



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

Pitkien terästaosten lämpökäsittelyjärjestelmän suunnittelu ja toteutus

Joonas Peltoniemi

Opinnäytetyö
Helmikuu 2017
Konetekniikka
Tuotantotekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka
Tuotantotekniikka

PELTONIEMI, JOONA:

Pitkille Terästaosten Lämpökäsittelyjärjestelmän Suunnittelu ja Toteutus

Opinnäytetyö x sivua, joista liitteitä 1 sivua
Marraskuu 2019

Opinnäytetyön tarkoituksena oli löytää ja mahdollisesti myös toteuttaa pitkille terästaoksille sopiva lämpökäsittelyjärjestelmä Pirkkalaissa toimivalle Takomo Hukkarauta-nimiselle yritykselle. Työn alkuvaiheessa lähdettiin kartoittamaan tarkan sähkövastuksilla toimivan modulaarisen lämpökäsittelyuunin toteutus- ja tuotteistusmahdollisuuksia. Ideaalitavoite oli löytää ratkaisu, jolla pystyttäisiin lämpökäsittämään eli karkaisemaan ja päästämään tehokkaasti erityisesti pitkiä, mutta tarvittaessa myös lyhyempiäkin teräskappaleita. Pitkiä kappaleita lämpökäsiteltäessä vaatimuksena oli mahdollisimman tasainen 830-850 Celsiusasteen lämpötila koko kappaleen noin 70cm pituiselta matkalta. Lyhyemmillä kappaleilla vaadittiin tarkkaa korkean, n. 1000-1150 Celsiusasteen, lämpötilan hallintaa noin 5-15 minuutin pitoajan verran. Suurin painotus työssä oli kuitenkin saada kehitettyä järjestelmä pitkien kappaleiden kuumentamiseen.

Työssä selvitettiin kattavasti erilaiset lämmitystekniikat ja eristeratkaisut. Sähköllä toimivan lämpökäsittelyuunin toteutettavuudesta tehtiin tarkat tutkimukset, joiden pohjalta voitiin todeta tämän vaihtoehdon toteuttamisen kustannusten nousevan melko suuriksi lopputuotteen käytön määrää ajatellen. Lisäksi patentoitavuus ja mahdollisuus valmistaa sitä myyntiin vaikuttaa myös suuren riskin ja pienten voittojen toiminnalta, joten se vaihtoehto voitiin myös poistaa suunnitelmista.

Parin vuoden tauon jälkeen työssä päädyttiin kaasuahjoihin perustuvaan ratkaisuun. Tämä vaihtoehto kypsyi hitaasti ajatuksena käytännön yritystoiminnan kokemuksen myötä. Pitkien kappaleiden lämpökäsittelyssä tämä yksinkertainen, huokea ja nopeasti toteutettava kaasuahjojono osoittautui riittävän hyväksi lopputulokseksi onnistuneeseen karkaisuun ja päästöön.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical and Production Engineering
Production Engineering

PELTONIEMI, JOONA:

Planning and Implementation of a Heat Treatment System for Long Steel Forgings

Bachelor's thesis ? pages, appendices ? pages
November 2019

The purpose of this thesis was to plan and possibly implement a heat treatment system for longer steel forgings to a Birckalan company called Kvenland Forgeworks. In the beginning of the project the thesis work was concentrated on surveying the possibilities and productisation of a precise electrically heated modular heat treatment oven. The ideal purpose was to find an effective solution for heating carbon steel forgings to quenching and tempering temperatures but also, when needed, shorter steel items too. The required temperature for long items was to maintain a steady 830-850 Celsius temperature for length of approximately 70 cm. For shorter items the main requirement was to maintain a steady and high, approximately 1000-1150, Celsius temperature for 5-15 minutes soaking time. The most important aim however was to develop a system for heating longer steel items to quenching temperatures.

Different heating techniques and insulation solutions were thoroughly researched in the thesis. The feasibility of an electrically powered heat treatment oven was carefully examined. From the basis of this a conclusion was drawn that the costs of planning and creating a modular electric oven system were rather high when the level of use of the product was added into consideration. In addition the price to file for patent and productisation of modular oven for sale seems to be a high risk-low reward business and thus this option was effectively ousted from feasible possibilities.

After a few years break a gas forge based system proved to be a successful enough of a solution. This idea formed slowly as a thought during those few years of practical entrepreneurship experience. In the heat treatment of long steel items this simple, cheap and quickly executable line of small gas forges proved to be more than enough to provide successful quench and temper.

Key words: machine planning, heat treatment

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	YRITYSESITTELY	8
3	TERÄSTEN LÄMPÖKÄSITTELYN TEORIAA	9
	3.1 Lämpökäsittelymenetelmät	9
	3.1.1 Karkenevuus.....	9
	3.1.2 Päästö	11
	3.1.3 Muutamien seosaineiden merkitys terästen lämpökäsittelyssä	11
	3.1.4 Pitoaika.....	12
4	TERMODYNAMIIKKA.....	13
	4.1 Lämpöenergia	13
	4.2 Lämpöenergian siirtyminen	14
	4.2.1 Konvektio.....	14
	4.2.2 Johtuminen	14
	4.2.3 Säteily.....	15
5	MODULAARISUUS	16
6	SUUNNITTELU	18
	6.1 Uunin vaatimukset	20
	6.1.1 Työn rajaukset.....	20
	6.2 Kuumennustavat	21
	6.2.1 Lämpötilakontrolli.....	22
	6.2.2 Lämpötilan tasaisuus.....	23
	6.2.3 Lämmitysnopeus	23
	6.2.4 Turvallisuus.....	24
	6.2.5 Modularisoinnin toteutettavuus.....	24
	6.2.6 Lämmitysmuotojen vertailu	25
	6.3 Eristemateriaalit	26
7	SÄHKÖVASTUKSILLA TOIMIVAN UUNIN SUUNNITTELU	29
	7.1 Mitoitus.....	29
	7.1.1 Lämpöeristys	29
	7.2 Lämmitystehon tarve	32
	7.3 Vastus.....	39
	7.3.1 Vastusmateriaali	39
	7.3.2 Resistanssi ja kytkentä	40
	7.3.3 Langan kuormitus.....	43
	7.3.4 Langan asettelu uuniin	44
	7.3.5 Langan hinta.....	47

7.4	Runkorakenne	47
7.4.1	Rungon materiaali	47
7.4.2	Jalat	49
7.4.3	Ovet ja niiden kiinnitysjärjestelmä	49
7.4.4	Moduulien kiinnitykset	51
7.5	Ohjausjärjestelmä.....	52
7.5.1	Lämpötilan tarkkailu ja hallinta	53
7.6	Sähkötekniset osat ja komponentit	56
7.7	Käyttöjärjestelmä	56
7.8	Turvallisuus	57
7.8.1	Direktiivit, standardit ja CE-merkintä.....	58
7.9	Patentointimahdollisuus.....	59
7.9.1	Vaatimukset patentoitavalle keksinnölle.....	59
7.9.2	Patentoinnin hinta	61
7.10	Modulaarisen sähköuunin toteutettavuus.....	62
8	KAASUPOHJAINEN VAIHTOEHTO	63
8.1	Kaasuahjojono karkaisu-uunina.....	63
8.2	Kaasuahjojen parannusehdotukset.....	63
8.3	Kaasupohjaisen karkaisu-uunin toteutettavuus.....	65
8.3.1	Kustannukset.....	66
9	POHDINTA.....	67
	LÄHTEET.....	71
	LIITTEET	74
	Liite 1. Sähköuunin taulukoitu kustannusarvio	74
	Liite 2. Otsikko.....	Error! Bookmark not defined.
	Liite 3. Otsikko.....	Error! Bookmark not defined.
	Liite 4. Otsikko.....	Error! Bookmark not defined.
	Liite 5. Otsikko.....	Error! Bookmark not defined.

LYHENTEET JA TERMIT

<i>A</i>	pinta-ala, m ²
<i>c</i>	ominaislämpökapasiteetti, kJ/(kg·K)
<i>d</i>	langan halkaisija, mm
<i>D</i>	renkaaksi taivutetun langan ympyrän sisäosan halkaisija, mm
<i>I</i>	sähkövirta, A
<i>L</i>	pituus, mm
<i>m</i>	massa, kg
<i>P</i>	teho, W
<i>P_d</i>	tehotiheys, W/cm ³
<i>Q</i>	energiamäärä, J
<i>r</i>	langan resistanssi metriä kohden, Ω/m
<i>R</i>	vastus, Ω
<i>S_L</i>	pintakuormitus, W/cm ²
<i>t</i>	aika, s
<i>T</i>	lämpötila, °C
<i>U</i>	jännite, V
<i>V</i>	tilavuus, cm ³
<i>ρ</i>	tiheys, kg/m ³

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön lähtökohtana on lämpökäsittelyprosessien parantaminen yrityksessä Takomo Hukkarauta. Yrityksessä työkalujen karkaisu hoidetaan perinteisellä hiiliahjolla, jossa suoritettava karkaisuprosessi vaatii paljon kokemusta. Esimerkiksi tarkan ja tasaisen laadun aikaansaaminen pidemmissä kappaleissa on todella haastavaa. Martensiittisten ruostumattomien terästen karkaisu puolestaan on pitkistä pitoajoista johtuen todella epäkäytännöllistä hiiliahjolla. Koska markkinoilta ei löydy kaikkiin yrityksen tarpeisiin lämpökäsittelylaitteita, joilla voisi energiatehokkaasti kuumentaa sekä lyhyitä että pitkiä kappaleita, päätettiin opinnäytetyössä kartoittaa mahdollisuuksia koottavan lämpökäsittelyuunin suunnitteluun ja toteutukseen.

Opinnäytetyön tavoitteena kartoittaa eri vaihtoehtoja lämpökäsittelyjärjestelmälle, jossa perusmoduuli saavuttaa suuret lämpötilat, joita vaaditaan esimerkiksi ruostumattomien terästen karkaisuun. Perusmoduuliin tulee olla helppo lisätä samanlaisia jatkomoduuleja, joiden avulla onnistuu pidempienkin kappaleiden lämpökäsittely. Rajauksena jatkomoduulien kanssa uunia käytettäessä maksimilämpötilan ei tarvitse olla niin korkea kuin yksittäisellä elementillä. Tämä siksi, että käytännön sovelluksia pidempien kappaleiden tavanomaista suuremmille lämpökäsittelylämpötiloille ei ole. Modulaarisena myytäviä vastaavia järjestelmiä ei löydy markkinoilta. Siksi pidetään suunnittelussa mielessä myös mahdollinen lopputuloksen patentointi, turvallisuusseikat sekä näkökulma sarjatuotantoa varten.

Työn rajauksena mahdolliset sähköjärjestelmien tarkat suunnittelut sekä komponenttien mitoitukset jätettiin vähemmälle huomiolle. Tämä tehtiin siksi, että niiden katsottiin kuuluvan sähkötekniikan koulutuksen piiriin.

Onnistunut modulaarinen lämpökäsittelyuuni antaa yritykselle erinomaisen kilpailuedun niin tasaisen ja erinomaisen laadun kuin taloudellisesti suoritettuna lämpökäsittelyinkin kannalta.

2 YRITYSESITTELY

Viikinkiseppä J. Peltoniemi- nimellä pyöritetty osuuskuntapohjainen ammatinharjoittaminen on ollut aktiivisessa toiminnassa kesästä 2012 lähtien. Yrityksen tuotteet koostuvat suurimmalta osin taoksista; sisustus-, käyttö-, ja koriste-esineistä sekä tietysti suuresta valikoimasta erilaisia terätyökaluja. Työkaluihin sisältyvät myös erilaiset historialliset asereplicat, joita valmistetaan enimmäkseen mittatilaustyönä. Taontatöiden yhteydessä tehdään myös hiekkavaluja sekä nahkatöitä, joilla tuodaan lisäarvoa esimerkiksi taottujen teräaseiden kahvoihin ja tuppiin. Keväällä 2017 toimintaa alettiin pyörittämään nimellä Takomo Hukkarauta tmi.

Sepäntöön perinetaitoja on tärkeää osata ja pitää yllä etteivät ne ammattikunnan keski- iän noustessa häviä. Pelkästään perinteisillä menetelmillä ei nykypäivänä kuitenkaan tehdä suurta tulosta. Niinpä yrityksen tavoitteena onkin tuoda sepän ammatti entisaikojen metallialan yleisammattilaisena ja kaikkien työstötapojen erityisosajana nykyaikaan 2000-luvulle. Tämän takia tuotantoinsoörin koulutus on ollut erittäin suuressa roolissa yrityksen tuotantomenetelmissä, joilla pyritään tehostamaan erilaisten kappaleiden valmistusta. Tämä tehostus voi tarkoittaa vaikka erilaisten modernien menetelmien, kuten tietokoneavusteisen mallinnuksen, laserleikkauksen ja 3d- tulostuksen käyttämistä erilaisten tako- ja valuaihioiden valmistukseen. Modeneilla menetelmillä saadaan nopeasti valmistettua erilaisia prototyyppisiä, puolivalmiita aihioita ja vaikkapa valumalleja. Näiden aihioiden ja mallien avulla valmistettu lopputuote on laadultaan tarkempi ja nopeammin valmistettu kuin pelkästään perinteisiä menetelmiä käyttämällä tehty vastine. Lopputuote on moderneilla tuotantomenetelmillä maustettuna aina erinomaista ja tasaista laatua jossa on silti tallella käsityön yksilöllisyys ja leima.

Yritys pyrkii valmistamaan terästuotteita ja yksittäiskappaleita erittäin laajalla skaalalla, mutta suurin monia tuotteita yhdistävä teema on historiassa ja eritoten viikinkiajassa. Kiinnostus keskiaikaan on lisääntynyt paljon viime vuosien aikana, minkä ansiosta yrityksen asiakaskuntaan ovat ilmestyneet myös museot ja yhdistykset.

3 TERÄSTEN LÄMPÖKÄSITTELYN TEORIAA

3.1 Lämpökäsittelymenetelmät

Erilaisia lämpökäsittelyuuneja käytetään suurimmaksi osaksi teräskappaleiden karkaisu- ja normalisointikuumennukseen, hehkutukseen sekä päästöön. Pienemmässä mittakaavassa sillä voi suorittaa myös hiilletys-, ja bainiittikarkaisua. Koska eri teräslaatuojen lämpökäsittelytekniikat vaihtelevat todella paljon seostuksen ja useiden muiden muuttujien vuoksi, tulee lämmitysjärjestelmän olla tarkasti toimiva laajalla lämpötila-alueella.

Useimmissa lämpökäsittelyn sovelluksissa, kuten vaikka terätyökalun karkaisussa ja päästössä on tärkeää kuumentaa tietty alue kappaleesta mahdollisimman tasaisesti ja tarkasti oikeaan lämpötilaan, jolloin teräksen rakenteessa tapahtuvat muutokset tapahtuisivat mahdollisimman hallitusti. Liika kuumuus aiheuttaa epätoivottuja muutoksia kiderakenteessa ja joskus jopa säröjen ja halkeamien muodostumista kappaletta sammuttaessa. Toisaalta taas jos osa kappaleesta ei lämpene tarpeeksi ei sen rakenne muutu lämpökäsittelyn yhteydessä. Näin ollen tämän työvaiheen tarkkuutta ja merkitystä lopputuotteen laatuun ei voi korostaa liikaa; huonolla lämpökäsittelyllä erinomaisestakin teräksestä voi tulla heikkolaatuinen työkalu. (Eriksson & Selen 1946, 231-232.)

3.1.1 Karkenevuus

Karkaisua voidaan pitää työkaluvalmistuksen alalla tärkeimpänä lämpökäsittelymenetelmänä. Teräksen karkenevuus, eli kovaksi muuttuminen nopeasti jäädytettäessä, on tunnettu luultavasti lähes yhtä kauan kuin rautaa on osattu valmistaa. Jo alkeellisessa pelkistysuunissakin syntyvään rautasieneen saadaan pieniä alueita hiilipitoista terästä. Näiden alueiden karkeneminen nopeassa jäädytyksessä ja siitä seuraava hauraus on voinut todennäköisesti ilmetä sattumalta, esimerkiksi jotain työkalua valmistettaessa. On huomattu, että sirppi pitää teränsä paremmin kärjestä, mutta samalla myös katkeaa siltä osin helposti. Fysikaalisia syitä tälle ilmiölle ei kuitenkaan ole tunnettu ennen modernia aikakautta. Perinteinen tieto teräksen

käyttäytymisestä karkaisussa on saatu yrityksen ja erehdyksen kautta. Nämä tiedot ja aiheeseen liittyvät työhöjeet ovat olleet tarkoin varjeltuja salaisuuksia, jotka ovat kulkeneet mestarilta oppipojalle perimätietona. Hyvänä esimerkkinä on japanilainen määritelmä katanan karkaisulämpötilasta ”kun teräs on punainen kuin nouseva aurinko”.

Teollistumisen myötä alettiin tuottaa kokeisiin ja tieteeseen perustuvaa tietoa teräksen mikrorakenteen muutoksista lämpökäsittelyssä. Nykyään tiedetään, että karkaisuohjeissa tärkeää on saada teräs ensin austeniittialueelle. Austeniitti on pintakeskeinen kuutiollinen (PKK) rakenne, joka kykenee liuottamaan hiiltä aina 2,06% pitoisuuteen asti (Meskanen & Toivonen 2002, 5-6). Jos teräs jäädytetään riittävän nopeasti tältä alueelta, esimerkiksi öljyyn tai veteen sammuttamalla, liuenneet hiiliatomit eivät pääse liuenneesta tilastaan pois vaan jäävät jäähtyvässä teräksessä muodostuvan kiteen sisälle. Tämä siksi, koska austeniitin PKK-rakenteessa on alueita, jonne hiili mahtuu. Näitä välisijoja ei tilakeskeisessä kuutiollisessa ferriitissä (niukkahiilinen teräksen rakenneosa) ole. Hiiliatomin sisältävää kiderakennetta kutsutaan martensiitiksi. Se on erittäin kovaa mutta samalla hyvin haurasta. (Lepola & Makkonen 2000, 93.)

Jäähditysnopeus riippuu suuresti aineesta, johon austenoitu teräs sammutetaan. Teräksen valmistajan ohjeissa on yleensä merkintä, mihin aineeseen kyseinen teräslaatu tulee sammuttaa. Jotkin seostetut teräkset karkaistuvat jopa ilmajäädytyksellä. Öljy taas on yleisin ja turvallinen vaihtoehto, se sammuttaa teräskappaleen sopivalla nopeudella. Liian suuri jäähditysnopeus voi aiheuttaa sen, että kappaleeseen syntyy murtumia. Tämä on yleisintä vesikarkaisussa. Myös karkaisunesteen alkulämpötila on tärkeä tekijä. Se ei saa olla liian kylmää tai kuumaa. Vesikarkaisussa veteen sekoitetaan usein suolaa, joka alentaa kuumen teräksen aiheuttaman höyryn syntymistä vesialtaassa. Höyry hidastaa jäähtymistä, kun vesi ei pääse tämän kerroksen läpi kosketuksiin terän kanssa. Suola ehkäisee höyryn syntymistä, jolloin lopputulos on paljon nopeammin jäähtynyt ja siten kovempi kappale. (Eriksson ym. 1946, 232-233.)

3.1.2 Päästö

Karkaisussa syntyvää haurautta ehkäistään sen jälkeen tapahtuvalla päästöllä, missä teräs kuumennetaan käyttötarkoituksesta riippuen 150-350 Celsiusasteeseen (Nevalainen 1979, 3.2.4). Päästön oikeaoppiseen suorittamiseen vaikuttavat hyvin monet samat tekijät kuin karkaisuunkin, kuten seostus, käyttötarkoitus, aika ja lämpötila. Erittäin karkeasti yleistäen voidaan kuitenkin tiivistää, että suurempi päästölämpötila vähentää karkaistun teräksen haurautta kovuuden kustannuksella.

3.1.3 Muutamien seosaineiden merkitys terästen lämpökäsittelyssä

Teräksen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa suuresti seosaineilla. Yleisesti voidaan sanoa, että kaikista seosaineista hiili on ehdottomasti merkityksellisin. Oikein seostettuna se tuo teräkseen kovuutta ja lujuutta. Alle 0,4% hiiltä sisältävät teräkset, joissa ei ole merkittävästi muita seosaineita, eivät ole karkenevia. Hiiltä käytetään teräksessä aina n. 1,7% asti. Tätä suurempiin pitoisuuksiin mennessä materiaali alkaa olla jo liian kovaa ja haurasta sekä haastavaa kuumatyöstettävää, jolloin puhutaan valurautoista. Puhdas, niukasti muilla aineilla seostettu hiiliteräs on matalaan karkeneva, eli se ei karkene kovin syvältä. Esimerkiksi paksu kappale veteen jäähdytettynä jää sisäosistaan pehmeäksi pintakerroksen muodostuessa martensiittiseksi. Tätä ominaisuutta käytetään hyväksi monissa sovelluksissa. (Eriksson ym. 1946, 173.)

