. 2021, 5–8.)

Tuulivoimamarkkinoiden kehittymistä tutkivassa artikkelissaan (2023) Summerfield-Ryan ja Park nostavat esille tuulivoimateknologioiden kehittyneisyyden keskittymisen suurilta osin Eurooppaan, huolimatta siitä, että suurin määrä uudesta rakennettavasta tuulivoimasta sijoittuu Euroopan ulkopuolelle – kuten esimerkiksi Kiinaan ja muualle Aasiaan. Aasialaisten ja eurooppalaisten valmistajien välillä vallitseva teknologinen kuilu tulee heidän mukaansa olemaan suuri syy sille, ettei johtavat aasialaiset valmistajat tule lähitulevaisuudessa luomaan uusia polkuja, jotka häiritsisivät vakiintuneita eurooppalaisia valmistajia.

Kappaleessa 3.4 kerrotaan tarkemmin lähitulevaisuudessa yleistyvistä tuulivoimaloiden kokoluokista ja kasvamisen edellytyksistä valmistusteknologioiden osalta.

### 3.4 Pemamek Oy:n liiketoiminta tuulivoimateollisuudessa

Pemamekin liiketoiminta jaetaan useisiin segmentteihin, jotka toimivat eri teollisuudenalojen hitsaavissa valmistusprosesseissa. Yhtenä merkittävimpana liiketoimintasegmenttinä on tuulivoimateollisuus. Segmentin merkitys oli huomattavasti vähäisempi vielä ennen 2020 lukua ja sen alussa, mutta vihreän siirtymän voimistuneen luonteen ja Venäjän hyökättyä Ukrainaan, tuulivoimaprojektien kokoluokat ja määrät ovat kasvaneet voimakkaasti ja kysyntä on ollut globaalia. Tuulivoimasegmentin liiketoiminnassa toimitetaan toisinaan yksittäisiä laitteita tuotantolinjojen eri työvaiheisiin, riippuen asiakkaan tarpeista, ja toisinaan kokonaisia tuotantolinjoja. Kokonaisissa tuotantolinjoissa (kuva 2) Pemamekin laitteilla valmistetaan yksittäisistä mankeloiduista lieriökappaleista pitkiä kokonaisuuksia eri käyttötarkoituksiin.



Kuva 2. Osa Pemamekin toimittamaa tuotantolinjaa. Vasemmassa reunassa nähtävissä ulkopuoliseen kehäsaumahitsaamiseen suunniteltu PEMA WS2 (Welding station 2) (Pemamek 2023, Pemamekin kuvapankki)

Tuulivoimateollisuuden asiakasprojektit Pemamekillä voidaan jakaa karkeasti seuraaviin luokkiin: maa- ja merituulivoimaloiden tuotantolinjat ja merituulivoimaloiden monopile-perustusten tuotantolinjat. Johtuen loppukappaleiden suuresta koosta, tehtaat ovat usein hyvin laajoja ja korkeita, kuten kuvasta 2 on nähtävissä. Tuotantolinja jakautuu useisiin eri osaluoksiin ja hitsaaminen on monessa vaiheessa merkittävässä roolissa. Monopile-perustuksissa (kuva 3) on pääsääntöisesti hitsauskohteiden suurimmat ainevahvuudet ja tässä tutkimuksessa perehdytään etenkin tähän osa-alueeseen. Suurimmissa ainevahvuuksissa käytetään suurimpia hitsausvirtoja ja kulutetun energian määrä on hypoteesin mukaan suurin. (Pemamek 2023.)



Kuva 3. Valmiita monopile perustuksia (EEW Group 2023)

Monopile-perustuksia (kuva 3) käytetään merituulivoimaloiden perustuksina verrattain matalissa rannikkovesissä. Ajatus perustuu raskaaseen teräspaaluun, joka voidaan osittain upottaa matalalla sijaitsevaan merenpohjaan, mutta upottaminen ei ole kuitenkaan ehdoton. Raskaan teräspaaluun on oltava riittävän kestävä ja vakaa, jotta se kestää olosuhteiden vaikutukset ja tuulivoimalan tuottamat kuormat. (Burton et al. 2021, 829–830.)

Kuvassa 4 on nähtävissä tuulivoimalan rungon tai monopile-perustuksen sisäosa ja sen kehäsaumat, eli piirin mukaiset hitsisaumat, joiden avulla yksittäiset lieriökappaleet hitsataan yhteen yhden pidemmän kokonaisuuden muodostamiseksi. Kuvassa ei ole nähtävissä aksiaalissa suunnassa hitsattavia pituussaumoja. Pituussaumat hitsataan, kun suora levy on

mankeloitu lieriön muotoiseksi ja pistehitsattu kiinni riittävästi, jotta työkappale pysyy muodossa pituussauman hitsauksen ajan.

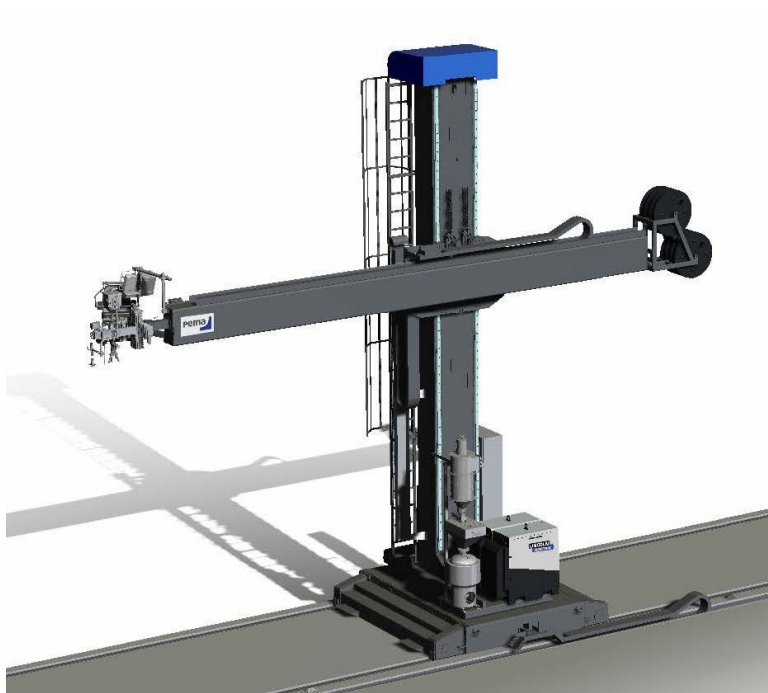


Kuva 4. Maatulivoimalan rungon sisäosa (Pemamek 2023, Pemamekin kuvapankki)

Kokonaisten runkolohkojen pituudet riippuvat täysin asiakkaista ja heidän vaatimuksistaan. Kuvan 4 lohko on pituudeltaan jo kymmeniä metrejä pitkä ja se koostuu suuresta määrästä yksittäisiä lieriökappaleita, mikä tarkoittaa monia hitsattavia pituus- ja kehäsaumahitsejä yhtä kokonaista lohkoa kohden.

### 3.5 Kokoluokkien kasvamisen ja valmistettavuuden kehittymisen vaikutukset Pemamek Oy:n liiketoimintaan

Pemamekillä on laaja kirjo erilaisia laitteita tuotevalikoimissaan ja myös laaja kyky rakentaa kustomoituja laitteistoja vakioitujen pohjalta. Tuulivoimateollisuuden parissa projektien yhteydessä myydyt laitteet jakautuvat useimmiten seuraaviin tuoteryhmiin: hitsaustornit (kuva 5), -tasot, -portaalit, rullastot, jyrsimet ja laipanasennusasemat. Tämä tutkimus tulee keskittymään pääasiassa hitsausprosessien ja hitsattavan materiaalin esilämmityksen energiatehokkuuksiin, joten tässä kappaleessa perehdytään enemmän siihen, mitä vaikutuksia kasvaneille tuulivoimaloiden kokoluokilla on kyseisten prosessien laitteisiin.



Kuva 5. PEMA EHD 10X10 Hitsaustorni (Pemamek 2023, Peman tuotekatalogi)

Kuvan 5 mukaisia hitsaustorneja käytetään yleensä pituus- ja kehäsaumahitsaukseen niin työkappaleen sisäpuolella, kuin ulkopuolellakin. Hitsaustorneja voidaan myös käyttää laipanhitsaukseen, mutta tällaiset prosessit ovat yleensä räätälöidympiä. Niin pituus- kuin kehäsaumahitsauksen yhteydessä voidaan käyttää esilämmityslaitteistoa. Pituussaumahitsauksessa voidaan hitsauspolttimien yhteyteen kiinnittää induktiokela, jolloin esilämmitys saadaan suoritettua ennen hitsausprosessia.

Monopile-perustusten halkaisijat vaihtelivat aikaisemmin välillä 4–8 m syvyyden rajoituksessa ollessa enimmillään noin 25 m. Samassa lähteessä kuitenkin mainitaan, että jo vuonna 2020 alankomaalaisella Sif Groupilla on ollut kyky valmistaa halkaisijaltaan 11 m monopile-perustuksia, joita voidaan käyttää 35 m syvyyksissä. (Burton et al. 2021, 829–830.)

Teknologia tuulivoimateollisuudessa kehittyi nopeasti – samoin kuin tuulivoimaloiden ja monopile-perustusten kokoluokat. Burtonin (et al. 2021) esille nostama Sif on vuonna 2023 sivuillaan ilmoittanut, että heillä on nykyään kapasiteetti valmistaa 11 m halkaisijaltaan olevia, 1800 tonnia painavia, 105 m pitkiä ja seinämävahvuudeltaan 160 mm paksuisia monopile-perustuksia, joita voidaan sijoittaa jo 50–60 m syvyyteen. (Sif 2023.) Samana vuonna toinen eurooppalainen valmistaja Haizea, on ilmoittanut sivuiltaan löytyvällä uutisella uudesta 150 miljoonan euron tehdasinvestoinnista, jonka avulla saavutettaisiin kapasiteetti

valmistaa 14–15 m halkaisijaltaan olevia, 130 m pitkiä ja 3500 tonnia painavia monopile-perustuksia. Kyseisille perustuksille voitaisiin kiinnittää jopa 20 MW tuulivoimaloita. (Haizea 2023.)

Tuulivoimaloiden ja näiden perustusten kasvaessa huomattavan paljon verrattain nopeassa aikataulussa, on näiden valmistajien – kuten Pemamekin – pysyttävä perässä tässä muutoksessa. Suurien lieriökappaleiden valmistamiseen soveltuvat laitteet, kuten hitsaustornit ovat rajoittuneet aiemmin maksimissaan 12 metrin pystysuuntaiseen ulottumaan (Pemamek 2023) ja tuotteet on pystytty vakioimaan tiettyihin ulottumiin. Kasvavat halkaisijat vaativat kuitenkin lisää ulottumaa vaaka- ja pystysuunnassa useita metrejä. Kuvasta 6 voidaan havainnoida, kuinka työkappaleen halkaisijan kasvaminen vaikuttaa sekä hitsausasemalta vaadittavaan maksimikorkeuteen, sekä hitsaustason ulottumaan vaakasuunnassa.



Kuva 6. PEMA WS2 hitsaustaso hitsaamassa ulkopuolista kehäsaumaa kahdella hitsauspäällä samanaikaisesti (Pemamek 2023, Pemamekin kuvapankki)

Hitsattavien työkappaleiden tyypillisten halkaisijoiden kasvaessa perinteisimmistä 8–9 metristä (Burton et al. 2021, 829–830) lähitulevaisuudessa yleistyviin 14–15 metriin, on laitteiden suunnittelussa otettava huomioon monia uusia tekijöitä. Kuvassa 6 näkyvällä hitsaustasolla työskentelee tyypillisesti 1–2 operaattoria operoimassa hitsausprosesseja, jonka vuoksi vaatimustasot teräsrakenteiden kestävyydelle ja väsymiselle ovat huomattavasti vaativampia.

Työkappaleiden halkaisijoiden kasvaessa, kasvaa myös kappaleiden seinämien ainevahvuus. Liian ohut seinämävahvuus sallisi kappaleiden mennä kasaan oman painonsa alla, eivätkä ne myöskään kestäisi kasvaneiden turbiinien aiheuttamia kuormia, tai turbiinin ja merenkäynnin yhteisvaikutusta monopile-perustuksissa. Mitä suurempien ainevahvuuksien hitsaamisesta on kyse, sitä tärkeämmäksi osoittautuu hitsattavan materiaalin kunnollinen esilämmitys. Esilämmityksellä voidaan parhaiten vaikuttaa materiaalin sitkeyteen, haurasmurtumien ja vetyhalkeamien syntymiseen. (Pettinen, Witting, Pullinen, Lindewald & Kortelainen 2004, 109–110.) Seuraavassa kappaleessa perehdytään enemmän näiden työkappaleiden hitsausmenetelmiin, hitsattavan materiaalin esilämmitykseen ja käytettyihin esilämmitysmenetelmiin.

## 4 Suurien lieriökappaleiden hitsaamisessa käytetyt teknologiat

Suurien teräksisten työkappaleiden kuten tuulivoimaloiden runkojen valmistukseen tarvitaan usein monien erilaisten prosessien toteuttamista rinnakkain. Työstettävien kappaleiden kokoluokan ja volyymin vuoksi on syytä tarkastella kriittisesti erilaisia prosesseja niin esilämmityksen, kuin hitsaamisenkin osalta. Alalla toimivien valmistajien ja loppukäyttäjien intresseissä on käyttää mahdollisimman tehokkaita ja turvallisia menetelmiä. Tehokkuutta voidaan tarkastella niin energiatehokkuuden kuin tuottavuudenkin näkökulmasta. Turvallisuudella tarkoitetaan esimerkiksi esilämmitysmenetelmien eroja käyttäjäystävällisyydessä.

### 4.1 Materiaalin esilämmitys ennen hitsausprosessia

Lämpötila on merkittävässä roolissa hitsauksen monissa hitsauksen eri vaiheissa ja sillä on suuri vaikutus syntyneen hitsin laatuun. Jäähtymisnopeuden olisi suotavaa olla tiettyjen raja-arvojen sisäpuolella paremman laadun varmistamiseksi ja tähän päästään usein löytämällä sopiva yhdistelmä esilämmityksen, työlämpötilan ja lämmöntuonnin välillä. Jäähtymisnopeus riippuu siis vahvasti työkappaleen lämpötilasta ennen hitsauksen aloittamista, sen aikana (työlämpötila) ja siihen tuodusta lämpöenergian määrästä. Parasta hitsauslaatua ei yleensä voida saavuttaa ylikompensoimalla vain yhtä näistä lämpötilakomponenteista. (Lepola & Ylikangas 2016, 331; SFS-EN 1011-2 2001, 26.)

Esilämmitys tapahtuu yleensä n. 70–150 °C lämpötilaan riippuen hitsausmenetelmästä, lämmöntuonnista, ainevahvuudesta ja hitsattavasta materiaalista. (Pettinen et. al. 2004, 84; Lepola & Ylikangas 2016, 335–336). Esilämmityksellä pyritään ensisijaisesti pidentämään hitsialueen jäähtymisnopeutta, sillä jännitystila ja eri ainepitoisuudet ovat aina ominaisia kullekin materiaalille, eli näihin ei voida vaikuttaa. Liian nopea jäähtymisaika saattaa johtaa kylmähalkeiluun hitsiliitoksessa, mitkä voidaan karkeasti jakaa vety- ja karkenemishalkeiluun. Karkenemishalkeamat riippuvat paljon teräksen hiilipitoisuudesta ja kemiallisesta koostumuksesta. Vetyhalkeamat riippuvat pitkälti vedyn määrästä hitsiprosessissa, jolloin ensisijaisesti pyritään välttämään vedyn tuomista prosessiin esim. lisääineen tai kosteuden mukana. (Lepola & Ylikangas 2016, 332–334.)



Vetyhalkeilussa riittävä määrä vetyä ei ehdi poistumaan hitsisulan mikrorakenteista, johtuen painetaskujen muodostamiin mikrorakoihin. Yhdessä rakenteen hitsauksessa syntyneiden jännitystilojen kanssa syntyneet mikroraoit muodostavat vetyhaurausalttiuden. (Lepola & Ylikangas 2016, 332–334.) Riittävän ohuilla ainevahvuuksilla lämmöntuonti yksinään saattaa riittää ehkäisemään vetyhalkeilua, mutta ainevahvuuksien kasvaessa lämmöntuonti tarvitsee rinnalleen esilämmitystä, jotta jäähtymisaikaa saadaan kasvatettua (Pettinen et. al. 2004, 109–110). Esilämmitys on ollut tavallista toteuttaa esimerkiksi kaasutoimisilla polttimilla, kuten kuvassa 7.



Kuva 7. Kaasutoiminen esilämmitysmenetelmä lieriökappaleen pituussauman hitsauksessa (Pemamek 2015, Pemamekin kuvapankki)

Lämmöntuonnin ollessa liian vähäinen suhteessa materiaalin hiilipitoisuuteen ja ainevahvuuteen, saattaa teräs muuttua hyvin martensiittiseksi liian nopean jäähtymisen vuoksi. Tämä aiheuttaa haitallista kovuutta ja heikentyntä sitkeyttä hitsiaineessa tai muutosvyöhykkeellä. (Suomen hitsausteknillinen yhdistys ry. 2011, 10; SFS-EN 1011-2 2001, 26.) Teräksen hiilipitoisuudella on kasvattava vaikutus syntyvän martensiitin kovuuteen ja haurauteen. Pidentämällä jäähtymisaikaa esilämmityksen avulla, voidaan martensiitin syntymistä eli karkenevuutta vähentää ja välttää karkenemishalkeamien syntymistä. (Lepola & Ylikangas 2016, 333.)

Myös liian suurella hitsauksen lämmöntonilla voi olla haitallisia vaikutuksia teräksen ominaisuuksiin, esimerkiksi heikentyneen iskusitkeyden tai kuumahalkeilun muodossa. Kuumahalkeilu johtuu yleensä epäpuhtauksien, kuten rikin ja fosforin suotautumisesta raerajoille, jotka jännitykset sitten repivät auki. (Lukkari et al. 2016, 29–32.) Lämmöntuonti on yksilöllistä eri hitsausmenetelmille ja materiaaleille, sillä jauhekaarella voidaan hitsata esimerkiksi 5–150 mm ainevahvuuden haarukassa. Karkeasti voidaan todeta lämmöntuontin olevan tyypillisesti suurempaa ainevahvuuden kasvaessa, mutta tässäkin on poikkeuksia. Jauhekaarihitsauksessa lämmöntuonti vaihtelee yleensä välillä 1–5 kJ/mm. (Åberg 2023; Lukkari et al. 2016, 21–25.) Tutkimuksessaan Pedrazzo, Barone & Rutili (2009) hitsasivat 500 A virralla, 30 V jännitteellä ja 580 mm/min nopeudella 3,2 mm lankaa, jolloin lämmöntuonti oli 1,5 kJ/mm.

Kaasutoiminen esilämmitysmenetelmä on ollut yleinen käytäntö suurien lieriökappaleiden valmistajilla jo pitkään, mutta myös muita keinoja – kuten esimerkiksi induktioteknologia – on ollut saatavilla. Huomattavasti kallistuneen maakaasun osoittautuessa kalliiksi vaihtoehtoksi esilämmityksessä, ovat valmistajat alkaneet osoittaa kiinnostusta merkittävästi energiatehokkaampaan ja nopeampaan induktiolämmitykseen. Offshore-tuulivoimaloiden valmistamisessa nojataan DNVGL-OS-C401-standardiin, jonka yhteydessä valmistajia suositellaan toteuttamaan esilämmitys sähköisillä menetelmillä. Kaasupolttimilla toteutettu esilämmitys on kuitenkin sallittua hallituissa olosuhteissa. (DNV 2023, 86.)

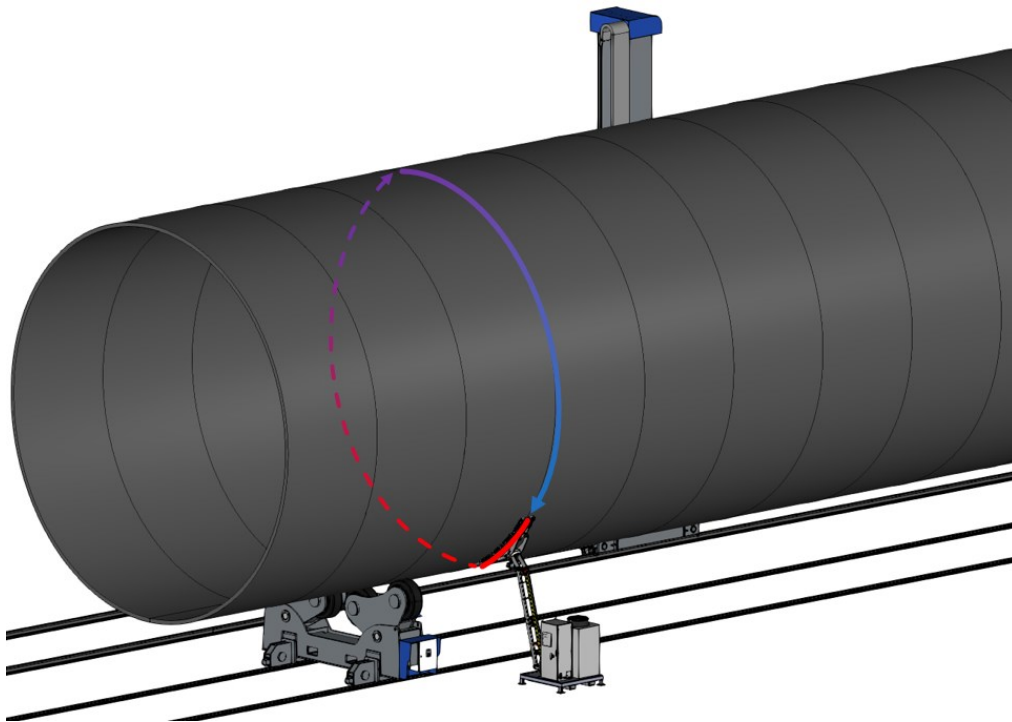
#### 4.1.1 Kaasupolttimilla toteutettava esilämmitys

Suurempien ainevahvuuksien hitsauksessa hitsiin on pystyttävä tuomaan enemmän lämpöä laadun varmistamiseksi ja hitsausvirheiden välttämiseksi. Kaasutoimisella esilämmitysmenetelmällä saavutetaan kuitenkin suuremmilla kappaleilla usein melko epätasainen lopputulos. Lämpötilaa tulee tällöin tarkasti seurata joko eri lämpötiloihin reagoivilla lämpöliiduilla, lämpötila-antureilla kappaleen läheisyydessä tai muilla erillisillä mittalaitteilla. (Lepola & Ylikangas 2016, 331.)

Kaasutoiminen esilämmitysprosessi on teknologiana helppo, yksinkertainen ja kevyt. Kyseisellä menetelmällä on kuitenkin huono hyötysuhde ja on täten energiatehokkuudeltaan heikko. Menetelmä perustuu työkappaleen pinnan lämmittämiseen, josta lämpö johtuu ainevahvuuden läpi syvempiin kerroksiin. Mitä paksumpi esilämmitettävä aines on, sitä

pidempään tuotavan lämmön leviäminen koko ainevahvuuden läpi kestää, merkiten pidempää esilämmitysaikaa. Menetetty aika esilämmitysprosessissa on pois seuraavien työvaiheiden, kuten hitsaamisen aloittamisesta. (Pemamek 2023.)

Huono hyötysuhde perustuu suurelta osin kaasupolttimen kykenemättömyyteen siirtää valtaosaa käytettävästä energiasta lämmitettävään ainekseen. Suuri osuus lämmitykseen käytettävästä energiasta – useimmiten fossiilisesta poltettavasta kaasusta – siirtyy työkappaletta ympäröivään ilmaan jo lämmitysvaiheessa lämmitettävän aineksen sijaan. Suurien lieriökappaleiden tapauksessa haasteeksi muodostuu myös pitkä lämmitysmatka (kuva 8), josta vain pieni alue kerrallaan on aina lämmitysprosessin alueella, jolloin loput alueesta pääsee jäähtymään. Tällä on entisestään hyötysuhdetta huonontava vaikutus.



Kuva 8. Esilämmitys pyörivään lieriökappaleeseen. Kierroksen aikana esilämmitys vaikuttaa vain pienellä alueella lieriön piirin matkasta, minkä vuoksi esilämmitetty alue pääsee jäähtymään ennen seuraavaa lämmityskierrosta

Esilämmitettäessä suuren lieriökappaleen kehäsaumaa, on hitsattava ja esilämmitettävä matka hyvin pitkä. Pitkää kehäsauman aluetta ei voida esilämmittää yhtäjaksoisesti kokonaisuudessaan, kuten esimerkiksi pituussaumun hitsauksessa on vielä mahdollista (kuva 7).

Tällöin lieriökappale laitetaan pyörivien rullien päälle pyörimään hitaasti ja esilämmityslaite asetetaan lämmittämään kappaleen pintaa kiinteässä asemassa. Lämmityksen kohdistuessa vain pieneen osuuteen koko matkasta ja lämmitettävän alueen olleen jatkuvasti liikkeessä, on valtaosa lämmitettävästä alueesta lämmityslaitteen ulkopuolella. Kyseisen ulkopuolisen alueen ollessa lämmityksen ulottumattomissa, altistuu lämmitetty alue jäähtymiselle.

Lämmityksen ulkopuolelle jäävän lämmitysalueen jäähtymistä tapahtuu esilämmitysmenetelmästä riippumatta. Jäähtymisen voimakkuus kuitenkin riippuu esilämmityksen tehosta, lämmitysnopeudesta ja vallitsevan ympäristön lämpötilasta. Hypoteesin mukaan suurimmat erot menetelmien välillä ja jäähtymisnopeuksien eroissa syntyvät lämpöenergian materiaaliin siirtymisen tehokkuudessa. Mitä nopeammin alue pystytään lämmittämään tarvittavaan lämpötilaan, sitä vähemmän lämmityskierroksia tarvitaan, jolloin jäähtymisen määrä on myös alhaisempi.

Kaasuesilämmityksen kokonaisteho riippuu polttimien tehosta, määrästä (kuva 9) ja työkappaleen pyörimisnopeudesta. Mitä suurempi on työkappaleen halkaisija, sitä pidempi on esilämmitettävä matka ja lämmityksen ulkopuolisen alueen jäähtymisestä aiheutuva energiahäviö. Energiahäviö kertyy myös ainevahvuuden kasvaessa, sillä esilämmitysajan kasvaessa, kasvaa myös työkappaleen pyörähdysten määrä ja jäähtymisen vaikutuksesta menetetyt hukkalämmön määrä kertyy. Voidaan siis päätellä kaasupolttimilla toteutettavan esilämmityksen energiatehokkuuden heikkenevän entisestään ainevahvuuden kasvaessa.