Toiseksi yleisin seosaine teräkselle on kromi, joka on tunnetuin ruostumattoman teräksen tärkeimpänä seosaineena. Pienemmät määrät, joihin törmää usein varsinkin työkaluteräksissä, parantavat karkenevuutta merkittävästi. Kromi muodostaa hiilen kanssa kovia karbideja sementiittiin, joka on teräksen perliittirakenteen erittäin kova mutta hauras osa. Näin se siis lisää teräksen kovuutta. Kromi vaikuttaa myös teräksen karkaisulämpötilaan korottamalla sitä hitusen. Se myös lisää karkenevuutta, eli kromilla seostettu teräs muuttuu martensiittiseksi syvemältä kuin puhdas hiiliteräs. Lisäksi kromilla maustettu karkaistu hiiliteräs on hienorakeisempaa kuin pelkästään hiilipitoinen teräs. Kromia käytetään usein toisen yleisen seosaineen, nikkelin, kanssa haponkestävissä teräslaaduissa. Pieni seostus nikkeliä lisää teräksessä lujuutta ilman että sitkeys vähenee ja nikkelilisiä myös parantaa karkaisusyvyyttä sekä alentaa karkaisulämpötilaa. (Eriksson ym. 1946, 174.)

Mikroseosaineista vanadiini ansaitsee maininnan. Se on voimakkaasti karbideja muodostava lisäaine, jota käytetään lisäämään kovuutta, lujuutta ja sitkeyttä. Vanadiini hienontaa raerakennetta karkaistussa teräksessä, se hidastaa kiteen kasvua lämpötilan alkaessa nousta yli austenointilämpötilan. Vanadiini myös korottaa karkaisulämpötilaa. (Eriksson ym. 1946, 175.) Hiiliahjoa käytettäessä vanadiini on ollut erinomaisen hyvä seosaine, sillä hiiliahjossa helposti tapahtuva teräksen pieni ylikuumentaminen karkaisussa ei vaikuta laatuun merkittävästi kiderakenteen pysyessä hienona.

3.1.4 Pitoaika

Seostamisen kanssa käsi kädessä kulkee pitoaika. Eli kuinka kauan kappaletta olisi hyvä pitää karkaisulämpötilassa ennen sammutusta. Pitoaika hiiliteräksille on yleensä lyhyt, sillä hiili liukenee austeniittiin nopeasti kuumennuksen yhteydessä. Voimakkaasti seostettuja teräksiä voi sen sijaan joutua pitämään karkaisulämpötilassa jopa puoli tuntia, sillä seosaineiden karbidit vapauttavat hiiltä hitaasti, ellei lämpötilaa nosteta. Myös kappaleen paksuus on merkittävä tekijä pitoajasta puhuttaessa, paksumpi kappale vaatii pidemmän pitoajan, että sen sisäinen rakenne ehtii muuttua riittävästi. Pitoaika, jos sellaista tarvitaan, löytyy yleensä teräslaadun valmistajan julkaisemasta lämpökäsittelyohjeesta. Myös päästettäessä pitoajalla on merkitystä teräksen ominaisuuksiin. Yksinkertaistettuna voidaan sanoa, että mitä kauemmin teräs on päästölämpötilassa, sitä enemmän sen sisäinen rakenne ehtii muuttua sitkeämmäksi. (Päivärinta 2001.)

4 TERMODYNAMIIKKA

Tämänhetkinen fysiikan tietämys määrittelee lämmön suureeksi, jolla mitataan aineen olotilaa. Tämä olotila, eli aineen senhetkinen lämpötila, tarkoittaa aineen sisäisiä atomitason värähtelyitä, eli liike-energiaa, mitä aineeseen on sitoutunut. Mitä enemmän atomit liikkuvat aineessa, sitä lämpimämpi se on. Kun energiaa ei ole yhtään, liike loppuu. Kun aineen atomit/molekyylit eivät liiku enää yhtään, ollaan matalimmassa mahdollisessa lämpötilassa, jota kutsutaan absoluuttiseksi nollapisteeksi. Lämpö onkin yksinkertaistettuna energian siirtymistä atomien liikkeiden muodossa kuumemmasta aineesta kylmempään. (Inkinen & Tuohi, 1999, 409-410.) Kirjassaan Ajan lyhyt historia (1988, 187) fyysikko Stephen Hawking määritteli lämpötilan yhdeksi universumin sisältämäksi tavaksi ajan mittaukseen: Termodynamiikan toinen pääsääntö, eli entropian kasvu, tarkoittaa universumin alkuhetken äärettömän (mutta järjestyneen) kuumuuden jäähtymistä epäjärjestyksen tilaan universumin vanhetessa ja laajetessa.

4.1 Lämpöenergia

Kappaleesta tai aineesta toiseen siirtyvää energiaa voidaan mitata sen lämpötilan muutoksesta. Tätä lämpötilaeron johdosta siirtyvää energiaa kutsutaan lämpömääräksi, jonka yksikkönä on energian yksikkö joule. Lämpötilan nostoon vaadittava energia vaihtelee eri aineilla. Vaihtelua kuvaa aineen ominaislämpökapasiteetti, jonka yksikkö on $J/(kg \cdot K)$. Ominaislämpökapasiteetti vaihtelee suuresti erilaisilla aineilla. Hyvä esimerkki tästä voisi olla vaikka kilo kuparia ja kilo vettä (astiassa) kuumalla liedellä. Kupari kuumenee pienemmän ominaislämpökapasiteettinsa ansiosta todella paljon nopeammin kuin viereisellä levyllä oleva vesiastia. Suuri ominaislämpökapasiteetti tarkoittaa siis, että aineeseen täytyy tuoda paljon energiaa massayksikköä kohti, että sen lämpötila nousisi. (Inkinen & Tuohi 1999, 379-381.)

4.2 Lämpöenergian siirtyminen

Lämpenemisen aikaansaava atomien/molekyylien liike on hieman erilaista, kun aine on kaasumaista, nestettä tai kiinteää. Puhutaankin tavoista, joilla lämpöenergia siirtyy näissä eri olomuodoissa. Mahdollisimman tehokas lämpöenergian siirto ja hyötykäyttö vaativat näiden tapojen erinomaista tuntemusta. (Inkinen & Tuohi 1999, 406.)

4.2.1 Konvektio

Nesteitä ja kaasuja lämmitettäessä niihin syntyy lämpötilaerojen johdosta virtauksia. Nämä virtaukset saavat alkunsa pienistä tiheyseroista, kun lämpölaajentunut aine on harvempaa kuin sen vieressä oleva kylmempi ainemassa. Esimerkkinä tästä on vaikkapa sauna, jossa ylälauteet ovat kuumin paikka istua. Myös monet maapallon luonnonilmiöt kuten merivirrat, tuulet ja maankuoren alla tapahtuvat sulan kiviaineksen liikkeet perustuvat konvektioon. Nesteissä ja kaasuissa lämpeneminen tarkoittaa Matemaattisesti selitettynä konvektio on kuitenkin melko monimutkainen ilmiö, mutta sen helpompaan kuvaamiseen on tehty yksinkertaistettuja yhtälöitä. (Inkinen & Tuohi 1999, 406.)

4.2.2 Johtuminen

Kiinteitä aineita lämmitettäessä niiden suhteellisen tiheään pakkautuneiden atomien/molekyylien liikehdintä kasvaa. Liikkuvat energiset atomit törmäilevät viereisiin atomeihin, ja törmäysten johdosta viereisetkin atomit saavat hieman liike-energiaa. Kun energiaa tuodaan lisää, lämmin alue laajenee. Esimerkki tästä on ahjoon työnnetty pitkä kuparitanko. Lämpö siirtyy johtumalla nopeasti kuumassa ahjossa olevasta päästä tangon muihinkin osiin. Rautatangolla ilmiö on sama, mutta raudan pienemmän lämmönjohtavuuden vuoksi johtuminen tapahtuu paljon hitaammin. Lämmönjohtavuutta kiinteissä aineissa mitataan yksiköllä $W/(m \cdot K)$. Lämpöä hyvin johtavien aineiden, joilla tämä arvo on suuri, lisäksi on olemassa joukko materiaaleja, joilla johtavuus on hyvin pieni. Näitä materiaaleja sanotaan lämpöeristeiksi. Niitä käytetään, kun pyritään estämään lämpöenergian siirtyminen tietyltä alueelta toiselle. (Inkinen & Tuohi 1999, 409-411.)

4.2.3 Säteily

Tuntoaistilla voidaan arvioida kuumen kappaleen lämpötilaa koskematta siihen. Lämmitetty aine säteilee energiaa niin paljon, että se voidaan aistia. Kuitenkin kaikki kappaleet, olivatpa ne kuumia tai kylmiä, emittoivat tätä energiaa sähkömagneettisena säteilynä. Säteily siirtää lämpöenergiaa, kuten voidaan huomata vaikka leivänpaahdinta käytettäessä. Lämmöllä on siis aaltoliikkeen ominaisuuksia. Lämpöaaltojen aallonpituudet ovat matalissa lämpötiloissa infrapuna-alueella, mikä tarkoittaa ettei sitä pysty näkemään silmillä. Lämpötilan kasvaessa säteilyn aallonpituuksien skaala laajenee, kappale alkaa emittoimaan lämpösäteilyä myös lyhemmällä aallonpituudella, josta osa on näkyvän valon alueella. Tämän seurauksena n. 500 Celsiusasteeseen lämmitetty kappale alkaa hehkumaan tummanpunaisena. Lämpötilan noustessa edelleen n. 900 asteeseen väri muuttuu oranssiksi ja yli 1500 asteessa valkohehkuseksi. Lämpösäteily voidaan laskea kaavalla XX , kun tiedetään kokonaissäteilyteho ja säteilevän pinnan ala. (Inkinen & Tuohi 1999, 408-419.) Hehkuvan korkeissa lämpötiloissa säteily on usein merkittävin lämpöä siirtävä ilmiö (Inkinen & Tuohi 1999, 422). Lämpösäteily liikkuu nopeasti yksi- ja kaksiatomisissa kaasuissa, joista kuiva ilma on tavallisin esimerkki (Ikonen 2013, 29). Niinpä lämpöenergiaa säteilemällä kappaleeseen siirtävä järjestelmä onkin paras menetelmä sen kuumentamiseen korkeisiin karkaisulämpötiloihin.

5 MODULAARISUUS

Perinteisesti koneet, laitteet ja rakennukset valmistetaan yhtenä suurena kokonaisuutena. Kaikki oleellinen, kuten vaikkapa voimansiirto, ohjausjärjestelmä, sähköt ja putket suunnitellaan ja lisätään saman rungon alle. Aikaa vievän suunnittelutyön valmistuttua muutosten tekeminen piirrustuksiin jälkikäteen on haastavaa, sillä huomioon otettavia asioita, joihin muutokset voivat vaikuttaa, on runsaasti. Tämänkaltainen kone ja laitesuunnittelu ei siis ole erityisen joustavaa toimintaa nykymaailman muuttuvissa tilanteissa. Nykyään suosiossa ovatkin järjestelmät, joita on helppo ja nopea muokata senhetkiseen tilanteeseen sopiviksi. (Gostimirović, Kovač, Radovanović, Madić & Krajny 2015, 27.)

Suuren mittakaavan esimerkki nykyaikaisesta järjestelmäsuunnittelusta on FMS (Flexible Manufacturing System) eli joustava valmistusjärjestelmä. Se tarkoittaa systeemiä, jossa tuotantoa voidaan jatkaa yhtenäisesti valmistettavien kappaleiden mallien ja tuotantomäärien muuttuessa. (Aaltonen & Toivonen 1997, 23.) Joustava valmistusjärjestelmä koostuu soluista, jotka ovat rinnastettavissa moduuleihin. Kun näitä soluja asetellaan sopivaan järjestykseen ja ne synkronoidaan toimimaan yhdessä, voidaan niistä rakentaa hyvin pitkälle automatisoitu tuotantolinja, jossa ihmisen tehtävät ovat prosessin suunnittelu ja valvonta. (Aaltonen & Toivonen 1997, 241-262.) Kun kaikki solut eli moduulit valmistetaan samoilla periaatteilla toisiinsa yhteensopiviksi, voidaan niitä yhdistelemällä saada aikaan mitä erilaisimpia tuotantokokonaisuuksia. Tuotantolaitosten suunnittelussa ja toteutuksessa saavutetaan tätä kautta suuria säästöjä, kun jokaista linjan osaa ei tarvi miettiä erikseen, vaan osakokonaisuudet voidaan hankkia valmiina standardimoduuleina ja koota senhetkisen tarpeen mukaiseen tehokkaimpaan järjestykseen.

Koneen tai järjestelmän jakamisella pienempiin moduuleihin tuodaan tuotteelle lisäarvoa myös vaihtoehtojen kautta: asiakas voi itse koota tarpeisiinsa sopivan paketin yksittäisistä toisiinsa yhteensopivista moduuleista. Tämä vaihtoehto jättää samalla mahdolliseksi järjestelmän päivittämisen lisämoduuleilla tulevaisuudessa, jos järjestelmältä vaaditaan nopeaa evoluutiota erilaiseen työhön. (Baldwing & Clark 2006, 181.)

Modulaarisuudella on siis monia hyviä puolia suunnittelussa. Ennen kaikkea sillä on kuitenkin taloudellisiin tekijöihin perustuvaa vaikutusvoimaa. Standardimoduulien helppo valmistettavuus tekee varaosista ja -moduuleista halvempia hankintoja kuin monimutkaisempien laitekokonaisuuksien osista. Viallinen moduuli on myös nopea vaihtaa, jos aika ei riitä varaosan hankkimiseen ja sopiva moduuli on sillä hetkellä käyttämättömänä. Modulaarisuuden tuomalla monipuolisuudella voidaan samalla peruslaitteella tehdä useita eri työtehtäviä yksinkertaisesti moduuleja vaihtamalla. Näin voidaan saavuttaa säästöjä myös yrityksen työtilojen tarpeessa, jos aikaisemmin vastaaviin työtehtäviin on tarvittu useampi erillinen kone, jotka vievät enemmän lattiatilaa. (Gostimirović ym. 2015, 27.)

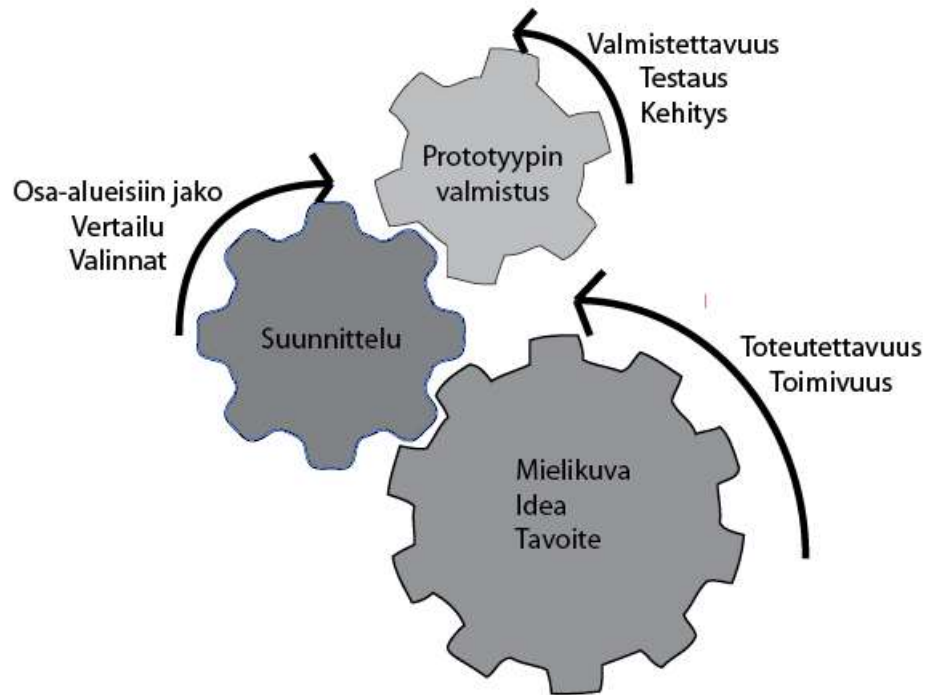
Modulaarisuutta käytetään harvemmin todella erilaisten työstötehtävien toteuttamiseen yhdellä järjestelmällä. Usein riittäviä hyötyjä saadaan pienemmilläkin laitteen tehtävien jakamisilla. Esimerkki tästä olisi työn alla oleva lämpökäsittelyuuni, jonka moduulit tuovat kokonaisuuteen yksinkertaisesti vain lisäpituutta, ja sitä kautta mahdollisuuksia pidempien kappaleiden lämpökäsittelyyn.

6 SUUNNITTELU

Järjestelmän suunnittelun filosofiaksi valittiin deterministinen lähestymistapa. Tämän ajattelun mukaan tuotantomenetelmien siirtäminen koneiden tehtäväksi eliminoi prosessista kaikki inhimilliset virheet. Kun kone on hyvin suunniteltu, sen toiminta on puhtaimmillaan fysiikkaa ja luonnonlakeja, jotka toimivat (ympäröivien olosuhteiden pysyessä muuttumattomina) aina samalla tavalla. Tämä ajattelu nojaa ideaan fysiikan lakien muuttumattomuudesta ja näiden ilmiöiden ymmärrykseen. Tämän ymmärryksen pohjalta voidaan kone tai laite suunnitella mahdollisimman tarkaksi ja käyttövarmaksi. (Hale 1999, 38). Hyvällä käyttötarkkuudella onkin lämpökäsittelyssä suuri rooli, varsinkin jos verrataan asteen tarkkuudella toimivaa ja lämpötilan selkeästi ilmoittavaa uunia ja hiiliahjoa, josta teräksen lämmitys täytyy tehdä käsivaralla ja lämpötila täytyy lukea silmämääräisesti.

Modulaarisen lämpökäsittelyuunin suunnittelua oli tehty koko ammattikorkeakoulun opintojen ajan. Tänä aikana mielikuva valmiista uunista ehti muuttua tarkemmaksi rauhallisesti, jolloin monia ratkaisuja ja vaihtoehtoja pystyi punnitsemaan perusteellisesti. Tällainen suunnitteluprosessi muistuttaa spiraalisen suunnittelun teoriamallia, jossa prosessi on itseään korjaava ja reflektiivinen. (Anttila 1993, 128-134.) Tällaisen suunnittelumallin runko on hyväksytyjen ratkaisujen sarja, jotka lähenevät spiraalin keskikohtaa eli valmista esinettä. Suunnittelun alustavassa mielikuvavaiheessa mietittiin niitä vaatimuksia, joita uunin tulee täyttää toimiakseen alkuperäisen idean hahmottelemalla tavalla. Näiden toimintojen saavuttamiseksi vertailtiin useita erilaisia vaihtoehtoja, joilla yksittäinen ominaisuus oli mahdollista saavuttaa. Vertailu erityyppisten ratkaisujen välillä toteutettiin poissulkemalla huonoimmin tärkeimpiä kriteerejä täyttävät vaihtoehdot, kunnes vain yksi tai muutama hyvä vaihtoehto oli jäljellä. Tärkeimpiä kriteerejä alkukarsintaan saattoi olla vaikka toimivuus, materiaali tai ratkaisun valmistettavuus/toteutettavuus. Jäljelle jääneistä vaihtoehdoista voitiin tehdä lopullinen valinta vähemmän tärkeän kriteerin, kuten esimerkiksi saatavuuden tai hinnan perusteella. Suunnitteluprosessia voikin ajatella kuvan 1 mukaisena hammaspyöräkokonaisuutena, jossa idean voima pyörittää suurinta pyörää. Tämä suurin pyörä siirtää liikkeen seuraavien vaiheiden suunnittelulle. Jos ideointi loppuu, niin koko prosessi pysähtyy.

Viime kädessä uunia voidaan kehittää käytössä havaittujen asioiden kautta. Puutteet huomataan viimeistään laitteen prototyypin testattaessa. Tässä vaiheessa saadaankin eliminoitua viimeiset pienet suunnitteluvirheet ja jalostettua kompromissiratkaisuja optimaalisemmiksi. Tällainen prosessi on tavallinen osa koneen kehitystyötä. Se on myös hyvin lähellä luontoa, sillä se mimikoi evoluutiota, joka on toiminut vuosimiljoonien ajan käytössään vain yksi työkalu: kokeilu.



KUVA 1. Työn etenemisprosessi

6.1 Uunin vaatimukset

Tärkein vaatimus toimivalle lämpökäsittelyuunille on mahdollisimman tarkka ja tasainen lämpötilan kontrolli. Lämpötilan tulee pysyä mahdollisimman tasaisena kaikkialla uunin sisällä, jolloin tämä tarkasti saavutettu lämpötila on tasaisesti myös kuumennettavassa kappaleessa. Tarvittavat lämpötilat uunin suunnitteluun asetettiin 1200 Celsiusasteeseen perusmoduulille, jolloin sillä pystyy karkaisemaan useimpia martensiittisiä ruostumattomia teräksiä. Jatkomoduulien kanssa uunin tulee saavuttaa 950 astetta, mikä riittää hyvin kaikille hiiliteräksille.