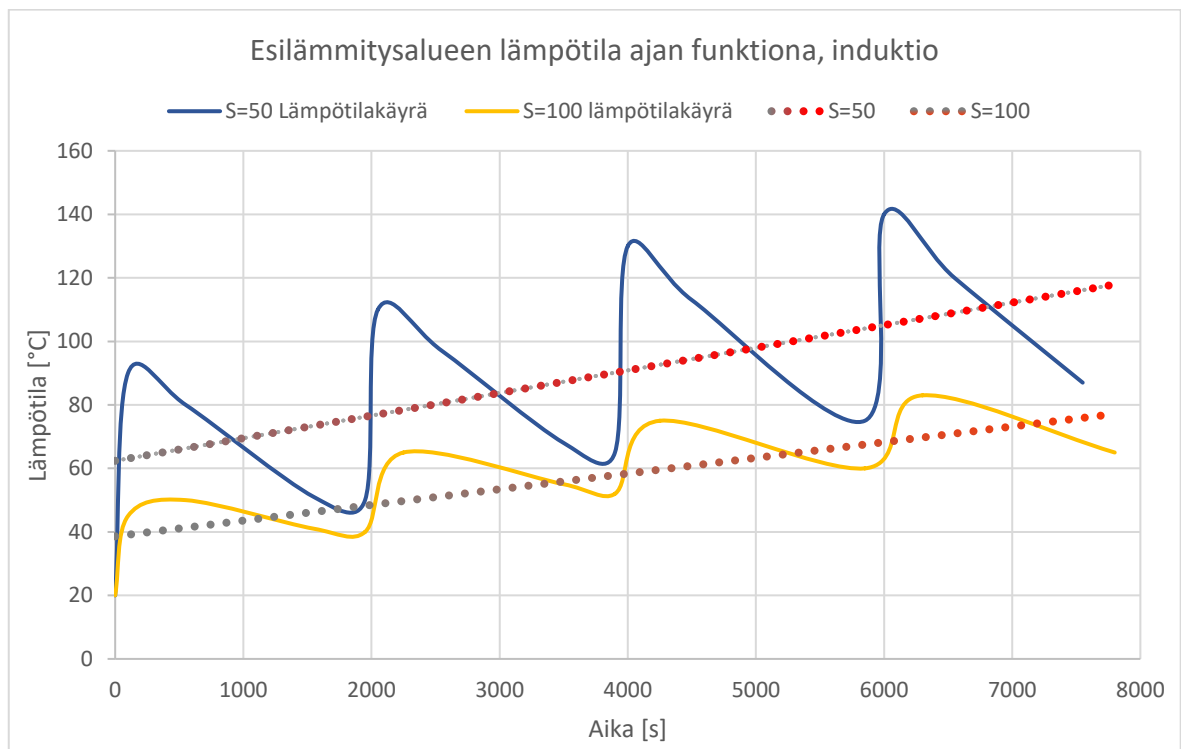
Kuva 9. Paineilma-asetyleenillä toimiva 24:n polttimen lieriökappaleen kehäsauman esilämmityslaite (Pemamek 2015, Pemamekin kuvapankki)

Tunnetulla eurooppalaisella valmistajalla esilämmitys on toteutettu asettamalla kuvan 9 mukainen kaasupoltinjärjestelmä vasten hitsattavaa kehäsaumaa, ja laittamalla sitten lieriökappale pyörimään rullastojen avulla. Kappaleen on annettu pyöriä useita kymmeniä minutteja – jopa tunteja – jotta riittävä lämpötila hitsauksen aloittamiseksi on saavutettu. Kuluva aika on riippuvainen ainevahvuudesta ja halkaisijasta. Tuntien esilämmitys esiintyy huonona tuottona valmistajalle huonon hyötysuhteen ja menetetyt tuotantoajan vuoksi. (Pemamek 2023.)

#### 4.1.2 Induktiokelojen hyödyntäminen esilämmitysprosessissa

Monipalkohitsauksen onnistuessa taloudellisesti optimaalisimmalla tavalla, esilämmitys voidaan toteuttaa mahdollisimman vähillä kierroksilla tai vedoilla. Hitsauksen alettua esilämmityksen jälkeen, välipalkolämpötilaa kyetään ylläpitämään hitsausjärjestyksen avulla riittävän korkeana hitsauskierrosten välillä (SFS-EN 1011-2 2001, 56).

Pemamekin ja erään induktiolämmittötoimittajan tekemässä kokeessa mitattiin lämpötilan kehittymistä ajan funktiona kahdella eri ainevahvuudella. Lämmitettävä hitsausrailo oli suuressa lieriökappaleessa, jonka halkaisija oli 10 metriä. Johtuen lieriökappaleen suuresta pinnasta ja rauhallisesta pyörimisnopeudesta, vain pieni alue hitsausrailosta sijaitsee kerrallaan lämmitysalueella, jonka vuoksi valtaosalla piirin matkasta tapahtuu jäähtymistä. Kuvassa 10 on havainnoitu kiinteän mittauspisteen lämpötilan elämistä neljän lämmityskierroksen aikana. Esilämmitysprosessi olisi tämän vuoksi hyvä pystyä toteuttamaan juuri ennen hitsausta, koska lämmitetty materiaali alkaa jäähtymään voimakkaasti pian lämmittämisen jälkeen.



Kuva 10. Induktioteknologialla toteutetun hitsausrailon esilämmityksen lämpötiläkäyrät ainevahvuuksilla  $s=50$  ja  $s=100$ . Trendiviivoilla on havainnoitu lämpötilan kumulatiivista kasvua. Yksi lieriökappaleen pyörähdys kestää noin puoli tuntia (1800s), jolloin valtaosa yhden kierroksen matkasta on jäähtymistä. Noin 1h 40min lämmityksellä saavutettiin toimittajan kokeessa  $140^{\circ}\text{C}$  ja  $85^{\circ}\text{C}$  lämpötilat ennen jäähtymisvaihetta (Pemamek 2023)

Kuvaajista voidaan päätellä lämpötilan kasvavan kumulatiivisesti syklien välillä, huolimatta voimakkaasta jäähtymisestä lämmityksen jälkeen ennen seuraavaa lämmityssykliä. Jäähtymisnopeus kasvaa sitä suuremmaksi, mitä korkeammaksi lämpötila materiaalissa on

noussut, jonka vuoksi kumulatiivinen lämpötilakertymä vähenee jokaisen lämmityskierroksen jälkeen hieman. Korkeissa esilämmityslämpötiloissa tulisikin nopeuttaa kierroksia tai jatkaa lämmittämistä eri kohdassa lämmityskierrosta, jotta voimakas jäähtyminen ei heikennä prosessin hyötysuhdetta haitallisen paljoa. (Pemamek 2023.)

Lämpenemisen ja jäähtymisen kulmakertoimien voidaan myös päätellä olevan voimakkaasti riippuvaisia ainevahvuudesta. Ohuemmalla ainevahvuudella lämpötila nousee hyvin jyrkästi, mutta myös laskee nopeasti ennen seuraavaan kierroksen alkua. Suuremmalla ainevahvuudella kulmakertoimet ja muutokset ovat huomattavasti maltillisempia. Jäähtymisnopeuteen on haastava vaikuttaa ympäristön vallitsevan lämpötilan pysyessä vakiona, mutta esilämmityksen tehoon voidaan vaikuttaa teknisillä valinnoilla. Lämmitystehoa ei voida kuitenkaan pitää liian korkeana, vaikka se tehostaisikin lämpöenergian absorboitumista materiaaliin ja vähentäisi lämmityskierrosten määrää. Jos teräsmateriaalin pintalämpötila karkaa liian suureksi, tapahtuu aineessa lämmön aiheuttamaa karkenemistä, joita ei haluta hitsattavassa saumassa tapahtuvan. (Pemamek 2023.)

#### 4.1.3 Esilämmitystarpeen laskeminen

Esilämmityksen tarve pystytään laskemaan matemaattisella kaavalla tai vaihtoehtoisesti graafisista käyristä standardin SFS-EN 1011-2 (2001) mukaisesti. Hitsattaessa suurempia ainevahvuuksia tai erikoisteräksiä, korostuu hitsausmenetelmien ja esimerkiksi esilämmityksen merkitys lopputuloksen laadun varmistamiseksi. (Pettinen et. al. 2004, 109–110.) Optimaalinen esilämmityslämpötila vetyhalkeilun estämiseksi riippuu vahvasti perusaineen koostumuksesta ja hiiliekvivalenttiarvosta (SFS-EN 1011-2 2001, 24; Pettinen et. al. 2004, 109–110). Hiiliekvivalentti on suoraan verrannollinen tavoiteltavaan esilämmityslämpötilaan, sillä hiiliekvivalentti CET:n kasvaessa n. 0,01 %-yksikköä, tulisi esilämmityslämpötilaa kasvattaa n. 7,5 °C (SFS-EN 1011-2 2001, 58).

Esilämmitysmatka saadaan pituussaumahitsauksen osalta yksinkertaisesti lieriön pituudesta ja kehäsaumahitsauksen osalta se voidaan laskea piirin kaavalla:

$$p = 2\pi r \quad (1)$$

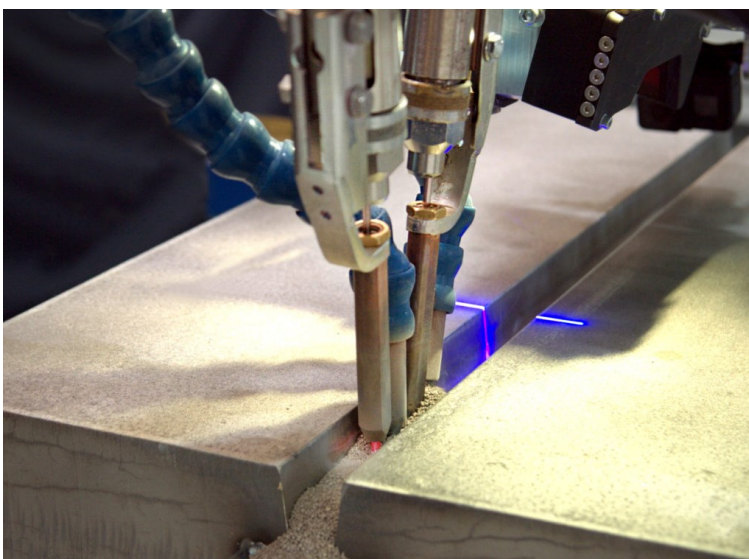
jossa  $p$  on lieriön piiri [m] ja  $r$  on lieriön säde [m]. Lieriön halkaisijan ollessa esim. 10 m, kasvaa esilämmitettäväksi matkaksi jo 31,4 m.

## 4.2 Hitsauksen laatuvaatimukset

Hitsausprosessien laatu on pystyttävä määrittelemään standardoiduilla tavoilla, jotta asiakkaan ja valmistajan välillä olisi yhteinen ymmärrys toimintamalleista. Laadunhallintajärjestelmänä voidaan käyttää standardia ISO 9001:2000, mutta se ei yksin riitä määrittelemään hitsauksen laatuvaatimuksia. Metallien sulahitsauksen laatuvaatimukset -standardin ISO 3834:n avulla voidaan valvontaa ylläpitämällä varmistua tuotteen laadusta valmistuksen eri vaiheissa. Hitsausprosesseja tarkastellaan tällöin erikoisprosesseina laadunhallintajärjestelmän mukaisesti. Valmistajan edellytyksiä esimerkiksi asiakkaan laatuvaatimusten täyttämiseksi voidaan arvioida kyseisen standardin avulla. (SFS-EN ISO 3834-1 2006, 6.)

## 4.3 Suurien ainevahvuuksien hitsauksessa käytettyjä hitsausmenetelmiä

Pemamekillä käytetään useita eri hitsausmenetelmiä riippuen asiakkaiden tarpeista. Ainevahvuuksien ollessa tuulivoimasegmentin parissa verrattain suuria, on vakiintunein hitsausmenetelmä tämän segmentin laitteissa jauhekaarihitsaus (kuva 11). Jauhekaarihitsaukseen yhdistetään usein monipalkohitsaus, sillä yli sadan millimetrin ainevahvuuksia ei ole mahdollista hitsata yksittäisillä hitsauspaloilla. (Pemamek 2023; Lukkari 1997.)

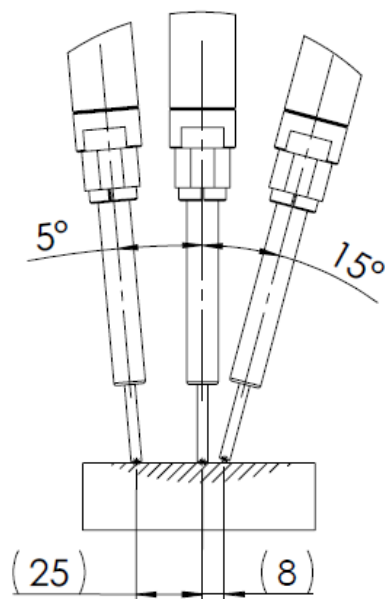


Kuva 11. Jauhekaarihitsausprosessi kahdella pitkälankahitsauspolttimella puolikapearailossa. Polttimen juuressa nähtävissä punahehkuinen lanka ja edempänä railoskannauksen lasersäde (Pemamek 2023)



Pemamekillä jauhekaarihitsauksessa käytetään usein suurien ainevahvuuksien yhteydessä useampaa lankaa samaan aikaan samassa hitsisulassa, mitä kutsutaan monilankahitsaamiseksi (kuva 11). Monilankahitsauksella saavutetaan parempi tehokkuus hitsituoton ja hitsausnopeuden osalta, joiden lisäksi sille on ominaista suurempi tunkeuma. Joissain sovelluksissa voidaan hitsata alapuolelta pienempi hitsausrailo MAG-hitsauksella ja yläpuolinen suurempi railo täyttää monilankaisella jauhekaarella ja tarvittaessa monipalkohitsauksena. Jauhekaarihitsauksen käyttämistä suurien levyjen liittämiseksi yhteen suositaan, koska tämän tuotto on usein moninkertainen muihin kaarihitsausmenetelmiin verrattuna. (Lukkari 1997.)

Jauhekaaren monipalkohitsauksessa suositaan usein virtalähteitä, joissa voidaan valita, joko vaihtovirta tai tasavirta. Perinteisesti yhdellä langalla hitsattaessa jauhekaarella on käytetty pääasiassa tasavirtalähteitä, mutta tandemhitsauksessa (kaksi lankaa) suositaan, että ensimmäinen, eli vetävä poltin on kytketty tasavirtalähteeseen ja jälkimmäinen työntävä poltin on kytketty vaihtovirtalähteeseen. (Lukkari 1997.) Kolmen polttimen sovelluksessa polttimet asetellaan yleensä niin, että ensimmäinen on vetävässä kulmassa, keskimmäinen on suorassa ja kolmas on työntävässä asennossa (Lincoln 2019; Pemamek 2023.)



Kuva 12. Esimerkki poltinkulmista kolmen polttimen hitsaussovelluksessa. Kulmat ja etäisyydet ovat viitteellisiä ja riippuvat todellisuudessa hitsauksen muuttujista, kuten materiaaleista ja hitsausparametreista (Lincoln 2019; Lukkari 1997)

Kolmen jauhekaaripolttimen tavanomaisessa asetelmassa vetävän polttimen – eli ensimmäisen – kulma on loivempi, kuin viimeisen eli työntävän polttimen kulma. Yhdessä polttimien kulmilla ja erikseen määritetyillä hitsausparametreilla voidaan saavuttaa ensimmäisellä polttimella tehokas tunkeuma ja viimeisellä polttimella laajempi täyttö. Kaarijännitteellä pystytään hallitsemaan valokaaren pituutta ja täten syntyvän palon leveyttä, kun taas virtaa ja langansyötön nopeutta säätelemällä voidaan vaikuttaa tunkeumaan ja hitsiaineen tuottoon. (Lukkari 1997; Pemamek 2023.)

#### 4.3.1 DC virtalähteet

Jauhekaarihitsauksessa on tavattu aiemmin käyttää pääosin DC-virtalähteitä, joissa on usein joutunut valitsemaan joko korkean lisäaineentuoton tai tunkeuman välillä. Näissä perinteisissä virtalähteissä parametrien hallinta on rajoittunut jännitteen tai virran säätämiseen. DC+ hitsauksella voidaan saavuttaa korkea tunkeuma maltillisemmalla lisäaineentuotolla, kun taas DC– hitsauksella saavutetaan päinvastainen tilanne. (Pedrazzo et al. 2009; Lukkari, 1997.)

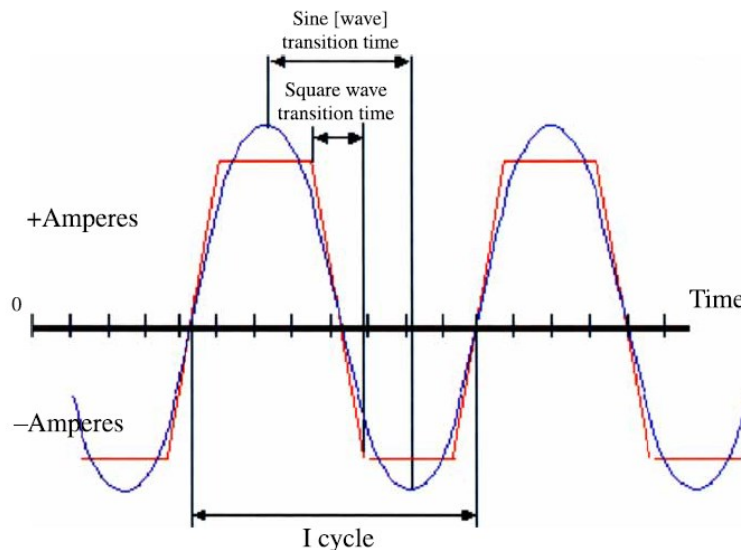
DC virtalähde ollut vallitseva käytäntö yhden polttimen jauhekaarihitsauksessa, mutta kahden polttimen tandemhitsauksessa mainitsee Lukkari jo vuonna 1997 toisen polttimen usein olevan AC virtalähteellä varustettu. AC virtalähde on ollut parempi valinta seuraavaan polttimeen (trail), koska näillä on laajemmat parametrien säätömahdollisuudet. Näiden ansiosta pystytään paremmin vaikuttamaan tunkeumaan, syntyvän hitsisauman geometriaan ja valokaaren vakauteen. Lisäksi toisen polttimen hitsatessa AC virtalähteellä, esiintyy hitsisau-massa huomattavasti vähemmän magneettista puhallusta. (Pedrazzo et al. 2009; Lukkari, 1997.)

Magneettinen puhallus on melko voimakasta DC virtalähteillä ja muun muassa napaisuutta vaihtamalla voidaan vaikuttaa puhalluksen suuntautumiseen. AC virtalähteillä puhallus on huomattavasti maltillisempaa, minkä vuoksi se soveltuu samassa sulassa tapahtuvaan monilankahitsaukseen DC virtalähteen yhteyteen. Magneettinen puhallus hankaloittaa prosessin hallintaa ja voi aiheuttaa hitsauksen laatuvirheitä. (Lukkari 1997.)

### 4.3.2 Hitsaus digitaalisesti ohjatuilla invertterivirtalähteillä

Nykyaikaisilla digitaalisesti ohjatuilla AC/DC virtalähteillä voidaan saavuttaa perinteisiin DC virtalähteisiin verrattuna monipuolisempia hitsauskonfiguraatioita. Laajojen parametrisääntömahdollisuuksien, vakiovirta tai -jännitevalinnan ja AC/DC virransyötön valinnan avulla voidaan saavuttaa DC – virtalähteille tyypillisiä korkeita lisäaineentuottomääriä ilman kyseiselle napaisuudelle ominaisia haittavaikutuksia, kuten magneettista puhallusta. (Mohanty & Sharma 2021; Pedrazzo et al. 2009.)

Perinteisimmillä AC virtalähteillä virtaa on tavallisesti syötetty siniaallon muodossa, jolloin haasteita on voinut esiintyä esim. langan syttymisessä. Kuitenkin uudemmilla vaihtoehdoilla – kuten Lincoln Electricin Power Wave® AC/DC 1000 virtalähteellä – pystytään tuottamaan kanttiaaltoa. Napaisuuden vaihtuminen kantti- ja trapetsiaallossa ei tapahdu kaarevasti, vain kulmikkaasti ja huomattavasti siniaaltoa nopeammin. Moduloimalla kanttiaallon korkeutta ja leveyttä, pystytään tunkeumaa säätämään portaattomasti tinkimättä korkeasta lisäainetuotosta. (Pedrazzo et al. 2009; Mohanty & Sharma 2021.)



Kuva 13. AC virtalähteen virran napaisuuden muuttuminen trapetsiaalolla ja siniaalolla. Huipusta huippuun -arvon muutosajoissa voidaan nähdä merkittävät erot siniaallon ja trapetsiaallon välillä (Pedrazzo et al. 2009)

Tavallisesti siniaaltoisilla AC virtalähteillä on esiintynyt valokaaren epävakautta, johtuen huipusta huippuun -arvon korkeasta muutosajasta (peak-to-peak transition time). Kantikaammalla virransyötöllä voidaan kuitenkin todeta muutosajan olevan merkittävästi lyhyempi, johtaen parempaan valokaaren vakauteen. Kuvasta 13 voidaan päätellä trapetsiaallon muutosajan olevan noin kolmanneksen siniaaltoisen käyrän muutos aikaan verrattuna. (Pedrazzo et al. 2009; Mohanty & Sharma 2021.)

Tutkimuksessaan Pedrazzo et al. (2009) puhuvat kuvan 13 mukaisesta trapetsiaallosta kanttiaaltona. Kuitenkin vuoden 2021 tutkimuksessaan Mohanty & Sharma puhuvat vastaavasta muodosta trapetsiaaltona ja kanttiaaltona he esittävät aaltoliikkeen, jossa kulmat ovat suora-kaiteen mallisia (kuva 14). Tällaisessa kanttiaallossa kohtisuorilla muutoskulmilla voidaan huipusta huippuun -arvon muutosajan päätellä olevan lähes olematon, johtaen edelleen parempiin tuloksiin valokaaren vakauden suhteen. (Mohanty & Sharma 2021.)



Kuva 14. Siniaalto, trapetsiaalto ja kanttiaalto (Mohanty & Sharma 2021)

Voidaankin päätellä, että tutkimusten välillä on tapahtunut teknistä kehitystyötä, jonka seurauksena aiemmin kanttiaaltona esitelty muoto on voitu myöhemmin esittää trapetsiaaltona ja varsinaisena kanttiaaltona esitetään käyrä kohtisuorilla muutoskulmilla.

#### 4.3.3 Pitkälankahitsaus

Jauhekaarisovelluksissa voidaan käyttää ns. pitkälankahitsausmenetelmää, jossa vapaalangan mitta on huomattavasti normaalisovellusta pidempi. Normaalisti jauhekaarella hitsattaessa vapaalangan mitta on n. 20–40 mm, kuitenkin enintään kymmen kertaa langanhalkaisijan mitta. Pitkälankahitsauksessa vapaalangan mitta voi kuitenkin olla esimerkiksi 125 mm tai enemmän (Lincoln Electric 2023). Pitkää vapaalankaa tulee tukea sähköä

johtamattomalla lämpöä kestäväällä materiaalilla, kuten keramiikalla, jotta voidaan varmistua sen vakaudesta ja sijainnista hitsauksen aikana. (Lukkari 1997.)

Vapaalangan mittaa kasvattamalla lanka alkaa kuumentumaan vastuslämmön vaikutuksesta huomattavasti jo ennen hitsausta, jolloin tavallisesti päästään merkittävästi suurempiin hitsiaineentuottoihin. Lukkari (1997) on arvioinut tuoton kasvuksi 20–50 %, joka vastaa melko hyvin Lincoln Electricin (2023) arviota heidän LSO-polttimensa (Long Stick Out) tuotosta. Tällä mainostetaan päästävän tandem-hitsauksessa 37 kg/h tuottoon, kun tavallisella tandem-hitsauksella päästäisiin 25 kg/h tuottoon.

Huomattava potentiaali hitsiaineentuoton kasvattamiseen on kasvattanut suurilla ainevahvuuksilla hitsaavien toimijoiden kiinnostusta kyseiseen tekniikkaan niin nopeutensa, kuin tehokkuutensa vuoksi. Suurien hitsausrailojen täyttöhitsaus on aikaa vievää ja vaatii paljon tuottoa hitsaukselta – molemmat seikkoja, joihin Lincoln Electric (2023) kertoo LSO-tekniikan vastaavan.

## 5 Energiatehokkuuslaskennan lähtökohdat

Perusteellisen energiatehokkuustutkimuksen taustoittamiseksi on olennaista ensin selventää, mitä energiatehokkuudella tarkoitetaan hitsauksessa ja hitsausrailon esilämmityksessä. Lisäksi perehdytään tarkemmin aiempien kaasuesilämmitysprosessien toteutukseen ja niiden energiatehokkuuden tarkasteluun.

### 5.1 Energiatehokkuus tutkimuksen kontekstissa

Energiatehokkuus itsessään on termi, joka kaipaa tämän tutkimuksen kontekstissa tarkempaa tarkastelua. Fawkesin (2013) mukaan energiatehokkuutta voidaan mitata karkeasti kahdella eri lähtökohdalla. Ensimmäinen lähtökohta on mitata muuntajalaitteen energiatehokkuutta sen suhteen, kuinka paljon sisään tulevasta energiasta saadaan myös ulos. Esimerkiksi voidaan mitata hehkulampulle syötettävän sähköenergian määrää ja verrata tätä mitattavissa olevaan valovirran määrään. Näin saadaan hehkulampulle noin 2 % hyötysuhde, kun valtaosa käytetystä sähköenergiasta muuntuu lämmöksi ja leviää ympäristöön. Näin saadaan laskehtua ns. muuntajalaitteen sisäinen hyötysuhde, eli millä tehokkuudella se muuntaa energiaa toiseen muotoon.

Toinen lähtökohta energiatehokkuuden mittaamiselle käsittelee monimutkaisempia järjestelmiä, kuten rakennuksia. Rakennusten tapauksessa energiatehokkuutta ei mitata sen mukaan, kuinka tehokkaasti järjestelmään syötetty energia saadaan muunnettua muihin muotoihin, vaan pikemminkin kuinka hyvin se saadaan säilytettyä ja hyödynnettyä järjestelmän sisällä, kuten lämpönä ja valona. Näitä Fawkes (2013) kutsuu energiatehokkuudessa passiivijärjestelmiksi, koska niissä ei mitata mitään aktiivista energian muunnos-prosessia, eli energia sisään ja ulos -prosessia. Passiivijärjestelmää ei terminä tule tässä kontekstissa sekoittaa talotekniikan yhteydessä puhuttuihin passiivitaloihin.

Hitsaamisen energiatehokkuuden selvittäminen tulee olemaan lähempänä passiivijärjestelmän määritelmää, sillä siinä ei mitata sisään tulleen energian suhdetta poistuvaan, vaan pikemminkin mitä sisään otetulla energiamäärällä pystytään saavuttamaan. Jos virtalähdettä arvioitaisiin aktiivisena muuntajalaitteena, tulisi tutkia kuinka suuri osa verkosta otetusta

sähköenergiasta pystytään välittämään hitsauspolttimelle. Kuitenkin tarkastellessa hitsausvirtalähteen hyötysuhdetta sen perimmäisen tarkoituksen näkökulmasta, tulee vertailu suorittaa tuottavuuden näkökulmasta, eli kuinka paljon ja millä laadulla hitsisaumaa sisään otetulla energialla voidaan saavuttaa.