Muut vaatimukset uunille ovat jo aiemmin mainittu modulaarisuus, mutta myös nopea koottavuus niin valmistuksessa kuin käytössäkin sekä helppokäyttöisyys ja turvallisuus. Uunin lämmityksen ei tarvitse olla erityisen nopeaa. Tämä lähinnä siksi, että työtiloissa voi tehdä useita muita työtehtäviä tavoitelämpötilaa odotellessa, eli pienellä työtehtävien järjestelyllä vältetään odotteluun hukattu aika. Myös uunien rakennetta ajatellen liian nopeat lämpötilan muutokset eivät tee hyvää millekään materiaaleille, vaan voivat aiheuttaa niissä muodonmuutoksia ja jopa hajoamisia.

6.1.1 Työn rajaukset

Koska uuni suunniteltiin Kone- ja tuotantotekniikan opinnäytetyönä, mahdolliset sähköjärjestelmät päätettiin jättää pelkästään pintapuoliselle tarkastelulle ja alustavien suuntalinjojen vetämiselle. Tämä tehtiin siksi, että ne kuuluvat sähkötekniikan koulutusohjelman piiriin, eikä tässä koulutuksessa saatu pintapuolinen raapaisu sähkösuunnitteluun riitä hyvään suunnitteluun eikä varsinkaan kytkentöjen ym. potentiaalisesti hengenvaarallisten seikkojen valmistukseen. Periaatteena näillä osa-alueilla siis on, että pintapuolin kyllä tiedetään mitä tulee tehdä ja samalla tiedostetaan, miten se kannattaa toteuttaa helpoiten ja turvallisimmin.

6.2 Kuumennustavat

Ensimmäinen vertailu ja päätös uunin suunnittelussa on kuumennustavan valinta. Eri ratkaisut vaikuttavat suuresti valmistettavuuteen, koottavuuteen ja käytettävyyteen. Lämmitystavat voidaan jakaa kolmeen erilaiseen luokkaan energiamuodon mukaisesti. nämä tavat ovat kiinteä polttoaine, kaasumainen/nestemäinen polttoaine ja sähkö.

Kiinteällä polttoaineella lämmittäminen tarkoittaa nimensä mukaisesti järjestelmää, jossa lämpö syntyy palavasta materiaalista, kuten vaikkapa puusta tai hiilestä. Puhaltamalla hapetta palavaan materiaaliin voidaan hiiltä poltettaessa saavuttaa todella korkeita lämpötiloja. Hyviä puolia tässä menetelmässä ovat laitteiston yksinkertaisuus ja sitä kautta huokea hinta. Suuri huono puoli tällaisessa uunissa on erittäin vaikea tasaisen lämpötilan hallinta ja tarkkailu, varsinkin pidempiä kappaleita kuumennettaessa. Myös kuumennusnopeuden hallinta ja säätö on erittäin haasteellista ja vaatii jatkuvaa tarkkailua. Tämän vuoksi kiinteäpolttoaineinen lämmitysjärjestelmä, kuten ahjo, sopiikin parhaiten muokkaavaan työstöön ja vain jossain määrin lämpökäsittelyyn, lähinnä silloin kun kuumennetaan vain osa käsiteltävästä kappaleesta. Muita huonoja puolia on polttoaineen varastoinnin suuri tilan tarve ja myös sen melko korkea hinta (verrattuna muihin lämmitysmuotoihin). (Eriksson ym.1946, 226.)

Kaasumaista polttoainetta tai öljyä käyttävät lämmitysjärjestelmät ovat olleet melko yleisiä varsinkin metalleja sulatettaessa, mutta myös takomotyössä monentyyppisissä kaasuahjoissa. Tällaiset kaasu-uunit ja -ahjot ovat melko helppohoitoisia, mutta polttoainekulut voivat laajamittaisessa käytössä nousta melko suuriksi. Polttoainetta eli nestekaasua on kuitenkin helposti saatavilla useimmista rautakaupoista ja jopa huoltoasemilta. Kuten kiinteilläkin polttoaineilla lämmitettäessä myös kaasu-uuneissa tasainen lämpötila on haastava saavuttaa ja ylläpitää, sillä lämpötilat nousevat polttimoiden kohdilla muuta aluetta korkeammaksi. Tämän pystyy kuitenkin kiertämään asettamalla uuniin esimerkiksi teräsputken, joka on suorassa kosketuksessa polttomoon. Lämpö polttimosta säteilee tällöin ensin putkeen, josta se johtuu koko putken mitalle ja säteilee tasaisesti putken sisällä olevaan kappaleeseen. Pienenä miinuksena kaasupoltin on useimmiten melko äänekäs pitää käynnissä (Stanaitis 2016). Koska uunia käytettäisiin myös päästöön, jolloin matalia, parin- kolmensadan asteen lämpötiloja ylläpidettäisiin pitkiä aikoja, olisi äänekäs ja kaasua kuluttava lämmitysmuoto melko epäkäytännöllinen monipuoliseen lämpökäsittelyuuniin.

Kaasuahjo vaatii nestekaasupulloja, joiden säilytys puolestaan asettaa erityisiä vaatimuksiaan työympäristölle, pullot tulee säilyttää kaukana lämmönlähteistä ja hyvän ilmanvaihdon tiloissa. Erityisesti säilytyksessä tulee kiinnittää huomiota siihen, että varastointipaikka ei ole kuoppamainen tila, esimerkiksi kellari, josta ilmaa raskaampi kaasu ei vuototilanteessa pääsisi virtaamaan pois. (TUKES 2010, 14.)

Sähköllä toimivalla uunilla lämmittäminen perustuu vastuksiin, jotka kuumenevat sähköän virratessa niiden läpi. Kuumat vastukset lämmittävät uunin sisätilaa. Hyviä puolia tällaisessa menetelmässä on tasainen rauhallinen lämpötilan kontrolli. Sitä on helppo säätää kytkemällä sähkövirta pois päältä kun haluttu lämpötila on saavutettu ja kytkemällä se takaisin päälle kun lämpötila alkaa laskea. Sähköuuni on äänetön pitää päällä eikä siitä koidu päästöjä, toisin kuin kaasu ja hiililämmityksessä, jotka vaativat hyviä ilmastointijärjestelmiä yhteyteensä. Sähköuunin käytön hinta riippuu suuresti sähköän senhetkisestä hinnasta, mutta sähköenergia pystytään uunilla muuttamaan lämmöksi hyvinkin tehokkaasti. (Eriksson ym. 1946, 227.)

6.2.1 Lämpötilakontrolli

Lämpötilakontrolli kriteerinä tarkoittaa lämpötilan tarkkaa ylläpitoa halutulla tasolla ja kappaleen kuumenemista hallitulla nopeudella. Tässä kriteerissä sähköuuni, joka lämpenee vastusten kuumetessa, tarjoaa parhaan vaihtoehdon. Jos uuniin toteutetaan relejärjestelmä ja lämpötila-anturit, se osaa katkaista vastuksia kuumentavan virran aina lämpötilan ylittäessä uunin ohajusjärjestelmään syötetyn tavoitteen, näin ollen teräs ei kuumene liikaa eikä siihen tämän vuoksi tule epätoivottuja kiderakennemuutoksia.

Kaasuahjo tarjoaa keskinkertaisen vaihtoehdon kontrolliin, kuumimmat kohdat ovat aina kaasupolttimen kohdalla, ja jos lämpötila nousee yli karkaisulämmön näiltä kohdin täytyy työstettävää kappaletta joko siirtää tai polttimen tehoa säätää manuaalisesti. Pitkien kappaleiden käsittelyyn tarkoitettu kaasuahjo vaatii monta poltinta, jolloin jokaisen säätäminen on hankalaa ja vaatii paljon liikkumista ja säätöjä, jotka kaikki ovat pois itse kappaleen tarkkailusta ja kontrolloinnista.

Hiiliahjossa ongelmat ovat samanlaisia kuin kaasuahjossa, mutta korostetumpia. Hiilet palavat sitä kuumempina mitä lähempänä ahjoon puhaltavia ilma-aukkoja ne ovat, tällöin myös ilma-aukkoja lähimpänä olevat kohdat kuumennettavasta kappaleesta kuumenevat aivan eri tahtia kuin ilma-aukkojen väliset alueet, mikä aiheuttaa samat ylikuumenemisiongelmat kuin kaasuahjollakin. Hiiliä myös täytyy lisätä koko ajan hyvin nopeaa tahtia, sillä pitkät kappaleet vaativat ison tulipesän jossa polttoainetta palaa suurella alueella nopeaa tahtia. Kuten kaasuahjossa tämä hiilien jatkuva syöttö vie aikaa itse kappaleen käsittelyltä. Näiden seikkojen vuoksi hiiliahjo on huonoin kolmesta kuumennustavasta lämpötilakontrollin suhteen.

6.2.2 Lämpötilan tasaisuus

Lämpötilan tasaisuus tarkoittaa koko uunissa vallitsevaa lämpötilaa. Karkaistavan kappaleen tulee olla kauttaaltaan mahdollisimman samassa lämpötilassa. Pitkien kappaleiden kohdalla tämä voi olla haastavaa varsinkin sellaisilla kuumennusmenetelmillä, joissa lämpöenergia tuotetaan palamisen avulla. Kaasu- ja hiiliahjoissa tämä realisoituu polttimien ja ilma-aukkojen läheisyyteen. Varsinkin hiiliahjossa paikalliset lämpötilaerot ovat suuret. Kaasuahjossa voidaan niitä tasata erillisellä ahjon sisälle asetettavalla teräsputkella kuten luvussa 6.2 mainittiin. Kumpikaan vaihtoehto ei kuitenkaan pärjää sähköuunille, joissa tällaisia kuumempien kohtien keskittymiä ei esiinny. Vastukset kuumenevat tasaisesti sähkövirran vaikutuksesta. Niinpä sähköuuni saa parhaat pisteet tässäkin tapauksessa.

6.2.3 Lämmitysnopeus

Lämmitysnopeus vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti uuni ja sen sisällä oleva työkappale tai työkappaleet saadaan tavoitelämpötilaan. Nopea kuumennus tarkoittaa vähemmän karkaisuun kulutettua aikaa ja näin ollen parantaa työn tehokkuutta. Se myös vaikuttaa myönteisesti teräkseen, sillä jos karkaisuhehkutuksessa teräs on hehkuvan kuumana pitkään saataa sen pinnalla tapahtua hiilikatoa, mikä vaikuttaa heti negatiivisesti sen karkaisussa saavutettavaan kovuuteen (Eriksson ym. 1946, 234). Lämmitysnopeudeltaan polttoainetta käyttävät kaasu- ja hiiliahjot ovat ylivoimaisesti parempia kuin verkkaisesti kuumeneva sähköuuni. Hiiliahjo vaatii usein kuitenkin

lämpökäsittelyn suoritusta helpottavia ja parantavia esivalmisteluja, kuten hiilten murskausta sopivan pieneksi rakeeksi, joka voidaan laskea lisää aikaa kuluttavaksi valmisteluvaiheeksi. Niinpä kappaleen lämmittäminen on nopeinta suorittaa kaasuahjolla.

6.2.4 Turvallisuus

Vähiten riskejä voidaan nähdä hiiliahjoissa. Jos puhaltimet hankitaan CE-merkittyinä osina niin ne eivät aiheuta merkittäviä sähköturvallisuusriskejä tavallisessa käytössä. Ainoa riski ovat palovammat ja kipinöiden tulipalovaara. Näistä ensimmäinen eliminoiduu lähelle nollaa vähäisenkin kuuman raudan ammattimaisen käsittelyn jälkeen, kun opitaan käyttämään oikeanlaisia työkaluja ja suojavaatteita. Tulipalovaara puolestaan on olematon aina jos työ suoritetaan vakituisella tulityöpaikalla, joissa tulityöhön olennaisesti liittyvien ahjojen on pakko muutenkin sijaita, sillä vakituinen tulityöpaikka täytyy suojata ja rakentaa niin, ettei palovaaraa kipinöistä ole (IF Vahinkovakuutus 2015, 3.)

Sähköuunissa riskinä ovat myös pienet palovammat, käytännössä ne voidaan minimoida oikeanlaisella toiminnalla. Suurempi riski ovat sähköiskut. Tätä aihetta käsitellään tarkemmin luvussa 7.8.

Kaasuahjossa suurimman riskitekijän muodostavat kaasupullot ja niiden säilytys ja käyttö. Kaasujärjestelmien, letkujen ja liittimien kuntoa täytyy tarkkailla aktiivisesti aina ennen työhön ryhtymistä. Vääränlainen käyttö, varastointi ja vuodot voivat aiheuttaa jopa räjähdysvaaran (TUKES 2010, 4). Siten kaasuahjoa voidaan pitää riskialtteinpana kuumennusvaihtoehtona.

6.2.5 Modularisoinnin toteutettavuus

Kaikki kolme vaihtoehtoa ovat ainakin teoriassa mahdollisia toteuttaa modulaarisista osista. Kaasuahjossa tämä voi tarkoittaa yksinkertaisimmillaan kolmea jonossa olevaa lyhyttä kaasuahjoa. Koska lämmitys tapahtuu nopeasti ja tehokkaasti, ei ahjojen väleihin tarvita tiiviitä liitoksia. Pieni lämpöhukka moduulien välisistä mahdollisista

rakosista ei vaikuta käyttöön näin tehokkaan kuumennustavassa. Pienet kaasuahjot vievät vähän tilaa, ne ovat nopeita kytkeä kaasupulloihin ja asetella siistiin jonoon. Niinpä kaasuahjo on modulaarisena toteutuksena yksinkertaisin

Hiiliahjolla modularisointi voisi tarkoittaa tavallista yhtenäistä teräsrunkoista ahjoa, jossa pelkkä tulipesä on muokattavissa joko lyhyeksi tai pitkäksi. Toisaalta se voitaisiin myös toteuttaa kolmesta lyhyemmästä identtisestä teräsrungosta, joista jokaisella olisi oma puhallin. Tällaiset ahjot voisivat toimia myös yksittäisinä työpisteinä esimerkiksi taontakursseilla, joissa ahjopaikka ja alasin tarvitaan jokaiselle opiskelijalle. Teräsrungot ovat kuitenkin isoja ja hankalia liikutella, mikä tiputtaa hiiliahjon toiselle sijalle modulaarisuudessa.

Sähköllä verkkaisesti kuumeneva moduuleista koostuva pitkä uuni täytyy eristää moduulien väleistä hyvin, ettei lämpö karkaa. Lisäksi jokainen moduuli vaatii oman sähköjärjestelmänsä. Nämä molemmat seikat tekevät modulaarisen sähköuunin suunnittelusta ja valmistuksesta kaikkein kalleimman ja suuritöisimmän projektin.

6.2.6 Lämmitysmuotojen vertailu

Eri lämmitysmuodot taulukoitiin, ja niiden tehokkuus vaadituilla osa-alueilla pisteytettiin asteikolla 1-3 tähteä. Kolme tähteä merkitsi parasta kolmesta lämmitysvaihtoehdosta, yksi huonointa.

TAULUKKO 1. Lämmitysmuotojen vaihtoehtovertilu

	Lämpötila- kontrolli	Lämpötilan tasaisuus	Lämmitys- nopeus	Turvallisuus	Modularisointi- toteutettavuus	Tähtiä Yhteensä
Kaasu	**	**	***	*	***	11
Sähkö	***	***	*	**	*	11
Hiili	*	*	**	***	**	10

Taulukon 1 pisteistä voidaan todeta, että eri lämmitysmuodot pärjäävät melko tasaisesti keskenään vaadituilla osa-alueilla. Kuitenkin kaasu ja sähkö pärjäävät hieman paremmin kuin hiilillä lämmittäminen. Koska lämpökäsittelyuunissa halutaan ennen kaikkea panostaa tuotteen laatuun, päätettiin lämmitysmuodoksi uuniin valita sähkö sen tarjoaman parhaimman lämpötilakontrollin ja lämpötilan tasaisuuden vuoksi.

6.3 Eristemateriaalit

Eristemateriaaleja, jotka kestävät toistuvaa kuumennusta lähes 1000 Celsiusasteen lämpötilaan ja joita käytetään yleisesti teollisissa lämpökäsittelyuuneissa, on saatavilla villamaisena, tiiliskivinä ja erilaisina massoina. Näistä ensimmäinen eli kivivilla on pehmeää ja kevyintä eristemateriaalia. Sen suurin käyttölämpötila-alue on kuitenkin vain 750 Celsiusasteen tietämällä (Paroc Group Oy 2010, 5). Tämä tarkoittaa, että sitä ei voi käyttää ainakaan uunin sisimpiin alueisiin, jotka ovat lämmityselementtien vieressä.

Yleisempiä korkeiden lämpötilojen eristemateriaaleja ovatkin erilaiset keraamiset villat, joissa suurin käyttölämpötila on keraamin laadusta riippuen 1000-1200 asteen luokkaa (Ranne, Hänninen & Salmi 1999, 12). Villamaisen eristeen pehmeys ja taipuisuus tekee siitä kuitenkin epäkäytännöllisen lämmityselementtien pysyvään kiinnitykseen. Keraamisesta villasta irtoaa myös pölyä, mikä on pidempään hengitettynä terveydelle haitallista (Guzzardo 2009, 2). Molempia näistä haittapuolista voidaan kuitenkin eliminoida erilaisilla pinnoitteilla.

Nämä pinnoitteet kovettavat villan pintakerroksen ja näin estävät, tai ainakin vähentävät, pölyämistä käytön aikana. Suurin osa pinnoitteista myös parantaa uunin tehokkuutta estämällä lämpöenergian virtaamista seinämien läpi ja heijastamalla lämpösäteilyä tehokkaammin kuin pelkkä villa. Heijastunut säteily osuu tällöin kuumennettavaan kappaleeseen ja lämmittää sen hieman nopeammin. Villaisen eristevaihtoehdon tapauksessa sopiva pinnoitemateriaali ICT-100HT löytyikin läheltä Tampereella toimivasta Rodbay Oy-yrityksestä. Tämä vesiliukoinen aine kovettaa villan pinnat ja vähentää uunin seinämien läpi kulkevaa energiavirtaa noin muutamia prosentteja. Sen toimintaperiaate on edellä mainittu lämpösäteilyn heijastaminen, jolloin lisääntynyt säteilyintensiteetti aiheuttaa nopeamman kuumentumisen työstettävälle kappaleelle. Villan lisäksi tätä ainetta voidaan käyttää kovemmissa pinnoissa kuten esimerkiksi sähkövastuksilla lämpiävän uunin tulitiilissä, tällöin aineen hyöty on oletettavasti vain lämmityksen hyötysuhdetta parantava. (Vapalahti 2018.)

Tulitiilet ovat yleisiä eristeratkaisuja monissa korkeita lämpötiloja käyttävissä järjestelmissä. Niitä on saatavilla muutamia erilaisia laatuja, mutta karkeasti tulitiilet voidaan jakaa koviin ja pehmeisiin tiiliin. Kovat tulitiilet ovat nimensä mukaisesti näistä kahdesta tiheämpiä ja kestävämpiä. Niitä käytetään mm. erittäin suurissa

muutoksia kitin rakenteeseen ja vielä nopeampi sammutus öljyyn pitää kitin useimmiten niin lujasti kiinni teräksessä, että karkaisun jälkeiseen kitin irrottamiseen vaaditaan avuksi pientä viilaa. Kitti on kuitenkin kallis materiaali, ja uunin suurehkon sisärakenteen valmistaminen yksistään siitä tulisi kohtuuttoman kalliiksi muihin eristemateriaaleihin verrattuna. Ehkä kuitenkin tulevaisuudessa kittejä voi olla saatavilla huokeampaan hintaan, ja niitä voi vaikkapa 3d-tulostaa haluamaansa muotoon.



KUVA 3. Cascon tulikitti (Kuva: Joonas Peltoniemi 2019)

7 SÄHKÖVASTUKSILLA TOIMIVAN UUNIN SUUNNITTELU

Luvussa 6.1 mainituista kolmesta lämmitysmenetelmästä valittiin ensisijaisesti sähköuunissa käytettäväksi lämmitysmuodoksi. Suurin syy valintaan oli tarkin lämpötilan kontrolli, mikä on kriittistä erinomaisesti suoritetulle lämpökäsittelylle. Parempi laatu oli suurin syy uunin suunnitteluprojektille, ja sen takia sähkövastuksilla lämmitys osoittautui ehdottomasti tarkimmaksi menetelmäksi. Hiljaisuus ja päästöttömyys ovat muita tämän lämmitystavan tuomia merkittäviä etuja, joiden merkityksen työskentelymukavuuteen huomaa silloin, kun uuni on päällä tiloissa, missä myös taonta ja muu tulityö tapahtuu samanaikaisesti. Sähköuunien ylivoimaisuuden voi huomata myös tutkimalla markkinoilla jo olevia lämpökäsittely-/keramiikkauunimalleja, jotka lähes kaikilta osin perustuvat vastuksien käyttöön.