Hitsauksessa hukkaenergiaksi voitaisiin määrittellä kaikki energia, mikä ei edesauta tai osallistu hitsausprosessiin. Vertailukohta voisi perusteellisemmassa selvitystyössä olla määrättyillä parametreillä laskettu teoriassa saavutettavissa oleva hitsisauma. Tässä työssä kuitenkin pääpaino on esilämmitysmenetelmien energiatehokkuudessa, joten hitsauksen osalta keskitytään vertailemaan eri hitsausmenetelmiä keskenään, kun käytetään digitaalisesti ohjattua invertterivirtalähdettä ja selvittämään ottovirran suhde tuotettuun hitsiainekseen.

Esilämmitysmenetelmien tapauksessa voitaisiin teoriassa tulkita sisään tulevan energiamäärän (kaasun energiasisältö säiliöstä tai ottovirta induktiovirtalähteelle) suhdetta todelliseen lämmitystehoon, eli lämpöenergiaan, joka tarttuu lämmityksen kohteena olevaan materiaaliin. Haasteena on kuitenkin kyky määrittää materiaaliin kohdistuneen lämpöenergian tarkka arvo. Lämpötila esilämmitysmateriaalissa on kuumimmillaan lämmitysalueen ytimessä ja on jäähtyvä siitä pois päin, eli lämpöenergia on jakautunut epätasaisesti materiaalissa. Simuloidut tai mitatut lämpötilaprofiilit materiaalista olisivat nekin epätarkkoja arvioita materiaaliin absorboituneen lämpöenergian osalta.

Näiden epätarkkuusolosuhteiden vuoksi tutkimuksessa on selkeämpää verrata sisään otettuja energiamääriä muutoin toistetussa kokeessa, eli samalla työkappaleella samoilla tavoitelämpötiloilla. Tämän ollessa energiatehokkuusvertailun lähtökohta, pystytään menetelmiä vertailemaan keskenään melko hyvällä tarkkuudella. Keskinäisen vertailun lisäksi molempia menetelmiä voidaan verrata referenssitason.

## 5.2 Laskennassa käytettävät mittausparametrit

Energiatehokkuuden selvittäminen tulee perustumaan matemaattiseen laskentaan erilaisilla yhtälöillä, joissa käytetään suureina kenttämittauksissa saatavia tuloksia. Laskentaa tullaan hyödyntämään vertaillen eri menetelmiä toisiinsa kuin myös järjestelmien sisäiseen vertailuun, kuten esimerkiksi hitsausvirtalähteen energiatehokkuuteen eri hitsausparametreillä ja -menetelmillä. Jotta voidaan vertailla prosentuaalisia ja suureellisia eroja

energiatehokkuuden nimissä, tulee ennen laskentaa täsmentää minkä mittayksikköjen suuria kenttätutkimuksissa lähdettiin selvittämään, jotta laskenta voitaisiin näiden tietojen avulla suorittaa.

1. Virta [A] ja jännite [V].

- Virtaa ja jännitettä mitataan virransyöttökaapeleiden eri vaiheista pihtimittareilla. Mittaamalla jokaisesta vaiheesta virran ja jännitteen suuruus tasaisen kuorman aikana, voidaan laskea syöttöteho [W].

2. Aika [s].

- Vertaamalla laskettua tehoa tutkimussuoritteen keston eli aikaan, voidaan laskea yksittäisen tutkimussuoritteen kuluttama energia [kWh]. Näin saadaan esim. metrin pituisen hitsisauman tuottamiseen tarvittava arvo energialle ja tätä voidaan hyödyntää myöhemmässä laskennassa.
- Aikaa verrataan myös lämmitystehtoon, eli kuinka nopeasti tutkimuskappale kytetään eri menetelmillä lämmittämään tavoitelämpötilaan.

3. Lämpötila [°C].

- Lämpötilaa mitataan esilämmitystutkimuksissa eri pisteistä, jotta voidaan selvittää johtumisen voimakkuutta ja lämpötehoa eli lämmönsiirtymistä lämmitettävään materiaaliin eri menetelmillä.

4. Matka [m].

- Matkaa mitataan esimerkiksi työkappaleen ja hitsausrailon koon, tutkimussuoritteen matkan ja johtumisen selvittämiseksi. Mittaukset todennäköisesti kirjataan millimetreissä, mutta laskennoissa arvot muutetaan kuitenkin SI-järjestelmän mukaiseen metriin.

Kenttätutkimuksissa on suotavaa pyrkiä minimoimaan tallennettavien mittayksiköiden määrä, jotta tulosten kirjaaminen olisi mahdollisimman nopeasti suoritettavissa ja pääpaino pystyttäisiin säilyttämään tutkimusten suoritusten laadussa ja tarkkuudessa. Kirjattavien yksiköiden pitäisi riittää laskemaan kaikki tarvittavat arvot energialaskuria varten.

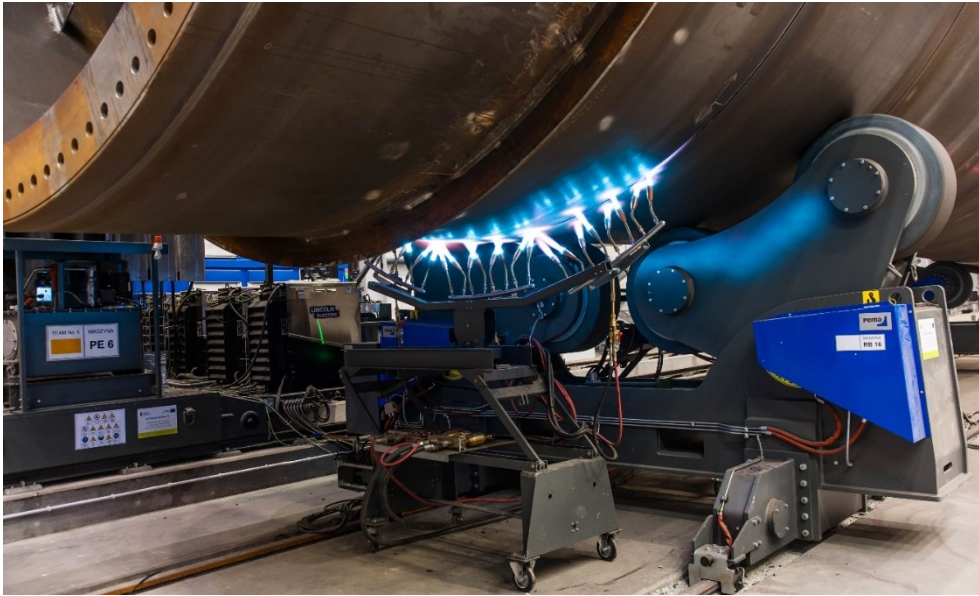


### 5.3 Kaasuesilämmityksen referenssikohde

Eräässä Pemamekille tehdyssä tapaustutkimuksessa suunniteltiin ja rakennettiin paineilma-asetyleenipolttimilla toimiva kaasuesilämmitysjärjestelmä tuulivoimalan rungon valmistamisprosesseja varten. Yksi näistä prosesseista oli ulkopuolisen kehäsauman esilämmittäminen hitsausta varten ja tämä valittiin referenssikohteeksi tähän tutkimukseen parhaan soveltuvuutensa vuoksi. Kyseinen hitsisauma on usein geometrialtaan yksi eniten hitsiaineen täyttöä vaativa, eli hitsin kesto ja energian kokonaiskulutus ovat myös yleensä melko suuria. Syvän railon tuoman suuren ainevahvuuden vuoksi myös esilämmityksen tarve on korostunut.

#### 5.3.1 Työkappaleen ja käytetyn teknologian parametrit

Tavoitteeksi esilämmityksen kestolle asetettiin 50 min ja esilämmityslämpötilaksi 100°C. Työkappaleen halkaisija oli 6000 mm ja ainevahvuuden paksuus 100 mm. Lämmitettävä matka voidaan laskea piirin kaavan avulla, jolloin lämmitysmatkaksi saadaan n. 18,8 m. Järjestelmän polttoaineena toimi asetyleeni yhdessä paineilman kanssa. Polttimien lämmittämä pinta-ala riippuu polttimien etäisyydestä ja kulmasta työkappaleeseen nähden, mutta sen voidaan päätellä olevan n. 200 mm leveydeltään, liekkien kuumimpien alueiden kohdistuessa railon läheisyyteen (kuva 15).



Kuva 15. Referenssikohteen 24:n paineilma-asetyleenipolttimen esilämmitysjärjestelmä ulkopuolisen kehäsauman hitsausta varten (Pemamek 2023, Pemamekin kuvapankki)

Suuren ainevahvuuden esilämmittäminen vaati tehokkaan lämmitysjärjestelmän, jotta lämmitysaika ei riistäytyisi käsistä. Pyydetyn esilämmitystehon perusteella tapaustutkimuksen toimittaja laski lämmitysjärjestelmän vaativan kolmesta kahdeksan polttimen setistä koostuvan kokonaisuuden – yhteensä siis 24 paineilma-asetyleenipoltinta (kuva 15). Asetyleenin kulutukseksi työkohteen esilämmittämiseksi arvioitiin 21–30 m<sup>3</sup> ja paineilman 147–210 m<sup>3</sup>.

Optimaalisen operoinnin aikana hitsaus ei onnistuneen esilämmityksen jälkeen keskeydy kertaakaan, vaan hitsausprosessien lämmöntuonti riittää ylläpitämään riittävää työlämpötilaa, jolloin useampaa esilämmityssykliä ei tarvita (Lepola & Ylikangas 2016, 331). Voidaan siis teoreettisesti olettaa n. 50 minuuttia kestävän lämmityssyklin riittävän yhden 100 mm hitsausrillon täyttöhitsaukseen. Kustannukset voidaan karkeasti arvioida kulutetun asetyleenin kulutuksen perusteella. Paineilman vaatima ilmamäärä on myös merkittävä ja tulisi huomioida kustannuslaskennassa.

### 5.3.2 Arvioidun polttoainemäärän energiasisältö

Esilämmitykseen tarvittava asetyleenimäärä 21–30 m<sup>3</sup> voidaan muuttaa kiloiksi asetyleenin tiheyden avulla. Asetyleenin tiheys on 0°C lämpötilassa 1,171 kg/m<sup>3</sup> ja 15°C lämpötilassa 1,1086 kg/m<sup>3</sup>, eli ympäristön lämpötilalla on suuri vaikutus tiheyteen. Laskennassa

käytetään 15°C tiheysarvoa, koska se on hyvin lähellä testiolosuhteiden lämpötilaa. (Air Liquide 2023.) Tiheys kerrotaan arvioiduilla kulutusmäärillä, jolloin esilämmityksen kilomääräksi voidaan laskea 23,3–33,3 kg. Euroopan markkinoiden kilohinta asetyleenille oli lokakuussa 2023 2,16 Yhdysvaltain dollaria (Business Analytiq 2023). Esilämmityksessä käytetyn asetyleenin hinnaksi voidaan siis tapaustutkimuksen kulutuksella ja lokakuun 2023 hinnalla laskea 50,3–71,8 dollaria. Asetyleenin kilohinta Euroopassa oli selkeästi korkeampi kaikkiin muihin vertailumarkkinoihin, kuten Aasiaan tai Amerikkaan verrattuna.

Laskennassa käytettyä kilohintaa ei voida kuitenkaan pitää kovinkaan tarkkana laskenta-arvona esilämmityksen kustannuksille, sillä ei voida varmuudella osoittaa, kenelle kyseinen hinta on saavutettavissa. Kustannusten arviointi on aina asiakaskohtaista ja Euroopan sisällä asetyleenin hinnoissa ja saatavuudessa saattaa olla todella suuria maa- ja asiakaskohtaisia eroja. Lämmitysmenetelmästä riippumatta lämmityskustannukset ovat riippuvaisia asiakkaan tekemistä hankintasopimuksista – oli kyseessä sitten kaasun tai sähkön hankintasopimus.

Lämmityskustannusten vertailua on helpompi lähteä tapaustutkimuksen pohjalta tekemään kulutetun energiasisällön perusteella. Kulutetun asetyleenin kilomäärä pystytään muuttamaan megajouleiksi, kun tiedetään asetyleenin lämpöarvo. Myös induktiolämmityksen tapauksessa pystytään monitoroimaan ja laskemaan kulutetun sähköenergian määrä, joka on esilämmitykseen kulunut. Näin saadaan selville tarkemmat vertailuarvot samoissa suureissa, kun muutetaan megajoulet kilo- tai megawattitunneiksi.

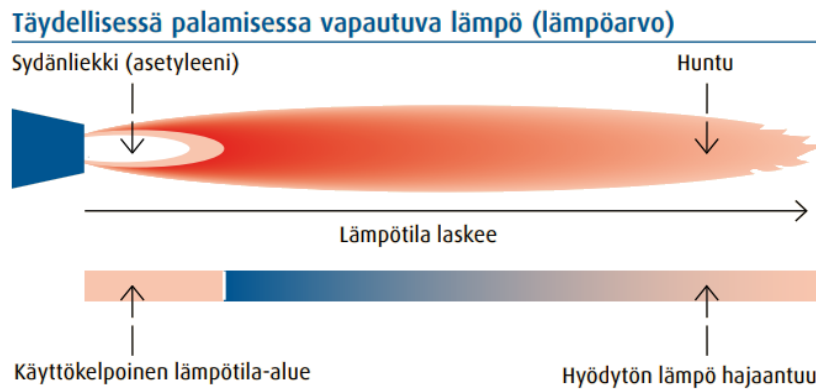
Asetyleenin lämpöarvolla 50 MJ/kg (O'Brien 2004) voidaan kertoa arvioidun kulutuksen mukaiset kilomäärät, jolloin saadaan kulutetun energiasisällön haarukaksi 1164–1663 MJ. Koska yksi wattitunti vastaa 3600 joulea, voidaan megajoulet muuttaa kilowattitunneiksi jakamalla niiden arvot 3,6 kertoimella. Näin saadaan arvioidun lämmitykseen kuluvan energian haarukaksi 323–462 kWh.

### 5.3.3 Railoon kohdistetun lämmön hajaantuminen

Voidaan tarkasti laskea, kuinka suuri määrä terästä lasketulla kaasun energiasisällöllä voitaisiin teoriassa lämmittää, jos hyötysuhde olisi 100 % ja mitään häviöitä ei esiintyisi. Tämä luo vertailupohjan, jonka avulla voidaan arvioida haarukka kaasuesilämmityksen

hyötysuhteelle kyseisessä tapaustutkimuksessa. Arvio on todella karkea, koska esilämmite-  
tyn aineksen tilavuus on haastava määrittää lämpömäärän laskentaa varten ainakaan niin,  
että lämmitetyn alueen lämpötilaprofiili olisi laskennassa yhtenäinen.

Lämmitettäessä hitsausrilo esilämmityslämpötilaan kaasupolttimilla – tai muillakaan me-  
netelmillä – ei alueelle kohdistettu lämpöenergia suuntaudu ainoastaan hitsauksen kannalta  
olennaiseen teräsmateriaaliin. Liekin kuumin osa voi olla kohdistettu kohti lämmitettävää  
aluetta (kuva 16), mutta lämpösäteily leviää liekin ympärillä jokaiseen suuntaan. Läm-  
pösäteilyn lisäksi lämpöä karkaa esilämmitysalueelta muualle materiaaliin johtumisen seu-  
rauksena.



Kuva 16. Asetyleenipolttimen liekin muoto ja lämpöarvon hyödynnettävyys (Linde 2023)

Johtumisen voimakkuutta ja vaikutusta pystytään matemaattisesti arvioimaan, mutta hajaan-  
tuneen lämpösäteilyn vaikutusta (kuva 16) ja sen imeytymistä materiaaliin esilämmitysalu-  
een ulkopuolella on vaikea arvioida ilman tutkimuksia, joissa mittauspisteitä on sijoitettu  
myös etämmälle hitsausriloista. On myös määriteltävä suhtautuminen tähän muualle ma-  
teriaaliin kohdistuneeseen lämpöenergiaan. Lämmön kohdistuessa verrattain lähelle hitsaus-  
riloa saattaa se edesauttaa ehkäisemään lämmön karkaamista ympäröivään kylmempään  
materiaaliin, mutta kauempana se voitaisiin jo tulkita hukkaenergiana, jolla ei ole merkitystä  
esilämmityslämpötilan saavuttamisen kannalta.

Lämpötilaprofiilin voidaan esilämmitysalueella ja sen välittömässä läheisyydessä olettaa  
noudattavan lämpöyhtälöä, jossa lämpötila laskee melko tasaisesti etäisyyden kasvaessa  
lämmitysalueelta. Johtuminen on voimakkainta ensimmäisen lämmityskierroksen jälkeen,

kun lämmitysalueen välittömässä läheisyydessä on vielä suuri massa viileämmässä – oletettavasti aloituslämpötilassa – olevaa terästä. Lämpötilojen tasaannuttua laajemmalla alueella, on jäähtymisen voimakkuus johtumisen seurauksena esilämmitysalueella oletetusti heikompaa seuraavien lämmityskierroksien jälkeen. Toisaalta jäähtyminen voimistuu korkeammissa lämpötiloissa, kun lämpötilaero ympäröivän ilman ja teräksen välillä kasvaa.

Käyttökokemusten mukaan yllä mainittu voimakas jäähtyminen johtumisen seurauksena toteutuu huomattavasti näkyvämmiin induktiokelalla lämmittäessä kuin kaasuesilämmityksessä. Induktiokela lämmittää voimakkaasti kelan läheisyydessä olevaa materiaa, kun taas kaasulla lämmitetään myös hitsausrailon läheistä aluetta. Tämän lisäksi kaasupolttimilla lämmittäessä lämpö jakautuu laajemmalle alueelle lämpösäteilyn vuoksi, lämmittäen ympäröivää aluetta.

### 5.3.1 Energiasisällön suhteuttaminen optimilämmitystilanteeseen

Esilämmityksen energiankulutuksen referenssiä varten voidaan luoda ns. minimitaso, eli energiamäärä, joka kuluisi materiaalin esilämmittämiseen kaikissa olosuhteissa minimissään. Tässä minimitasossa hyötysuhteen oletetaan olevan 100 % eli mitään häviöitä ei tapahtuisi missään vaiheessa prosessia. Todellisuudessa tilannetta ei voida luonnollisesti säävittää, mutta se auttaa suhteuttamaan esilämmitykseen kuluvan energian määrää. Lisäksi voidaan kaasua- ja induktioesilämmitysten keskinäisen vertailun lisäksi luoda kolmas näistä riippumaton vertailutaso.

Lämpömäärän kaavalla voidaan selvittää kuinka suuri massa terästä tapaustutkimuksessa esitetyillä energiasisällöillä olisi mahdollista lämmittää maksimissaan.

$$Q = cm\Delta T \quad (2)$$

jossa  $Q$  on lämpömäärä [J],  $c$  on ominaislämpökapasiteetti [J/kgK],  $m$  on kappaleen massa [kg] ja  $\Delta T$  on lämpötilamuutos [°C].

Sijoittamalla kaavaan lämpömäärän paikalle arvioidut energiasisällöt hitsausrailon esilämmittämiseksi, saadaan lämmitettävän kappaleen massaksi 31 598–45 196 kg. Jos tämä suhteutetaan työkappaleen halkaisijaan ja ainevahvuuteen, saadaan lämmitettävän vaipan leveydeksi 2,14–3,05 m, eli merkittävästi enemmän, kuin lämmitettävän hitsausrailon vaipan

leveys olisi. Esilämmitettävän alueen leveydeksi voidaan hyvin karkeasti arvioida olevan n. 100–200 mm.

Tapaustutkimuksen arvioituilla asetyleenin kulutuksilla voitaisiin siis optimiolosuhteissa lämmittää 10–15 kertainen määrä terästä, kuin sillä tavoitellaan todellisuudessa lämmitettävän. Tässä vertailussa hyötysuhde olisi siis kaasulla esilämmitettäessä parhaimmillaan 9,37 % ja arvioituista kulutusmääristä suuremmalla 6,55 %. Hyötysuhteen laskenta kuitenkin perustuu puhtaasti asetyleenin energiasisällön vertaamiseen tapaustutkimuksen esilämmitysprosessin ja optimilämmitystilanteen välillä. Tarkemmat kenttätutkimukset esilämmityksestä induktion ja kaasun välillä tarjoavat hyödyllistä materiaalia lisävertailun suorittamiseksi.

## 6 Kenttätutkimukset

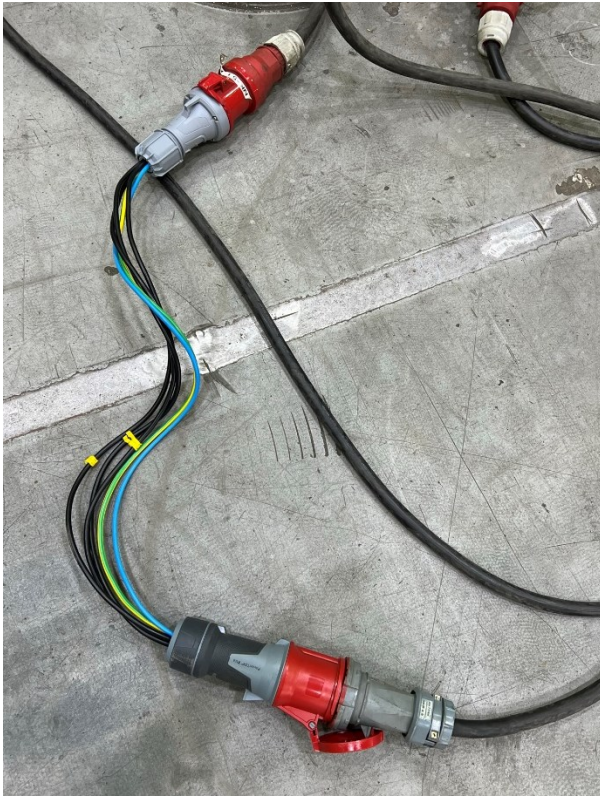
Kenttätutkimusten tavoitteena oli pystyä mahdollisimman suurella tarkkuudella mittaamaan ja laskemaan asetetun esilämmityslämpötilan saavuttamiseen vaaditun kokonaisenergian määrä kaasu- ja induktiolämmitysmenetelmillä. Esilämmitykseen kuluvan energian määrä kokonaisprosessin kannalta on usein merkittävä ja tutkimukset osoittivat, että näiden välillä on suuriakin eroja. Selvitettävänä kokonaisuutena oli myös eri jauhekaarihitsaussovelluksissa kuluvan hitsausenergian määrä. Kenttätutkimukset suoritettiin Pemamekin Process Centerissä, jossa tutkitaan ja testataan erilaisia hitsaamiseen liittyviä teknologioita.

Esilämmitystesteissä tuli varmistua johdonmukaisuudesta mittaustavoissa. Testit poikkesivat toisistaan lämmitysmenetelmien erilaisen luonteen vuoksi, mutta tärkeintä kahden eri menetelmän testeissä oli varmistua samaan lämpötilaan pääsemisestä ennalta päätetyissä lämpöpareissa. Kun lämmitykseen kuluvat energiamäärät selvitetäisiin tarkasti, olisivat nämä arvot keskenään suoraan vertailukelpoiset.

### 6.1 Hitsaustestien toteutus

Hitsausenergiamittausten keskiössä oli hitsausvirtalähteen sähkönkulutus, sillä hitsausprosessiin ei tämän testin yhteydessä liity muita merkittäviä energiamuotoja, jotka näkyisivät kulutuksena. Hitsaustornia syötetään myös pienemmällä syöttökaapelilla yleistointojen, kuten ohjausjärjestelmän ylläpitämiseksi. Yleistointojen virrankulutus on kuitenkin hitsauksen rinnalla häviävän pientä, joten se sivuutettiin tässä tutkimuksessa.

Hitsaustestit suoritettiin kappaleessa 3.5 nähdyn hitsaustornin vaakapuomin päähän integroidun hitsauspään avulla. Järjestelmää ohjattiin hitsaustornin WeldControl 100 ohjausjärjestelmällä, jota kautta kaikki hitsausparametrit voidaan säätää. Kaikki virtalähteen kuluttama sähkövirta kulkee yhden 63 ampeerisen kolmivaihekaapelin välityksellä (kuva 17), eli eri jauhekaariparametreilla hitsattaessa erot energiankulutuksissa voitaisiin havaita kyseisen syöttökaapelin vaiheiden virranvaihteluissa.

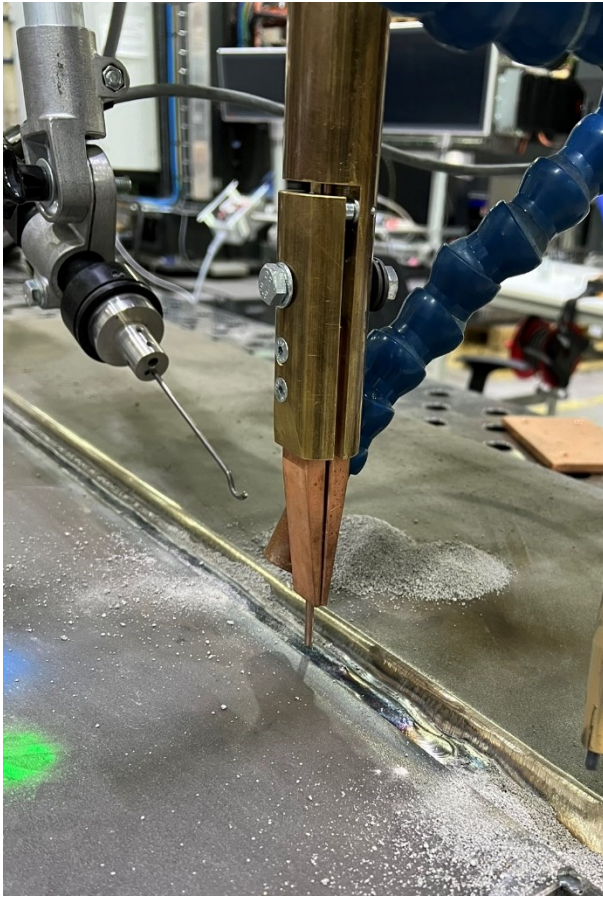


Kuva 17. 3-vaihe 63 A virransyöttökaapeli ilman ulointa suojausta hitsauksen kenttätutkimusten virranmittaukseen

Mittauksia varten teetetty noin metrin mittainen kolmivaiheinen testikaapeli (kuva 17) voitiin sijoittaa kiinteän sähkönsyöttöpisteen pistorasian ja virtalähteen pistokkeen väliin. Poiketen valmiista IP-luokitellusta ja suojatusta 63 A kaapelista, tästä testikaapelista jätettiin kokonaan uloin kuori pois, eli vaiheet olivat omina suojattuina kaapeleinaan näkyvissä ja toisistaan eroteltavissa. Tämän avulla pihtimittareiden avulla voitiin mitata kukin vaihe kerrallaan vaivattomasti ja turvallisesti. Virrankulutukset mitattiin vakiokuormalla, eli hitsauksen ja hitsausparametrien pysyessä stabiileina hitsauksen käynnissä ollessa.