7.1 Mitoitus

Uunin mitoitus aloitti varsinaisen suunnittelutyön. Alun perin mitoitus ajateltiin tehtäväksi sähkötehon tarpeen mukaan, mutta koska tarvittava sähköteho riippuu lämmitettävän alueen tilavuudesta, mitoituksen ensimmäiseksi tekijäksi osoittautuikin uunin sisätilavuuden määrittäminen. Uunin sisäpuoli pitää eristää mahdollisimman hyvin, että lämpö ei karkaisi sieltä. Niinpä saatavilla olevien eristemateriaalien valinta ja niiden saatavuus eri kokoluokissa määrittelisivät uunin sisämitat, mikä puolestaan määrittelisi lämmitettävän sisäosan tilavuuden ja sitä kautta lämmitykseen vaadittavan sähkötehon tarpeen.

7.1.1 Lämpöeristys

Luvussa 6.3 luetelluista eristemateriaaleista pehmeä tulitiili osoittautui sähköllä toimivaan uuniin parhaiten sopivaksi eristeratkaisuksi. Sen keveys, suhteellisen hyvä kovuus, korkeiden lämpötilan kestävyys ja huokea hinta tekivät siitä ylivoimaisesti käytännöllisimmän eristemateriaalin. Uunin tiilirakenne päätettiin vielä tiivistää tulikitillä, jolloin tiilet ”muuraantuisivat” paremmin yhteen eikä niiden väliin jäisi pienintäkään rakoja, mistä lämpöä voisi karata ulkopuolelle. Uunin ulkokerros voitaisiin

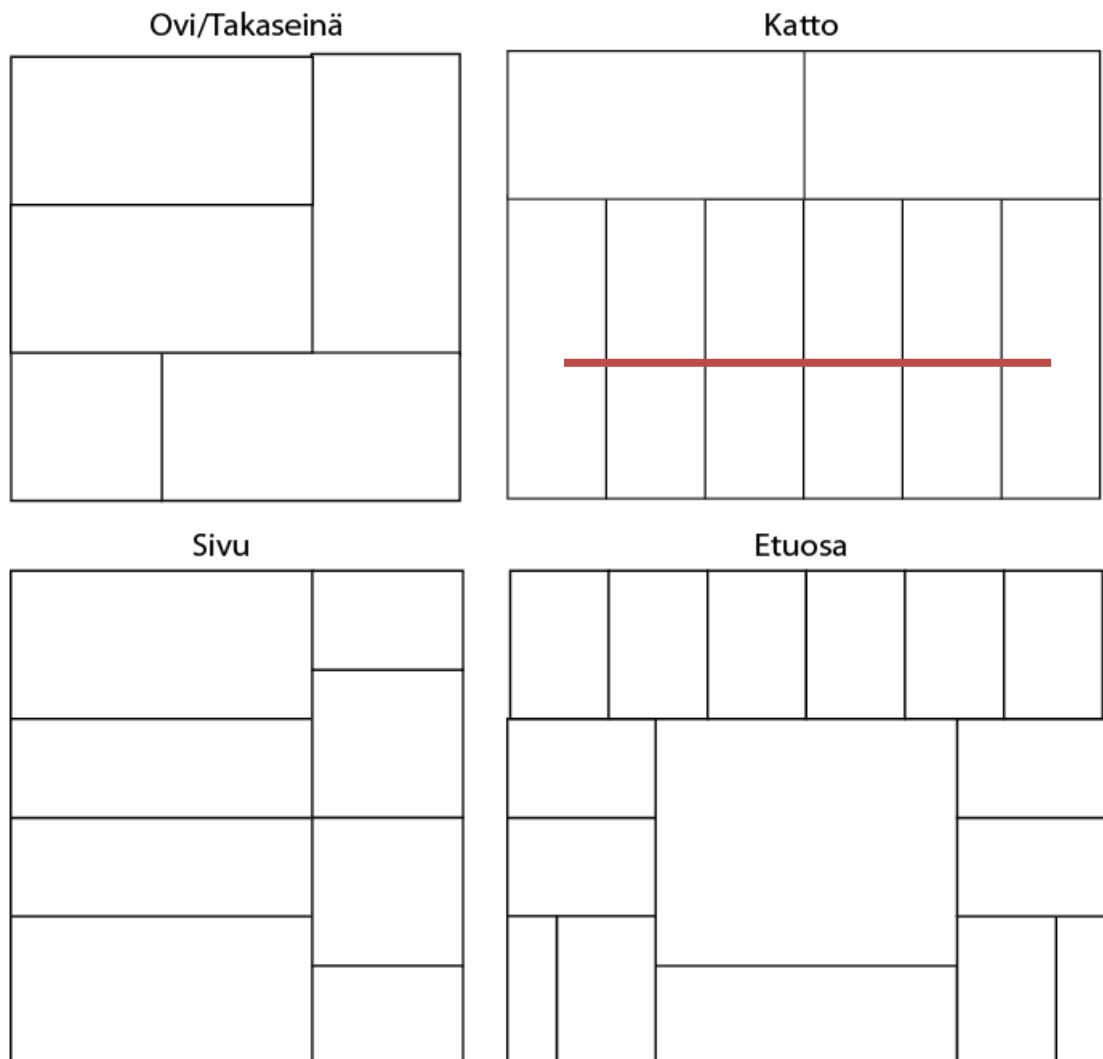
tarvittaessa myös lisäeristää villakerroksella, jos pelkkien tiilien läpi johtuva lämpö tekisi uunin ulkokerroksesta vaarallisen kuuman.

Uunin sisämitat ratkaistaisiin siis tiilien asettelulla. Asettelussa pyrittiin välttämään tiilien paloittelua. Vaikka pehmeät tulitiilet olisivatkin suhteellisen helppoja sahata pienemmiksi palikoiksi, olisi sahaaminen silti ylimääräinen ja aikaa vievä työvaihe, joka korottaisi valmistuskustannuksia tulevaisuuden mahdollisessa suuremman mittakaavan tuotannossa. Pehmeää tulitiiltä valmistetaan useissa kokoluokissa (Morgan Thermal Ceramics 2016), mutta ainoastaan kokoja 229x114,5x62,5 mm ja 229x114,5x75 mm on tällä hetkellä saatavilla Suomessa (Varnia 2016). Näistä kahdesta tiilikoosta jälkimmäinen valittiin uunin sisäkammion rakennuspalikaksi. Syy tähän on sen suurempi paksuus, mikä tarkoittaa parempaa lämmöneristyskykyä. Tiilien mittoja mallinnettiin ensin kaksikulotteisesti Adobe Illustrator-ohjelmalla, jolla erilaisten tiiliasetelmien testaus oli kaikkein helpointa ja nopeinta. Muutamien kokeilujen jälkeen löydettiin sopiva yhdistelmä, jolla saavutettiin haluttu uunielementin pituus 343 mm. Tähän pituuteen sopivan tiiliasetelman sisäkammion korkeudeksi saatiin 187mm ja leveydeksi 229 mm. Nämä mitat riittäisivät varsin hyvin useammallekin samaan aikaan lämpökäsiteltävälle työkalulle sekä hieman isommillekin kappaleille, kuten vaikkapa kirveenterille.

Tiilien sahaamiselta ei tässä järjestelyssä vältytä kokonaan. Tiilien asetteluratkaisulla aikaansaadun kammion koko oli kuitenkin optimaalisin mahdollinen. Asettelulla pitkät vastukset saataisiin varmasti mahdutettua kammion seinille. Tämän vuoksi pieni tiilien paloittelun aiheuttama ylimääräinen työ päätettiin sallia. Erilaisia asetelmia mallintaessa tuli myös selväksi, että käytännöllistä ratkaisua, jossa tiilien paloittelua ei olisi yhtään, ei löytynyt tiilien standardimitoilla. Koska pehmeiden tulitiilien materiaalia on helppo työstää, ei uunin mahdollisessa massatuotannossa tule suurta lisähintaa tästä ylimääräisestä työvaiheesta. Positiivista oli, että kaikki paloittelaviksi joutuvat tiilet ovat puolikkaita. Näin ollen niiden toisia puolia voi käyttää uunin jatkomoduuleihin, eli yhdellä sahauksella saa käytännössä tiilenpalan kahteen uunimoduuliin.

Tiilien asetelmassa kattopalan etuosan (kuva X yläoikea) keskimmäiset tiilet eivät ole rakenteellisesti tuettuna mistään, vaan ne ovat kiinni ympäröivissä tiilissä vain tulikitin ja kitkan voimalla. Pitkällä aikavälillä käytettynä on mahdollista, että tulikitti antaa periksi ja tämä kattotiili voi pudota alas uunin pohjalle. Jatkosuunnittelussa täytyy siis ottaa huomioon näiden tiilien mahdollinen lisätuenta. Tiiliä voidaan tukea esimerkiksi poraamalla niihin reiät ja asettelemalla reikiin terästappi (havainnollistettu kuvassa X punaisella viivalla) tukemaan putoamisvaarassa olevia tiiliä.

Kun tiilien järjestys oli päätetty, mallinnettiin yhden moduulin uunikammio kokonaisuudessaan Autodesk Inventorilla. Näin uunin peruselementin tiilirakenne saatiin vihdoon kolmiulotteiseksi ja havainnollistavaksi kuvaksi, jonka ympärille pystyttiin suunnittelemaan muita rakenteita ja järjestelmiä.



KUVA 4. Uunin tiilien asettelumalli.

Kuvan 4 mukaisella järjestyksellä uunin yksittäisen moduulin ja ovien tiilimenekki kirjattiin taulukkoon 2.

TAULUKKO 2. Tulitiilien menekki yhteen toimivaan uunimoduuliin

Uunin rungon osa	Tulitiiliä (kpl)
Katto	9
Seinät (2 kpl)	10
Lattia	3
Ovi (2 kpl)	9
Yhteensä	31

Mallin K-23 tulitiilien kappalehinta on 5,11 euroa (Varnia 2016), niinpä runkorakenteen materiaalikulut ovat $5,11 \cdot 31 = 158,41\text{€}$.

7.2 Lämmitystehon tarve

Sähkövastuksilla toimivan uunin tarvitseman lämmitystehon selvittäminen aloitettiin tutkimalla olemassa olevia lämpökäsittelyuunimalleja. Yritykseksi, jonka uuneista tehoarvoja tutkittiin, valikoitui Yhdysvalloissa toimiva Evenheat Kiln Inc. Se valmistaa vastuksilla toimivia lämpökäsittelyuuneja monissa eri mitoissa (Evenheat Kiln Inc 2017). Valikoimalla näistä uuneista sekä perusmoduulin mittaa lähellä oleva sekä lähellä metrin pituutta oleva malli, löydettiin tehoarvot, jotka varmasti riittävät kyseisen kokoluokan uunin lämmitykseen.

Evenheatin uuneista mallit KF 13.5 ja KF 40.5 Extreme length (Kuvat 5 ja 6, otettu valmistajan sivuilta) valittiin vertailu-uuneiksi. Niistä lyhyemmän pituus 13.5 tuumaa eli n. 343 mm vastaa hyvin perusmoduulia ja sen tehontarvetta. Pidempi uuni vastaa hieman yli 40 tuuman eli 1000mm pituudellaan modulaarista uunia, jossa on kolme elementtiä kiinni. Uunien käyttöohjeista löytyivät tehot molemmille malleille. Lyhyt uuni toimii 3120W teholla ja pitkässä mallissa tämä arvo on 7200W. Molemmat on tehty 240 Voltin jännitteelle. (Heat treat oven operating manual 2015, 5.) Tämän perusteella yhdelle uunimoduulille riittäisi saatavilla oleva 230V jännite 16A sulakkeella.



KUVA 5. Evenheat KF 13.5-lämpökäsittelyuuni. (Kuva: Evenheat Kiln Inc 2019)



KUVA 6. Evenheat KF 40.5 Extreme length-lämpökäsittelyuuni. (Kuva: Evenheat Kiln Inc 2017)

Kun olemassa olevista malleista saatiin verrokkiarvot, voitiin alkaa laskemaan modulaarisenuunin perusmoduulin mittojen ja eristemateriaalin määrittämää tehontarvetta. Jos tiedetään mitat kaikille niille kappaleille, joihin lämpöenergiaa siirretään, pystytään laskemaan tämä energiamäärä kaavan 1 mukaisesti.

$$Q_{kok} = Q_k + Q_i + Q_e \quad (1)$$

Kaavassa Q_k tarkoittaa lämmitettävään kappaleeseen siirrettävää energiamäärää, Q_i Uunin sisäkammion ilman lämmitämiseen kuluva energia ja Q_e uunin seiniin sitoutuvaa lämpöä. Kaavasta ratkaistaan ensin Q_k kaavan 2 mukaisesti. Tässä kaavassa m_k on lämpöenergiaa vastaanottavan kappaleen massa, c_k on kappaleen materiaalin ominaislämpökapasiteetti ja ΔT tarkoittaa lämpötilan muutosta. Oletetaan ensimmäisessä laskussa, että uunin perusmoduulilla lämmitetään suurehko kirveenterä ($m=1\text{kg}$) huoneenlämmöstä 15°C hiiliteräksen karkaisulämpötilaan 830°C . Raudan ominaislämpökapasiteetti on $0,47\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ (Inkinen & Tuohi 1999: 382).

$$Q_k = m_k c_k \Delta T \quad (2)$$

$$Q_k = 1\text{kg} \cdot 470 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (830 - 15)^\circ\text{C}$$

$$Q_k = 383050 \text{ J} = 383 \text{ kJ}$$

Uunin sisäkammion ilmaa lämmitettäessä lasketaan massa tilavuuden V ja tiheyden avulla, kuten kaava 3 osoittaa. Ilman tiheys on $1,293 \text{ kg}/\text{m}^3$ (Inkinen & Tuohi 1999, 309). Perusmoduulin kammion sisämitoilla $V_i = h \cdot w \cdot d$, missä h on korkeus, w on leveys ja d on kammion syvyys. Ilman ominaislämpökapasiteetti vakio-tilavuudessa on $0,714 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ (Engineering Toolbox 2017).

$$Q_i = V_i \rho c_i \Delta T \quad (3)$$

$$Q_i = 0,232\text{m} \cdot 0,1875\text{m} \cdot 0,343\text{m} \cdot 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 714 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (830 - 15)^\circ\text{C}$$

$$Q_i = 11226,3278 \text{ J} = 11 \text{ kJ}$$

Kun uuni lämpenee, sen eristemateriaali pyrkii pysäyttämään lämmön siirtymistä ulkopuolelle. Lämpö pyrkii johtumaan sisäseinästä eristeen läpi ulkoseinälle ja siitä ympäröivään ilmaan. Vaikka eriste on tehty materiaalista, joka pyrkii sitomaan ja kuljettamaan lämpöä mahdollisimman vähän, sitoo se sitä silti määrän, joka täytyy

huomioida laskuissa. Oletetaan, että jos uunin sisäseinä on halutussa karkaisulämpötilassa 830°C ja ulkoseinä pysyisi alle 100 Celsiusasteessa, saadaan keskimääräiseksi seinän lämpötilaksi 465°C . Seiniin sitoutuvaa lämpöenergiaa täytyy korvata lisäenergialla. Tämä korvaamiseen vaadittu lämpöenergia pystytään laskemaan kaavalla 4. Kyseisessä kaavassa V_e on eristemateriaalin tilavuus, eli jokaisen seinän sekä etu- ja takaoven tilavuus yhteen laskettuna.

Eristemateriaalin, eli tässä tapauksessa tulitiilien, lämmönjohtavuus- tai tässä tapauksessa eristävyyskyky muuttuu lämpötilan noustessa. K-23 tulitiilen ominaislämpökapasiteetti saatiin selville sen tiheyden $473\text{-}569 \text{ kg/m}^3$ avulla (Thermal Ceramics 2016, 2.) Tiheyden avulla saatiin ominaislämpökapasiteetille taulukkoarvo $c_e = \sim 504 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K}$ (Applied Research Services 2009).

$$Q_e = V_e c_e \Delta T \quad (4)$$

$$Q_e = (2 \cdot V_{ovi} + 2 \cdot V_{seinä} + V_{lattia} + V_{katto}) c_e \Delta T$$

$$Q_e = (2 \cdot (0,18\text{m} \cdot 0,23\text{m} \cdot 0,075\text{m}) + 2 \cdot (0,187\text{m} \cdot 0,34\text{m} \cdot 0,113\text{m}) + (0,229\text{m} \cdot 0,34\text{m} \cdot 0,075\text{m}) + (0,229\text{m} \cdot 0,34\text{m} \cdot 0,113\text{m})) \cdot 504000 \frac{\text{J}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}} \cdot (465 - 15)^{\circ}\text{C}$$

$$Q_e = 0,03521676 \text{ m}^3 \cdot 504000 \frac{\text{J}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}} \cdot 450^{\circ}\text{C}$$

$$Q_e = 7987161,168 \text{ J} \approx 8 \text{ MJ}$$

Seuraavaksi voidaan laskea koko energiantarve kaavalla 1.

$$Q_{kok} = Q_k + Q_i + Q_e$$

$$Q_{kok} = 383050 \text{ J} + 11226,33 \text{ J} + 7987161,168 \text{ J}$$

$$Q_{kok} = 8381437,498 \approx 8,4 \text{ MJ}$$

Tästä huomataan, että uunin seiniin sitoutuva lämpö on selkeästi suurin energiaa syövä tekijä. Nyt kun lämmitykseen kuluva energia tiedetään, voidaan laskea, kuinka kauan uunilla kestää kuumentua karkaisulämpötilaan käytettävissä olevalla teoreettisella sähköteholla kaavan 5 mukaan.

$$P = \frac{Q_{kok}}{t} \quad (5)$$

$$t = \frac{Q_{kok}}{P}$$

$$t = \frac{8381437,498J}{3680 W}$$

$$t = 2277,56 s = 37,959 min$$

Näillä puhtaasti teoreettisilla laskelmilla näyttää siltä, että uunin perusmoduuli on siis mahdollista saada lämpenemään hieman yli puolessa tunnissa. Kuitenkin täytyy muistaa, että täyttä tehoa tuskin saadaan pelkkiin vastuselementteihin, vaan osa lämpötehosta johtuu lämmityksen aikana uunin ulkopuolelle ja osa puolestaan kuluu uunin kontrollijärjestelmiin. Niinpä uunin vastuksille päätettiin mitoittaa realistisemmaksi tehoksi pienempi 3kW, jolloin yllä olevalla kaavalla laskemalla saadaan lämmitysajaksi 47 minuuttia.

Jos perusmoduulia lämmitetään martensiittisten ruostumattomien terästen karkaisulämpötiloihin, eli n. 1100°C tietämille, olisi uunin lämmitysaika 3kW teholla teoriassa tasan tunnin luokkaa. Lämmön siirtymisiä on kuitenkin vaikea mallintaa matemaattisesti, ja tarkat lämmitykseen kuluvat ajat nähdään vasta uunin ollessa toiminnassa.

Tehon tarvetta tarkasteltiin vielä tehotiheyden (power density) vertailuna. Tämä tarkoitti wattimäärää, mikä kohdistuu kuutiosenttimetriin uunin sisällä (Kaava 6). Kaupallisissa uunimalleissa, kuten verrokkeina käytetyissä Evenheatin malleissa tehotiheydet ovat seuraavia:

Evenheat model 13,5:

Kammion tilavuus: $25,4 \cdot 16,5 \cdot 34,3 \text{ cm} = 14375,13 \text{ cm}^3$, Teho 3120W (13A)

$$P_d = \frac{P}{V} \tag{6}$$

$$P_d = \frac{3120W}{(25,4cm \cdot 16,5cm \cdot 34,3cm)}$$

$$P_d = \frac{3120W}{14375,13cm^3}$$

$$P_d = 0,217 \frac{W}{cm^3}$$

Evenheat model 40,5 Extreme length:

Kammion tilavuus: $25,4 \times 16,5 \times 102,7 \text{ cm} = 43041,57 \text{ cm}^3$, Teho 7200W (30A)

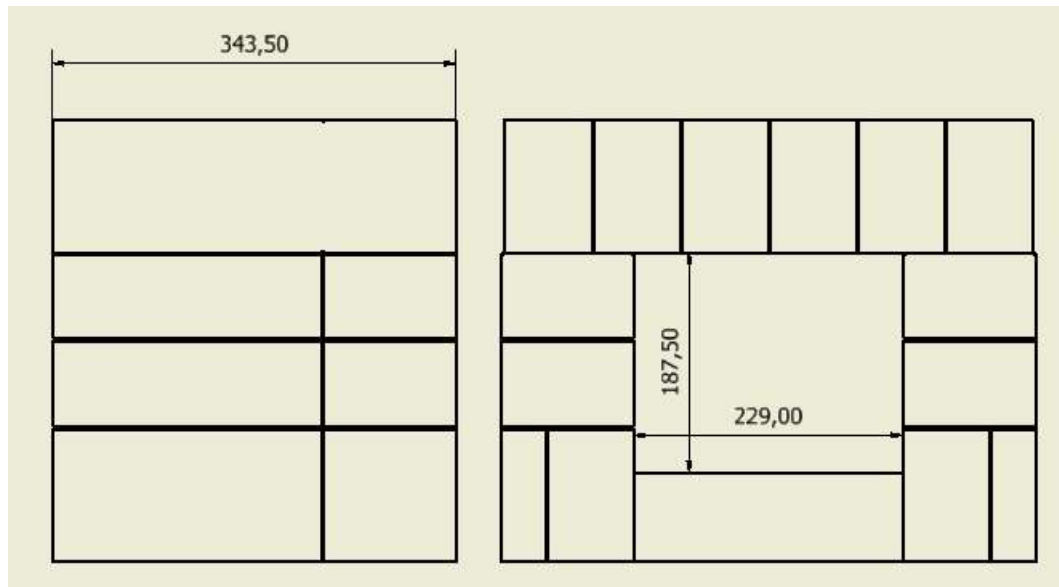
$$P_d = \frac{P}{V}$$

$$P_d = \frac{7200W}{(25,4cm \cdot 16,5cm \cdot 102,7cm)}$$

$$P_d = \frac{7200W}{43041,57cm^3}$$

$$P_d = 0,1672 \frac{W}{cm^3}$$

Verrokkimalleista huomataan, että pitkällä uunilla tehotiheys on pienempi, eli sen lämpeneminen esimerkiksi 800°C lämpötilaan vie enemmän aikaa kuin lyhyemmällä versiolla. Verrokkimallien tehotiheyslaskuihin sovellettiin suunnitteilla olevaa läpökäsittelyuunia. Uunin yksittäisen moduulin sisäkammion mitat otettiin Autodesk Inventorilla piirretystä kuvasta 7.