Hitsaamiseen liittyvät tutkimukset suoritettiin käyttämällä Lincoln Electricin Powerwave AC/DC 1000SD virtalähdettä, joka on Pemamekillä yleisesti käytetty virtalähde jauhekaari-sovelluksissa. Hitsaustestit suoritettiin 4 mm langalla, leukasuutin- (kuva 18) tai pitkälanka-hitsauspolttimella, vaihtelevilla hitsausvirroilla ja kaarijännitteillä. Eri vaiheiden virrat mitattiin pihtimittareilla, kun hitsausta oli kulunut hetki. Syöttöjännitteet mitattiin useaan otteeseen ennen hitsausta, mutta havaittiin, että jännitteessä esiintyi jonkin verran hajontaa, riippuen sen hetkisestä yhteiskuormasta.





Kuva 18. Leukasuutinpoltin, joka oli toinen testihitsauksissa käytetyistä hitsauspolttimista

Hitsaamisen alettua suoritettiin ensin vaihevirtojen mittaus pihtimittareilla, jonka jälkeen siirryttiin seuraamaan hitsausprosessi loppuun ja kirjaamaan tulokset. Hitsauslaadun tuloksen näkee jauhekaarisovelluksissa tyypillisesti vasta hitsauksen päätyttyä, kun ylimääräinen jauhe on imetty pois ja kuona poistettu. Silminnähten parametrit vaikuttivat olevan optimoidummat leukasuutinpolttimelle, kuin pitkälankapolttimelle, sillä hitsisauman laatu vaikutti tasaisemmalta. Ohjausjärjestelmä kertoo hitsauksen päätyttyä osan tiedoista, kuten lisäaineen tuottomäärän ja lämmöntuonnin, joten kaikki parametrit kirjattiin vasta hitsauksen päätyttyä. Aikaa ja hitsausmatkaa mitattiin myös jokaisella toistolla.

## 6.2 Kaasulämmitystestin toteutus

Kaasulämmityksen kenttätutkimukset poikkesivat muista tutkimuksista eniten, koska kyseisessä menetelmässä sähkö ei näyttele minkäänlaista roolia. Tämän vuoksi mittausmenetelmät olivat myös merkittävästi erilaiset ja vaativat erilaisen mittaustavan suunnittelun. Jotta

energiatehokkuuksia eri esilämmitysmenetelmien välillä voitaisiin vertailla, tulisi energiankulutusta kuitenkin pystyä mittaamaan sellaisissa yksiköissä, jotka voitaisiin muuntaa lopulta samaksi vertailuyksiköksi induktiolämmitystestien kanssa. Tutkimuksissa päädyttiin tutki- maan kaasun kulutusta lämmitystestien aikana ja tämän avulla voitiin selvittää esilämmityk- seen vaadittava energiankulutus, kun kulutetun asetyleenin energiasisältö megajouleina voi- taisiin muuttaa kilowattitunneiksi. Poltтокаasujen käyttö vaatii usein hapettajan, jotta saavu- tetaan riittävän suuri lämmitysteho. Hapen rooli lämmitystestissä on siis tulistaa liekin läm- pötila korkeammaksi, mutta sillä ei varsinaisesti ole suoraa vaikutusta lämpöarvoon, vaan tehoon.

Molempien lämmitystestien työkappaleeksi valittiin suuren ainevahvuuden teräslevy, jonka mitat olivat 1010 x 545 x 150 mm. Hitsausrailo oli pisimmän sivun kanssa yhdensuuntainen (kuva 19). Testeihin haluttiin valita levy, jolla voitaisiin parhaiten demonstroida esimerkiksi suurten tuulivoimasovellusten todellista tuotantotilannetta. Hitsausrailo sijaitsi levyn kes- kellä ja se oli alun perin 138 mm syvä, mutta pohjalle oli hitsattu jo kahdeksan testipalkoa, jolloin syvyyttä oli jäljellä 110 mm. Railon pohjan säde oli 8 mm ja railokulma 8 astetta.

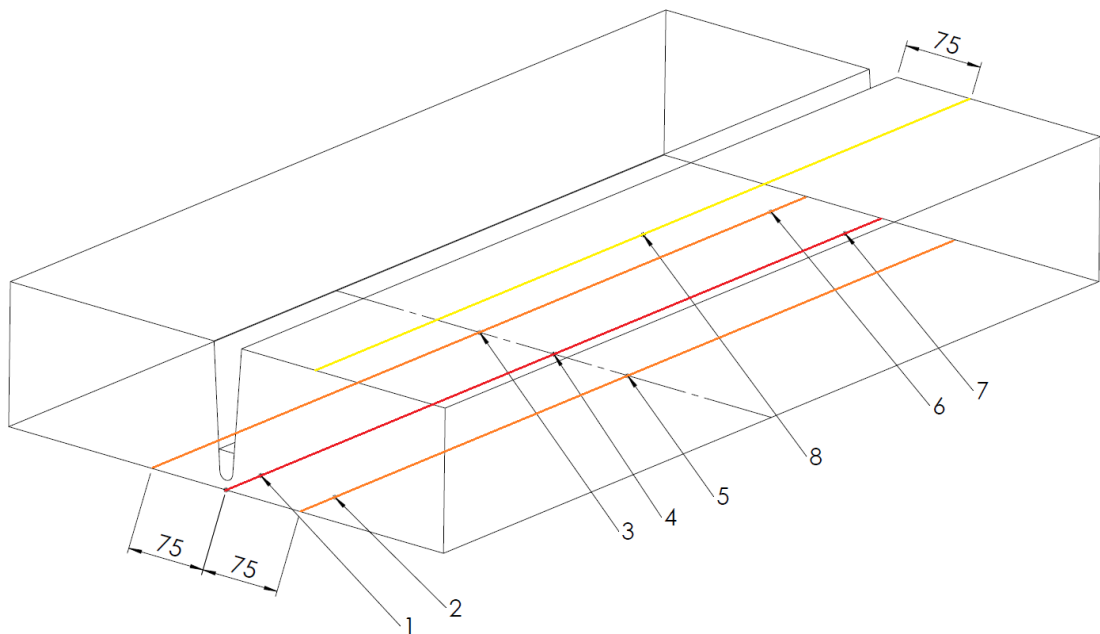


Kuva 19. Esilämmitystutkimuksien testikappale, kooltaan 1010x545x150 mm (hitsausrailo- jen päädyissä olevia satelliittipaloja ei huomioitu)

Esilämmitystesteissä käytettiin samaa testikappaletta (kuva 19) molemmilla lämmitysmene- telmillä, jotta testituloksiin vaikuttavista tekijöistä pystyttäisiin eliminoimaan mahdollisim- man monta tuntematonta muuttujaa. Eri työkappaleiden tapauksessa tällaisia muuttujia voisi

esimerkiksi olla hieman erilaisten teräsmateriaalien tai geometrioiden vaikutukset termodynaamisiin ominaisuuksiin.

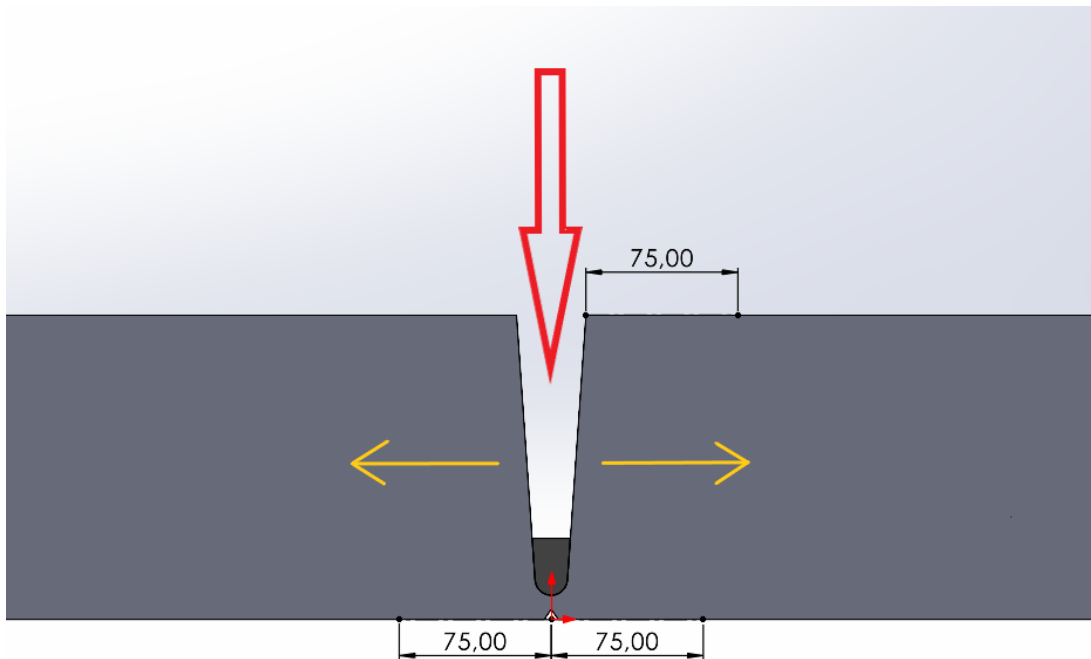
Lämpötilan mittaamiseen käytettäviä lämpöpärejä sijoitettiin railon päästä katsottuna eri etäisyyksille railosta, jotta voitaisiin myös havainnoida lämmön johtumisnopeutta suuressa teräsmassassa. Railon suunnassa mitauspisteitä sijoitettiin tasaisesti koko testikappaleen matkalle – kuten kuvasta 20 voidaan todeta – jotta testikappale pystyttäisiin varmasti lämmittämään tasaisesti tavoitelämpötilaan koko matkalta. Levyn alapuolelle eli lähemmäs kuumempaa lämmitysaluetta sijoitettiin seitsemän lämpöpäriä ja levyn yläpuolelle sijoitettiin yksi lämpöpäri vertailupisteeksi.



Kuva 20. Lämpöpärien sijainnit testikappaleessa. Kuumimpien lämpötilojen lämpöpärit sijaitsevat punaisella linjalla, oranssilla toiseksi kuumimmat ja keltaisella viivalla levyn yläpuolella vertailulämpöpäri

Kuvasta 20 nähdään, miten keskelle poikittaissuunnassa sijoitettiin lämpöpärit molemmiin puolin hitsausrailoa eli keskilinjasta mitattuna 75 mm etäisyydelle standardin SFS-EN ISO 13916:2017 (2017) mukaisesti. Hitsausrailon sivuun (75 mm) asetettujen neljän lämpöpäarin 2,3,5,6 lisäksi hitsausrailolinjalle sijoitettiin kolme lämpöpäriä 1,4,7 – päihin ja keskelle. Päihin sijoitettiin vain yhdet lämpöpärit 75 mm etäisyyksille hitsausrailosta, koska lämmön

voidaan olettaa jakautuvan melko tasaisesti materiaalissa, mutta tämän varmistamiseksi ja keskinäisen vertailun vuoksi keskelle työkappaletta sijoitettiin lämpöparit molemmin puolin hitsausrailoa. Keskellä sijainneiden parien 3 ja 5 avulla voitiin kuitenkin todeta, ettei lämpö jakautunut täysin tasaisesti näiden parien välillä. Syyksi epäiltiin heittoa 75 mm etäisyyden asennustarkkuudessa, mutta myös käytettyjen lämpöparien, mittalaitteiston, lämmityslaitteistojen toiminnassa saattaa esiintyä eroja, mitkä aiheuttaisivat alueellisia lämpötilaeroja. Induktiolämmityksessä kelan epäsymmetrinen sijoittelu railon keskelle voisi aiheuttaa toispuoleisuutta railon lämmitysalueella, mutta kaasulla lämmittäessä (kuva 21) lämmöntuonnin voidaan olettaa olevan täysin symmetrinen.



Kuva 21. Lämpötilan mittauspisteet testikappaleessa. Punainen nuoli havainnoi lämmöntuontia kaasumenetelmällä ja keltaiset nuolet lämmön johtumista ympäröivään materiaaliin

Testien lämpötilatavoitteeksi asetettiin  $100^{\circ}\text{C}$ , joka tulisi saavuttaa molemmissa lämmitystesteissä keskeltä sivuun sijoitetuissa lämpöpareissa 75 mm päässä hitsausrailon keskilinjasta levyn alapuolella (kuva 21). Olennaisinta testeissä ei ole saavuttaa mahdollisimman korkeaa esilämmityslämpötilaa, vaan saman lämpötilan saavuttaminen samalla testikappaleella – eri menetelmillä. Korkeamman lämpötilan saavuttaminen olisi ollut myös

haastavampaa, pitkäkestoisempaa ja enemmän energiaa kuluttavaa. Mitä korkeammaksi materiaali kuumennetaan, sitä voimakkaampaa on kappaleen jäähtyminen.

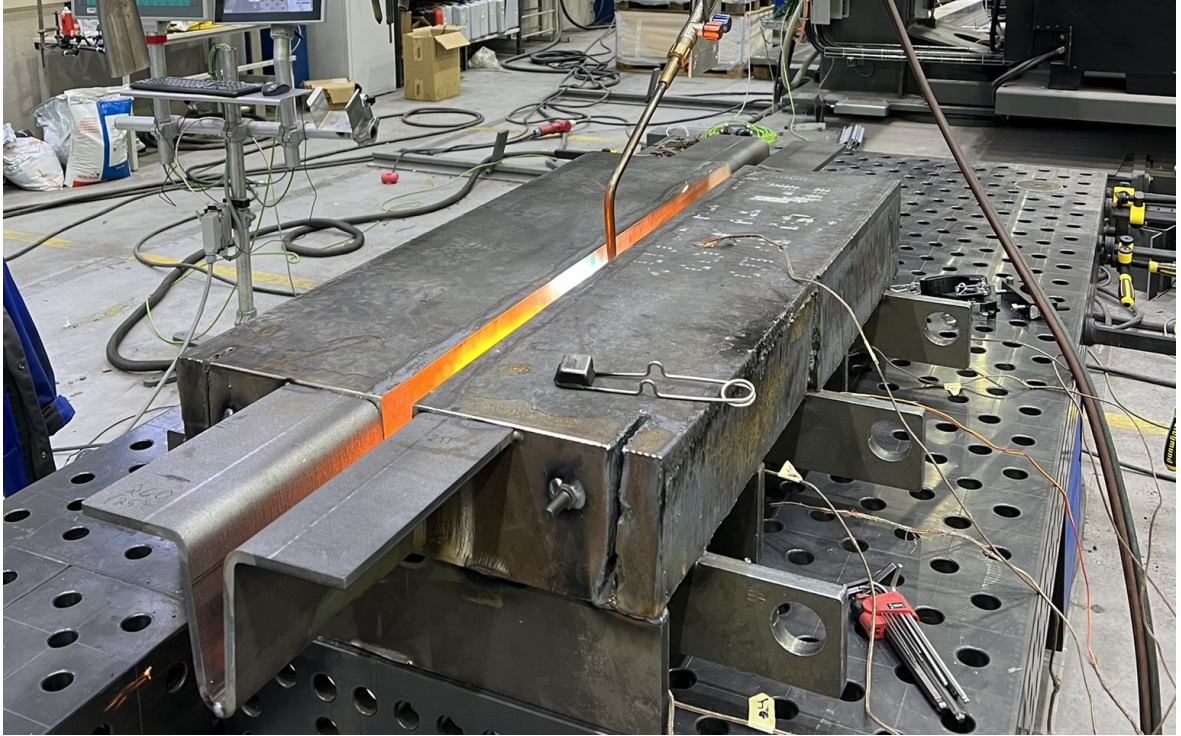
Kaasuesilämmityksen tehokkuus on enemmän riippuvainen vallitsevista ympäristöolosuhteista, kuten lämpötilasta ja työtilan vetoisuudesta. Tutkimukset kuitenkin suoritettiin vakioolosuhteissa, jolloin testiolosuhteet ovat samat niin kaasulämmitykselle, kuin induktiolämmityksellekin. Induktiolämmityksen tapauksessa vetoisuus ei olisi vaikuttanut muuhun kuin lämpöenergian johtumiseen kappaleesta ilmaan voimakkaammin, mutta kaasulämmityksessä se olisi voinut vaikuttaa kaasupolttimen tehoon ja vääristää tutkimustuloksia.

Lämpöenergia johdettiin AGA (nyk. Linde) X21 kuumennuspolttimen avulla hitsausrailoon, josta lämpö jakautui ympäristöön ja osin absorboitui ympäröivään teräsmateriaaliin. Testeissä hyödynnettiin kyseistä kuumennuspoltinta happi-asetyleeniyhdistelmällä, koska kappaleessa 5.3 esitellyn referenssikohteen mukaista paineilma-asetyleenilaitteistoa ei ollut saatavilla. Lepola & Ylikankaan mukaan (2016, 155) asetyleeniliekkin lämpötila ilman lisähapetta on 2300°C ja hapen kanssa 3160°C, eli hapen rooli tehonlisääjänä on merkittävä sen kasvattaessa lämpötilaa lähes tuhat astetta. Kaasuliekki asetettiin neutraalista liekistä hieman hapettavaan tahtavaksi, jotta voitaisiin mahdollistaa mahdollisimman tehokas kuumennusliekki (Lepola & Ylikangas 2016, 160).

Kokonaiskustannusten määrittämisen kannalta oli olennaista mitata myös kulutetun hapen määrää. Referenssiprojektin esilämmityksessä käytettiin useita paineilma-asetyleenipolttimia ja kyseisessä sovelluksessa paineilman määrä oli n. seitsemänkertainen arvioidun asetyleenin kulutusmäärään nähden. Paineilamalla pystytään kasvattamaan hapen määrää, jotta saadaan aikaan kuumempi sininen liekki. Happi-asetyleeniyhdistelmällä käytettävää puhdasta happea tarvitaan huomattavasti paineilmaa vähemmän, mutta kuitenkin asetyleeniä enemmän.

Molemmissa lämmitystesteissä laitteisto oli kiinteästi asennettu hitsaustornin hitsauspään yhteyteen (kuva 22), jolloin kaikkia liikkeitä pystyttiin ylläpitämään hallitusti ja vakionopeudella. Tämä mahdollisti jatkuvan lämmitysliikkeen hyödyntämisen hitsaustornin ohjausjärjestelmästä, jossa pystyttiin määrittämään lämmitysmatka ja -nopeus. Vaihtoehtona oli ajaa lämmitystä niin sanotulla kiertoliikkeellä, jossa olisi lämmitetty vain toiseen suuntaan ja palattu takaisin lähtöpisteeseen ilman lämmitystä. Toisena vaihtoehtona oli ajaa

jatkuvalla lämmityksellä edestakaista liikettä, johon lopulta päädyttiin. Lämmitysnopeudeksi molempiin testeihin asetettiin 1 m/min.



Kuva 22. Happi-asetyleenipoltin ja työkappale kaasulämmitystesteissä

Kuumennuspoltin pyrittiin sijoittamaan hitsausrailon keskelle (kuva 22) ja mahdollisimman optimaalisen etäisyyden päähän hitsausrailon pohjasta. Kuumennusliekin kuumin kohta on heti polttimen päässä, mutta lämmön haluttiin kuitenkin jakautuvan tasaisesti melko samalle alueelle induktiokelan lämmitysalueen kanssa, joten se jätettiin vähän loitommalle railon pohjasta. Testi poikkeaa todellisesta lämmitystilanteesta siten, että kuten esim. kappaleen 5.3 referenssikohteen tapauksesta voidaan todeta, polttimia harvoin asetetaan suoraan rai- loon, vaan ne jätetään ulkopuolelle pidemmän vaikutusetäisyyden päähän. Tällä tavalla saa- vutetaan helpompi käytettävyys, koska hitsausrailon sijainti saattaa elää työkappaleen akse- lin suunnassa ja polttimet ovat kuitenkin usein kiinteästi asennettuja. Helppokäyttöisyydellä saattaa olla hyötysuhdetta alentava vaikutus, kun polttimet asetetaan kauemmas itse hitsaus- railosta, jota tulee sitten kompensoida pidemmällä lämmitysajalla tai tehokkaammilla polt- timilla.

Kaasupolttimen antama teho on melko haastava määrittää tarkasti, jonka vuoksi energiankulutuksen mittaamisen lähtökohdaksi otettiin kulutettujen kaasumäärien mittaaminen kaasupolttimen tehon sijasta. Ensimmäiset lämmityskokeet suoritettiin mittausten menetelmällä, jossa happi- ja asetyleenipullot punnittiin ennen lämmitystestiä ja sen jälkeen. Odotusarvo oli, että punnituksessa havaittaisiin useiden kilojen ero, jota voitaisiin hyödyntää ominaiskulutuksen määritelmässä. Ongelmaksi kuitenkin muodostui odotettua pienempi kaasun kulutus kiloina, punnituslaitteen matala mittaustarkkuus ja odottamaton mittausrvirhe. Punnitukseen käytettävän vaa'an olisi pitänyt olla tarkasti kalibroitu vähintään kolmen desimaalin tarkkuudelle. Asetyleenin ja hapen painaessa vain reilun kilon kaasukuutiota kohden, olisi kolmen desimaalin tarkkuudella saavutettu litran tarkkuus, joka olisi ollut jo erittäin hyvä tarkkuus – ottaen huomioon kaasulämmityksessä käytettävät suuret litramäärät.

Ensimmäisen lämmitystestin jälkeen suoritettiin lisätutkimuksia, joissa jäljiteltiin lämmityksessä käytettyä kuumennusliekkiä ja pyrittiin mittaamaan kaasujen virtausnopeudet asetyleenin ja hapen osalta. Näissä virtausmittauksissa hyödynnettiin SMC:n valmistamaa paineilman ilmamäärän mittauksessa käytettävää virtausmittaria ja MAG-hitsauksen argon suoja kaasun mittarina käytettävää rotametria. Paineilman ilmamäärän mittaamiseen tehdyn mittalaitteen antamiin tuloksia ei voitu kuitenkaan pitää riittävän luotettavana, joten hapen määrä päätettiin myöhemmin ennemmin laskea tunnettujen happi-asetyleeni-sekoitussuhteiden avulla. Rotametri oli kuitenkin suunniteltu argonille, jonka tiheys poikkeaa asetyleenin tiheydestä melko paljon.

### 6.3 Induktiolämmitystestin toteutus

Induktiolämmitysjärjestelmällä suoritettavat testit olivat testikappaleen ja lämpötilan mittaamismetodien kannalta täysin samanlaiset kuin kaasulämmitystesteissäkin, eli testikappale oli sama ja lämpötilan mittauspisteet olivat samoissa sijainneissa. Tavoitelämpötila testikappaleen alapuolelle 75 mm päähän railosta sijoitetuissa lämpöpareissa oli sama kuin kaasulämmitystesteissä, eli 100°C. Merkittävä ero testissä oli energiankulutuksen mittaustavassa, koska lämmitykseen käytettävä teknologia oli merkittävästi erilainen. Induktiolämmitystesteissä oli mitattava induktiovirtalähteen kuluttamaa sähköenergiaa, kun kaasulämmitystesteissä kulutuksen mittaaminen perustui asetyleenin tilavuusvirran mittaamiseen.

Testeissä käytettiin induktiolämmitysjärjestelmää, joka sisälsi virtalähteen, yhdistetyn virta- ja jäädytyskaapelin ja kustomoidun T-mallisen kelan. Kela (kuva 23) on riittävän kapea, jotta se saadaan mahtumaan kapeidenkin raijlojen pohjalle. Hitsausrailon lämmityksessä kelan geometrialla on suuri merkitys sen tehokkuuteen, mutta jos haluttaisiin aina saavuttaa optimaalisin hyötysuhde lämmityksessä, tulisi kullekin railogeometrialle ja lämmityskonfiguraatiolle suunnitella erilainen kela. Suunnittelurakenteiden harmonisoimiseksi ja kustannusten hillitsemiseksi on koettu järkevämmäksi käyttää kaikkiin käytetyimpiin railogeometrioihin samaa kelatyyppeä.



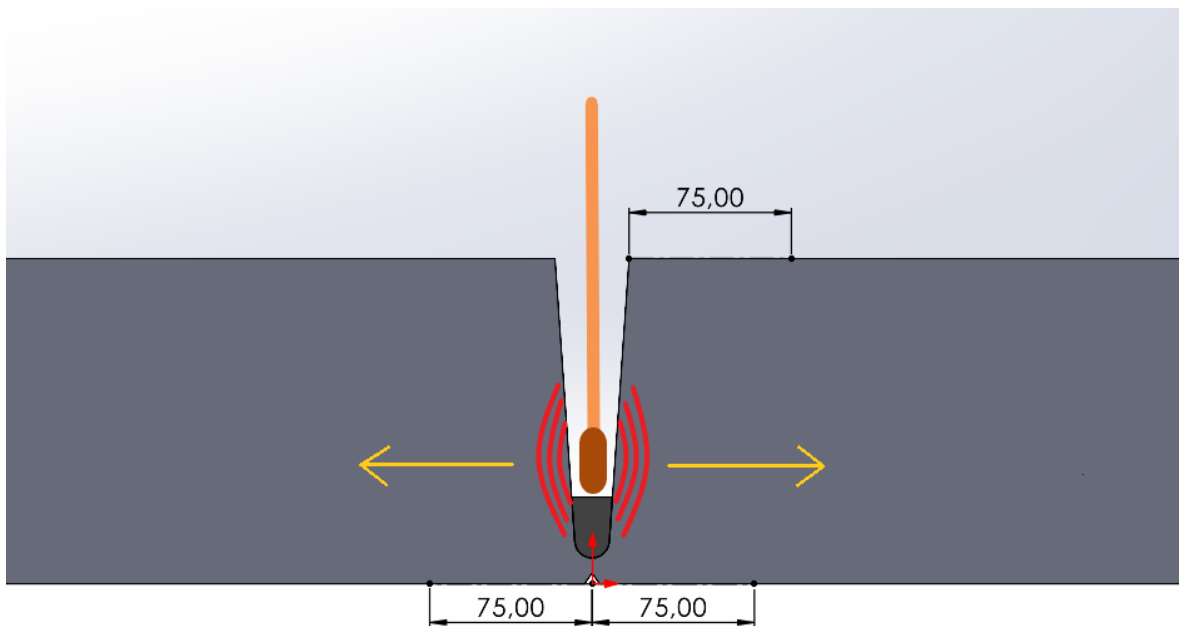
Kuva 23. Testeissä käytetty T-mallinen induktiokela

Käytetyllä virtalähteellä voidaan saavuttaa 50 kW nimellinen teho jatkuvassa käytössä ja 80 kW hetkellinen teho. Hitsausrailon pohjaa lämmittäessä (kuva 23) lämmitettävän alueen pinta-ala on kuitenkin suhteellisen pieni, jonka vuoksi suuri lämmitysteho kohdistuu pienelle alueelle. Tämä aiheuttaa helposti liian korkeita pintalämpötiloja, joiden välttämiseksi virtalähdettä ei voida ajaa täydellä teholla. Testeissä lämmitys toteutettiin 35 % tehoasetuksella, joka perustui aiempiin lämmitystesteihin. 35 % asetuksella saavutetaan 28 kW kelateho virtalähteen mukaan.

Optimitehon löytämiseksi tulisi suorittaa lisätestejä, joissa lämpöparit olisivat hitsausrailon pintakerroksissa kiinni. Näin voitaisiin mitata pintalämpötiloja, hillitä näiden nousemista



liian korkeaksi hyvän metallurgian säilyttämiseksi ja selvittää korkein mahdollinen tehoasetus. Optimitehon määrittäminen olisi tärkeää, jotta voitaisiin minimoida lämmitykseen käytettävä työaika. Teho vaikuttaa esilämmitysovelluksessa ensisijaisesti lämmityskierrosten määrään, koska esilämmityslämpötila voitaisiin saavuttaa tehon puolesta jo esimerkiksi ensimmäisellä kierroksella, jos pintalämpötila (kuvassa 24 kelan välittömässä läheisyydessä) ei toimisi rajoittavana tekijänä.