KUVA 7. Uunin yksittäismoduulin sisäkammion mitat

Kun sisäkammion tilavuus ja teoreettinen 3kW lämmitysteho tiedettiin, voitiin laskea uunin perusmoduulin tehotiheys.

$$P_d = \frac{P}{V}$$

$$P_d = \frac{3000W}{(18,75cm \cdot 22,9cm \cdot 34,35cm)}$$

$$P_d = \frac{3000W}{14749,03cm^3}$$

$$P_d = 0,2034 \frac{W}{cm^3}$$

Tästä laskusta huomataan, että suunnitellun uunin yksittäinen moduuli on tehotiheydeltään suhteellisen samalla tasolla kuin samankokoinen kaupallinen malli. Näin ollen voidaan olettaa, että uunin lämpenemisnopeus on kestäväällä ja turvallisella tasolla.

Koska uunimoduulit suunnitellaan identtisiksi, sekä teho että tilavuus kaksinkertaistuvat kahta moduulia käytettäessä. Kolmella moduulilla teho ja tilavuus kolminkertaistuvat. Molempien kasvaessa samassa suhteessa pysyy tehotiheys samana, kun uuniin lisätään pituutta moduuleilla. Näin ollen pidempi versio uunista on tehokkaampi, kuin Evenheatin pitkä 40,5 tuuman verrokkimalli. Suurempi tehokkuus tarkoittaa tässä tapauksessa kilpailuetua uunin jatkoelementtien markkinointia ajatellen.

7.3 Vastus

Vastuselementin mitoitus osoittautui todella monimutkaiseksi suunnitteluvaiheeksi, sillä lämpötilan nousu perustuu energian säteilemiseen lämpönä vastuslangasta tietyllä pituudella, mikä taas riippuu langan resistanssista, ja resistanssi puolestaan vaihtelee langan materiaalin ja halkaisijan mukaan. Lisäksi langan pituuden tulisi olla sellainen, että se saadaan mahtumaan uunin sisälle. Vastusta suunniteltaessa jouduttiinkin uunin tiilirungon rakennetta muokkaamaan langan pituudelle sopivaksi.

7.3.1 Vastusmateriaali

Uunin sisäosia lämmittävän vastuselementin tulisi kestää korkeita lämpötiloja ja samalla johtaa sähkövirtaa. Erilaisista alkuaineista ja materiaaleista erityisesti metallisten alkuaineiden ulkokehällä on vapaita elektroneita, jotka voivat helposti liikkua viereisten atomien vajaalukuisille ulkokehille. Tämä liike kuljettaa sähkövarauksia, mikä antaa metalleille hyvän sähköjohtavuuden. (Lepola & Makkonen 2000, 59.) Metalleista teräs sopii vastusmateriaaliksi hyvin, koska sen sulamispiste on korkea. Niukkahiiliset (alle 0,5% hiiltä) teräkset sulavat yli 1400 °C lämpötilassa (Lepola & Makkonen 2000, 59). Korkeaa lämpötilaa kestäviä teräseoksia on myös helposti saatavilla vastuselementeiksi sopivissa lankamuodoissa (Sandvik Materials Technology 2012, 4). Terästä on myös helppo työstää ja muotoilla (Lepola & Makkonen 2000, 79) ja se on yleisesti ottaen halpa raaka-aine (Teknologiateollisuus 2015, 3). Vaihtoehtoinen saatavilla oleva vastusmateriaali on paremmin korroosiota ja vaativampia olosuhteita kestävä nikkeli-kromiseos, mutta sen suurin lämmönkesto on vain 1200 °C, mikä yhdistettynä nikkelin kalliiseen hintaan tekee siitä huonomman vaihtoehdon teräksen lämpökäsittelyuuniin (Sandvik Materials Technology 2012, 4).

Teräksisistä vastusmateriaalivalmistajista esiin selvimmin nousi Sandvik AB:n omistuksessa oleva Kanthal, jonka vastusmateriaaleja valmistetaan useissa lanka ja nauhamuodoissa. Kanthalin eri tuotteista päädyttiin kuvassa 8 näkyvään vastusmateriaaliin A-1, suurimpana syynä olivat sen korkein ominaisvastus 1,45 Ω mm²/m sekä hyvin pieni, vain 4 prosentin, resistanssin muutos langan kuumetessa (Sandvik Materials Technology 2012, 17). Langan paksuus, eli poikkileikkauksen pinta-

ala siis vaikuttaa langan materiaalin ja pituuden kanssa siihen, miten suuren vastuksen lanka antaa. Korkea ohmimäärä metriä kohti tarkoittaa, että lankaa tarvitaan vähemmän halutun vastusarvon saavuttamiseksi, mikä taas tarkoittaa säästöä materiaalikuluissa. Pieni muutos resistanssissa helpottaa langan mitoittamiseen liittyvää laskemista, sillä resistanssin muutoksen vaikutukset ovat hyvin vähäiset. Muita tärkeitä huomioitava asioita vastuksessa ovat langan paksuus ja suurin sallittu läpi kulkeva sähköteho langan pinta-alaa kohden.



KUVA 8. Kanthal A1-vastuslankaa (Kuva: Joonas Peltoniemi 2019)

7.3.2 Resistanssi ja kytkentä

Lankamateriaalin valinnan jälkeen täytyi selvittää, paljonko resistanssia vastuselementtiin tarvittaisiin. Tämä osoittautui melko monisyiseksi suunnitteluvaiheeksi, sillä lämpötilan nousu perustuu energian säteilemiseen lämpönä vastuslangasta tietyllä pituudella, mikä taas riippuu langan resistanssista, ja resistanssi puolestaan vaihtelee langan materiaalin ja halkaisijan mukaan.

Käytettävissä oleva jännite tiedettiin ja tarvittava teho sopivaan lämmitysnopeuteen oli laskettu aikaisemmin. Näiden tietojen ja kaavan 7 avulla voitiin mitoittaa vastuselementille resistanssi.

$$R = \frac{U^2}{P} \quad (7)$$

$$R = \frac{230V \cdot 230V}{3000W}$$

$$R = 17,63333 \dots \Omega$$

Vastuksen läpi kulkevan virran määrä riippuu vastuksen resistanssista. Seuraavaksi voitiin siis Ohmin lain avulla (Kaava 8) selvittää, paljonko virtaa vastuslangan läpi kulkisi.

$$I = \frac{U}{R} \quad (8)$$

$$I = \frac{230V}{17,633\Omega}$$

$$I = 13,04A$$

Virta on selkeästi alle 16 ampeerisena sopiva työtiloissa oleville sulakkeille. Korkeahko sähkövirta kuitenkin kuluttaa vastuslankaa nopeammin, joten on oleellista löytää keino virran pienentämiseksi vastuselementtiä kohden.

Kokeena laskettiin tarvittava pituus Kanthal A-1 vastuslangalle, jonka paksuus on 2mm. Taulukkoarvo 2mm paksun langan resistanssille on 0,462 Ω/m (Sandvik Materials Technology 2012, 17). Langan tarve voitiin nyt laskea kaavan 9 avulla.

$$l = \frac{R}{r_{lanka}} \quad (9)$$

$$l = \frac{17,6333\Omega}{0,462 \frac{\Omega}{m}}$$

$$l = 38,16738 m$$

Kaksi millimetriä paksua lankaa tarvittaisiin siis melkoisesti, noin 38 metriä, vastusosaan. Yksi pitkä elementti ei ole kuitenkaan suunnittelun kannalta järkevää toteuttaa. Se olisi mahdotonta asetella uunin sisälle siten, että se säteilisi lämpöä tasaisesti molemmille puolille, eikä kulkisi katon kautta. Modulaarisuudesta johtuen uunin ovielementit ovat irrotettavia, mikä tarkoittaa ettei niihin ole käytännöllistä

sisällyttää vastuksia. Painovoima vetäisi katossa roikkuvaa kuumana hehkuvaa vastuslankaa alaspäin, ja aiheuttaisi vääntymiä sekä venymiä, mitkä puolestaan saattaisivat aiheuttaa oikosulun vastuslangan eri kohtien koskettaessa toisiaan tai ohentuessa. Kuten aiemmin mainittiin, myös suurehko sähkövirta yhden elementin läpi kulkevana kuluttaisi elementtiä suuresti. Kaikilla vastuslangoilla on vaativista käyttöolosuhteista johtuen tietty elinikä, ja niitä joutuu jossain vaiheessa vääjäämättä uusimaan. Käyttöikä voi kuitenkin pidentää suunnittelemalla uuni siten, että langan kuormitus on mahdollisimman pieni. Tähän sopivin keino on käyttää useampaa elementtiä, jolloin niitä on helpompaa ja halvempaa vaihtaa tarvittaessa. Jos elementit kytketään rinnan, jakaantuu sähkövirta molempiin tasaisesti Kirchoffin lain mukaisesti (Inkinen jne 2002, 94). Pienempi virta tarkoittaa pidempää langan käyttöikä. Niinpä vastukset on järkevä sovitella uunin molemmille seinille rinnakkainkytkentään, jolloin niiden kokonaisresistanssi olisi pieni kaavan X mukaisesti virran samalla puolittuessa. Lankaa tällaiseen järjestelyyn tarvittaisiin runsaasti enemmän, mutta pienemmän virran ansiosta voidaan elementteihin käyttää ohuempaa lankaa, joka on myös hinnaltaan halvempaa (Varnia 2016).

Jotta kaksi rinnan kytkettyä elementtiä saavuttaisi yhteensä $17,6333\Omega$ vastuksen, täytyi yksittäisen elementin resistanssi selvittää kaavan 10 avulla.

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{kok}} &= \frac{1}{R_e} + \frac{1}{R_e} & (10) \\ \frac{1}{17,6333\Omega} &= \frac{1}{R_e} + \frac{1}{R_e} \\ 0,0568 \cdot R_e &= 1 + 1 \\ R_e &= \frac{2}{0,05671} \\ R_e &= 35,26714\Omega \end{aligned}$$

Kanthalin A-1 langoista paksuus 1,0 mm, jonka vastusarvolla $1,85\Omega/m$ saadaan yhden vastuselementin langan pituudeksi 19,06m. Huomioon otettiin myös langan resistanssin 4% suureneminen korkeilla lämpötiloilla. Korkeissa lämpötiloissa langan vastus on $1,85 \cdot 1,04 = 1,924\Omega/m$. Tämä tarkoittaa, että keskimääräinen vastus lämmityksen aikana on $1,89\Omega/m$ tienoilla, jolloin langan tarve olisi 18,65 metriä.

7.3.3 Langan kuormitus

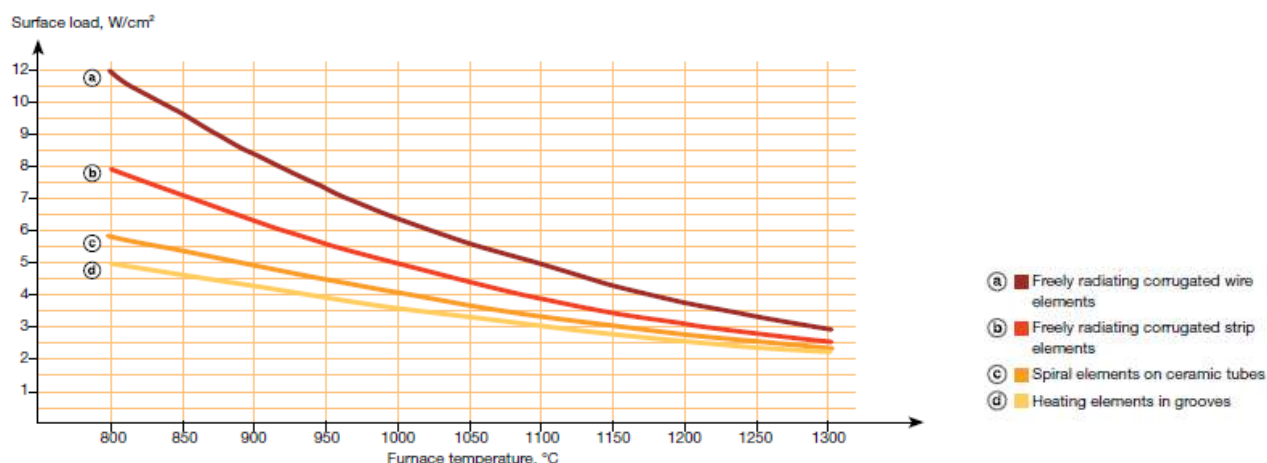
Jos langan läpi johdetaan liian suuri teho, voi se vaurioitua. Langan mitoituksen tärkein suure on Surface load eli pintakuormitus, mikä lasketaan jakamalla langassa kulkeva teho langan ulkopinta-alalla kaavan X mukaisesti. Suuri pintakuormitus kertoo, että lankaa kuormitetaan paljon, jolloin sen elinikä pienenee. Suositeltu pintakuormitusarvo eri materiaaleista valmistetuille ja eri paksuisille langoille löytyy valmistajan taulukosta. Sopivaa lankaa jouduttiin hakemaan kauan kokeilemalla erilaisia langan paksuuksien ja lenkkien halkaisijan yhdistelmiä, kunnes sopiva paksuus ja vastusarvo löytyivät siten, että pintakuormitus on mahdollisimman pieni tai maksimissaan yhtä paljon kuin valmistajan suositeltu arvo. (Sandvik Materials Technology 2012, 12.)

Kun langan pituus ja paksuus tiedettiin, voitiin kyseiselle langalle laskea pintakuormitus kaavan 11 mukaisesti. Huomattava on, että koska rinnan kytkentä puolittaa elementille kulkevan sähkövirran, myös yksittäisen elementin teho puolittuu. Kokonaisteho kahta elementtiä käytettäessä pysyy kuitenkin kolmessa kilowatissa.

$$\begin{aligned}
 S_L &= \frac{P}{A} & (11) \\
 S_L &= \frac{1500W}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot l} \\
 S_L &= \frac{1500W}{\pi \cdot D \cdot l} \\
 S_L &= \frac{1500 W}{3,14159 \cdot 0,1cm \cdot 1865cm} \\
 S_L &= \frac{1500 W}{585,906 cm^2} \\
 S_L &= 2,560 \frac{W}{cm^2}
 \end{aligned}$$

Vertaamalla saatua tulosta kuvion 1 arvoihin huomataan, että uunin lämpötilan ylittäessä 1200°C surface load-arvo uriin tuetuilla vastuksilla (d) ei saisi olla yli 2,5 W/cm². Martensiittiset ruostumattomat teräkset karkaistetaan yleensä alueella 1050-1100°C, ja vain todella erikoisten seosten, kuten martensiittisten ruostumattomien terästen tapauksessa, 1150°C tietämillä (Päiväniemi 2000). Tällaisissa lämpötiloissa, joihin uunin perusmoduuli joutuu vain harvoin, on maksimi surface load 3 W/cm². Niinpä uunin langan mitoituksessa on 0,5 W/cm² verran varmuusvaraa.

Maximum recommended surface loads for Kanthal A-1, Kanthal AF and Kanthal APM alloys in industrial furnaces



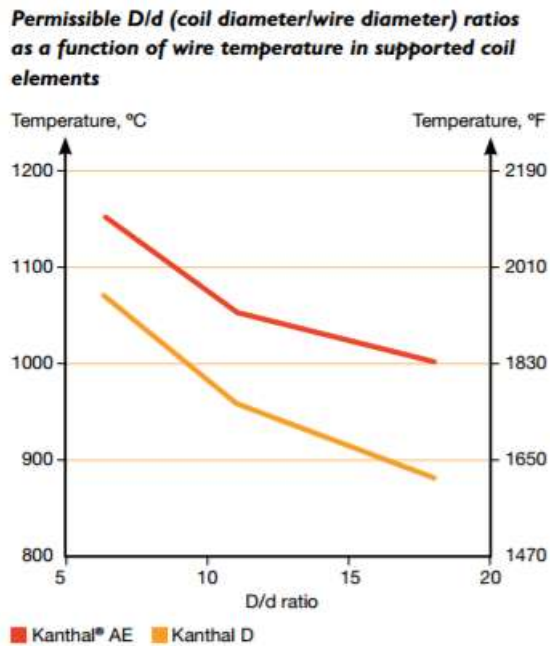
KUVIO 1. Suositellut Surface load-arvot. (Sandvik materials technology 2012, 17).

7.3.4 Langan asettelu uuniin

Noin 19 metriä vastuslankaa ei mahdu mitenkään suorana uunin sisälle. Niinpä se täytyy kiertää pyörötangon ympäri hieman kierrejousta muistuttavaan muotoon. Sandvikin Kanthal-oppaasta (2012, 17) löytyy suositukset sekä jousen sisähalkaisijalle että lenkkien välille. Erityisen tärkeää on, että lenkit eivät kosketa toisiaan. Kosketus tai liian pieni etäisyys tarkoittaa mahdollisuutta lenkkien välille muodostuviin oikosulkuihin, jotka häiritsevät lämmitystä ja saattavat aiheuttaa vastuslangan ennenaikaisen kulumisen ja sen seurauksena katkeamisen.

Kierrettyä tai suoraa vastuslankaa täytyy aina tukea, ettei se kuumana ollessaan muuta painovoiman johdosta muotoaan, venymä saattaa aiheuttaa ohuemman kohdan, josta lanka palaa tai kuluu ensimmäisenä poikki. Tapoja vastuselementtien tukemiseen on monia, mutta käytetyin tukimenetelmä lämpökäsittelyuuneissa on vastuslankarullien asetteleminen tulitiiliin jrsittyihin uriin (esimerkkeinä Evenheat ja Paragon). Muut menetelmät pitävät sisällään esimerkiksi langan sisälle tulevia keraamisia tankoja. Saatavilla olevat tangot ovat kuitenkin lyhyitä, joten niitä pitäisi hankkia todella monta tällaiseen uuniin, mikä taas on ylimääräinen materiaalikuluerä. Tankoja käyttämällä tulee myös enemmän asennustyötä uunin kokoamisvaiheeseen.

Uraan asetellulla vastuslangalla on jousimuotoon kieputtamista varten suositusarvot lenkkien mitoille ja välille. Vastuslangan kierrepituutta laskettiin siten, että yhden vastuselementin 1865 cm lankaa kierrettäisiin halkaisijaltaan 7 mm pyörötangon ympärille. Tangon halkaisija valittiin valmistajan suositteleman kuviossa 2 näkyvän D/d-arvon pohjalta. Korkeilla käyttölämpötiloilla lenkit eivät saa olla liian suuria, ettei niissä tapahdu liikaa muodonmuutoksia. (Sandvik materials technology 2012, 17.)



KUVIO 2. Sallitut suhteet vastuslangan paksuuden ja lenkkien halkaisijan välillä eri käyttölämpötiloissa (Sandvik materials technology 2012, 17).