Kuva 24. Lämpötilan mittauspisteet ja induktiokela hitsausrailon pohjalla lämmitystilanteessa. Punaiset kaaret kuvaavat kelasta indusoituvaa magneettikenttää ja keltaiset nuolet lämpöenergian johtumista ympäröivään materiaaliin

Testien aikana induktiolämmittimen toimintaa on vaikea näkemällä havaita, sillä prosessista kuuluu ainoastaan pieni vinkuva ääni. Menetelmä poikkeaa tältä osin huomattavasti kaasulämmityksestä, jossa poltin pitää kuumennusasetuksessa melko kovaa ääntä hyvin näkyvän liekin lisäksi. Induktiolämmittimen toimintaa pystyi kuitenkin havainnoimaan lämpötilaa tarkkailemalla loggerista ja kädellä varovaisesti tunnustellen työkappaleen pinnalta ja railon ympäriltä ilmasta. Noin kahden tunnin päästä testin toteuttamisesta lämpöenergia oli hyvin tasaisesti jakautunut koko kappaleen alueelle. Työkappaleen ulkoreunoilta, eli noin 275 mm etäisyydellä lämmitetystä hitsausrailosta pystyttiin mittaamaan samoja lämpötiloja – noin 60

astetta – kuin lämpöpareista. Lämpötila pyrkii siis tasaantumaan tehokkaasti johtumisen (kuva 24) avulla samalla kun jäähtymistä tapahtuu konvektion kautta teräksestä ilmaan.

Induktiolämmityksestä on saatavilla kaasulämmitystä enemmän simulointidataa ja tietoa Pemamekin sisäisissä tietokannoissa, koska sitä on tutkittu sisäisesti enemmän. Tämä johtuu osittain induktiolämmityksen sisältymisestä Pemamekin tuoteportfolioon, kun taas kaasuesilämmitys hankitaan usein asiakkaan tai kolmannen osapuolen toimesta. Induktiolämmityksestä löytyvän tietotaidon vuoksi testin aikana käytettäviä tehoja, odotettuja lämmitysaikoja ja absorboituneen lämpöenergian määrää pystyttiin näiden aiempien simulointien ja testien perusteella paremmin ennustamaan ja arvioimaan, vaikka testit antoivatkin jälleen uutta tietoa näiden osalta.

#### 6.4 Tutkimuksissa käytetyt mittalaitteet

Tutkimuksissa mitattiin syötetyn sähkövirran määrää hitsaus- ja induktiovirtalähteille. Myös jännitettä mitattiin ennen ja testien aikana, jotta pystyttiin havainnoimaan kuorman vaikutusta jännitteeseen. Kuorman vaikutusta jännitteeseen ei voida kuitenkaan suoraan korreloida testissä käytettyyn virtalähteeseen, sillä samaan sähköverkkoon koko Pemamekin kiinteistössä on kytkeytynyt samanaikaisesti valtava määrä erilaisia sähkölaitteita kokoonpanosta, maalaamosta, koneistamosta, hitsaamosta ja käyttöönotosta, jotka myös tuovat kokonaisjännitteeseen vaikuttavaa kuormaa.

Pihtimittari oli malliltaan Fluke 323 True RMS (kuva 25), jolla voidaan mitata vaihtovirtaa 400 A ja AC/DC jännitettä 600 V saakka. Testeissä käytetään maksimissaan 125 A syöttövirtakaapelia, eli mittari soveltuu hyvin kyseisiin mittauksiin. Syöttöjännite oli kaikissa testeissä sama eli 400 V AC. Mittaustarkkuudeksi valmistaja on ilmoittanut vaihtovirran mittauksessa  $2\% \pm 5$  numeroa (45 Hz to 65 Hz) ja vaihtojännitteen mittauksessa  $1.5\% \pm 5$  numeroa. (Fluke 2023.)



Kuva 25. Sähkönsyötön mittauksissa käytetty pihtimittari Fluke 323

Pihtimittarin pihdeillä pystyttiin mittaamaan virta jokaisesta syöttökaapelin vaiheesta ja tarkastamaan kulkeeko nollajohtimessa virtaa. Virran lisäksi mittariin kytketyillä mittausjohdoilla pystyttiin mittaamaan jännite jokaisen vaiheen ja nollan väliltä. Virrat ja jännitteet mitattiin aina hetki testin alkamisesta, jolloin hitsaus tai lämmitys oli stabiloitunut ja arvot pysyivät verrattain muuttumattomina. Tarkemmassa mittauksessa voitaisiin mitata virrankulutus koko prosessin ajalta ja laskea tämän muodostaman kuvaajan avulla tarkka arvo energiankulutukselle. Tällaisen mittarin hankintaan ja käyttöönottoon oli kuitenkin rajalliset resurssit ja mittausmenetelmän valintaa tehdessä todettiin, että tutkimuksen tavoitteet kuitenkin pystyttäisiin saavuttamaan myös hetkellisen tehon avulla laskemalla.

Lämpötilan mittaamisessa käytettiin 20-kanavaista Graphtec GL840-M dataloggeria. Laitteella (kuva 26) pystyttäisiin lämpötilan lisäksi mittaamaan monia muitakin suureita, kuten jännitettä, suhteellista kosteutta, logiikkaviestejä, pulsseja ym. Kanavalähtöihin pystyttiin kiinnittämään kaikkien lämpötilamittauspisteiden analogiset lähdöt, jotta lämpöenergian absorboitumista pystyttiin seuraamaan reaaliajassa. Loggerista pystyttiin testien jälkeen viemään datatiedostot omina tiedostoinaan Graphtecin tietokonesovellukseen, jossa pystyi paremmin analysoimaan tuloksia ja muuttamaan ne .csv muotoon.



Kuva 26. Lämpötilamittauksissa käytetty dataloggeri Graphtec GL840-M

Valmistaja on ilmoittanut laitteen analogisen lämpötilamittauksen tarkkuudeksi  $\pm 1,55 \text{ }^\circ\text{C}$ . Mittaustarkkuus riippuu kuitenkin käytetyn lämpöparin tyypistä ja mitattavan kohteen lämpötila-alueesta. Tutkimuksissa käytettiin K-termopareja, jolle valmistaja ilmoittaa tarkkuudeksi 0,05 % ilmoitetusta lukemasta plus  $1,0^\circ\text{C}$ . (Graphtec 2023.) Tutkimuksissa tavoiteltiin samaa lämpötilaa molemmilla lämmitysmenetelmillä, eli testien aikana esiintyvä epätarkkuus mitatussa lämpötilassa toteutuu molemmissa testeissä samalla tavalla. Tämän vuoksi epätarkkuuden vaikutus ei vääristä mittaustuloksia, kun verrataan lämmitysmenetelmien tuloksia toisiinsa.

## 7 Kenttätutkimusten tulokset

Kenttätutkimusten suorittamisen jälkeen tuloksista muodostettiin omat kokonaisuudet eri hitsaus- ja lämmitysprosessien osalta. Tulosten avulla luotiin laskentataulukoita ja kuvaajia, joiden avulla voitiin tulkita merkittäviä eroja niin hitsaus- kuin esilämmitysprosesseissakin. Hitsauksessa mielenkiintoisimmat havainnot keskittyivät hitsituottojen suhteeseen kulutettuun energiaan nähden ja esilämmityksissä odotetusti energiankulutuksiin.

### 7.1 Hitsaus

Kenttätutkimukset aloitettiin hitsaustesteillä, joissa toteutettiin neljä erilaista testikierrosta. Hitsaustestejä suoritettiin määrällisesti eniten ja näiden kohdalla suuri toistomäärä on myös hyvin perusteltavissa lukuisten erilaisten hitsauskonfiguraatioiden vuoksi. Täydellisen tai todella kattavan hitsausenergialaskurin luominen vaatisi huomattavan monien erilaisten konfiguraatioiden energiankulutusten mittaamista ja tutkimista. Tätä tutkimusta varten tehdyillä hitsaustesteillä pystytään luomaan pohja laskurille ja arvioimaan suurten ainevahvuuksien vaatimaa energiamäärää melko hyvin suuntaa antavassa muodossa.

Neljästä hitsaustestistä kolmessa ensimmäisessä testissä hitsausasetuksena oli kanttiaaltoinen CC eli vaihtovirtainen Constant Current. CC tarkoittaa nimensä mukaisesti vakiovirtaa, eli hitsausprosessi toteutetaan vakiovirralla ja langansyöttönopeuden jatkuvalla säätämällä virtalähde pyrkii pitämään hitsausjännitteen vakiona. Constant Voltage eli CV asetuksella virtalähde pyrkisi pitämään jännitteen vakiona virtaa säätämällä, kun langansyöttönopeus pysyy vakiona. CV asetusta käytetään yleensä pienemmillä hitsauslangoilla ja CC isomilla. CC asetuksella myös saavutetaan usein tasaisempi tunkeuma. (Åberg 2023.) Viimeinen hitsaustesti tehtiin vertailuarvojen saamiseksi DC+ CC asetuksella, eli ns. perinteisemmällä tasavirta-asetuksella.

Toista testiä lukuun ottamatta kaikki toteutettiin samoilla asetuksilla hitsausvirran ja -jännitteen osalta. Toisessa testissä ohjausjärjestelmästä oli valittuna väärä virtalähde, jolle hitsausparametrit syötettiin ja testi aloitettiin järjestelmän antamilla oletusarvoilla. Testi päätettiin kuitenkin toteuttaa loppuun saakka, sillä se tarjosi vertailuarvoja lopputuloksiin. Testeissä

käytettiin yhtenä polttimena leukasuutinpoltinta, joka syöttää virran langalle normaalin vaapaalankaetäisyyden päästä, eli yleensä n. 30 mm päästä. Toisena polttimena käytettiin Lincoln Electricin Long Stick Out -poltinta, eli pitkälankapoltinta. Hitsausnopeutena kaikissa testeissä oli 650 mm/min.

Taulukosta 1 voidaan lopputuloksien osalta havaita merkittäviä eroja niin lisäaineen tuottojen osalta, kuin virtalähteen kuluttamien energioiden osalta. Syöttötehoa ja energiaa lukuun ottamatta kaikki muut arvot taulukossa on kerätty ohjausjärjestelmään syötettyjen hitsausparametrien avulla. Syöttötehon laskennassa on hyödynnetty vaihevirtojen mittausta ja syöttöjännitettä, jolloin vastaus on saatu näiden tulona. Energialla tarkoitetaan yhden n. 1min 30s kestäneen testin aikana kulutettua sähköenergiaa, joka on laskettu tehoa ja kulunutta aikaa hyödyntäen.

Taulukko 1. Hitsaustestien tulokset. Taulukosta pystytään tulkitsemaan merkittäviä eroja lisäaineen tuoton määrissä eri menetelmillä melko samoilla energiankulutuksilla. Kaikki testit kestivät noin 1min 30s, joka on sijoitettu energianlaskentakaavaan. Hitsausnopeutena oli 650 mm/min

| Kierros | Asetus         | Poltin | Virta<br>[A] | Jännite<br>[V] | Lämmön-<br>tuonti<br>[kJ/mm] | Tuotto<br>[kg/h] | Syöttö-<br>teho<br>[kW] | Energia<br>[kWh] |
|---------|----------------|--------|--------------|----------------|------------------------------|------------------|-------------------------|------------------|
| 1       | Sq. Wave<br>CC | LSO    | 690          | 36             | 2,3                          | 17,1             | 31,8                    | 0,80             |
| 2       | Sq. Wave<br>CC | LS     | 600          | 38             | 2,1                          | 8,4              | 28,5                    | 0,73             |
| 3       | Sq. Wave<br>CC | LS     | 690          | 36             | 2,3                          | 11,3             | 32,0                    | 0,81             |
| 4       | DC+ CC         | LS     | 690          | 36             | 2,3                          | 8,0              | 31,4                    | 0,80             |

Huomionarvoista on vertailla etenkin testejä 1 ja 3 keskenään, sillä ne olivat muuten asetusparametreiltään samanlaiset polttimia lukuun ottamatta. LSO eli Long Stick Out pitkälankahitsauspolttimella saavutettiin tavanomaisempaa leukasuutinpoltinta (LS) 51 % suurempi tuotto energiankulutuksen ollessa lähes sama ja jopa hieman pienempi pitkälankahitsauksessa. Voidaan siis todeta olevan mahdollista saavuttaa merkittävästi suurempi tuotto

käyttämällä erilaisia hitsauspolttimia. Ei voida kuitenkaan vetää suoraa johtopäätöstä pitkä-lankahitsauksen paremmuudesta, sillä sen käyttöä tulee aina harkita käyttökohteen ja toivotun lopputuloksen mukaan.

Toinen huomionarvoinen seikka tuloksissa voidaan nähdä testien 3 ja 4 välillä. Testeissä käytettiin samoja parametrejä hitsausasetuksen ollessa ainoastaan eri. DC+ CC ja kanttiaaltoisen vaihtovirta CC hitsaustesteissä energiankulutus on jälleen lähes sama, mutta vaihtovirta-asetuksella on saavutettu 41 % enemmän tuottoa. Kappaleessa 4.3.1 kerrottiin enemmän DC-virtalähteiden tuottaman tunkeuman ja lisäainetuoton suhteesta ja eroista DC+ ja DC- hitsausasetusten välillä. Seuraavassa kappaleessa kerrottiin AC-virtalähteiden kykenevän parempaan säädettävyyteen näiden välillä. Testien perusteella voidaan päätellä testissä 4 käytetyn DC+ asetuksen tuottavan huomattavasti paremman tunkeuman, sillä langansyötön nopeus ja tämän avulla laskettava tuotto on merkittävästi suurempi vaihtovirta-asetuksessa. Näissä testeissä poltin oli molemmissa tavanomainen leukasuutinpoltin.

## 7.2 Kaasuesilämmitys

Kaasulämmitystesteissä testikappaleen lämpötilapisteiden monitorointi suoritettiin Graphtec dataloggeriin kytkettyjen kahdeksan lämpöparin avulla. Suurimmat haasteet kaasulämmitystesteissä kohdattiin happi-asetyleenikaasun lämmityksen aikaisesta kulutuksen mittaamisesta. Kaasusäiliöiden punnitsemisen osoittauduttua puutteelliseksi menetelmäksi, pyrittiin kaasuvirtausten määrät selvittämään hapen ja asetyleenin osalta yksitellen virtausmittareita apuna käyttäen.

Asetyleenin virtausnopeuden selvittämiseksi käytettiin argonille tarkoitettua rotametria. Rotametrin ollessa huomattavasti tiheämmälle kaasulle suunniteltu, ei kelluke nouse todellista virtausnopeutta indikoivalle korkeudelle, vaan jää alemmas harvemman kaasun vuoksi. Todellinen virtausnopeus voidaan kuitenkin laskea luomalla argonin ja asetyleenin tiheyksistä suhdeluku, jonka avulla voidaan kertoa rotametrin indikoima lukema. Kaasujen tiheydet ovat 15°C lämpötilassa argonilla 1,6903 kg/m<sup>3</sup> ja asetyleenillä 1,1086 kg/m<sup>3</sup> (Air Liquide 2023), jolloin suhdeluvuksi saadaan 1,525. Kertomalla asetyleenin virtausnopeus suhdeluvulla, saadaan virtausnopeudeksi 20 l/min sijasta 30,5 l/min.

Kaasulämmitystestien tärkeimmät tulokset ovat koottuna taulukkoon 2, josta ilmenee aika, kaasujen virtausnopeudet, kaasujen kulutetut kokonaismäärät, syöttöteho ja energia. Syöttötehon laskennassa on hyödynnetty asetyleenin lämpöarvoa 50 MJ/kg, tiheyttä ja kulutetun asetyleenin kokonaismäärää. Energia on laskettu syöttötehon ja lämmitykseen kuluneen ajan avulla ja se tarkoittaa tarkemmassa tarkastelussa koko testilämmitykseen kulutettua energiämäärää. On kuitenkin haastavaa arvioida, kuinka suuri osuus kulutetusta energiasta absorboituu teräsmateriaaliin. Hapen määrä laskettiin lopulta happi-asetyleenin seossuhteen 1:1,5 avulla (Linde 2023a). Jos mittaus olisi tässä tutkimuksessa kohdistunut polttimen tehoon, olisi mittausmenetelmän pitänyt olla tarkempi. Tämän tutkimuksen energiankulutuksen kannalta sillä ei kuitenkaan ollut lopputulosten kannalta merkitystä.

Taulukko 2. Kaasulämmitystestien tulokset

| Aika [min, s] | Asetyleenin virtaus [l/min] | Hapen virtaus [l/min] | Kaasumäärä, asetyleeni [l] | Kaasumäärä, happi [l] | Syöttöteho [kW] | Energia [kWh] |
|---------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------|---------------|
| 16min 14s     | 30,5                        | 46                    | 495                        | 743                   | 28,2            | 7,62          |

Molempien kaasuvirtausten mittauksissa esiintyi haasteita, eikä niiden tuloksia voida pitää absoluuttisen tarkkoina juuri tämän testin osalta. Asetyleenin osalta mittaustarkkuus oli n.  $\pm 1$  l/min ja hapen tilavuusvirta laskettiin seossuhteen avulla. Asetyleeni on tämän tutkimuksen kannalta kuitenkin näistä huomattavasti merkittävä, sillä syöttötehon ja energiankulutuksen laskenta perustuu syötetyn kaasun kokonaislämpömäärän vertaamiseen sähköiseen lämmitysmenetelmään. Hapen kulutus kaasulämmityksessä on myös merkittävä, mutta puhtaasti energiankulutuksia vertaillessa lämmitysmenetelmien välillä se jätetään huomioimatta. Syy tähän on hapen luonne olla vain hapettajana, eikä polttokaasuna. Kustannustarkastelua tehdessä se tulisi kuitenkin ehdottomasti huomioida, sillä tunteja kestävässä monien polttimien esilämmitystilanteessa hapen kulutus on suurta.

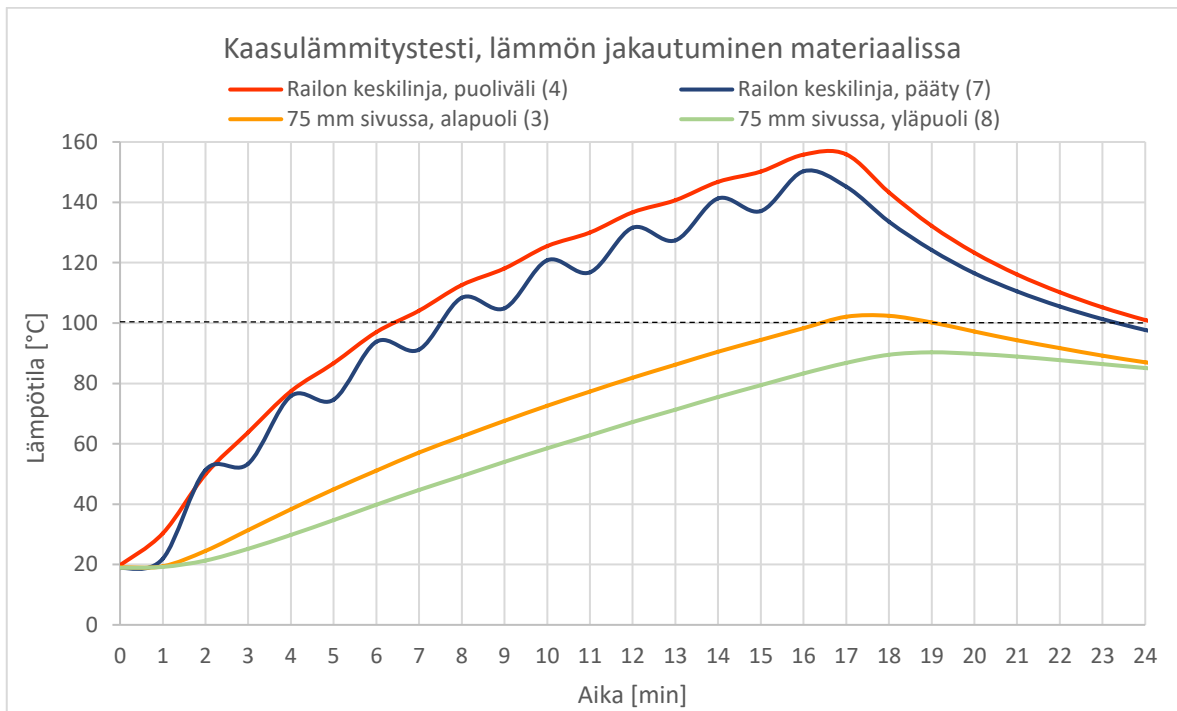
Kaasun ja sen sisältämän kokonaisenergian kulutusta laskiessa on myös huomioitava, että kaasuliekin säätäminen hapettavalle tai neutraalille liekille on useimmiten melko vaihtelevaa, eikä polttimen säätäminen aina samalle liekille ole todennäköistä. Kulutuksissa esiintyy siis paljonkin vaihtelua eri lämmitystilanteiden välillä, eikä absoluuttisen kulutusarvon selvittäminen ole tämän vuoksi tarpeellista. Vaikka tämän testin virtausnopeudet ja kulutetut



määrät olisi selvitetty suurellakin tarkkuudella, todennäköistä olisi, että toimija, joka käyttää suurta määrää kaasupolttimia esilämmitykseen, asettaa polttimet kuumentamaan työkappaleita eri virtausnopeuksilla. Testin tulosta voidaan siis pitää ns. keskiarvona kaasutoimiselle esilämmitysmenetelmälle.

Lämmitystesteissä testikappaleeseen kiinnitetyt lämpöparit olivat sijoiteltu eri etäisyyksille lämmitysalueesta, kuten aiemmin kappaleen 6.2 kuvassa 20 havainnoitiin. Korkeampia lämpötiloja saavutettiin odotetusti lähempänä hitsausrailoa, johon lämmitysenergia kohdistuu voimakkaammin. Hitsausrailon linjassa mitattiin lämpötiloja päädyistä ja lämmitysmatkan puolesta välistä. 75 mm hitsausrailosta sivuun sijaitsi testikappaleen alapuolella neljä lämpöparia – päädyissä yhdet ja puolivälissä yhdet molemmin puolin railoa – jonka lisäksi kappaleen päälle oli sijoitettu yksi lämpöpari 75 mm hitsausrailon aukon reunasta sivuun. Näistä kahdeksasta lämpöparista neljän lämpötilakäyrät on esitelty, sillä samanlaisten ja päällekkäin asetettujen lämpötilakäyrien esittäminen vähentää selkeyttä ja kuvaajien tulkittavuutta. Ei ole myöskään tarvetta havainnoida kahden eri pisteen lämpötilakäyriä yhdessä kuvassa, jos niissä ei ole keskenään juuri mitään poikkeavuutta toisistaan. Kaikkien lämpöparien lämmityskäyrät kaasulämmitystestien osalta ovat nähtävissä liitteessä 1.

Lämmön absorboitumisen ja johtumisen eroja eri lämpöparien välillä voidaan hyvin tulkita alapuolella näkyvässä kuvassa 27 esitettyjen lämmityskäyrien avulla, jotka on koottu yhteen lämmitystestien datatiedoston avulla (liite 1). Korkeimmat lämpötilat saavutettiin tumman punaisella käyrällä, eli kappaleen puolivälissä hitsausrailon kohdalla (kuva 27, piste 4). Lähes samoihin lämpötiloihin päädyttiin myös hitsausrailon linjassa olleessa päätyyn sijoitetussa pisteessä (piste 7). Tasaisempaa lämpötilakertymää voitiin tulkita 75 mm railosta sivuun sijoitetuissa pisteissä levyn ala- ja yläpuolella (alapuolella piste 3 ja yläpuolella 8). Molemmista testeistä asetettiin tavoitteeksi saavuttaa alapuolisissa 75 mm railosta sivuun sijoitetuissa lämpöpareissa 100°C lämpötila.



Kuva 27. Kaasulämmitystestin lämmityskäyrät, pisteet 4, 7, 3 ja 8. Pisteiden tarkat sijainnit voidaan nähdä kappaleen 6.2 kuvasta 20. Korkeamman lämpötilan käyrät sijaitsivat huomattavasti lähempänä lämmönlähdettä (kaasuliekkiä) ja kahdessa loivemmassa käyrässä näkyy johtumisen vaikutuksesta syntyvä aikaviive. Testeissä tavoitteena oli saavuttaa 100°C lämpötila pisteessä 3

Puolivälissä lämmitysmatkaa (piste 4) mitattiin huomattavasti tasaisempaa lämpökertymää, kuin työkappaleen päädyssä (piste 7), vaikka päädyssä käytiin lähes samoissa lämpötiloissa. Tämä johtuu luultavasti teräksestä ilmaan tapahtuvasta lämmön vapaasta konvektiosta, jolla on päädyssä voimakkaampi jäähdyttävä vaikutus kuin muualla testikappaleen alueella. Konvektiosta aiheutuva voimakkaampi jäähtyminen luo käyrälle sahalaitaisen lämmityskuvauksen.

75 mm sivussa sijainneiden pisteiden 3 ja 8 lämpötilakäyrissä ei esiinny juuri yhtään aaltomaisuutta, eli näissä mittauspisteissä ei yhden aallonpituuden aikana ehdi tapahtumaan yhtään jäähtymistä vapaan konvektion vaikutuksesta. Aallonpituus on n. 2 minuuttia, sillä työkappale oli metrin pituinen ja lämmitysnopeus oli 1 m/min. Vaikka yläpuolella sijainnut piste 8 oli jonkin verran kauempana lämmönlähteestä, ei sen lämpötilakertymä jää merkittävästi pienemmäksi, kuin lähempänä sijainneessa pisteessä 3. Johtumisen voidaan siis tapahtuvan melko voimakkaasti kyseisessä teräsmateriaalissa, joka toisaalta vähentää tarvetta kohdistaa lämpöenergia koko hitsausrailon alueelle niin tarkasti.

### 7.3 Induktioesilämmitys

Induktiolämmitystesteissä testikappaleen lämpötilapisteiden monitorointi suoritettiin samalla tavalla kuin kaasulämmitystesteissäkin, mikä osoittautui testin tarkimmaksi ja helpoiten toteutettavaksi osa-alueeksi. Induktiolämmitystesteissä ei kohdattu niin merkittäviä mittaushaasteita, kuin kaasulämmitystesteissä. Vaihevirtoja mittaamalla pystyttiin laskemaan lämmityksenaikainen syöttöteho induktiovirtalähteelle ja kun tätä verrattiin lämmitykseen kuluneeseen aikaan, kyettiin selvittämään kulutetun sähköenergian määrä – samoin kuin hitsaustesteissä.

Induktiolämmitystesteissä mitatut vaihevirratt ja aika on listattu taulukkoon 3. Hyödyntämällä näitä mittaustuloksia ja verkon syöttöjännitettä, pystyttiin laskemaan syöttöteho ja kulutettu sähköenergia. Vaihevirratt mitattiin kaikilta vaiheilta ja niiden keskiarvo laskettiin. Kelateho kertoo, kuinka suuri teho virtalähteestä on asetettu kelalle syötettäväksi. 28 kW vastasi 35 %:a virtalähteen maksimitehosta, eli kapasiteettia jäi vielä reilusti käytettäväksi. Testikappale oli sama kuin kaasulämmitystestissäkin, eli taulukon osoittamat tulokset ovat sellaisinaan suoraan vertailukelpoiset taulukossa 2 esitettyjen kaasulämmitystestien tulosten kanssa.