Kiertämällä lankaa 7mm tangon ympäri yhteen lenkkiin kuluu lankaa kaavan 12 mukaisesti.

$$L_1 = 2\pi r \quad (12)$$

$$L_1 = 2\pi \cdot 4,5\text{mm}$$

$$L_1 = 28,27431\text{mm}$$

Näin ollen 1865cm lankaa muodostaa lenkkejä kaavalla 13 lasketun lukumäärän.

$$n = \frac{L_{kok}}{L_1} \quad (13)$$

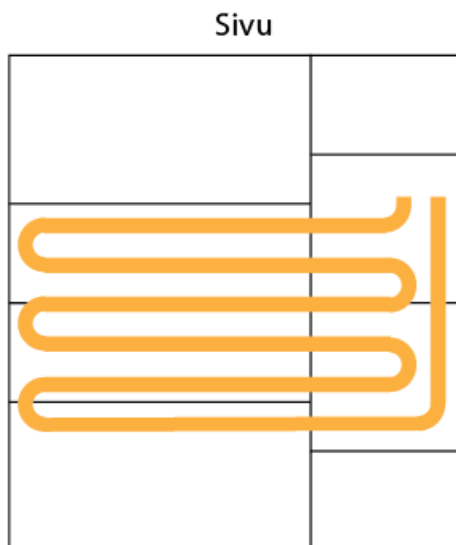
$$n = \frac{1865\text{cm}}{2,827431\text{cm}}$$

$$n = 660 \text{ kpl}$$

Yhden lenkin tuoma pituus vastukseen on langan paksuus 1,0mm, joten vastuselementin pituus saadaan Kaavalla 14.

$$\begin{aligned} L_{vastus} &= d_{lenkki} \cdot n \\ L_{vastus} &= 1,0\text{mm} \cdot 660 \\ L_{vastus} &= 660\text{mm} \end{aligned} \quad (14)$$

Lasketussa mitassa langat kuitenkin koskettavat toisiaan, mikä tarkoittaa että virta kulkee suorinta tietä vastuksen läpi eikä jokaista lenkkiä kiertämällä. Niinpä langasta kieputettua ”jousta” joudutaankin venyttämään siten, että lenkkien väliin jää langan valmistajan suosittelema $2 \cdot d$, eli 2mm. Tämä tarkoittaa n. $660 \cdot 2\text{mm}$ lisäystä pituuteen, eli 1320mm, tehden elementin koko pituudeksi n. 1980 millimetriä. Elementti on siis todella pitkä, ja sen mahduttaminen uuniin edellytti tehokasta sijoittelua. Tämä lämmityselementti saatiin kuitenkin mahtumaan uuniin kuvan 9 mukaisella tavalla aseteltuna. Sivuseinään jyrksitään 10mm leveät urat langalle, jolloin elementti asettuu hyvin paikoilleen.



Kuva 9. Lämmityselementin (keltainen) asettelumalli uunin sivuseinään.

7.3.5 Langan hinta

Hinnaltaan 2x19m 1mm paksua kanthal A-1 lankaa maksaa 52,06 euroa. Ensimmäisessä mitoitusyrityksessä käytetty 38m pitkä pätkä 2mm paksua lanka taas maksaisi n. 100 euroa. Ohuempi lanka kahtena helposti vaihdettavana elementtinä on siis huomattavasti halvempi ratkaisu, vaikka ohuemman langan käyttöikä onkin hieman pienempi. (Varnia 2017).

7.4 Runkorakenne

Hauraita tulitiiliä ei ole järkevää jättää uunin ulkoseinäksi. Työtiloissa voi sattua vahinkoja, kuten rautakappaleet voivat osua uunin seinään ja lohkoa tiilistä paloja, mikä huonontaa lämmön eristystä. Niinpä uunin rungon tiilirakenne ovineen on parasta sijoittaa kolhuja ja elementtejä kestävään laatikkoon. Ideaalinen materiaali laatikolle on halpaa ja helppoa työstää, kolhuja ja lämpöä kestävä. Myös materiaalin hyvä sähköneristyskyky on suositeltava ominaisuus turvallisuuden kannalta, sillä silloin ei ole vaaraa, että esimerkiksi vahingossa vaurioitunut uunin sähköjohto voisi jännitteellistää uunin runkorakenteen.

Uunin runkorakenteeseen piti laatikon lisäksi suunnitella jalat, uunin moduulien sekä ovien kiinnitysjärjestelmä ja kiinnikkeet ohjausjärjestelmälle sekä reitit ohjausjärjestelmältä elementeille meneville sähköjohtoille.

7.4.1 Rungon materiaali

Mahdollisia rakennevaihtoehtoja ovat puinen, metallinen, kivinen ja muovinen materiaali. Puurungon voi sulkea pois laskuista heti, sillä vaikka uunin ulkoseinät pysyvät huomattavasti kylmempinä kuin sisäpuoli, on niillä silti teroreettinen mahdollisuus lämmitä liikaa, jolloin puurakenne voi syttyä tuleen.

Kivimateriaali, kuten vaikkapa tiilet, olisi jatkumoa uunin tulitiiliseinille. Sen hyviä puolia ovat erinomainen kuumuudenkesto ja eristyskyky sekä myös sähköneristys. Kiviseinät kuitenkin toisivat uunille runsaasti lisäpainoa ja kokoa, jolloin lopputulos

vaatisi paljon tilaa sekä olisi hankala kuljettaa tai toimittaa asiakkaille. Myös modulaarisuuden kätevyys kärsisi kun jatkoelementtien nostelu ja liikuttelu uunin vierelle kävisi lihaskuntoharjoittelusta.

Muoviset materiaalit puolestaan olisivat helppoja työstää, halpoja hankkia, sekä erinomaisesti sähköä vastustavia. Ne voivat kuitenkin sulaa helposti, jos lämpötila nousee liikaa uunin ulkoseinille. Muovilaatujen kestävyys on myös heikohkoa, käytännössä se tarkoittaisi että muovirakenteeseen olisi vaikea kiinnittää ovien saranoita ynnä muita lisäosia.

Metallisista runkomateriaaleista puhuttaessa suurin ero löytyy hinnasta. Yleisimmistä metalleista ja niiden seoksista kuparipohjaisetseokset ovat kalliita ja niiden lämmön- sekä sähkönjohtokyvyt ovat todella suuria. Alumiiniseokset ovat teoriassa sopivia uuniin. Alumiinin sulamispiste on metalliksi alhainen, vain n. 660 Celsiusastetta seostuksesta riippuen, mutta kuitenkin niin korkea ettei uunin tiiliseinien ulkopuolen lämpötila tule saavuttamaan sellaista tasoa (Inkinen&Tuohi 1999, 386). Metallina alumiini johtaa luonnollisesti sähköä, mutta huonommin kuin kupariseokset (Inkinen & Tuohi 2002, 86). Alumiinin suurin etu on sen keveys, siksi alumiini sopisikin uuniin hyvin, sillä siitä tehtyjä rakenneosia on kaikkein helpointa liikutella. Näitä runko-osia on myös todella helppo valmistaa massatuotantona valamalla, jolloin materiaalikustannukset suurille tuotantomäärille olisivat melko pienet. Tämän työn prototyypiuuniin valamisen suuret muottikustannukset eivät kuitenkaan sovellu. Alumiinin hyvät puolet pidetään kuitenkin mielessä tulevaisuudessa.

Rautapohjaisista metalliseoksista rakenteeseen sopisivat tavalliset rakenneteräkset, ruostumattomat teräkset ja valurauta. Näille seoksille yhteistä on pienin sähkönjohtavuus aiemmin mainittuihin metalleihin verrattuna (Inkinen&Tuohi 2002, 86). Ne ovat suhteellisen painavia materiaaleja, mutta suuren lujuutensa vuoksi niistä tehtyjen osien ei tarvi olla kovinkaan massiivisia. Valurauta on näistä kolmesta heikoin kandidaatti uunin runkoon, sillä valettu rakenne on ohuimmillaankin paksu ja raudan painavuudesta johtuen uunista tulisi liian raskas liikutella. Rakenneteräkset ovat halpoja, helposti työstettäviä ja iskuja kestäviä. Kaupallisia lämpökäsittelyuunimalleja on olemassa myös ruostumattomasta teräksestä valmistetuilla runko-osilla. Tämä materiaali on kuitenkin paljon kalliimpaa kuin rakenneteräs, eikä ruostumattomuus ole merkittävä tekijä uunin rungon ominaisuutena. Sähköllä toimivaa uunia ei varmasti tulla

käyttämään kosteissa ympäristöissä turvallisuustekijöiden vuoksi, eikä sen takia ole suurta vaaraa, että runko ruostuisi puhki sisätiloissa. Rakenneteräksen voi aina maalata lämpöä kestäväällä maalilla, jolloin ruosteesta ei tule välitöntä ongelmaa. Rakenneteräsrunkoja on myös suhteellisen helppo valmistaa standardimittaisista profiileista sekä ohuista levyistä leikatuista paloista. Myös saranoihin, kulmiin ja jalkoihin sopivia osia löytyy huokeina heti hitsaamalla kiinnityskelpoisina komponentteina.

7.4.2 Jalat

Uunin teräsrunkoon pitää sisällyttää jalat, että uunin alaosan ja pöydän väliin jää hieman ilmarakoa. Ilma estää uunia kuumentamasta tasoa, jolle se on asetettu. Jalat päätettiin valmistaa yksinkertaisesti hitsaamalla rungon pohjaan neliöputkesta sahatut lyhyet pätkät. Jalkojen päihin asennetaan kumiset tai muoviset tassut estämään mahdollista sähköä jännittämästä useimmiten metallista työpöytää, jolla uunia voidaan kuvitella yleisimmin pidettävän.

Mahdollista olisi ollut myös valmistaa jaloista säädettävät. Tämä idea kuitenkin hylättiin, sillä moduulien lisäyksestä uuniin olisi tullut enemmän aikaa vievä operaatio, jos perusmoduulin korkeutta olisi säädetty. Koska uuni sijoitettaisiin pöytätasolle, ei sen optimaalinen käyttökorkeus olisi jalkojen pituudesta vaan pöydän korkeudesta kiinni.

7.4.3 Ovet ja niiden kiinnitysjärjestelmä

Uunin perusmoduulista haluttiin mahdollisimman samanlainen kuin jatkettavistakin moduuleista. Siksi sen tulisi olla molemmista päistään avoin. Käytännössä tämä tarkoittaa, että runkoon tulee molempiin päihin lisätä saranasysteemi salpalaitteinen, jolloin uunin ovet saa avattua ja suljettua. Oviin tulee saada mahdollisimman tiivis rakenne, jolloin ne eivät vuoda lämpöä pois uunin sisältä. Kaupallisissa lämpökäsittelyuuneissa näkee paljon ovia, jotka aukeavat ylöspäin uunista. Hyvä puoli tällaisessa on pienempi tilan tarve. Tällaisten ovien suunnittelu vaatii kuitenkin hieman enemmän suunnittelua kuin sivulle aukeavien. Koska lämpökäsittelyuuni kuumenee käytössä, suositellaan ettei sen lähelle sijoiteta muita esineitä (Evenheat 2015, 3).

Tämän vuoksi ahtaus ei ole ongelma uunin ovien toiminnan kannalta, vaan niistä voidaan suunnitella yksinkertaiset ja sivuille aukeavat.

Saranointi tarkoittaa osia, jotka liittävät yhteen oven ja muun rakenteen siten, että ovi pystyy liikkumaan alueella, jonka saranat mahdollistavat. Koska uuni suunnitellaan modulaariseksi, tulisi saranoiden olla sellaiset, että ovi on mahdollisimman helppo asettaa ja poistaa paikaltaan. Niinpä rungossa olevan saranarakenteen tulee olla yksinkertainen yläpäästään vapaa tappi. Yksi sarana ei kuitenkaan riitä pitämään ovea tukevasti paikoillaan. Niinpä näitä saranatappeja tulee lisätä kaksi kappaletta ovea kohden. Vastaavasti uunin oviin kiinnitetään putkimaiset vastakappaleet. Saranat asennetaan oviin yksinkertaisesti laskemalla ovielementin putkiosat tappeihin.

Oven tärkein rakenteellinen vaatimus on pitää lämpö uunin sisällä. Suurin syy lämmön karkaamiselle sijaitsee oven ja uunielementin väliin jäävässä raossa, josta lämpö pääsee helposti virtaamaan ulos. Tämän raon tukkiminen tai tiivistäminen tavallisin materiaalein on melko hankalaa, sillä tällaiset tiivistämateriaalit ovat yleensä muovisia ja siksi sulavat uunin käyttölämpötiloissa. Parempi vaihtoehto tiivistämiseen on käyttää ohutta palaa kivivillaa uunin ja rungon välissä. Tila tälle palalle jyrskittää oven tiiliin siten, että ovea suljettaessa villa painuu hieman kasaan tukkien pienet ilmaraot oven ja uunin välistä.

Salpalaitteen tulee villaeristeen johdosta aiheuttaa hieman jousivoimaa, joka pitää ovea tiukasti kiinni rungossa. Tähän sopivan ratkaisun tarjoaa mm. peräkärriksen kuomujen kiinnittämiseen käytetty lavalukkomalli. Sen toiminta perustuu kahvaan kiinnitettyyn lenkkiin, joka kahvaa ääriasentoon avattaessa saadaan ulottumaan hyvin pitkälle. Kun kahva suljetaan, lenkki siirtyy hitusen sisäänpäin ja vetää mukanaan koukkumaisia vastakappaleita. Sulkuasennossa kahva ja lenkki ovat 180° kulmassa toisiinsa nähden, joten lukko ei avaudu muuten kuin yhdensuuntaisella liikkeellä.

Oven salvassa olevan kahvan käytön tulee olla mahdollisimman vaivatonta. Niinpä kahvasta tehtiin pitkä, jolloin se antaa mahdollisimman paljon vipuvoimaa avaus- ja sulkuoperaatioon. Ovien kahvan pää päätettiin valmistaa muovista, jolloin se pysyy varmasti jännitteettömänä.

7.4.4 Moduulien kiinnitykset

Moduulien kiinnityksen tulee olla vaivatonta ja nopeaa, mutta samalla moduulien liitoksen pitää olla tiivis, ettei uunin hitaassa kuumennusvaiheessa hukata lämpöenergiaa moduulien välisistä mahdollisista raoista. Kiinnittyminen tarvii siis vetoa moduulien välille puristamaan nämä yksittäiset uunit toisiinsa tiiviiksi kokonaisuudeksi. Pelkät tiilipinnat jättävät väkisinkin väleihin rakoja, joista lämpö pääsee säteilemään ulos. Tämän moduulien välisen lämpöhukan voi kuitenkin eliminoida lisäeristyksellä, jossa moduulien väliin asetetaan vielä tiilien mukaisesti leikattu pala tulivillaa, joka moduuleja toisiinsa asennettaessa puristuu entistä tiiviimmäksi väliaikaiseksi välisosaksi.

Käytännössä moduulien kiinnityksen voi saavuttaa yksinkertaisimmillaan pulttiliitoksella. Tässä vaihtoehdossa vedon tarjoaa yksittäinen pultti ja periaate on samantyylinen kuin esimerkiksi vanhoissa vesiputkien liitoksissa. Käytännössä tällainen ratkaisu kaikessa pitävyydessään ja lujuudessaan ei silti ole kaikkein käytännöllisin. Modulaarisen uunin kokoaminen tällä tapaa olisi melko hidasta vaikka pultteja tarvittaisiinkin vain pari kappaletta uunin sivua kohden. Lisäksi puristusvoima olisi tällaisessa ratkaisussa jo hieman liiankin ylimitoitettu, ainakin sillä oletuksella että liitoksessa käytettäisiin näppärimmän kokoisia, eli M6 tai M8 pultteja.

Käytännössä pienempikin kuin kahdeksan paksuhkon ruuvin tarjoama veto riittää pitämään moduulit kiinni toisissaan tarpeeksi tiiviisti. Niinpä ainakin protouuniin ideoitiin moduulien kiinnitysjärjestelmän toteuttaminen vetosalpamaisella ratkaisulla. Kuvassa 10 esiintyvä vetosalpatyyppi on tuttu mm. auton perävaunujen sulkumekanismeista. Ne tarjoavat nopean käytettävyyden ja teräksisinä osina ne tuovat silti lujan pidon ja ne on helppo kiinnittää uunin seinämiin joko pulteilla tai hitsaamalla. Vetosalpoja on myös saatavana heti käytettävänä standardiosina, joten niiden toimivuutta testatakseen ei tarvitse tehdä ylenpalttisia suunnitelmia kiinnitysmekanismeista.



KUVA 10. Vetosalpamalli (Kuva: Isojoen konehallin verkkokauppa 2019)

7.5 Ohjausjärjestelmä

Erittäin tärkeä osa toimivaa uunia on systeemi, millä sen lämpötiloja kontrolloidaan. Uunin sisällä tulee olla lämpömittari, joka lähettää tietoa sisätilojen lämpötilasta uunin ulkopuolelle. Ulkopuolella täytyy olla vastaanotin, joka prosessoi ja näyttää tiedon uunin käyttäjälle. Järjestelmän täytyy toki myös osata ottaa vastaan dataa käyttäjältä siitä, kuinka kuumaksi hän uunin haluaa lämmittää. Näppäriä ohjausyksiköitä on saatavilla vaikkapa keramiikkauunien myyjien verkkokaupoista (Varnia 2017). Kuvan 11 mukainen yksikkö sisältää lämpötilan asteittaisen nostomahdollisuuden ja yleisimmät kontrollit uunin kumentamiseen.



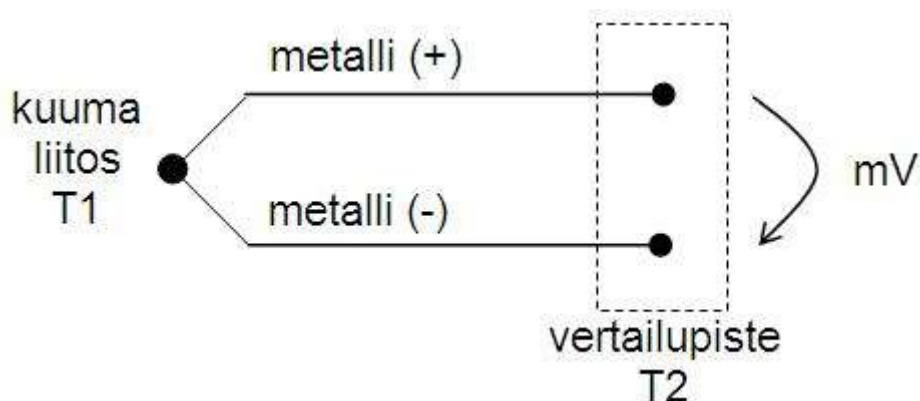
KUVA 11. Ohjausyksikkö (Kuva: Joonas Peltoniemi 2019)

7.5.1 Lämpötilan tarkkailu ja hallinta

Korkeiden lämpötilojen tarkkailuun on olemassa useita menetelmiä. Lämpökäsittelyuunin toimintaperiaate kuitenkin rajaa niitä tehokkaasti. Koska uuni on suljettuna sen lämmitessä, täytyy tiedon senhetkisestä lämpötilasta kulkea uunin sisältä sen ohjausjärjestelmälle. Koska kappaleet ovat usein eri muotoisia ja pituisia, ei ole järkevää sijoittaa uuniin laitetta, joka lukisi lämpötilat kappaletta koskettaen. Kontaktia varten tämän laitteen sensoria pitäisi aina siirrellä eri kappaleiden välillä, ja ongelmia tulisi, jos uunissa olisi useampi kappale samaan aikaan.

Monet modernit lämpömittarit perustuvat lämpösäteilyn mittaamiseen. Kuten luvussa 3 mainittiin, lämpö on energiaa, jota kappale emittoi lämpösäteilynä. Vaikka tällä menetelmällä päästäänkin korkeisiin lämpötiloihin, on se altis häiriöille muista lämpöä säteilevistä kappaleista (Virta 2013, 5). Lämpökäsittelyuunin tapauksessa näitä häiriöitä aiheuttavat vastuselementit, jotka uunin lämmitessä ovat huomattavasti kuumempia kuin itse uunin hitaammin lämpenevä sisätila. Tämän johdosta lämpötila täytyykin mitata uunin sisäilmasta.

Sisäilman korkean lämpötilan mittaamiseen soveltuu erinomaisesti termopari. Sen toimintaperiaate perustuu potentiaalieroon, joka syntyy kahden eri materiaalin välille niiden liitoksien ollessa eri lämpötiloissa. Eri materiaaleilla jännite vaihtelee hieman samoin kuin mitattavaksi suositeltu lämpötila-aluekin. (Virta 2013, 7-8). Termoparin toimintaperiaate löytyy kuvasta 12.



KUVA 12. Termoparin toiminta yksinkertaistettuna.

Termopareja on saatavilla eri tyyppisinä elementteinä. Keramiikka- ja sähköuuneissa niiden metallipäät on suojattu keraamisella massalla (Varnia 2017). Kuvassa 13 on esiteltynä S-tyyppin termoelementti, jossa puikkomainen pää toimii lämpöanturina.



KUVA 13. S-tyyppin Nikkeli-Kromi-pohjainen termoelementti. (Kuva: Joonas Peltoniemi 2019)

Termoparin ja ohjausyksikön väliin tarvitaan välikomponentti, joka kontrolloi ohjausyksiköltä tulevat käskyt (ON/OFF) termoparille. Se toimii yksinkertaisella relelogiikalla, eli verraten termoparilta saatua lukemaa käyttäjän asettamaan tavoitelämpötilaan. Kun lämpötila on vähemmän kuin tavoite, vastukset pidetään päällä uunia lämmittämässä. Kun tavoitelämpötila saavutetaan, kontrolleri katkaisee vastuksilta virran. Lämpötilan kääntyessä laskuun kontrolleri laittaisi vastukset taas päälle siksi aikaa, että tavoitelämpötila saavutetaan. Tällaiseen käyttöön sopii hyvin teollinen moduulikontaktori. Kuvassa 14 näkyvä kontaktorityyppi IEC 1095 lienee sopiva modulaariseen lämpökäsittelyuuniin. Se ottaa vastaan matalajännitteisiä signaaleja uunin ohjausyksiköltä ja niiden perusteella kytkee uunin vastuksissa kulkevaa korkeajännitteistä vaihtovirtaa päälle ja pois päältä lämpötilan mukaan.