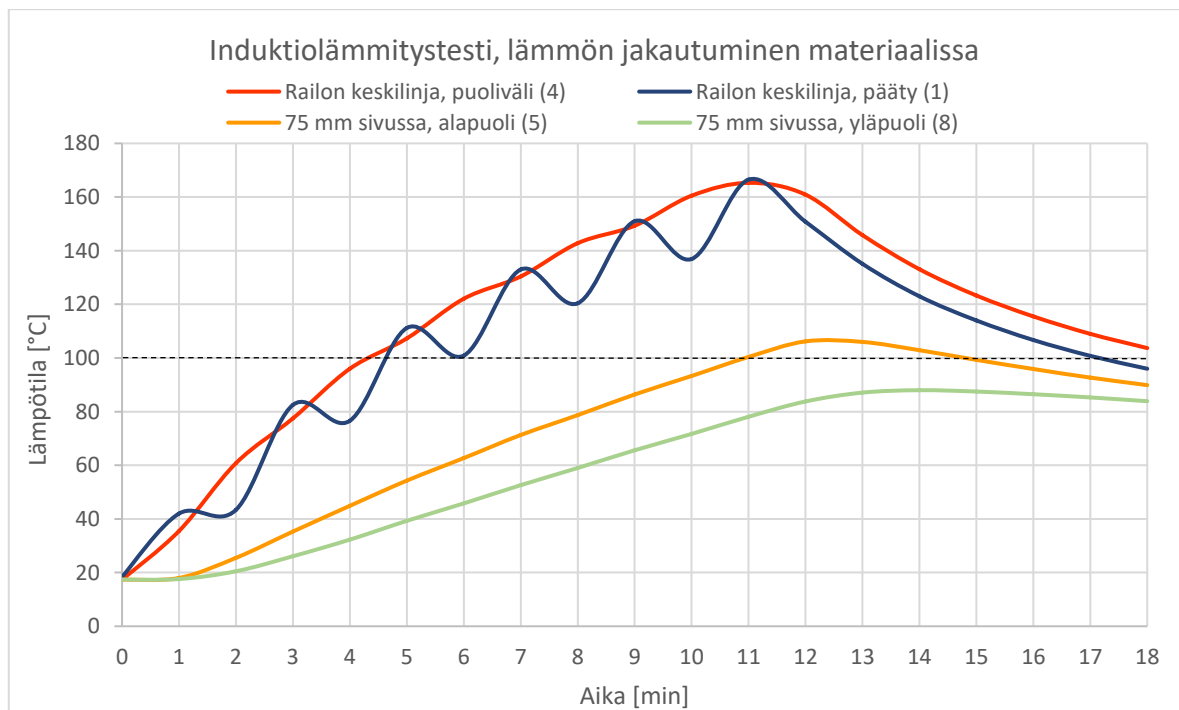
Taulukko 3. Induktiolämmitystestien mitattu syöttöteho ja energiankulutus

| Aika [min, s] | Vaihevirta ka.<br>[A] | Jännite<br>[V] | Kelateho<br>[kW] | Syöttöteho<br>[kW] | Energia [kWh] |
|---------------|-----------------------|----------------|------------------|--------------------|---------------|
| 10min 39s     | 46,4                  | 400            | 28               | 32,2               | 5,71          |

Induktiolämmitystestien tuloksista voidaan taulukosta 3 havaita 4,2 kW tehohäviö syöttötehon ja kelatehon välillä. Kelateho on virtalähteeltä asetettu tehoarvo, eli sitä ei testeissä tai mittauksin voitu kuitenkaan todentaa. Kelalla on lisäksi sisäinen hyötysuhde, eli kaikkea kelalle syötettyä energiaa ei saada siirrettyä lämmitettävään materiaaliin, vaan osa poistuu lämpönä vedenjäähdytyslaitteen kautta lauhteena. Vedenjäähdytyslaite oli käynnissä koko testin ajan ja se on välttämätön lisälaitte induktiolämmityksessä, sillä se pitää kelarakenteen lämpötilan vakioskaalan rajoissa, estäen kuparisen kelan ylikuumenemisen.

Induktiolämmityslaitteita on ilma- ja vesijäähdytteisiä, mutta suuritehoisemmissa järjestelmissä on usein käytössä vesijäähdytys. Vesijäähdytyslaitteen mittareista voitiin havaita jäähdytysveden lämpötilan nousua, mutta kalorimetrinen lämpöhäviön arvioimiseksi tulisi selvittää tilavuusvirta ja jäähdytysveden meno- ja paluuvirtauksen lämpötilaerotus. Jäähdytyslaitteen energiankulutusta ei tässä tutkimuksessa huomioitu.

Syöttötehon ja lämmitykseen kuluneen ajan avulla pystyttiin laskemaan lämmitykseen vaadittavan sähköenergian määrä (kWh). Lämmön absorboitumista testikappaleeseen voidaan tulkita kuvassa (28) esitettyjen lämmityskäyrien avulla. Lämpöparit oli sijoitettu samoihin pisteisiin kuin kaasulämmitystestissäkin ja näiden sijainnit selostettiin aiemmassa kappaleessa 7.2.



Kuva 28. Induktiolämmitystestin lämmityskäyrät, pisteet 4, 7, 3 ja 8. Pisteiden tarkat sijainnit voidaan nähdä kappaleen 6.2 kuvasta 20. Korkeamman lämpötilan käyrät sijaitsivat huomattavasti lähempänä lämmönlähdettä (induktiokelaa) ja kahdessa loivemmassa käyrässä näkyy johtumisen vaikutuksesta syntyvä aikaviive. Testeissä tavoitteena oli saavuttaa 100°C lämpötila pisteessä 5

Yllä näkyvän kuvan 28 lämmityskäyristä voidaan havaita hyvin samanlaista lämpöenergian jakautumista ja käyttäytymistä kuin kaasulämmitystestin tuloksissakin kuvassa 27.

Lämmityspisteen 1 lämpökäyrä osoittaa myös sahalaitaista lämpötilan käyttäytymistä, mutta voimakkaammin. Voimakkaampi lämpötilan muuttuminen jäähtymisen ja lämpenemisen välillä johtuu voimakkaammasta lämmitystehosta, eli lämmityksen ollessa tehokkaampaa, on myös jäähtyminen voimakkaampaa. Lämmitysajan ollessa lyhyempi induktiolämmityksessä, ovat lämmityskäyrät muuten vastaavat kuin kaasulämmityksessä, mutta aallonkorkeudet kasvavat suhteessa aallonpituuteen, eli yhden lämmityskierroksen aikaan.

Lämpötilaero kauempana lämmönlähteestä sijaitsevissa pisteissä 5 ja 8 on myös kaasulämmityksessä n. 7 astetta suurempi, kuin induktiolämmityksessä. Tämän voidaan päätellä johtuvan kaasulämmityksen suuremmasta lämpöenergian hajonnasta, sillä lämpö karkaa kaasupolttimen päästä laajalle alueelle, mennen myös osittain hukkaan ympäröivään ilmaan. Induktiokelalla pystytään kohdistamaan lämmitysenergia pienemmälle alueelle, eikä lämpöä juuri karkaa itse kelasta ympäröivään ilmaan ja materiaaliin.

Lukuun ottamatta pidempää lämmitysaikaa ja lämmitysmenetelmistä johtuvia poikkeavuuksia lämmityskäyrien käyttäytymisessä ja ulkomuodossa, ovat tulokset induktiolämmityksen osalta hyvin samankaltaiset kaasulämmityksen testien kanssa. Lämpö absorboituu materiaaliin eri tehokkuudella, joka vaikuttaa jäähtymisaikoihin. Kun suhteutetaan lämpöenergian absorboitumisesta kertovat lämmityskuvaajat energiankulutuksesta kertoviin taulukoihin, pystytään tulkitsemaan eri lämmitysmenetelmien kokonaisvaikutukset kokonaisvaltaisemmin.

## 8 Energialaskurin luominen

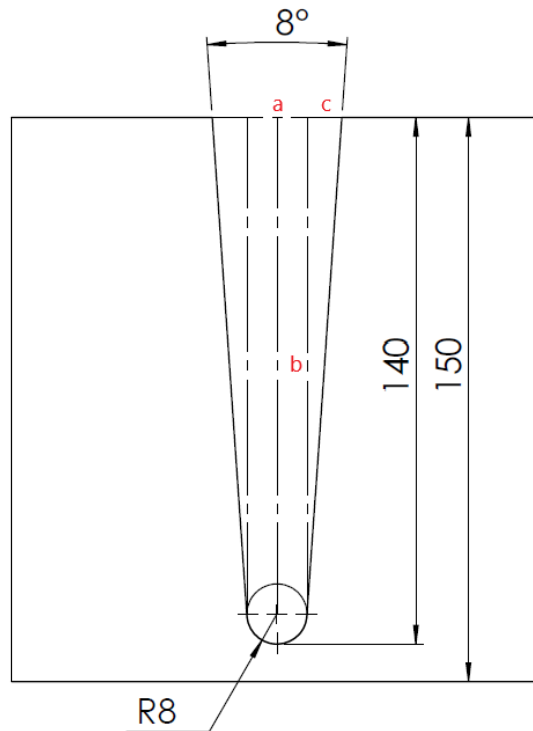
Hitsaukseen ja esilämmitykseen kulutettujen kokonaisenergioiden selvittämiseksi tehtyjen tutkimusten jälkeen näiden pohjalta voitiin alkaa luomaan energialaskuria. Laskurin on tarkoitus toimia tietyin rajauksin niin, että syöttämällä työkappaleen halkaisija, ainevahvuus, hitsaus- ja esilämmitysmenetelmä ja railogeometria, saadaan tuloksena mahdollisimman tarkka arvio kokonaisprosessiin kuluvaan energian määrästä. Vertailemalla kokonaisenergiämääriä esimerkiksi eri esilämmitysmenetelmien välillä, pystytään tekemään vertailua energiatehokkuuden näkökulmasta.

Energialaskurin rajaamisen lähtökohtana on sisällyttää sen toimintoihin tämän tutkimuksen myötä vain hitsaamisen ja esilämmityksen osuudet. Jos vertailtaisiin koko prosessia, jossa esimerkiksi kaksi paksuseinäistä lieriömäistä kappaletta hitsattaisiin yhteen, tulisi kokonaisenergiankulutukseen sisällyttää myös hitsausrilon koneistus tai polttoleikkaus, logistiikka, materiaalikulut ym. Laskurista ei pystytä luomaan vielä tämän tutkimuksen myötä täydellistä versiota, sillä erilaisia kenttätutkimuksia tulisi suorittaa mittava määrä, jotta laskuria varten pystyttäisiin luomaan riittävän kattava datapankki kaikkia hitsaus- ja lämmitysvariaatioita varten. Laskurin on kuitenkin tässä vaiheessa tarkoitus luoda pohja palvelulle, jolla pystyttäisiin vaivattomasti osoittamaan energiatehokkain hitsaus- ja esilämmityskonfiguraatio.

### 8.1 Hitsausrilon geometrian tilavuuslaskenta

Lämmitettävän ja hitsattavan työkappaleen paksuudella ja hitsausrilon geometrialla on suuri vaikutus niin esilämmitykseen vaadittavan lämmitysenergian, kuin hitsaamiseen vaadittavan lisäainetuoton vaatiman energian osalta. Hitsausrilon geometrialla on kuitenkin suurempi vaikutus hitsaamiseen, sillä kuvan 30 mukaisesti hitsauspalkojen määrä riippuu rilon kulmasta ja syvyydestä. Eli vaadittujen hitsauskierrosten määrä ja täytettävän hitsausrilon tilavuus on suoraan riippuvainen hitsausrilon geometriasta, minkä vuoksi tulee pystyä luomaan laskuriin valmiit kaavat tilavuuden laskentaa varten.

Tilavuuden selvittämiseksi laskuriin sovitettiin ensin kaavat hitsausrailon pinta-alan laskemiseksi. Hitsausrailo muodostuu kuvan 29 mukaisesti kahdesta kolmiosta, suorakulmiosta ja railon pohjan puoliympyrästä. Pinta-alan laskemiseksi tulee geometrian lähtötiedoista ilmetä pohjan puoliympyrän säde, railon syvyys ja railokulma.



Kuva 29. Hitsausrailon pinta-alan laskentaan tarvittavat lähtötietomitat

Puoliympyrän laskennassa hyödynnettiin ympyrän pinta-alan kaavaa ja kolmioiden laskennassa trigonometrisia funktioita. Suorakulmion pinta-alaan riitti  $a$  ja  $b$  sivujen tulon laskeminen. Kuvassa 29 on  $a$ ,  $b$  ja  $c$  mitat sijoiteltuna kolmion kateetin ja suorakulmion sivujen kohdille. Näiden mittojen arvot sijoitettiin laskurin soluihin seuraavilla kaavoilla:

$$\tan \alpha = \frac{a}{b} \quad (3)$$

jossa  $\alpha$  on kohtauskulma [°],  $a$  on vastakkainen kateetti  $c$  [m] ja  $b$  on viereinen kateetti  $b$  [m]. Tällä kaavalla selvitettiin kolmion päädyn mitta, eli  $c$ . Päädyn  $c$  ja sivun  $b$  tulolla saatiin selville kolmioiden pinta-ala.

$$A = \pi r^2 \quad (4)$$

jossa  $A$  on ympyrän pinta-ala [ $\text{m}^2$ ] ja  $r$  on ympyrän säde [ $\text{m}$ ]. Jakamalla ympyrän pinta-ala kahdella, voitiin selvittää puoliympyrän eli railon pohjan pinta-ala. Summaamalla yhteen puoliympyrän, kolmioiden ja suorakulmion pinta-alat, saatiin selville hitsausrailon kokonaispinta-ala. Pinta-alan ja piirin avulla voitiin laskea hitsausrailon tilavuus  $V$ .

$$V = Ah \quad (5)$$

jossa  $V$  on hitsausrailon tilavuus [ $\text{m}^3$ ],  $A$  hitsausrailon pinta-ala [ $\text{m}^2$ ] ja  $h$  piirin pituus [ $\text{m}$ ]. Piirin pituus voitiin laskea piirin laskentakaavalla (1). Kertomalla tilavuus teräksen tiheydellä, voitiin selvittää hitsausrailon täyttämiseen vaadittavan teräsmäärän massa.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (6)$$

jossa  $\rho$  on teräksen tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $m$  on tilavuuden massa [ $\text{kg}$ ] ja  $V$  hitsausrailon tilavuus [ $\text{m}^3$ ]. Kertomalla railon tilavuus teräksen tiheydellä ( $7850 \text{ kg}/\text{m}^3$ ), saatiin selville railon tilavuutta vastaavan teräsmäärän massa. Tätä massaa käytettiin hyödyksi seuraavassa vaiheessa, kun laskettiin yhden railon täyttöhitsauksen osalta vaadittavan lisäaineen määrää.

Taulukkoon 4 on listattu erilaisia variaatioita työkappaleen halkaisijan ja hitsausrailon geometrian osalta. Tuloksista voidaan nähdä railon tilavuuden ja tämän täyttämiseen tarvittavan lisäaineen määrän olevan voimakkaammin riippuvainen hitsausrailon geometriasta, kuin työkappaleen halkaisijasta.

Taulukko 4. Hitsausrailon tilavuuslaskurilla lasketut railon täyttämiseen vaadittavat lisäaineen määrät erilaisilla railokulmilla ja työkappaleiden halkaisijoilla. Vertailun selkeyttämiseksi levyn paksuus on kaikissa konfiguraatioissa sama, railokulmat ovat 8, 12 ja 16 astetta ja työkappaleen halkaisijat ovat 10 ja 14 metriä

| Levyn paksuus<br>[mm] | Railokulma [ $^\circ$ ] | Työkappaleen<br>halkaisija [m] | Railon tilavuus<br>[ $\text{m}^3$ ] | Lisäaineen määrä<br>[kg] |
|-----------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| 150                   | 8                       | 10                             | 0,11                                | 846                      |
| 150                   | 12                      | 10                             | 0,13                                | 997                      |
| 150                   | 16                      | 10                             | 0,15                                | 1150                     |
| 150                   | 8                       | 14                             | 0,15                                | 1185                     |
| 150                   | 12                      | 14                             | 0,18                                | 1396                     |
| 150                   | 16                      | 14                             | 0,21                                | 1609                     |



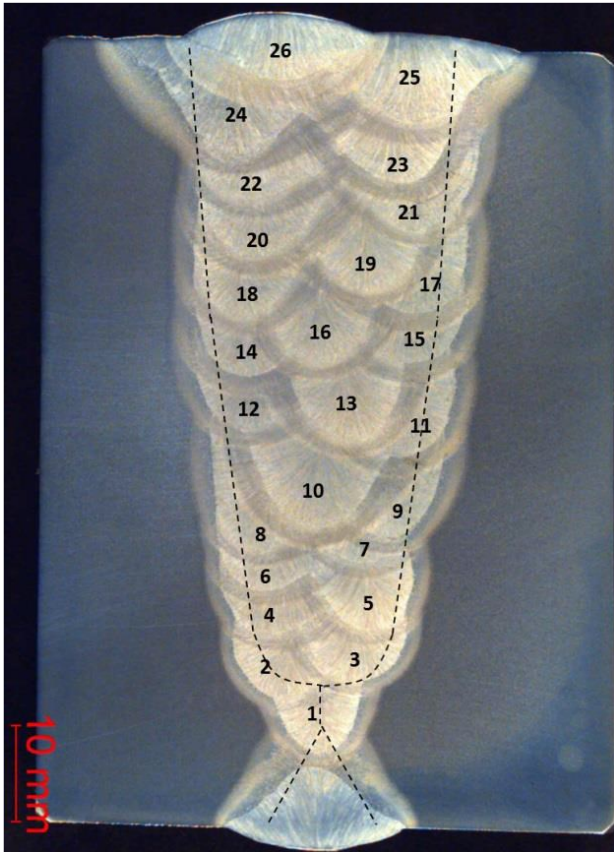
Hitsausrailojen tilavuudet laskettiin kuudella erilaiselle työkappaleelle ja taulukoitiin (4), jotta laskurin toiminnallisuus pystyttiin todentamaan ja osoittamaan sen helppokäyttöisyys. Railogeometrian suuri vaikutus tarvittavan täyttöhitsauksen määrään vaikuttaa suoraan hitsausaikaan, sen kuluttamaan energiaan ja kokonaiskustannuksiin, joka näistä muodostuu. Energialaskurin ensimmäisen vaiheen, eli hitsausrailon tilavuuslaskurin luominen onnistui lopulta tavoitteiden mukaisesti ja syöttämällä vain tarvittavat lähtötiedot, pystyttiin nopeasti selvittämään lähes minkä tahansa työkappaleen tiedot täyttöhitsauksen osalta.

Pinta-alalaskurin paikkaansa pitävyys todennettiin mallintamalla esitetöiden mukainen hitsausrailo 3D-suunnitteluohjelmistolla ja tarkastamalla ohjelmiston ilmoittama pinta-ala kyseiselle geometrialle. Laskurin antaessa railon pinta-alaksi  $3431 \text{ mm}^2$ , poikkesi tämä  $5 \text{ mm}^2$  todellisesta suunnitteluohjelmiston ilmoittamasta arvosta. Näin pientä poikkeamaa voidaan pitää merkityksettömänä, sillä hitsausrailon koneistusprosessissakin esiintyy enemmän hajontaa hitsausrailon tilavuudessa, kun terän syvyys työkappaleessa elää prosessin aikana.

## 8.2 Hitsauskonfiguraatioiden sovittaminen laskuriin

Hitsaustestien avulla saatiin kirjattua datapankkiin neljän eri hitsauskonfiguraatioiden energiankulutukset. Laskurin toimintaperiaatteen mukaisesti hitsaustesteissä suoritetun hitsin pituuden, parametrien ja energiankulutuksen avulla pystytään matemaattisesti laskemaan kulutus mille tahansa matkalle – olettamalla hitsausarvojen pysyvän vakioina koko hitsauskieron ajan. Vertaamalla hitsauksen ajallista kestoa tehoon, pystytään laskemaan kWh/m-arvo. Syöttämällä arvo energialaskurin hitsausosioon, laskee ohjelma automaattisesti hitsaukseen kuluvan energiamäärän lähtötietoihin syötetyn työkappaleen halkaisijan ja railogeometrian perusteella.

Hitsausenergiankulutusten osalta haaste muodostuu monien kymmenien eri hitsausparametrikonfiguraatioiden vuoksi. Suurten ainevahvuuksien hitsaamisessa sovelletaan lähestulkoon aina monipalkohitsausta, jossa yhden hitsausrailon täyttäminen vaatii jopa kymmeniä hitsipalkoja (kuva 30). Monipalkohitsauksessa kaikille hitsipaloille voi olla hitsausta ylläpitävään ohjausjärjestelmään tallennettu erikseen säädetyt hitsausparametrit, jolloin teoriassa yhden monipalkohitsauksen osalta pitäisi kirjata ylös kaikkien palkojen energiankulutukset – ja tämäkin kattaisi vain yhden spesifin hitsiraillon. Eri materiaaleilla ja ainevahvuuksilla palkokartta voi näyttää erilaiselta parametrien myös vaihdellessa.



Kuva 30. Esimerkki monipalkohitsauksen palkokartan näkymästä (Pemamek 2023, Pemamekin kuvapankki)

Ilman testejä monilla eri hitsausparametreillä, ei voida varmuudella sanoa, kuinka merkittävä ero näiden energiankulutuksissa on. Energialaskurin sovellettavuuden kannalta on kuitenkin järkevämpää hyödyntää tutkimuksessa tehtyjen testien osoittamia energiankulutuksia sovellettuna kaikkiin hitsauspalkoihin monipalkohitsauksessa (kuva 30). Jos näin ei menettäisi, ei energialaskuria voitaisi ollenkaan laajentaa koskemaan hitsausenergioita tämän tutkimuksen yhteydessä. Laskennallista lopputulosta kokonaisen hitsausrailon täyttämiseen kulutetusta energiasta ei voida tämän vuoksi pitää täysin tarkkana, mutta sen voidaan olettaa olevan suhteellisen lähellä todellista kokonaiskulutusta.

Hitsauksen energiankulutuslaskurin luomiseksi tuli luoda laskentasoluja, jotka muuttaisivat kenttätutkimuksissa mitattuja tuloksia laskuriin paremmin sovitettavaksi yksiköksi. Tehon ja hitsauksen keston avulla laskettu energiankulutus tuli muuntaa kWh/m muotoon jakamalla energia hitsin pituudella. Hitsiaineen tuotto muutettiin myös kg/h muodosta kg/m muotoon jakamalla ohjausjärjestelmän ilmoittama kg/h tuottoarvo hitsausnopeudella (mm/min). Näiden muutossolujen avulla jokaiselle kenttätutkimuksen hitsauskonfiguraatiolle pystyttiin

määrittämään niiden ominaiskulutukset ja -tuotot metrin matkalle. Laskentaprosessin selkeyttämiseksi luotiin ensin taulukointi hitsausmatkan laskennalle (5), jonka pohjalta voitiin luoda taulukointi hitsausajoille ja energiankulutuksille.

Taulukko 5. Hitsausmatkat laskettuna eri hitsausasetusten tuottojen ja railon täyttämiseen tarvittavan lisäaineen määrän suhteesta. Kg/m arvo on laskettu tuntikohtaisten tuottojen ja hitsausnopeuden 650 mm/min avulla. Lisäaineen määrä on riippuvainen työkappaleen parametreistä ja tässä laskennassa hyödynnetty arvo lisäaineen määrälle on laskettu taulukossa 4

| Asetus      | Poltin | Tuotto [kg/h]<br>& [kg/m] | Työk.<br>halkaisija<br>[m] | Railo-<br>kulma<br>[°] | Lisäaineen<br>määrä [kg] | Hitsaus-<br>matka [m] |
|-------------|--------|---------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Sq. Wave CC | LSO    | 17,1 ja 0,44              | 10                         | 16                     | 1150                     | 2623                  |
| Sq. Wave CC | LS     | 11,3 ja 0,29              | 10                         | 16                     | 1150                     | 3969                  |
| DC+ CC      | LS     | 8,0 ja 0,21               | 10                         | 16                     | 1150                     | 5606                  |

Laskettaessa railon täyttämiseen vaadittavia hitsausmatkoja lisäaineen määrän ja metrillisen tuoton avulla huomattiin hitsausmatkan korreloivan odotetusti tuntikohtaisen tuottoarvon kanssa. Tuntikohtaisen tuoton ollessa yli 50 % pienempi DC+ asetuksella ja leukasuuttimella kuin kanttiaaltoisella pitkälankahitsauspolttimella, piteni hitsausmatka vastaavasti yli kaksinkertaiseksi. Taulukossa 5 on laskettuna hitsausmatkat yhdelle työkappalekonfiguraatiolle ja tämän railotilavuudelle kolmella eri hitsausmenetelmällä. Kyseisen työkappaleen railon tilavuus ja tarvittava lisäaineen määrä laskettiin aiemmassa taulukossa 4.

Laskettuja hitsausmatkoja hyödynnettiin seuraavassa taulukoinnissa 6 laskettaessa hitsausaikoja eri määrällä polttimia ja yhden railon hitsaamiseen kuluva energiaa. Apuna laskennassa käytettiin metrikohtaista energiankulutusta jokaiselle hitsausmenetelmälle (kWh/m), joka kerrottiin hitsausmatkalla hitsausenergian selvittämiseksi. Hitsausajat laskettiin hitsausnopeuden 650 mm/min ja hitsausmatkan suhteesta.

Taulukko 6. Hitsausmatkojen avulla lasketut hitsausajat yhden ja useamman polttimen polttikonfiguraatioissa. Lisäksi hitsausenergiat kullekin matkalle on laskettu metrikohtaisten energiankulutusten avulla. Polttimien määrä vaikuttaa pääsääntöisesti vain hitsausaikoihin, mutta ei energiankulutukseen. Hitsausmatka on laskettu aiemmin taulukossa 5

| Hitsausmatka<br>[m] | Hitsausaika,<br>single [h] | Hitsausaika,<br>tandem [h] | Hitsausaika,<br>triple [h] | Energianku-<br>lutus<br>[kWh/m] | Hitsausenergia<br>[kWh] |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 2623                | 67                         | 34                         | 22                         | 0,83                            | 2186                    |
| 3969                | 102                        | 51                         | 34                         | 0,85                            | 3369                    |
| 5606                | 144                        | 72                         | 48                         | 0,83                            | 4661                    |

Kahden polttimen hitsauskonfiguraatio pudottaa hitsausajan karrikoidusti puoleen ja kolmen polttimen kolmannekseen. Todellisuudessa erot hitsausaikojen välillä eivät todennäköisesti ole näin tarkkaan kahdella tai kolmella jaollisia, sillä hitsausparametrit eivät yleensä ole samoja vetävän ja seuraavan tai seuraavien polttimien välillä. Lisäksi esimerkiksi kolmen polttimen konfiguraatioissa ensimmäisen polttimen asetus voi olla paremman tunkeuman saavuttamiseksi DC+ ja seuraavien polttimien kanttiaaltainen. Pääsääntöisesti ensimmäisellä polttimella pyritään saavuttamaan parempi tunkeuma, jolloin sen tuotto on pienempi. Taulukossa 6 laskettujen hitsausaikojen avulla pystytään kuitenkin havainnoimaan useamman polttimen konfiguraatioissa saavutettavissa oleva tehokkuushyöty.

Hitsausenergia on lähtökohtaisesti vakio kunkin hitsausmatkan kohdalla, riippumatta polttimien määrästä. Polttimien määrällä pystytään lähtökohtaisesti vaikuttamaan prosessin tehokkuuteen ajallisesti, kun vaadittava hitsausmatka pystytään jakamaan useammalle polttimelle. On kuitenkin huomioitava edellisen kappaleen mukaisesti, että useamman polttimen konfiguraatioissa erilaisia hitsausparametrejä käytettäessä myös ominaisenergiankulutukset myös vaihtelevat.

Tarkastellessa yhtä kokonaista hitsausrillon täyttöhitsausta ja tähän kuluva hitsausaika, -matkaa ja energiankulutusta, pätevät seuraavat oletukset: Oli kyseessä single, tandem tai triple -hitsauskonfiguraatio, kaikkien polttimien ominaistuotot (kg/h) ja ominaisenergiankulutukset (kWh/m) ovat samat. Eli käyttäessä kanttiaaltoista pitkälankahitsausta kolmen polttimen konfiguraatioissa, saadaan 150 mm paksuseinämäinen 10 m työkappale 16° asteen rai-  
lokulmalla täytettyä 22 tunnin kuluessa, kuluttaen 2186 kWh sähköä.

### 8.3 Lämmitysmenetelmien sovittaminen laskuriin

Happi-asetyleenillä ja induktiomenetelmällä toteutetuissa esilämmitystesteissä saatiin selvitettyä, kuinka paljon asetyleeniä ja sähkövirtaa tarvittiin saman testikappaleen lämmittämiseksi tavoitelämpötilaan 100°C. Hyödyntämällä asetyleenin lämpöarvoa (MJ/kg), pystyttiin molempien menetelmien energiankulutukset ilmaisemaan kWh-muodossa. Tulosten perusteella induktiolämmityksen voitiin laskea kuluttavan 25 % vähemmän energiaa, kuin happi-asetyleenimenetelmä. Saadut tulokset ovat tarkkoja ja suoraan sovellettavissa kuitenkin vain työkappaleelle, joka vastaa testeissä käytettyä. Käytettäessä testeistä poikkeavia työkappaleita energiankulutus muuttuu molempien menetelmien kohdalla pienemmäksi tai suuremmaksi, mutta menetelmien energiatehokkuuden suhde pätee.

Lämmitystestien tilanne poikkeaa melko paljon todellisesta lieriökappaleen lämmitystilanteesta. Testeissä lämmitettiin metrin mittaista testikappaletta nopeudella 1 m/min, eli mikään alue ei ollut lämmittämättömänä yli kahta minuuttia. Jäähdytysajan ollessa näin lyhyt, ei lämmityskäyrissä näkynyt juurikaan jäähdytymisen vaikutusta, joka normaalisti on lieriökappaleiden esilämmityksessä suuressa roolissa (kappale 4.1.2, kuva 10). Todellisessa lämmitystilanteessa lämmitetty alue olisi ehtinyt jäähtymään voimakkaasti ennen seuraavaa lämmityskierrosta, mikä kasvattaa kokonaislämmitystarvetta ja lämmitysaikaa. Testien energiankulutuksia voidaankin pitää kyseiselle matkalle minimiarvona, joka lämmittämiseen vaaditaan vähintään.

Happi-asetyleeni on kaasulämmitysvaihtoehtoista yksi tehokkaimpia. Verrattuna esimerkiksi metaaniin (maakaasu) tai nestekaasuun, sen liekin lämpötila saavuttaa 300–400 astetta korkeamman huippulämpötilan, kun polttokaasujen kanssa käytetään yhdessä lisähapetta (Linde 2023a.) Tämän tutkimuksen kaasulämmitystesteissä käytettiin happi-asetyleeniä, mutta se ei kuitenkaan usein ole käytetyin menetelmä suurten teräskappaleiden hitsauksen esilämmityksissä. Yleisimpiä polttokaasuja esimerkiksi tuulivoimaloiden runkojen tapauksissa ovat maakaasu ja nestekaasu. Maakaasun lämpöarvo on 49,2 MJ/kg (Alakangas, 2000) ja se on lähes sama kuin asetyleenillä, mutta sen liekki palaa kuitenkin viileämpänä, minkä vuoksi sen teho jää asetyleeniä matalammaksi.

Hyödyntäen Linden (2023b) tekemää tapaustutkimusta, laskettiin energiatehokkuus myös maakaasulle. Lämmityksen energiatehokkuuden laskeminen toiselle polttokaasulle koettiin tarpeelliseksi, koska happi-asetyleeniä ei juurikaan käytetä suurien kappaleiden

esilämmityksessä, eikä se sellaisenaan toimi niin hyvänä vertailureferenssinä induktiolämmitykselle. Laskemalla tapaustutkimuksessa vertailtujen maakaasun ja paineilma-asetyleenin välinen polttokaasujen kulutussuhde, pystyttäisiin induktiolämmityksen ja maakaasupolttaisen kaasulämmityksen välinen kulutussuhde myös soveltamaan tämän tutkimuksen happi-asetyleeni tulosten perusteella. Tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia sellaisinaan, mutta tarkkuudeltaan riittävästi suunta antavia kokonaisuuden hahmottamiseksi.

Tapaustutkimuksessa esilämmitettiin 3,5 m halkaisijaltaan olevan lieriömäisen työkappaleen kehällä oleva hitsausrailo 150°C lämpötilaan. Pytyn pyörimisnopeus kehällä oli sama kuin kenttätutkimuksien lämmitystesteissä, eli 1 m/min. Halkaisijan ollessa huomattavasti pienempi kuin tässä tutkimuksessa on esitelty, on myös työkappaleen ainevahvuus 55 mm reilusti pienempi. Työkappaleen vahvuuden ja halkaisijan välillä on usein korrelaatio. Lämmitettävän massa oli siis tapaustutkimuksessa merkittävästi pienempi. Tapaustutkimuksessa kerrottiin lämmitykseen tarvittavan asetyleenin kokonaiskulutukseksi 3,36 m<sup>3</sup> ja maakaasun 24,25 m<sup>3</sup>. Maakaasulämmityksessä ei ollut lisähapetta, vaan prosessi oli vapaahengitteinen, mikä osaltaan laskee kyseisen prosessin tehoa. Asetyleenillä oli rinnallaan paineilma ja paineilman tarve oli 23,46 m<sup>3</sup>.

Asetyleenille voitiin laskea metrikohtaiseksi energiakulutukseksi 4,70 kWh/m hyödyntämällä asetyleenin tiedettyä lämpöarvoa. Maakaasulle voitiin lämpöarvon avulla laskea vastaava metrikohtainen kulutus, jolloin tulokseksi saatiin 21,79 kWh/m. Ominaiskulutuksissa nähdään merkittävä ero ja maakaasua voidaan laskea kuluvan n. 4,6 kertainen määrä. Tapaustutkimuksessa käytettiin paineilma-asetyleeniä happi-asetyleenin sijasta, joka palaa hieinan pehmeämmällä ja viileämmällä liekillä, eli sen tehon voidaan olettaa jäävän pienemmäksi kuin happi-asetyleeniliekissä. (Linde 2023a.) Happi-asetyleenin ollessa tehokkaampi kuin paineilma-asetyleenin, voidaan tapaustutkimuksen kulutuskertoimen olettaa olevan tämän tutkimuksen yhteydessä myös käyttökelpoinen. Todennäköisesti asetyleenin tarve happi-asetyleeniyhdistelmällä on tehon vuoksi pienempi kuin paineilma-asetyleenissä, minkä vuoksi kulutuskerroin olisi vielä suurempi.

Tämän tutkimuksen kenttätutkimuksissa 150 mm paksun hitsausrailon esilämmittämiseksi 100°C lämpötilaan testikappaleen alapuolelta 75 mm hitsausrailosta mitattuna vaadittiin 7,55 kWh/m energiaa. Tapaustutkimuksessa lämmitettävän alueen massa oli pienemmän ainevahvuuden vuoksi merkittävästi pienempi, joka osaltaan selittää pienempää energiankulutusta (4,70 kWh/m). Ei voida kuitenkaan tietää millä tavoin ja mistä tapaustutkimuksessa

tavoiteltu 150°C on mitattu. Kyseisen epävarmuuden ja muiden tuntemattomien muuttujien vuoksi tapaustutkimuksen ja tämän tutkimuksen tulosten vertailtavuus asetyleenin kulutusten osalta ei ole suoraan mahdollista.

Tapaustutkimuksen avulla lasketun kulutuskertoimen avulla voitiin laskea myös maakaasulle ominaiskulutus. Kertomalla happi-asetyleenin ominaiskulutus kertoimella 4,63, saatiin maakaasun ominaiskulutukseksi n. 35 kWh/m. Kyseinen ominaiskulutus pätee teoriassa kuitenkin vain kenttätutkimusten testikappaleelle kuten induktion ja happi-asetyleenin ominaiskulutukset. Energiankulutukset laskettiin 14 m halkaisijaiselle työkappaleelle ja tulokset taulukoitiin taulukkoon 7. Maakaasun suurempaa kulutusta osittain selittää sen matalampi teho suhteessa hapella rikastettuun asetyleeniin.

Taulukko 7. Vaadittavat esilämmitysenergiat 14 m lieriökappaleen esilämmittämiseksi. Energiankulutukset on laskettu ominaiskulutuksen ja piirin tulona. Kulutuksia voidaan pitää laskennallisina minimiarvoina, sillä todellisuudessa pitkän pyörähdysajan aikana lämmitetty alue ehtii jäähtymään, jolloin menetetty lämpöenergia pitää tuoda kappaleeseen uudelleen

| Lämmitys-<br>menetelmä | Aine<br>vahvuus<br>[mm] | Työk.<br>halkaisija<br>[m] | Lämmitys-<br>matka<br>(piiri) [m] | Ominaiskulutus<br>[kWh/m] | Energiankulutus<br>[kWh] |
|------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Induktio               | 150                     | 14                         | 44                                | 5,65                      | 249                      |
| Happi-<br>asetyleeni   | 150                     | 14                         | 44                                | 7,55                      | 332                      |
| Maakaasu               | 150                     | 14                         | 44                                | 34,96                     | 1538                     |

Taulukosta 7 voidaan tulkita n. 25 % kulutussäästö induktiolämmityksen ja happi-asetyleenin väliltä, mutta polttoaasujen välillä on nähtävissä selkein ero. Maakaasun kulutus saattaisi olla pienempi, jos tapaustutkimuksessa sen tehoa olisi pystytty nostamaan paineilmalla tai puhtaalla hapella. On kuitenkin haastavaa arvioida hapen vaikutusta loppukulutukseen. Induktion voidaan tulosten perusteella laskea kuluttavan 84 % vähemmän energiaa maakaasuun verrattuna.

Toisin kuin hitsauslaskurin tapauksessa, jossa voitiin laskea energiaan tarvittavan hitsausenergian määrä hitsausrailon tilavuuden ja piirin mitan avulla, ei samaa voida laskea esilämmitysten osalta. Jokaisella erilaisella työkappaleella on sille ominainen lämmön

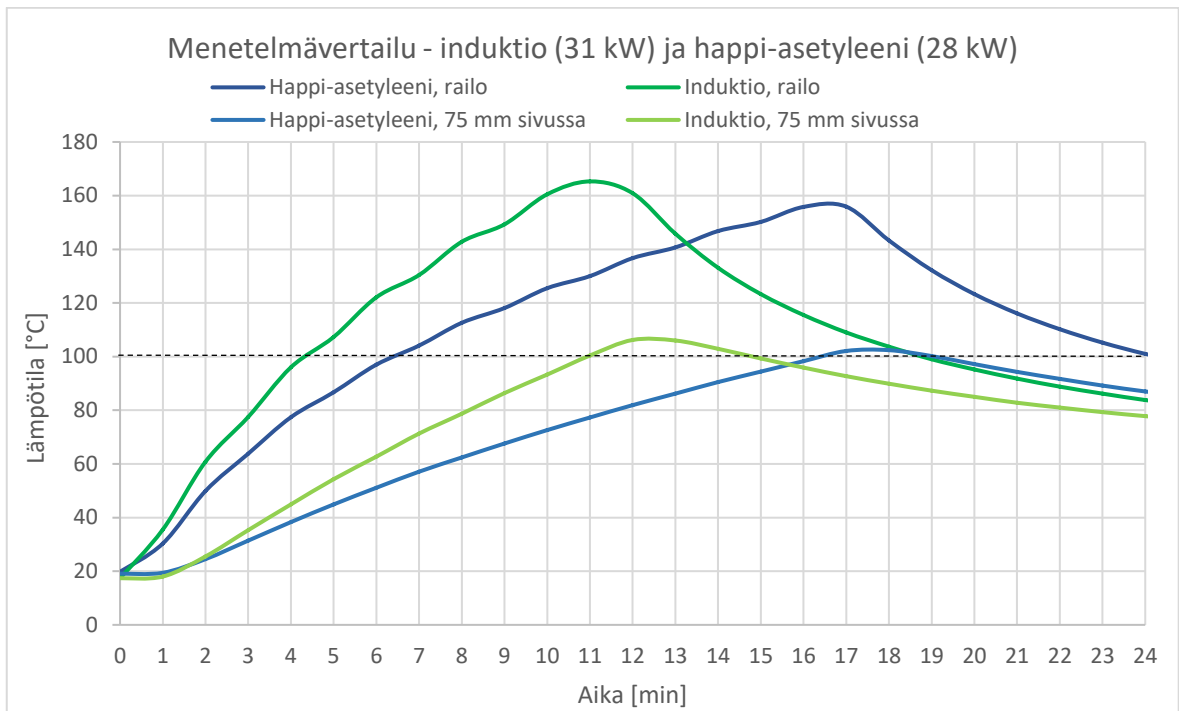
absorboitumiskyky, joka on riippuvainen railogeometriasta, ainevahvuudesta ja piirin mitasta. Jos kuitenkin pystytään selvittämään esimerkiksi induktiolämmityksen energiankulutus esimerkiksi pienemmällä työkappaleella, pystytään polttoaasujen laskennalliset kulutukset laskemaan laskurin avulla samalle työkappaleelle kulutussuhteita hyödyntämällä.

#### 8.4 Lämmitysmenetelmien tehokkuusvertailu

Tuloksissa käytiin yksityiskohtaisesti läpi molempien lämmitysmenetelmien tulokset kenttätutkimusten osalta ja niiden perusteella pystyttiin laskemaan induktion säästävän 25 % energiaa happi-asetyleeniin verrattuna. Maakaasun verrattuna ero on laskennallisesti vielä merkittävästi suurempi, mutta koska maakaasusta ei tehty lämmitystestejä, ei siitä ole myöskään lämmityskäyriä olemassa. Induktiosta ja happi-asetyleenistä tehtiin näiden välinen vertailukuvaaja (kuva 31), jonka avulla on helpompi hahmottaa eroavaisuuksia näiden tehokkuuksissa.

Induktion kelatehoksi oli virtalähteestä asetettu 28 kW ja sen ottotehoksi pystyttiin vaihevirtojen avulla laskemaan 30,6 kW. Otto- ja kelatehon välinen tehoero poistuu prosessista pääosin induktiokelan jäähdytysveden mukana. Happi-asetyleenin polttimen tehoa ei pystytty luotettavasti mittaamaan, mutta asetyleenin tilavuusvirran perusteella ottotehoksi voitiin laskea 28,2 kW. Jos oletetaan, että järjestelmässä ei ole suuria vuotoja, lähes kaiken asetyleenin voidaan olettaa palavan polttimen päässä, jolloin myös poltinteho olisi lähellä 28 kW. Eli kelateho ja polttimen teho ovat todellisuudessa olleet hyvin lähellä toisiaan, jolloin kuvaajia voidaan vertailla keskenään myös menetelmien tehokkuuden hyötysuhteen näkökulmasta. Kuvasta 31 voidaan havaita eri menetelmien erot tehokkuuksissa.





Kuva 31: Tutkittujen lämmitysmenetelmien vertailukuvaaja. Induktiomenetelmällä saavutetaan 100°C lämpötila 75 mm railosta sivussa olevassa lämpöparissa yli 5 min ennen happi-asetyleenin vastaavaa lämpöparia. Tehot ovat sähkön vaihevirroista ja asetyleenin tilavuusvirrasta laskettuja syöttötehoja

Kuvan 31 kuvaajista voidaan nähdä, että induktiolla saavutetaan parempi energiatehokkuus ja lämmön tunkeutuminen materiaaliin. Energiategokkuudella tarkoitetaan kuvaajan kontekstissa kela- tai poltintehon suhdetta aikaan, jolloin saavutetaan tavoiteltu lämpötila määrätyillä lämpöpareilla. Tulos on odotettu, sillä induktiolla kyetään kohdistamaan lämpöenergia suoraan materiaaliin, kun kaasutoimisella lämmitysmenetelmällä lämmitysteho perustuu lämmön johtumiseen pintakerroksista syvemmälle materiaaliin. Kaasutoimisella menetelmällä suuri osa lämmöstä heijastuu materiaalin pinnasta ympäröivään ilmaan.

Induktiolämmityksellä saavutetaan railossa suurempi huippulämpötila, mikä mahdollistaa lämmön johtumisen syvemmälle materiaaliin ja 75 mm päässä oleville lämpöpareille myös nopeammin. 100°C lämpötilat lämpöpareilla saavutetaan induktiolla yli 5 min nopeammin. Jäähdyttämisestä huomataan, että loitomalla materiaalissa olevalla induktion lämpöparilla lämpötila putoaa lämmityksen loputtua 10 min aikana (12–22 min) n. 25 astetta (106–81°C). Lämmitys lopetettiin ennen 11 minuuttia, mutta siitä huolimatta lämpötila jatkaa n. 1–2 min ajan vielä nousuaan 75 mm päässä hitsausrailosta, ennen kuin lähtee laskuun.

Jäähtymistä voidaan tutkia tarkemmin pidemmälläkin aikavälillä, koska lämpötilojen monitorointia jatkettiin vielä pitkään lämmitysvaiheen jälkeen. Suhteuttamalla jäähtymisen voimakkuus kuvitteellisen työkappaleen piirin mittaan, saadaan selvitettyä jäähtymislämpötilat eri työkappalehalkaisijoilla (taulukko 8). 10 m työkappaleen pyörähdys vie aikaa n. 30,4 min lämmityсноpeudella 1 m/min, koska piirin mitta on 31,4 m. Tarkastellessa dataloggerin dataa tarkemmin induktiolämmityksen osalta (liite 2), saadaan selville, että lämpötila putoaa yhden pyörähdysten aikana maksimissaan 42°C.

Taulukko 8. Jäähtymisen voimakkuuden riippuvuus työkappaleen halkaisijasta ja tämän pyörähdysajasta

| Työkappaleen halkaisija [m] | Pyörähdysaika [min] | Lämpötila alussa [°C] | Lämpötila lopussa [°C] | Jäähtyminen [ $\Delta^{\circ}\text{C}$ ] |
|-----------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|--|
| 10                          | 31,4                | 106                   | 64                     | 42                                       |
| 14                          | 44,0                | 106                   | 60                     | 46                                       |

Taulukosta 8 huomataan, että suurempien työkappaleiden pidemmät jäähtymisajat vaikuttavat kokonaisjäähtymiseen verrattain vähän. Jäähtymislämpötilojen erotus 10 ja 14 m työkappaleiden välillä on vain 4 astetta, mikä on koko jäähtymisen aikana tapahtuneeseen lämpötilamuutokseen  $\Delta^{\circ}\text{C}$  verrattuna hyvin pieni kasvu. Tulosten perusteella voidaan päätellä, että valtaosa työkappaleeseen tuodusta lämpöenergiasta menetetään jäähtymisen seurauksena ensimmäisten 10 minuutin aikana, minkä jälkeen jäähtymisen lämpötilakäyrän kulma-kerroin loivenee.

## 8.5 Energiansäästöpotentialiaali monopile-valmistuksessa

Kenttätutkimuksissa lämmitinelementti kulki metrin työkappaleen matkan päästä päähän kahdessa minuutissa. Lyhyessä ajassa teräskappale ei ehdi jäähtymään juuri ollenkaan konvektion vaikutuksesta, mikä vääristää tuloksia todellisuuteen verrattuna todella paljon. Todellisten energiankulutusten laskemiseksi tuloksia verrattiin tapaustutkimukseen, jossa paineilma-asetyleenillä toteutettua esilämmitysjärjestelmää käytettiin tuulivoimaloiden runkoja valmistavassa tehtaassa.

Suhteuttamalla tapaustutkimuksessa ilmoitettu asetyleenin kulutus tässä tutkimuksessa mitattuun ja vertaamalla tätä suhdetta työkappaleiden vaippojen kokojen suhteeseen, saatiin selville, että tapaustutkimukseen oli laskettu asetyleeniä kuluvan lähes viisinkertainen määrä. Jäähtymisen voimakkuus suurihalkaisijaisen lieriökappaleen pyörähdyskierron aikana on niin voimakasta monien lämmityskierroksien aikana, että jäähtymällä menetettyä lämpöenergiaa pitää tuoda kappaleeseen uudelleen, minkä vuoksi kulutus on tapaustutkimuksessakin niin suurta. Ilmiö korostuu entisestään vielä suuremmilla työkappaleilla.

Tapaustutkimuksen tekijä on kokenut toimija kaasulämmityksen alalla, joten sen tekemää laskentaa voitiin pitää luotettavana. Laskettu kerroin todellisille energiankulutuksille sovellettiin työn yhteydessä luotuun energialaskuriin ja sen avulla voitiin laskea energiankulutukset taulukkoon 9 tämän tutkimuksen tulosten mukaan ja tapaustutkimuksen eli referenssi-kohteen kertoimen mukaan.

Taulukko 9. Eri esilämmitysmenetelmien arvioidut energiankulutukset tämän tutkimuksen testien perusteella laskettujen arvojen ja referenssi-kohteesta tulleen kertoimen perusteella. Menetelmien väliset prosentuaaliset suhteet kulutuksissa säilyvät vakioina.

| Lämmitysmenetelmä | Työk. halkaisija<br>[m] | Ainevahvuus<br>[mm] | Energiankulutus,<br>testit [kWh] | Energiankulutus<br>ref. [kWh] |
|-------------------|-------------------------|---------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Induktio          | 14                      | 150                 | 249                              | 1211                          |
| Happi-asetyleeni  | 14                      | 150                 | 332                              | 1617                          |
| Maakaasu          | 14                      | 150                 | 1538                             | 7488                          |

Induktiolämmityksen voidaan energialaskurin antamien lukujen perusteella laskea taulukon 9 mukaisesti kuluttavan 14 m halkaisijaltaan olevan ja 150 mm paksun hitsausrailon lämmittämisessä vähintään 1,2 MWh sähköenergiaa. Todellinen kulutus on luultavasti vielä suurempi, koska jäähtymisen vaikutus kertaantuu vielä referenssi-kohdetta suuremmassa työkappaleessa, joka laskuriin on sijoitettu. Referenssi-kohteen perusteella luodun kertoimen avulla voidaan laskea enemmän todellisuutta vastaavat energiankulutukset eri lämmitysmenetelmien osalta. Jotta tämän tutkimuksen tuloksia voitaisiin paremmin sovittaa todellisen tuotantoympäristön kontekstiin, päätettiin luoda laskentamenetelmät kokonaisen monopile-perustuksen osalta. Laskennan lähtökohtana oli määritellä työkappaleen kokoluokka.

Monopilet eivät yleensä ole täydellisiä lieriöitä, vaan ne usein kapenevat alhaalta ylöspäin mentäessä. Kartiomainen muoto saattaa tarkoittaa ohuempia ainevahvuuksia kevyemmässä päässä, mikä merkitsee vaihtelevia railogeometrioita. Monopilen hitsausrailojen määrä riippuu yhteen hitsattavien lieriöiden pituudesta, eli tarkan energiankulutuksen määrittämiseksi tulisi saada tarkat tiedot kaikkien hitsausrailojen geometriasta ja näiden määrästä. Muuttuvien tekijöiden vuoksi laskentaa päätettiin yksinkertaistaa olettamalla kaikki monopilen hitsausrailit samanlaisiksi geometrialtaan. Yksinkertaistettukin laskenta antaa hyvän käsityksen energiankulutusten eroavaisuuksista.

Monopilen oletettiin olevan 14 m halkaisijaltaan olevista ja 4,2 m pituisista lieriöistä koostuva 130 m pitkä kokonaisuus. Jakamalla kokonaisuuden pituus lieriöiden pituudella, saatiin hitsausrailojen määräksi pyöristettyä 30 kpl. Ainevahvuudeksi asetettiin 150 mm ja railokulmaksi 12°. Monopilen kokoonpanon energiankulutus laskettiin kertomalla kyseiselle railogeometrialle energialaskurista saatavat ominaiskulutukset hitsausrailojen määrällä. Lämmitysmenetelmien ominaiskulutukset tälle kokoluokalle laskettiin aiemmin taulukossa 9. Hitsausenergian ominaiskulutus kyseiselle railogeometrialle laskettiin kappaleen 8.1 taulukossa 4 tarvittavan lisäaineen kilomäärän avulla (1396 kg). Hyödyntämällä energialaskurista saatavia ominaiskulutuksia, pystyttiin kokonaiskulutukset laskemaan taulukkoon 10.

Taulukko 10. Energiankulutusten laskeminen kokonaisen monopilen osalta. Kertomalla lämmitys- ja hitsausenergiat hitsausrailojen määrällä (30 kpl), saatiin selville näiden kokonaiskulutukset. Eli esimerkiksi induktionlämmityksen energiankulutus monopilen osalta saadaan kertomalla lämmitysenergia 1,21 MWh kolmellakymmenellä.

| Lämmitys-<br>menetelmä | Hitsaus-<br>menetelmä | Lämmitys-<br>energia<br>[MWh] | Hitsaus-<br>energia<br>[MWh] | Monopile,<br>lämmitys<br>[MWh] | Monopile,<br>hitsaus<br>[MWh] |
|------------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Induktio               | Sq. Wave CC,<br>LSO   | 1,21                          | 2,65                         | 36                             | 79                            |
| Happi-<br>asetyleeni   | Sq. Wave CC,<br>LS    | 1,62                          | 4,09                         | 48                             | 122                           |
| Maakaasu               | DC+ CC, LS            | 7,49                          | 5,66                         | 224                            | 169                           |

Eroavaisuudet eri menetelmien energiatehokkuuksissa on jo huomioitu tämän tutkimuksen aiemmissa vaiheissa, ja suhdeluvut eri menetelmien välillä ovat samoja kokonaisen

monopilen energiankulutusten laskennassa. Taulukon 10 tuloksista saadaan kuitenkin parempi käsitys energiatehokkuuden merkityksen mittasuhteista monopile-tuotannossa. Erojen osoittaminen energiatehokkuuksissa prosentuaalisesti ei ilman kontekstia tarjoa välttämättä riittävästi konkretiaa todellisen energiansäästöpotentiaalin ymmärtämiseksi, minkä vuoksi on tärkeää suhteuttaa se oikeaan tilanteeseen.