KUVA 14. Moduulikontaktori (Kuva: Joon Peltoniemi 2019)

Modulaarisuuden johdosta uunin jokainen lisäosa tulee varustaa termoparilla. Jokaisen termoparin lukema täytyy saada helposti luettavaksi uunin käyttöjärjestelmästä, jolloin voidaan olla varmoja, että sisälämpötila on tasainen.

7.6 Sähkötekniset osat ja komponentit

Kuten luvun 7 alussa sanottiin, tämän osuuden tarkempi komponenttivertailu, valinta ja asennus jätetään suosiolla sähkötekniikan ammattilaiselle suunniteltavaksi ja sen toteutus alihankintana sähkötyöluvut omistavan henkilön tehtäväksi.

7.7 Käyttöjärjestelmä

Uunin tulee ilmoittaa mahdollisimman selkeästi, mikä lämpötila termoparin mukaan vallitsee uunin sisäosissa. Tavoitelämpötilan tulee olla mahdollisimman helposti asetettava, eli uunin ohjausjärjestelmässä pitää olla näppäimiä tai kosketusnäytöllinen käyttöjärjestelmä. Käyttöjärjestelmän ohjelmointi itse rajattiin pois tästä opinnäytetyöstä sen monimutkaisuuden ja konetekniikkaan kaukaa liittyvän luonteensa vuoksi. Niinpä tämäkin osuus ja siihen liittyvät asiat on järkevämpi hankkia alan ammattilaiselta tilauksena sähköuunin valmistusvaiheessa.

7.8 Turvallisuus

Sähkövastuksilla lämpeävä uuni ja sen kautta kulkevat yli 800-asteiset teräsesineet ja niiden käsittely tuottaa lukuisia käyttöriskejä. Ilmeisimpiä näistä ovat tietenkin palovammat. Niiden estäminen on toki myös helpointa kuumien kappaleiden huolellisella ja vakaalla käsittelyllä sekä asianmukaisten suojarusteiden, kuten tulenkestävien vaatteiden ja paksujen hitsaushanskojen käytöllä. Yli kymmenen vuoden kokemuksella kuumen raudan käsittelystä voidaan myös sanoa että takomotyössä joskus syntyvät palovammat ovat poikkeuksetta pieniä. Ihmiskeholla on tapana refleksinomaisesti vetäistä raaja pois kun se osuu kuumaan kappaleeseen, estäen vakavampien palovammojen synty, ja tämä mekanismi on osoittautunut riittävän toimivaksi suojaksi. Suurempi riski vastustoimisessa uunissa on sähköiskun vaara. Uunin sisäosien vastukset ovat jännitteellisiä osia, joihin kosketus teräksisellä työkalulla teräspihkien kautta voi aiheuttaa hengenvaaran. Pienessäkin uunissa riski on olemassa, mutta pitkien kappaleiden tapauksessa se moninkertaistuu kun pienikin liike käsiteltävän kappaleen tyvessä voi heilauttaa kärkeä laajassa kaaressa. Niinpä tämä ongelma on syytä ottaa esille ja ratkaista uunin sähköjärjestelmien suunnittelun toimeksiannon yhteydessä. Luonnollisin ratkaisu asialle on oveen sijoitettava relepohjainen logiikkasysteemi, joka katkaisee päävirran vastuksilta automaattisesti aina kun uunin ovi avataan. Modulaarista järjestelmä aiheuttaa tässäkin uniikkeja suunnitteluhaasteita. Esimerkiksi kolmen uunin ollessa jonossa tulee jokaiseen suunnitella sarjakytkenät niin, että etumoduulin ovi kontrolloi koko kolmikon vastusten virtapiirejä. Lisäksi koko muu sähköjärjestelmä kytkentöineen tulee toteuttaa erityisen hyvillä kuumankestävillä eristemateriaaleilla ja liitännöillä, ettei käytön aiheuttama kuluminen aiheuttaisi esimerkiksi uunin rungon jännitteellistymistä tai muita isoja riskitilanteita. Tämän osa-alueen perusteellisempi tarkastelu kuitenkin menee työn raja-alueiden ulkopuolelle, joten se jätetään uunin toteuttamistapauksessa sähkösuunnittelijan päänvaivaksi.

7.8.1 Direktiivit, standardit ja CE-merkintä

Koneille ja laitteille, mihin kategoriaan tämäkin uuni menee, on Euroopan Unionissa laadittu myös tarkkoja turvallisuusstandardeja ja ohjeistuksia. Vuonna 2006 voimaan tullut konedirektiivi edellyttää, että valmistajan, myyjän tai vastaavan markkinoille saattajan on suoritettava täysi turvallisuussuunnittelu eli riskikartoitus, joka sisältää terveys- ja turvallisuusriskit ja odotettavissa olevan väärinkäytön mahdollisuus kaikissa koneen tai laitteen elinkaaren vaiheissa. Näiden ohjeiden minimivaatimusten lisäksi on olemassa vielä tarkempia turvallisuusstandardeja. Näiden standardien sisältö on kuitenkin maksullista, eikä niitä sen vuoksi käsitellä tässä kuin pintapuolisesti. (SFS 2015, 3.)

Direktiivit ovat siis minimivaatimuksia, mitä markkinoille tulevilta koneilta odotetaan käyttöturvallisuuden suhteen. Standardit puolestaan tarjoavat tarkempia teknisiä ratkaisuja riskien pienentämiseen. Kun suunniteltu kone täyttää sitä koskevan direktiivin vaatimukset, EU:ssa toimiva valmistaja voi ilmaista tämän turvallisuusvakuuden CE-merkinnällä. Tämä merkintä ei kuitenkaan ole vapaaehtoinen tai edes laatumerkintä, vaan tarkat direktiivit määrittävät käytännössä minimiturvallisuusvaatimukset useimmille koneille ja laitteille, ja merkintä ilmaisee että nämä vaatimukset täyttyvät. CE-merkintää voi hakea muutamillakin tavoilla, joissain tapauksissa valmistajan vakuutus riittää, toisissa täytyy tuote testauttaa kolmannen osapuolen toimesta ennen kuin merkintä voidaan myöntää. Esimerkiksi sähkötoimisen lämpökäsittelyuunin tapauksessa riittää, että valmistaja huolehtii direktiivien vaatimusten täyttymisestä. Merkinnän tarkoitus on ilmoittaa helposti tuotteen ostajalle että se täyttää tietyntasoiset turvallisuusvaatimukset, jotka ovat samat koko Euroopan talousalueella. Lisäksi kun merkintä on saatu niin yritys voi myydä tuotetta tällä alueella ilman erillisiä rajoituksia. (SFS 2013.)

7.9 Patentointimahdollisuus

Patentilla tarkoitetaan viranomaisen myöntämää yksinoikeutta keksinnöstä hyötymiseen. Tällä menettelyllä keksijä suojaa patentoidun keksintönsä, sillä patentti antaa oikeuden kieltää muilta kyseisen keksinnön kopiointi ja siitä hyötyminen. Tämän oikeuden piiriin luetaan mm. patentoidun keksinnön valmistus, myynti tai käyttö sillä maantieteellisellä alueella, minne patenttioikeutta haetaan. (Patentti- ja rekisterihallitus 2015.)

7.9.1 Vaatimukset patentoitavalle keksinnölle

Patentin saamiseksi haetun keksinnön tulee olla uusi, keksinnöllinen ja teollisesti käyttökelpoinen. Näistä ominaisuuksista uusi tarkoittaa, että keksintöä ei ole julkistettu ennen patentin hakemista. Keksinnöllisyys puolestaan edellyttää, että keksintö eroaa olennaisesti vastaavista tunnetuista sovelluksista. Teollisesti käyttökelpoinen taas tarkoittaa, että keksintö on luonteeltaan tekninen ja se ratkaisee jonkin aihealueensa ongelman. Näin ollen pelkkä teoria tai idea ei siis kelpaa keksinnöksi. (Patenttikäsikirja 2017, 73.)

Tämän työn tapaisia modulaarisia terästen lämpökäsittelyuuneja ei löydy kattavalla internethaulla. Lähellä tätä käyttötarkoitusta olevia järjestelmiä löytyy toki muutamia. Yksi niistä on alhaisessa maksimilämpötilassa (175°C) toimiva ei-metallinen uuni, jota käytetään erilaisten sensorien testauksessa. Siihen saa asetettua jatko-elementeillä lisäpituutta eri työkalujen testausta varten. (APS Technology 2016). Toisena esimerkkinä on modulaarinen tyhjiöuuni, joka saavuttaa korkeita 1400°C lämpötiloja. Tässä mallissa modulaarisuus kuitenkin tarkoittaa sitä, että se koostuu kokonaan erilaisista moduuleista, joista yhteen asetetaan lämpökäsiteltävät kappaleet, toinen moduuli kuumentaa ne ja kolmas jäädyttää. Tässä uunimalli on siis valmistettu sellaisten kappaleiden lämpökäsittelyyn, jotka eivät saa hehkuvan kuumina joutua kosketuksiin esimerkiksi ilman kanssa. (Gasbarre Furnace Group 2014). Näin ollen voidaan sanoa, että ensimmäinen patentoinnin edellytys, eli uutuus, täyttyy modulaarisen terästen lämpökäsittelyuunin tapauksessa.

Tämän opinnäytetyön uuni eroaa markkinoilla olevista vastaavista sovelluksista sillä, että sen avulla voidaan helposti lämpökäsitellä sekä lyhyitä että pitkiä kappaleita. Vastaavat sovellukset ovat sopivia joko vain pitkille tai lyhyille kappaleille. Pitkällä uunilla toki pystyy lämpökäsittämään lyhyenkin kappaleen, mutta tällainen käyttö kuluttaa tarpeettoman paljon sähköenergiaa. Patenttikäsikirjassa löytyi hyvä määritelmä modulaarisen uunin tapaisille yhdistelmäkeksinnöille: ”Keksintö koostuu useista eri elementeistä, jotka yksinään ovat tunnettuja. Jotta yhdistelmä olisi keksinnöllinen, näiden eri elementtien yhdistämisellä saadaan kuitenkin aikaan yhteisvaikutus, joka poikkeaa yksittäisten elementtien teknisestä vaikutuksesta, tai yhdistämisellä aikaansaadaan yllättävä vaikutus. Yhdistelmän elementtien välillä tulee kuitenkin olla toiminnallinen suhde: elementtien tulee toimia yhdessä ja vaikuttaa toisiinsa. Vaatimuksessa kuvattu keksintö ei saa olla pelkästään elementtien luettelo. Jos yhdistelmällä aikaansaadaan tunnettua parempi lopputulos tai se sisältää uuden teknisen tai yllättävän vaikutuksen, tämä puoltaisi yhdistelmän keksinnöllisyyttä. Myös tulee kiinnittää huomiota siihen, kuinka ilmeistä ammattimiehelle olisi yhdistää tietyt elementit keskenään ja olisiko yksittäisten elementtien yhteisvaikutus ollut ammattimiehen ennakoitavissa.” (Patenttikäsikirja 2017, 87.)

Useiden uunimoduulien yhteisvaikutus ei poikkea yksittäisen uunimoduulin vaikutuksesta, molemmat käyttötavat kuumentavat uunia samalla tavalla. Niinpä uunin pituuden jatkamisen lisämoduuleilla tulisi saavuttaa yllättävä vaikutus. Se, että uunissa voidaan jatkomoduulien kanssa kuumentaa pidempi kappale, ei ole kovinkaan yllättävää. Yhdistelemällä uunimoduuleja lämpökäsiteltävän kappaleen pituuden mukaan saadaan kuitenkin aikaan uusi tekninen vaikutus ja tunnettua parempi lopputulos säästetyssä lämmitysenergian määrässä. Näiden seikkojen johdosta uunin keksinnöllisyys ei ole yksiselitteisen selkeää. Jos patenttia haetaan, tämä osa-alue riippuisi luultavasti keksinnöllisyystarkastelua tekevän tutkijainsinöörin arviosta siihen, päätyisikö alan keskitasoinen ammattimies samanlaiseen ratkaisuun. Patenttihakemuksessa voidaan kuitenkin puoltaa uunin keksinnöllisyyttä painottamalla sen tuomaa energiasäästöä ja sitä kautta saatavaa vaikutusta ympäristön suojeluun (Patenttikäsikirja 2017, 88.)

Modulaarinen terästen lämpökäsittelyuuni on tekninen laite, joka ratkaisee eripituisten kappaleiden energiatehokkaan lämpökäsittelyn ongelman. Uunin valmistus laitteena on toistettavissa, eli se pystytään valmistamaan alan ammattilaisen toimesta vain piirustusten pohjalta. Koska uunista valmistetaan toimiva ja sille on selkeä käyttötarkoitus, täyttyy kolmaskin patentoitavuuden vaatimus. (Patenttikäsikirja 2017, 73.)

7.9.2 Patentoinnin hinta

Patentti on voimassa 20 vuotta, jos sen vuosittaiset maksut suoritetaan. Patentointi ei ole halpa prosessi, sähköinen hakemus patentille Suomessa maksaa 350€, ja jos patentti hyväksytään, sen julkaisu kustantaa vielä 450 euroa. Keksintöä, jolle patentti haetaan tutkitaan patentoitavuuden selvittämiseksi. Tämä prosessi tuo vielä kasan muita kustannuksia riippuen keksinnön luonteesta. Jos keksintö on patentoitavissa ja maksut suoritetaan myönnetään sille patentti. Tämän jälkeen patentti on käytössä seuraavat kolme vuotta yhdellä 200 euron maksulla. Kyseisen ajan kuluessa keksinnöllä on patenttisuojaa Suomessa. Neljännestä vuodesta eteenpäin maksuja joutuu tekemään vuosittain. Maksut alkavat 155 eurosta ja nousevat seuraavien 16 vuoden aikana 900 euroon. Jos patenttia haetaan suuremmalle maantieteelliselle alueelle, nousevat siihen liittyvät kustannukset tuhansiin euroihin. Myönnetystä patentista voi kuitenkin hyötyä taloudellisesti useilla tavoin, kuten esimerkiksi myymällä sen tai myöntämällä sen käyttöoikeudet lisenssillä muille tahoille. (Patentti- ja rekisterihallitus 2015). Tämä ratkaisu voi olla kannattavaa, jos omat resurssit eivät riitä esimerkiksi keksinnön tuotekehitykseen, tuotteistamiseen, tuotantoon tai markkinointiin.

Korkeiden maksujen vuoksi patentointi onkin järkevää vain tapauksissa, joissa keksinnön yksinoikeudellisesta käytöstä saatava taloudellinen hyöty on selkeästi suurempi kuin patentointimaksut. Jos keksinnön mahdollinen kopiointi ei ole suuri riski, eli sen taloudellisessa hyödyntämisessä ei ole kyse suurista rahoista, voidaan osia siitä suojata muilla keinoin kuten hyödyllisyysmallilla. Hyödyllisyysmalli eli ”pikkupatentti” on kevyempi, halvempi ja nopeammin saatavissa oleva versio varsinaisesta patenttioikeudesta. Edellytykset hyödyllisyysmallisuojan saamiseksi ovat kuitenkin lähes samat kuin varsinaisella patentilla. Suurimpana erona näiden kahden välillä on, että keksinnöllisyyden tason ei tarvi olla yhtä korkea kuin patentilla. Sen pitää silti olla selvä ero tunnettuihin keksintöihin. Käytännössä tämä tarkoittaa ettei hakemuksessa

esitetty keksintö tai ratkaisu ole aivan ilmeinen keskitason ammattilaiselle. Myös hyödyllisyysmallin voi myydä ja sen käyttöoikeuksia pystyy lisensoimaan. (Hyödyllisyysmalliopus 2012, 4-6.)

Modulaarisen lämpökäsittelyuunin markkinat ovat luultavasti pienet, sillä uunin monikäyttöisyydestä saa hyötyä vain, jos sen käyttäjä joutuu lämpökäsittämään usein sekä pitkiä että lyhyitä kappaleita. Yleisesti ottaen yritykset erikoistuvat tiettyihin esineryhmiin, jotka voivat olla vain tiettyä kokoluokkaa. Niinpä uunien valmistuksesta saatava taloudellinen hyöty voi jäädä pieneksi. Kun huomioidaan patentointiin liittyvät suuret kustannukset ja vertaillaan niitä opinnäytetyön modulaarisen lämpökäsittelyuunin keksinnöllisyyteen ja edellä mainittuun taloudelliseen kannattavuuteen, käy ilmeiseksi, että maksu pelkästään Suomen alueen patenttioikeuksien hakemisesta on kohtuullisen suuren riskin sijoitus. Niinpä hyödyllisyysmalli on parempi vaihtoehto tämän tuotteen suojaukseen.

7.10 Modulaarisen sähköuunin toteutettavuus

Luvussa 7 tehdyt laskelmat ja alustavat suunnitelmat osoittavat, että sähkövastuksilla kuumeneva modularisoitava lämpökäsittelyuuni on teknisesti mahdollista valmistaa. Käytännössä tämä vaatii kuitenkin odotettua suuremman määrän eri osa-alueiden suunnittelua ja kolminkertaisen (joka moduuli) valmistuksen sekä runsaasti sähköpuolen erityisosaamista vaativaa työtä. Jos uunia lähtee toteuttamaan itse sähkötyöt alihankintana tehden projektin kokonaishinta nousee arviolta 6000€ luokkaan ja n. 60 omaan työtuntiin. Tämä alustava karkea arvio materiaaleista, tarvikkeista, alihankintatyöstä ja omatoimityötunneista löytyy taulukoidusta liitteestä 1. Modulaarisen sähköuunin hyödyt jäänevät henkilökohtaisiksi omaan työhön liittyviksi, sillä lopputuote ei ole patentoitavissa ja koska tuotteen käyttäjäryhmä on pieni, ei näin kalliille lopputuotteelle ole odotettavissa suurta taloudellista menestystä. Tiivistettynä voidaan todeta, että uunin toteutuksessa alkuinvestoinnit niin rahallisesti kuin ajallisesti nousevat melko suuriksi hyötyihin nähden.

8 KAASUPOHJAINEN VAIHTOEHTO

8.1 Kaasuahjojono karkaisu-uunina

Sähköuunin toteutuksen korkeiden kustannusten ja suuren työmäärän vuoksi projektissa palattiin taaksepäin tarkastelemaan uudelleen muita lämmitysvaihtoehtoja. Lämmitysmuodoista kaasulla toimiva uuni oli saanut taulukon 1 vertailussa yhtä paljon pisteitä kuin sähköuuni, joten se päätettiin ottaa lähempään tarkasteluun.

Tässä vaihtoehdossa ideana on asettaa useampia pieniä kaasuahjoja jonoon, jolloin ne yhdessä muodostavat pitkän kuumen tilan. Kaasuahjojen suuremman lämmitystehon ansiosta kuumennusaika on huomattavasti sähköuunia nopeampi, eikä näiden ahjojen välejä tarvi tiivistää yhtä perusteellisesti kuin sähköuunissa. Huonoja puolia ovat, kuten aiemmin mainittu, epätasainen kuumennus ja vaikeampi lämpötilan hallinta.

8.2 Kaasuahjojen parannusehdotukset

Kuten luvussa 6.2 mainittiin, kuumimmat alueet kaasuahjossa osuvat polttimoiden kohdalle. Tätä epätasaista lämpötilaa voidaan kuitenkin tasata asettamalla ahjon sisälle ylimääräinen metalliputki, joka ottaa vastaan polttimon lämpösäteilyn ja johtaa sen koko putken alueelle. Suoraa kaasupolttimon alla oleva alue putkesta lämpenee toki tälläkin tapaa enemmän kuin kauempana liekistä sijaitsevat alueet, mutta kun koko putki kuumenee oranssinhehkuiseksi sen sisälle asetettu teräskappale lämpenee huomattavasti tasaisemmin putken sisällä tasaisesti säteilevän lämmön vaikutuksesta kuin suoraan polttimien alle sijoitettuna. Tällä toimenpiteellä voidaan parantaa kaasuahjon lämpötilan tasaisuuskriteeriä kahdesta pisteestä ainakin pistemäärään 2,5. Kuvasta 15 nähdään, miten kaasuahjon polton alkuvaiheessa kuumimmat alueet keskittyvät juurikin polttimoiden alle. Kun lämpö johtuu tältä alueelta koko putken mitalle saadaan putken sisälle riittävän tasainen lämpötila, joka säteilee karkaistavaan kappaleeseen.