Taulukon 10 pohjalta luotiin vielä yksi taulukko, minkä avulla voitaisiin selkeästi havainnollistaa erilaisten lämmitys- ja hitsausmenetelmäyhdistelmien kokonaisenergiankulutukset kaikilla tämän tutkimuksen variaatioilla. Taulukkoon 11 laskettiin yhdeksän erilaisten lämmitys- ja hitsausmenetelmän yhdistelmien kokonaisenergiankulutukset.

Taulukko 11. Monopilen valmistamisen kokonaisenergiankulutus erilaisilla menetelmävariaatioilla. Alleviivattuina energiatehokkain- ja tehottomin yhdistelmä. Kaikki arvot ovat yksikössä MWh. Yhdistämällä rivin ja sarakkeen osoittaman menetelmän kulutus, saadaan menetelmäyhdistelmälle arvo.

|                  | Induktio   | Happi-asetyleeni | Maakaasu   |
|------------------|------------|------------------|------------|
| Sq. Wave CC, LSO | <u>116</u> | 128              | 304        |
| Sq. Wave CC, LS  | 159        | 171              | 347        |
| DC+ CC, LS       | 206        | 218              | <u>394</u> |

Taulukon 11 arvoista voidaan havaita induktion ja kantiaaltoisen pitkälankahitsauksen olevan energiatehokkain yhdistelmä. Kyseinen yhdistelmä kuluttaa 71 % vähemmän energiaa, kuin leukasuutinpolttimella toteutettu DC hitsaus yhdessä maakaasulämmityksen kanssa. Ero on huomattava 278 MWh. Induktion ja happi-asetyleenin välillä on pienempi kuilu energiatehokkuudessa, kun näitä verrataan maakaasuun. Laskelmien tarkkuus olisi kannattavaa varmistaa jatkotutkimuksien avulla, mutta tälläkin tarkkuudella pystytään jo hyvin haaroimaan energiatehokkaampia valmistusmenetelmiä tämän tutkimuksen teollisuudenalaan.

## 9 Johtopäätökset

Tutkimukseen lähdettäessä ensimmäisenä tavoitteena oli selvittää eri hitsausprosessien eroavaisuuksia energiatehokkuuksien osalta. Energiatehokkuudella tarkoitetaan hitsausmenetelmien kontekstissa tuotetun hitsiaineen määrän suhdetta sen luomiseksi kulutettuun energiaan. Huomattiin, että tuotetuissa lisäaineiden määrissä on merkittäviä eroja energiankulutusten pysyessä lähes samoina eri hitsausprosessien välillä. Suuriin eroihin vaikuttivat pääsääntöisesti kaksi tekijää: hitsausasetus ja poltinvalinta.

Hitsausasetuksella tarkoitetaan polttimelle syötetyn virran muotoa vaihto- tai tasavirran muodossa. Poltinvalinnalla tarkoitetaan perinteistä jauhekaari- ja pitkälankahitsauspoltinta. Virransyötön valinta vaikuttaa suuresti hitsisauman tunkeumaan, jonka voimakkuus korreloi lisäaineen tuoton kanssa. Jos tunkeuma on suuri, niin lisäaineentuotto on pieni – ja päinvastoin. Poltinten välillä tehtävä valinta vaikuttaa myös tunkeumaan ja lisäaineentuottoon, mutta vaikutusmekanismi on erilainen. Pitkälankahitsauspolttimella vapaalangan osuus on moninkertainen tavalliseen polttimeen verrattuna, minkä vuoksi lanka lämpenee punahehkuseksi ennen työkappaleen pintaa vastuslämmön vaikutuksesta. Vapaalangan kuumentuminen voimakkaasti ennen hitsisulaa nähdään merkittävästi suurempana lisäaineen tuottona ja heikompana tunkeumana.

Hitsausprosessin valinnassa on kuitenkin paljon muutakin huomioitavaa kuin maksimaalinen lisäaineentuotto. Kaikkiin kohteisiin pitkälankahitsaus ei todennäköisesti sovellu sen huonomman tunkeumakyvyn vuoksi. Joissain sovelluksissa, kuten päittäis- tai pienaliitoksissa on tärkeämpää saavuttaa hyvä tunkeuma kuin suuri lisäaineentuotto. Tämän vuoksi hitsaavan rakentamisen toimijoiden tulee pohtia tarkkaan heille parhaiten soveltuvat hitsausmenetelmät. Tämän tutkimuksen perusteella tuulivoimateollisuudessa olisi suotavaa käyttää hitsausvirtalähdettä, josta voidaan valita sekä tasa- että vaihtovirta. Tällöin juuriliitoksiin voitaisiin käyttää paremman tunkeuman saavuttavaa hitsausasetusta ja täyttöhitsaukseen voitaisiin valita paremman lisäainetuoton asetus. Hitsattaessa samalla polttimella ja samoilla hitsausparametreillä, ainoastaan virta-asetusta muuttamalla saavutettiin 41 % suurempi lisäaineentuotto kanttiaaltoisella vaihtovirralla tasavirtaan verrattuna.

Pitkälankahitsauspolttimet ovat lisäaineentuotoltaan selvästi ylivoimaisia tavanomaisiin jauhekaaripolttimiin verrattuna, tuottaen 51 % enemmän lisäainetta samoilla asetuksilla, hitsausparametreillä ja energiankulutuksella. Näiden valintaan pätee kuitenkin samat säännöt kuin hitsausvirtalähteen valintaan. Jos tiedetään, että tullaan hitsaamaan vain vähän tunkeumaa vaativaa täyttöhitsausta, niin energiatehokkain ja tuottoisin valinta olisi käyttää pitkälankahitsausta. Enemmän tunkeumaa vaativien työtehtävien osalta tulisi kuitenkin harkita tarkemmin ja varmistuttava siitä, että päästäänkö pitkälankahitsauspolttimella riittävään tunkeumaan millään hitsausparametreillä.

Tutkimuksissa havaittiin molempien hitsausasetuksen (AC/DC) ja poltinvalinnan vaikuttavan merkittävästi lisäaineen tuoton määrään, mutta näiden yhdistelmällä saavutettiin suurin lisäaineen tuottavuus. Hitsattaessa kanttiaaltoisella vaihtovirralla ja pitkälankahitsauspolttimella, saavutettiin 114 % enemmän tuottoa vaihtovirralla käytettävään jauhekaaripolttimeen verrattuna. Havaittua tulosta voidaan pitää merkittävänä, sillä kun se onnistutaan kohdentamaan oikeaan käyttökohteeseen, voidaan hitsausprosesseissa saavuttaa merkittäviä energiasäästöjä.

Tutkimuksen toisena tavoitteena oli tutkia esilämmitysmenetelmiä ja näiden osalta onnistuttiin selvittämään merkittäviä eroja niin eri polttokaasujen, kuin induktiolämmityksen ja happi-asetyleenilämmityksen väliltä. Happi-asetyleenin ollessa polttokaasumenetelmistä tehokkaimmasta päästä, sen ja induktiolämmityksen välinen ero energiankulutuksessa oli pieni. Maakaasun kulutus laskettiin kenttätutkimuksissa selvitetyn asetyleenin tilavuusvirran ja kaasutoimittajan tietojen avulla. Maakaasulla on ilman paineilman tai puhtaan hapen osallistumista lämmitysprosessiin kaikista lämmitysmenetelmistä huonoin teho, minkä vuoksi sen kulutus on moninkertainen muihin verrattuna. Induktion käyttöystävällisyyden voitiin kenttätutkimusten yhteydessä todeta olevan ylivoimainen kaasulämmitykseen verrattuna.

Kenttätutkimusten perusteella induktio kuluttaa 25 % vähemmän energiaa lämmitysprosessissa, kuin happi-asetyleeni. Happi-asetyleenissä on merkittävänä kustannustekijänä asetyleenin lisäksi happi, jota kuluu enemmän kuin asetyleeniä. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan laskettu kustannuksia, minkä vuoksi hapen kulutuksen rooliksi jäi arvioida sen vaikutusta kaasulämmityksen tehoon. Laskujen perusteella induktio kuluttaa 84 % vähemmän energiaa kuin maakaasu ilman prosessiin tuotavaa lisähappea. Eri lämmitysmenetelmien välisiä eroja voidaan pitää melko luotettavina tutkimusten perusteella, mutta todellisessa lämmitystilanteessa tulee huomioida jäähtymisen vaikutus.

Jäähtymisen huomioimiseksi tuloksiin lisättiin laskenta, jossa kaasutoimijan tapaustutkimuksen avulla laskettiin kerroin todellisille lämmitysmäärille. Kertoimeksi voitiin laskea lähes viisi, jolla eri lämmitysmenetelmien kulutukset kerrottiin. Esimerkiksi induktiolämmityksen osalta tämä tarkoitti yhden railon lämmittämisen kuluttavan 249 kWh sijasta 1211 kWh. Vastaavasti maakaasun kulutus kasvoi arvosta 1538 kWh arvoon 7488 kWh. Eli huolimatta prosentuaalisen energiatehokkuuden säilymisestä vakiona, merkitsee kertoimen tuominen laskentaan huomattavaa kasvua energiamäärässä.

Eroja hitsaus- ja lämmitysmenetelmien energiatehokkuuksissa suhteutettiin yhden hitsausrailon laskemisen pohjalta kokonaisen monopile-perustuksen kokoonpanohitsaukseen. 130 m pitkässä monopilessä laskettiin olevan ainakin 30 hitsausrailoa, kun yksittäisten yhteen hitsattavien lieriöiden pituus on enintään 4,2 m. Todellisuudessa hitsausrailojen määrä on todennäköisesti vielä suurempi. Odotettavaa oli, että energiatehokkuuksien väliset suhteet pysyvät vakioina, vaikka energiankulutusten suuruusluokka kasvaakin merkittävästi. Energiatehokkaimman yhdistelmän – induktiolämmityksen, kanttiaaltoisen vaihtovirtahitsauksen ja pitkälankahitsauspolttimen – laskettiin kuluttavan kokonaisen monopilen kokoonpanohitsauksessa 71 % eli 278 MWh vähemmän energiaa kuin energiatehottomin yhdistelmä. Suurimmat kulutukset laskettiin maakaasulämmitykselle yhdessä vaihtovirran ja tavallisen polttimen kanssa.

Tutkimuksissa saavutettiin tavoitteet hitsausprosessien ja esilämmitysmenetelmien keskinäisten energiatehokkuuksien vertailun osalta. Jäi kuitenkin avoimeksi, että kuinka tarkkoihin arvoihin luoduilla hitsauksen ja lämmityksen energialaskureilla voidaan todellisuudessa päästä ja mitkä muuttujat vaatisivat tarkempaa tutkimista, jotta tarkkuutta saataisiin parannettua. Jatkotutkimuksia olisi suositeltavaa jatkaa induktio- ja kaasuesilämmitysmenetelmien vertailun osalta vielä suuremmassa mittakaavassa. Nyt tutkimuksia päästiin suorittamaan pienessä mittakaavassa ja todellisessa tuulivoimalan tehdasympäristössä voi olla monia tuloksiin vaikuttavia tekijöitä. Olisi arvokasta tutkia kuinka tarkkaan kokonaisen monopilen valmistamiseen kuluva energiamääriä pystyttiin tämän tutkimuksen yhteydessä laskemaan ja kuinka hyvin ne vastaavat todellisuutta.

Diplomityön yhtenä osana luotiin energialaskurit energiatehokkaimpien hitsausprosessien ja esilämmitysmenetelmien löytämiseksi ja yhdistämiseksi. Huolimatta siitä, että niiden tarkkuus saattaa muuttua jatkotutkimusten myötä, pystytään niiden avulla jo hyvin haarukoiamaan asiakkaille parhaiten soveltuvia ja kustannustehokkaimpia hitsaus- ja



esilämmitysmenetelmiä. Tuulivoiman kysyntä on jatkuvassa kasvussa, kun valtiot ja yritykset kasvattamaan energiaomavaraisuusastettaan fossiilisten polttoaineiden riippuvuuden jälkeen. Etenkin Euroopassa maakaasun ja sähkön hinnat ovat olleet korkeita, mikä luo kustannuspaineita tuulivoimaloiden runkojen ja perustusten valmistajille.

Tällaisia suuria teräskappaleita valmistavilla organisaatioilla tulisi olla saatavilla parhaat tiedot eri valmistusmenetelmistä ja näiden keskinäisistä eroista. Eri menetelmillä saattaa olla hyvin erilainen kustannusrakenne, soveltuvuus operoivan organisaation tuotantoon ja tuottavuus. Organisaatiolla, jolla ei ole haasteita edullisen polttokaasun saatavuudessa tulisi kuitenkin harkita vaihtoehtoisten menetelmien soveltuvuutta suuremman tehon kautta saavutettavalla tuottavuudella. Tehokkaampi esilämmitysmenetelmä tarkoittaa lyhyempää esilämmitysaikaa ja nopeampaa tuotantoprosessia. Vastaavasti induktiolämmitysjärjestelmä saattaa vaatia muulta tuotantolaitteistolta enemmän kykyä prosessien keskinäiseen synkronointiin. Tehdyissä tutkimuksissa pystyttiin luomaan valmistusorganisaatioille soveltuvaa tietokantaa valmistusmenetelmien valintaperusteiden tueksi.

## Lähteet

Air Liquide. 2023. Gas Encyclopedia. Acetylene. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 30.10.2023]. Saatavissa:

<https://encyclopedia.airliquide.com/acetylene>

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Otamedia Oy, Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT tiedotteita 2045. Saatavissa:

<https://www.motiva.fi/files/685/t2045.pdf>

Burton, T., Jenkins, N., Bossanyi, E., Sharpe, D. & Graham, M. 2021. Wind energy handbook. Third edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc. s. 5-8. [Viitattu 3.9.2023].

Business Analytiq. 2023. Acetylene prices. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 30.10.2023]. Saatavissa:

<https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/acetylene-prices/>

Crnčec, D., Penca, J. & Lovec, M. 2023. The COVID-19 pandemic and the EU: From a sustainable energy transition to a green transition? Energy Policy. Vol. 175, s. xxx-yyy. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.6.2023]. Saatavissa:

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113453>

DNV. 2020. DNVGL-OS-C401. Fabrication and testing of offshore structures. Edition July 2020.

European Commission, Directorate-General for Energy, Hørman, M., Georgiev, I., Wessel, R. et al. 2022a. EU's global leadership in renewables: final synthesis report: July 2021. [Viitattu 29.8.2023]. Saatavissa:

<https://data.europa.eu/doi/10.2833/523799>

European Commission, Directorate-General for Trade, Beiter, P. 2022b. Analysis of the offshore wind tender results in Japan: sectoral study. Publications Office of the European Union. [Viitattu 29.8.2023]. Saatavissa:

<https://data.europa.eu/doi/10.2781/238314>

European Commission. 2023. Renewable energy directive. [Luettu 30.6.2023]. Saatavissa:

[https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive\\_en#directive-20182001eu](https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en#directive-20182001eu)

Eurostat. 2023a. Electricity production capacities for renewables and wastes. [Viitattu 30.6.2023]. Saatavissa:

[https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG\\_INF\\_EPCRW/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_INF_EPCRW/default/table?lang=en)

Eurostat. 2023b. Share of energy from renewable sources. [Viitattu 20.10.2023]. Saatavissa:

[https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG\\_IND\\_REN\\_\\_custom\\_7985973/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_IND_REN__custom_7985973/default/table?lang=en)

Eurostat. 2023c. Shedding light on energy - 2023 edition. [Viitattu 30.6.2023]. Saatavissa:

<http://doi.org/10.2785/405482>

Euroopan unionin neuvosto. 2022. Euroopan vihreän kehityksen ohjelma. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.6.2023]. Saatavissa:

<https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/green-deal/>

Fawkes, S. 2013. Energy efficiency: The definitive guide to the cheapest, cleanest, fastest source of energy. Farnham: Gower. Saatavissa:

[https://lut.primo.exlibrisgroup.com/permalink/358FIN\\_LUT/1js2888/alma991474403906254](https://lut.primo.exlibrisgroup.com/permalink/358FIN_LUT/1js2888/alma991474403906254)

Fluke. 2023. Fluke 323 True RMS Clamp Meter. [Viitattu 24.11.2023]. Saatavissa:

<https://www.fluke.com/en/product/electrical-testing/clamp-meters/fluke-323/ds>

Graphtec. 2023. Midi Logger GL840-M / GL840-WV Standalone Multi-channel Datalogger. [Viitattu 25.11.2023]. Saatavissa:

[https://www.yeint.fi/media/akeneo\\_connector/asset\\_files/G/r/Graphtec\\_GL840\\_Datasheet\\_Brochure\\_e0eb.pdf](https://www.yeint.fi/media/akeneo_connector/asset_files/G/r/Graphtec_GL840_Datasheet_Brochure_e0eb.pdf)

Haizea Wind Group. 2023. Haizea Wind Group and Iberdrola sign contract worth more than 200 million euros. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 7.9.2023]. Saatavissa:

<https://haizeawindgroup.com/en/haizea-wind-group-iberdrola-sign-contract-worth-more-than-200-million-euros/>

IAE. 2023. Renewable Energy Market Update - June 2023. [Viitattu 29.8.2023]. Saatavissa:

<https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-june-2023>

Lepola, P. & Ylikangas, R. 2016. Hitsaustekniikka ja teräsrakenteet. Helsinki: Sanoma Pro Oy. 415 s.

Lincoln Electric. 2023. Long Stick Out. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 7.11.2023]. Saatavissa:

<https://www.lincolnelectric.com/en-SG/Solutions/Target-Solutions/Long-Stick-Out>

Lincoln Electric. 2019. Modern SAW: Mild Steel and Low Alloy Submerged Arc Welding Guide. [Verkkoaineisto]. Saatavissa:

<https://ch-delivery.lincolnelectric.com/api/public/content/c6c88b1a1fd5495c9a6c9fe887750379?v=41bf5aa5>

Linde. 2023a. Asetyleeni. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 28.12.2023]. Saatavissa:

[https://www.linde-gas.fi/fi/images/Linde\\_Acetylene\\_Brochure\\_FI\\_tcm634-120437.pdf](https://www.linde-gas.fi/fi/images/Linde_Acetylene_Brochure_FI_tcm634-120437.pdf)

Linde. 2023b. Preheating and postheating. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.12.2023]. Saatavissa: [https://www.linde-gas.com/en/images/Brochure%20Preheating\\_tcm17-393406.pdf](https://www.linde-gas.com/en/images/Brochure%20Preheating_tcm17-393406.pdf)

Liu, Y., Xie, X. & Wang, M. 2023. Energy structure and carbon emission: Analysis against the background of the current energy crisis in the EU. Energy. Vol. 280. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128129>.

Lukkari, J., Kyröläinen, A. ja Kauppi T. 2016. Hitsauksen materiaalioppi. Osa 2: Metallit ja niiden hitsattavuus. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y.

Lukkari, J. 1997. Hitsaustekniikka: perusteet ja kaarihitsaus. Helsinki: Opetushallitus.

Mohanty, U. & Sharma, A. 2021. Recent developments in AC square waveform welding. Materials Today: Proceedings. Vol. 45. Part 6. Saatavissa:

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.516>

Pedrazzo, G., Barone, C.A. & Rutili, G. 2009. AC/DC generators with waveform control: innovation in submerged arc welding. *Welding International*. Vol. 23. s. 839-845. Saatavissa:

<https://doi.org/10.1080/09507110902843255>

Pettinen, R., Witting, L., Pullinen, A., Lindewald, C-G. ja Kortelainen, O. 2004. Hitsauksen materiaalioppi. 4. Painos. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y. 304 s

SFS-EN 1011-2. 2001. Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset. Osa 2: Ferriittisten terästen kaarihitsaus. Metalliteollisuuden standardisoimiskeskus. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN ISO 13916:2017. 2017. Hitsaus. Esikuumennuslämpötilan, välipalkkolämpötilan ja ylläpitolämpötilan mittausohjeet. Metalliteollisuuden standardisoimiskeskus. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN ISO 3834-1. 2006. Metallien sulahitsauksen laatuvaatimukset. Osa 1: Laatuvaatimustason valintaperusteet. Teknologiateollisuus ry, Standardisointi. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Sif Group. 2023. Monopiles & Transition Pieces. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.9.2023]. Saatavissa:

[https://sif-group.com/en/monopiles-and-transition-pieces/?gad=1&gclid=Cj0KCQjwxuCnBhDLARIsAB-cq1pKxYUII4o3oQx0mO4IBhVQKh-kuIBIMGiJIQjKBCJrdxy0uYTGnyJcaAv6DEALw\\_wcB](https://sif-group.com/en/monopiles-and-transition-pieces/?gad=1&gclid=Cj0KCQjwxuCnBhDLARIsAB-cq1pKxYUII4o3oQx0mO4IBhVQKh-kuIBIMGiJIQjKBCJrdxy0uYTGnyJcaAv6DEALw_wcB)

Summerfield-Ryan, O. & Park, S. 2023. The power of wind: The global wind energy industry's successes and failures. *Ecological Economics*. Vol. 210. [Viitattu 31.8.2023]. Saatavissa:

<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107841>

Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys ry. 2011. Hitsaustekniikka-lehti, 5/2011. s. 7–10. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.9.2023] Saatavissa:

[http://shy.fi/portals/shy/iBooklet/2011/ht\\_5\\_11/files/assets/basic-html/index.html#1](http://shy.fi/portals/shy/iBooklet/2011/ht_5_11/files/assets/basic-html/index.html#1)

Suomen Tuulivoimayhdistys (STY). 2023a. Tuulivoima Suomessa 2022. Saatavissa:

[https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima\\_vuositilastot\\_2022-1.pdf](https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositilastot_2022-1.pdf)

Suomen Tuulivoimayhdistys (STY). 2023b. Tuulivoima Suomessa 2023. Saatavissa:

[https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima\\_vuositilastot-2023-2.pdf](https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositilastot-2023-2.pdf)

Suomen virallinen tilasto (SVT). 2023. Energian hankinta ja kulutus. [Viitattu: 30.6.2023].  
Saatavissa:

<https://www.stat.fi/julkaisu/cl8lmyfdcqgc70dukvv6dsrdd>

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2023. EU:n uusiutuvan energian tavoitteet ja lainsäädäntö. [Luettu 30.6.2023]. Saatavissa:

<https://tem.fi/eu-lainsaadanto>

O'Brien A. 2004. Welding Handbook, Volume 2 - Welding Processes, Part 1 (9th Edition). American Welding Society (AWS).

Åberg, A. 2023. Hitsausinsinööri IWE, konetekniikan diplomi-insinööri, Pemamek Oy. Loimaa. Haastattelu 10.11.2023.

Kuvalähteet:

Pemamek. 2023.

<https://pemamek.com/product/ehd-10x10/>

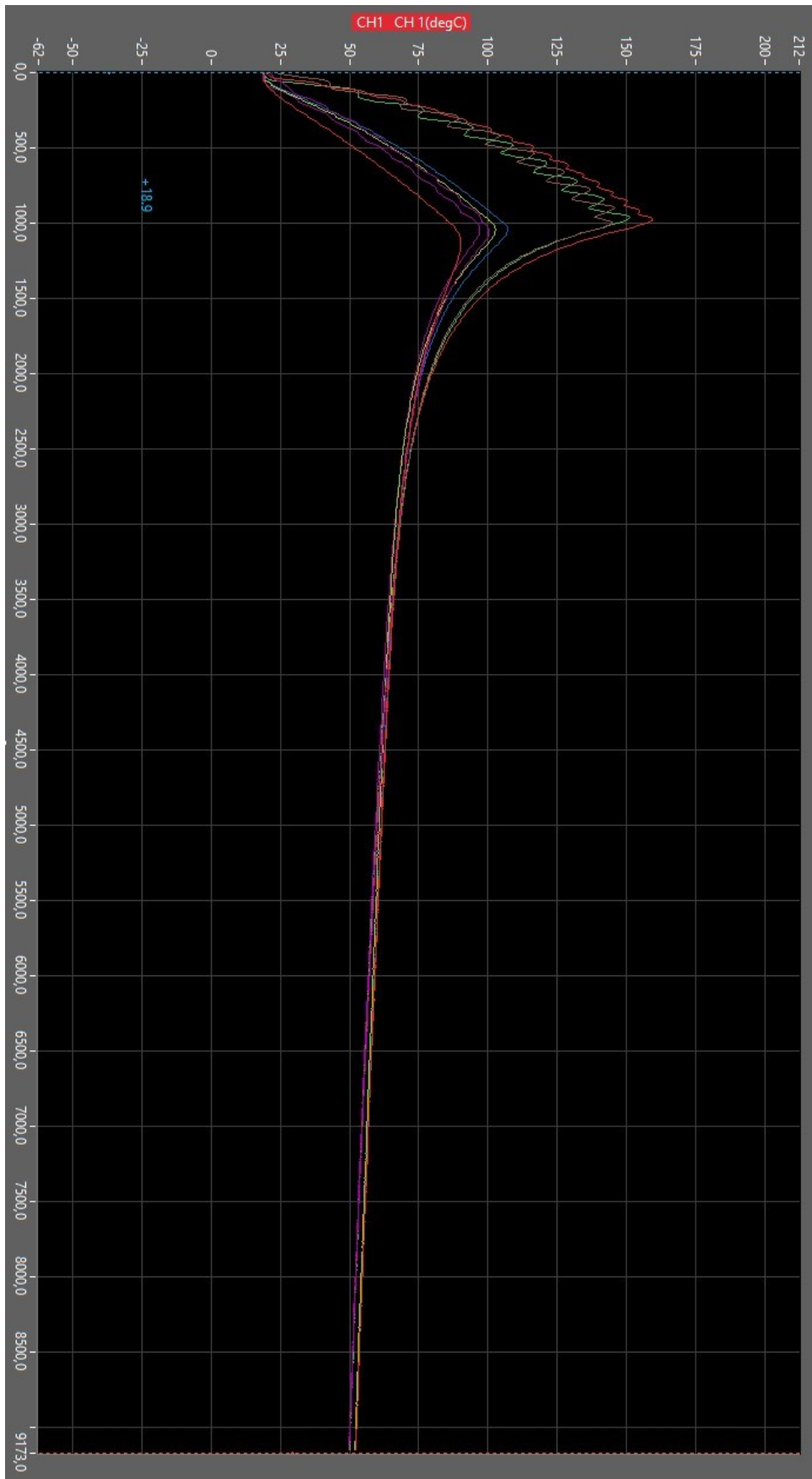
EEW Group. 2023.

<https://eew-group.com/products/structural-pipe-offshore-wind/monopiles/>

Linde. 2023.

[https://www.linde-gas.fi/fi/images/Linde\\_Acetylene\\_Brochure\\_FI\\_tcm634-120437.pdf](https://www.linde-gas.fi/fi/images/Linde_Acetylene_Brochure_FI_tcm634-120437.pdf)

Liite 1. Kaasulämmitystestien lämmityskäyrät Graphtec-dataloggerissa



Liite 2. Induktiolämmitystestien lämmityskäyrät Graphtec-dataloggerissa