KUVA 15. Lämpötilantasausputkella varustettu kaasuahjojono toiminnassa, lämmityksen alkuvaihe. Putkessa esikuumenemassa karkaistava kahden käden integraalipseax. (Kuva: Joonas Peltoniemi 2019)

Kaasuahjojono toinen miinus on lämpötilakontrolli. Kaasupolttimessa ei ole automaattisia säätöjärjestelmiä jotka kontrolloisivat polttimon tehoa, eikä ahjoissa ole lämpötila-antureita. Niinpä karkaisuhevkuksessa lämpötila tulee päätellä perinteiseen seppätapaan teräksen hehkuväristä. Tämä ei ole suurikaan ongelma, sillä yrityksessä on tehty karkaisulämpötilan arviointeja tällä tapaa koko sen olemassaoloaika ja useampi vuosi aiemminkin. Jos kaasuahjolla halutaan lämpökäsitellä martensiittisiä ruostumattomia teräksiä, joissa karkaisulämpötilat ovat yli 1000 Celsiusasteen luokkaa ja pitoaika tässä lämpötilassa 5-15 minuuttia tarvitaan kuitenkin ahjon kylkeen paremmat lämpötilan tarkkailujärjestelmät. Ratkaisun tähän tarjoaa vaikkapa huokea digitaalinen lämpömittari termoelementtiin yhdistettynä (Varnia 2019). Käyttöperiaate tässä ratkaisussa pitää sisällään pienen reiän poraamisen kaasuahjon kylkeen. Reiästä ahjon keskiosiin asetetaan termopari, jota luetaan digitaalisen mittarin kautta ahjon vierestä. Näin saadaan helposti tarkka lämpötiladata uunin sisältä. Helppo lämpötilan tarkkailu jättää enemmän aikaa säätää kaasupolttimia tarvittaessa pienemmälle tai suuremmalle. Digitaalisella lämpömittarilla voidaan myös tarkkailla uunin sisäosan lämpötilaa matalammilla alueilla, jolloin pitkien kappaleiden päästön suoritus helpottuu myös. Lopullista päästöä varten tarvitaan kaasuahjoihin perustuvassa ratkaisussa

kuitenkin n. 200-350 Celsiusasteen lämpötila-alueella toimiva erillinen uuni, jossa lämpötilaa pystytään pitämään tarvittaessa yllä useampi tunti ja jonne pitkä kappale mahtuu. Parannustoimenpiteistä huolimatta kaasuahjojen lämpötilakontrolli ei pysty edelleenkään kilpailemaan sähköuunin tarkkuuden kanssa. Niinpä se pysyy taulukon X vertailussa kahden pisteen arvoisena ominaisuutena.

8.3 Kaasupohjaisen karkaisu-uunin toteutettavuus

Kaasuahjojen valmistajia löytyy useita, eikä sellaisen valmistus omatoimisesti ole myöskään mahdottoman vaikeaa. Polttimet tarkkojen mittatoleranssien osina on kuitenkin hyvä hankkia valmiina. Sisälle asetettavan teräsputken saa mistä tahansa teräsmyyntiliikkeestä ja lämpötilan tarkkailujärjestelmän vaikkapa Varnian nettikaupasta. Näiden lisäksi tarvitaan polttoaineeksi nestekaasupullot jokaiselle ahjolle. Nestekaasua myyvät monet liikkeet tavarataloista huoltoasemiin, joten senkään hankinta ei tuota ongelmia. Kun kaikki aiemmin mainitut tarvikkeet on hankittu, täytyy ahjat vain liittää kaasupulloihin ja sytyttää, ja pitkille kappaleille soveltuva karkaisu-uuni on toiminnassa. Yhteenvetona voidaan siis todeta, että tämä vaihtoehto on huomattavasti sähköuunia helpompi toteuttaa, vaikkakin sen käyttö vaatii enemmän valvontaa ja taitoa.

8.3.1 Kustannukset

Kaasuahjoja valmistaa muun muassa Liettualainen Devil Forge. Heiltä yritys on hankkinut jo aiemmin pieniä kaasuahjoja taotakursseille oppilaiden käytettäväksi. Devil Forgen malli DFSW on osoittautunut erittäin kompaktiksi, helppokäyttöiseksi ja tehokkaaksi. Sen hintakin on maltillinen, vain 170€. Kaasupulloista peritään ensimmäisen oston yhteydessä pullon hinta, mutta tämän jälkeen vaihto täyteen pulloon on hyvin edullista, pienempien pullojen tapauksessa vain 20€ luokkaa.

TAULUKKO 2. Kaasuahjojonon toteutushinta-arvio

Tarvike	Kpl	Hinta	Lähde
Kaasuahjot	3	513	Devil Forge
Teräsputki (metriä)	1	12	Teräsmyynti Tre
Kaasupullot täyttö	3	60	K-rauta
Lämpötila-anturi	3	90	Varnia
Digitaalinen mittari	3	55,5	Varnia
Yhteensä		730,50 €	

Kaasuahjojen ja muiden tarvikkeiden hinnat koottiin taulukkoon 2. Tästä taulukosta huomataan, että yhteishinta 730€ on huomattavasti vähemmän mitä sähköuunin kustannukset, eikä omaa työtä tarvita lämpötilan mittaussysteemin toteuttamiseen kuin muutamia minuutteja, mitä reikien poraus ahjojen kylkeen vie aikaa. Lisäksi tällainen järjestelmä voidaan toteuttaa erittäin nopeasti ja pienellä suunnittelutyöllä, mikä jättää aikaa myös tuottavaan valmistustyöhön.

9 POHDINTA

Alkuperäinen idea sähkövastuksilla toimivasta tarkasta lämpökäsittelyuunista syntyi AMK-opintojen toisena vuotena. Käytännön yritystoiminta oli tällöin vielä alkuvaiheessa ja suunnitelmia tehtiin idealismi etusijalla. Parin vuoden yrityskokemus kuitenkin toi esille ajankäytön ongelmat, kun huomattiin, että 24:n tunnin vuorokausi osoittautuu usein liian lyhyeksi. Niinpä käytännön toiminnassa yrityksessä pyritäänkin painottamaan ajankäytössä eniten itse tuotteiden valmistusta. Monimutkaiset kone- ja laitesuunnitteluprojektit eivät yksinkertaisesti mahdu kalenteriin, ellei niistä saatava hyöty ole todella huomattava. Niinpä opinnäytetyön edetessä näihin realiteetteihin törmättiinkin sähköuunin toteutettavuutta tarkasteltaessa. Kun ilmeni, että sähköuuni olisi haastava toteuttaa eikä sen valmistus myyntiin vaikuta kannattavalta niin projekti jäi tauolle pitkäksi aikaa.

Opinnäytetyön vertailun pohjalta yrityksessä päätettiin kuitenkin ottaa käyttöön kaasupohjainen pitkien kappaleiden karkaisujärjestelmä. Tämä päätös tehtiin käytännön kokemusten sanelemana. Pitkiä lämpökäsiteltäviä kappaleita, eli käytännössä miekkoja, valmistetaan toistaiseksi vain n. 10 kpl vuodessa, joten tuotantomäärät ovat vielä liian pienet että kallis sähköuuni olisi järkevää toteuttaa. Kaasuhajojono tarjoaa tuotantomääriin nähden riittävän hyvän toteutustavan, jonka operointi on toki tarkempaa ja enemmän taitoa vaativaa kuin sähköuunilla. Karkaisu on kuitenkin tärkein ja mielenkiintoisin työvaihe monien pitkien kappaleiden valmistuksessa, ja sitä tuskin tullaan antamaan työntekijöiden tehtäväksi. Sen käyttöönotto on huomattavasti nopeampaa ja halvempaa kuin sähköuunin suunnittelu ja valmistus, mikä tekee siitä paljon käytännöllisemmän vaihtoehdon.

Jälkikäteen voidaan sanoa, että koko pitkien kappaleiden lämpökäsittelyjärjestelmän suunnittelutyö olisi pitänyt aloittaa vasta noin vuoden kestäneen oman yritystoiminnan kokemusten perusteella. Tällöin kuumennusmuotojen vertailussa oltaisiin voitu painottaa eri kriteereitä vaikkapa tietynsuuruisilla kertoimilla riippuen siitä, kuinka tärkeäksi mikäkin ominaisuus on käytännön kokemusten perusteella todettu. Esimerkiksi modularisoinnin toteutettavuuden voidaan sanoa olevan tärkein kriteeri, jolloin siitä saadut pisteet kerrottaisiin kolmella ja lämpötilakontrolli toiseksi tärkeimpänä kahdella. Tällöin kaasupohjainen järjestelmä nousee kiistattomasti parhaaksi vaihtoehdoksi.

Opinnäytetyöstä suurimman osan kattava sähköuunin suunnittelun ja valmistuksen selvitystyö ei kuitenkaan ollut turhaa, vaan sen pohjalta voidaan tulevaisuudessa toteuttaa yksittäinen omavalmistettuuni, jolla martensiittisten ruostumattomien terästen lämpökäsittely voidaan suorittaa näppärin. Tämän yksittäisen uunin rakenteeseen voidaan jättää modularisointimahdollisuus siltä varalta, että opinnäytetyön alkuperäisen idean toteutettavuus muuttuu kannattavaksi ratkaisuksi.

Kaasuahjojono osoittautui myös käytännössä toimivaksi lämpökäsittelyjärjestelmäksi. Kuvassa 15 on koottu kolme pientä yrityksen pitämällä taontakursseilla oppilaiden käyttöön tarkoitettua kaasuahjoa jonoon. Niiden sisälle on asetettu paksuseinäinen teräsputki lämpötilaeroja tasaamaan. Itse lämpötila-antureita ei tässä vaiheessa ole vielä asennettu, vaan oikea karkaisulämpötila päätellään hehkuväristä. Parannettavaa on kuitenkin tulevaisuudessa päästössä. Nyt päästö suoritetaan heti karkaisun jälkeen, kun ahjon sisällä oleva putki on vielä kuuma. Kappale kuumenee tasaisesti sen sisällä kunnes se saavuttaa halutun päästölämpötilan. Tämän jälkeen kappale poistetaan putkesta ennen kuin se kuumenee liikaa. Puute tässä prosessissa on lyhyt pitoaika, sillä enemmän sitkeyttä saadaan kun kappaletta pidetään päästölämpötilassa pidempään. Perinteisesti ahjolla toimivien seppien ainoa käytännön päästö on kuitenkin kautta aikain ollut vastaavantyylinen lyhyt päästölämpötilaan kuumennus ja jäähdytys. Jos tämä on toiminut ennen niin sen voi olettaa antavan toistaiseksi riittävän hyvän lopputuloksen.



KUVA 15. Kaasuahjojono ensimmäistä kertaa karkaisutarkoitukseen koottuna. (Kuva: Joonas Peltoniemi 2019)

Kaasuahjojolla saadaan tasainen hyvä karkaisulämpö noin 70 cm pitkiin kappaleisiin. Käytännössä puhutaan siis Kuvan 16 tyyppisistä rautakauden miekoista. Keskiajan 80-90 cm teräpituuden pitkämiekkoihin tullessa täytyy miekka-aihiota liikutella ahjossa kuumennuksen aikana, jolloin kärki ja tyvi kuumenevat myös. Tällöin keskiosan lämpötila nousee kuitenkin helposti huomattavasti tavoitetta korkeammalle, minkä johdosta keskimmäisen ahjon poltin täytyy sammuttaa karkaisuvehkutusloppuvaiheessa. Niinpä tulevaisuudessa aiheelliseksi nousee kasvattaa jonossa olevien ahjojen määrää vielä yhdellä, jolloin vielä pidemmätkin kappaleet kuumenevat tasaisesti. Tämä päivitys on kuitenkin triviaalisen helppo operaatio. Se, kuten koko kaasuahjojonoon perustuva ratkaisu, ei vaadi tuntien työtä ja tuhansien eurojen investointia.



Kuva 16. Kaasuahjojonossa lämpökäsitelty valmis miekka. (Kuva: Joonas Peltoniemi 2019)

LÄHTEET

Aaltonen, K. & Toivonen, S. 1997. Konepaja-automaatio. Porvoo: Wsoy.

APS Technology. 2016. Non-metallic modular oven. Technical datasheet. Luettu 22.2.2017. <http://www.aps-tech.com/documentation/technical-data-sheets/APS-TDS-Modular-Oven.pdf>

Applied research services Ltd. 2009. Heat capacity of insulating materials in solid fuel appliances. Technical bulletin number 45/release 1. Luettu 31.1.2017. <http://appliedresearch.co.nz/downloads/TB%2045%20Heat%20Capacity%20of%20Insulating%20Materials.pdf>

Baldwin, C. & Clark, K. 2006. Modularity in the Design of Complex Engineering Systems. Teoksessa Braha, D., Minai, A. & Yaneer, B. (toim.) Complex engineered systems, 175-205. Berlin: Springer.

Engineering Toolbox, 2017. Verkkosivusto. Luettu 28.2.2017. https://www.engineeringtoolbox.com/air-specific-heat-capacity-d_705.html

Evenheat Kiln Inc. Knife and heat treat ovens. Luettu 31.1.2017. <http://evenheat-kiln.com/?p=knife-heat-treat-oven-models&c=16>

Evenheat Kiln Inc. Heat treat oven (KF, KO and KH) Operating manual. 2015. Luettu 31.1.2017 <http://evenheat-kiln.com/pdfs/manuals/knife-heat-treat-ovens/kf-135.5.installation-and-operation-manual.pdf>

Gasbarre Furnace Group. 2014. Continuous vacuum furnaces. Technical data sheet. Luettu 22.2.2017. <http://www.cihayes.com/assets/cih-continuous-vacuum-furnaces.pdf>

Gostimirović, M., Kovač, P., Radovanović, M., Madić, M. & Krajny, Z. 2015. Modular Design of unconventional cutting machine tools. Journal of production engineering 18 (1), 27. Luettu 14.2.2017. http://www.jpe.ftn.uns.ac.rs/papers/2015/no1/6-Gostimirovic_rad%201_JPE_18_No1.pdf

Guzzardo, J. 2009. Material Safety Data Sheet Ceramic Fiber Products. LEWCO Specialty Products, Inc. Luettu 8.11.2019 <http://www.lewcospecialtyproducts.com/Files/Press/RG2300CeramicFiber.pdf>

Hale, L. 1999. Principles and techniques for designing precision machines. University of California. Department of mechanical engineering. Väitöskirja. Luettu 23.2.2017 <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/235415.pdf>

If Vahinkovakuutus Oyj. 2015. Tulitöiden turvallisuusohje. Luettu 18.3.2017 <https://www.if.fi/globalassets/fi/commercial/brochures/omaisuusvakuutus/65473-tulitoiden-turvallisuusohje.pdf>

Ikonen, K. 2013. Säteilylämmönsiirron laskennasta. VTT. Luettu 30.1.2017. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2013/T116.pdf>

Inkinen, P. & Tuohi, J. 1999. Momentti 1 Insinöörifysiikka. Helsinki: Otava.

Inkinen, P., Manninen, R. & Tuohi, J. 2002. Momentti 2 Insinöörifysiikka. Helsinki: Otava.

Sandvik Group. Sandvik Materials Technology. 2012. Kanthal: Resistance heating alloys for home appliances. Luettu 31.1.2017

<http://www.kanthal.com/Global/Downloads/Materials%20in%20wire%20and%20strip%20form/Resistance%20heating%20wire%20and%20strip/S-KA026-B-ENG-2012-01.pdf>

Lepola, P & Makkonen, M. 2000. Materiaalit ja niiden käyttö. Helsinki: WSOY.

Meskanen, S. & Toivonen, P. 2002. Valimotekniikan perusteet. Metallurgian perusteita. Valimoinstituutti. Luettu 15.1.2017.

http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/vtp_sulatus_metallurgia.pdf

Morgan Thermal Ceramics. 2016. Insulating Fire Brick Datasheet. Luettu 27.1.2017.

http://www.morganthermalceramics.com/media/2937/ifb_up_to_2600degf_1427degc_-_kr-23_tctm-23_k-23-hs_k-25_k-26_1.pdf

Nevalainen, H. 1979. Teräsopas. Ovako. Luettu 19.1.2017.

<http://www.elisanet.fi/harri.nevalainen/tietoisk/lampokasittelyt.htm#3.2.4>

Eriksson, R. & Selen, A. 1946. Rauta ja teräs. Teoksessa Woxen, R., Hallendorff, H., Svahn, O. (toim.) Konepajatekniikka osa 1, 155-239. Helsinki: WSOY.

Paroc Group Oy. 2010. Teollisuuden Erityisratkaisut. Luettu 26.1.2017.

www.paroc.fi/-/media/Files/Brochures/Finland/Industrial_Solutions-Paroc-FI.ashx

Patentti- ja rekisterihallitus. 2017. Patenttikäsikirja. Patentit ja tavaramerkit. Luettu 23.2.2017.

https://www.prh.fi/stc/attachments/patentinliitteet/4palvelutjietokannat/Patenttikasikirja_2017.pdf

Patentti- ja rekisterihallitus. 2012. Hyödyllisyysmalliopus. Luettu 23.2.2017.

<https://www.prh.fi/stc/attachments/patentinliitteet/hmopas.pdf>

Päivärinta, A. 2000. Lämpökäsittelyohje Sandvik 12C27-Teräs. Teräsrenki Oy. Luettu 20.1.2017. http://www.terasrenki.com/teras/12c27_lampo_kasittely.htm

Päivärinta, A. 2001. Johdatus superseosten lämpökäsittelyyn. Teräsrenki Oy. Luettu 20.1.2017. http://www.terasrenki.com/teras/teoria_lampo_kasittely.htm#pitoa

Rakennuskemia Oy. 2015. Bison tulikitti: Tuoteseloste. Luettu 27.1.2017.

<http://tds.rakennuskemia.com/G185.pdf>

Ranne, A., Hänninen, M. & Salmi, J. 1999. Kuitueristeet korkealämpötiloissa: Toteutus ja käyttö. VTT. Luettu 26.1.2017 <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1999/T1975.pdf>

Stanaitis, P. 2016. Coal forge vs. Gas forge. Luettu 25.1.2017.

<http://www.spaco.org/Blacksmithing/CoalForgeVsGasForge.htm>

Suomen Standardoimisliitto SFS ry. 2015. Koneturvallisuuden Standardit. Luettu 11.11.2019 http://www.sfs.fi/files/63/Koneturvallisuus_SFS_esite_web.pdf

Suomen Standardoimisliitto SFS ry. 2013. CE-merkintä. Luettu 11.11.2019 https://www.sfs.fi/julkaisut_ja_palvelut/standardi_tutuksi/ce-merkinta

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. 2010. Käytä nestekaasua oikein-opas. Luettu 9.11.2019 <https://tukes.fi/documents/5470659/6424402/K%C3%A4yt%C3%A4+nestekaasua+oikein/d98935b0-90e1-4237-9455-dd10f1c0387f/K%C3%A4yt%C3%A4+nestekaasua+oikein.pdf>

Vapalahti, S. 2018. ICT-100 aine kaasuahjoon. Sähköpostiviesti 2.2.2018. Vastaanottaja J. Peltoniemi. Rodbay Oy:n perustajan lähettämä julkaisematon materiaali TAMK:n opiskelijalle.

Virta, J. 2013. Korkean lämpötilan mittausmenetelmät. Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos. Aalto- Yliopiston teknillinen korkeakoulu. Mittaustekniikan erityistyö.

Wunch, J. 2010. Buying Firebricks. Ceramic Publication Company. Luettu 27.1.2017. <https://ceramicartsdaily.org/wp-content/uploads/2010/06/firebrick-types.pdf>

LIITTEET

Liite 1. Sähköuunin taulukoitu kustannusarvio

Materiaalit	kpl	Hinta-arvio
Tulitiilet	93	475,23
Teräsrunko	3	600
Tulivilla (rulla)	1	90
Vetosalvat	8	111,2
	Yhteensä	1 276,43 €

Lähde

Varnia
verkkokauppa
Tampereen Teräsmyynti
oy
Varnia
IKH

Komponentit	kpl	Hinta-arvio
Vastuslanka (metriä)	114	156,18
Kontaktori	3	150
Lämpöanturi S- tyyppi	3	450
Muut asennustarvikkeet	3	300
Ohjausyksikkö	3	1050
	Yhteensä	2 106,18 €

Varnia
Varnia
Varnia
Varnia
Varnia

Oma työ	Tunnit (arvio)
Suunnittelu, palaverit	24
Runkojen kokoaminen	20
Tiilien muokkaus	8
Runko pintakäsittely	4
	Yhteensä 56 h
	Työtuntihinta 25€, yhteensä 1400 €

Alihankintatyö	Karkea hinta- arvio
Sähkösuunnittelu 3 hlö 2pvää	1 240 €
Sähköasennus 3 moduulia 1 hlö 3 pvää	1 458 €
	Yhteensä 2 698 €

Grankull, K. 2019. Apex Oy.
Puhelinhaastattelu 19.11.2019
Lahtinen, P. 2019. Avitor Oy.
Puhelinhaastattelu 19.11.2019

Koko projektin hinta 6 080,85 € plus työtunnit

