

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikka / käyttö ja käynnissäpito

Tuomo Hurri

LÄMPÖKÄSITTELYUUNIEN ENERGIA TEHOKKUUDEN PARANTAMINEN

Opinnäytetyö 2013

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikka

HURRI, TUOMO

Lämpökäsittelyuunien energiatehokkuuden parantaminen

Opinnäytetyö

56 sivua

Työn ohjaaja

Hannu Sarvelainen, pt. tuntiopettaja

Toimeksiantaja

Sulzer Pumps Filand Oy

Marraskuu 2013

Avainsanat

jäännöshappi, häkä, lämpösäteily, emissiivisyys, energiatehokkuus, virtautus

Lämpökäsittelyuunit kuluttavat paljon energiaa, joten pienillä energiataloutta parantavilla ratkaisulla voidaan saavuttaa merkittäviä taloudellisia säästöjä. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää matalaemissiivisen pinnoitteen vaikutus vanhan maakaasukäyttöisen uunin energiatehokkuuteen. Tarkoitus oli myös verrata energian kulutusta täydellä ja vajaalla uunipanoksella. Ennen varsinaisten koemittausten aloittamista uunin toimintoja mitattiin, mittaustuloksia analysoitiin ja analysoinnin tuloksena uunia huollettiin ja säädettiin.

Lämpökäsittelyuuneissa lämpö siirtyy kappaleeseen ympäristöstä tai päinvastoin lämpösäteilyllä (yli 90 %), joten lämpösäteilylle alttiit pinnat vaikuttavat merkittävästi uunien energiatalouteen. Lämpösäteilyn osuessa seinämien eristemateriaaleihin säteily absorboituu, heijastuu tai menee pinnan läpi. Pinnan emissiivisyys ϵ määritetään pinnan lähettämän säteilyn ja samassa lämpötilassa olevan mustan kappaleen lähettämän säteilyn osamääränä. Emissiivisyyskerroin on yksi mustalla kappaleella, joka absorboi ja emittoi kaiken pintaan osuneen säteilyn. Eristysmateriaalien emissiivisyys on lämpökäsittelyuunien lämpötiloissa 0,4. Eristysmateriaalien emissiivisyyttä voidaan nostaa jopa 0,9:ään emissiivisillä pinnoitteilla. Heijastavilla pinnoitteilla sen sijaan pienennetään eristysmateriaalin emissiivisyyttä, jolloin pinnan lämpösäteilyn absorptio pienenee ja heijastuminen suurenee.

Työssä mitattiin pinnoittamattomalla ja pinnoitetulla uunilla koekappaleiden ja uunin lämpötiloja, jäännöshapetta, häkää ja kaasunkulutusta sekä suoralla että hitaalla nostolla. Työssä vertailtiin myös uunipanoksen painon vaikutusta nousu-aikaan ja energiankulutukseen.

Opinnäytetyössä tehtyjen kokeiden perusteella uunin ehdottomasti tärkein energiansäästöllinen ja lämpötilan nousua nopeuttava toimenpide on mitata ja säätää polttimien ilma-kaasusuhde oikeaksi. Tuotannon nopeamman virtautuksen kannalta uunin panostaminen kannattaa suorittaa kuumaan uunin, vaikka puolikkaalla uunipanoksella.

Lopputuloksena tämä opinnäytetyö tarjoaa Sulzer Pumps Finland Oy:lle mahdollisuuden ympäristöystävällisempään ja energiatehokkaampaan lämpökäsittelyyn ja lyhentää tuotantoaikaa prosessin jatkuvalla virtautuksella.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Energy Engineering

HURRI, TUOMO

Cost- and Energy-Efficiency by Modernization of Heat
Treatment Plants

Bachelor's Thesis

56 pages

Supervisor

Hannu Sarvelainen, Lecturer

Commissioned by

Sulzer Pumps Filand Oy

November 2013

Keywords

excess oxygen, carbon monoxide, thermal radiation emis-
sivity, energy-efficiency, flow of material

Heat treatment furnaces require a lot of energy and even small improvements in energy efficiency can lead to considerable savings. The purpose of this work was to investigate the effect of low emissivity coatings on energy efficiency of an old heat treatment furnace. Another goal was to investigate the effect of load size. Before the actual comparative measurements the furnace, was analyzed, repaired, and adjusted accordingly for optimized operation.

In heat treatment, furnaces heat transfer between surroundings and objects is mainly through radiation (over 90 %), so surfaces play a major role in heat transfer. When radiation hits surfaces, it can be absorbed, reflected, or it can penetrate them. Surface emissivity ϵ is defined by surface emitted radiation divided by radiation emitted by a black object. Emissivity is one for a black object that absorbs and emits all radiation hitting the surface. Emissivity of insulation materials in heat treatment temperatures is 0.4. Emissivity can be increased to 0.9 with high emissivity coatings. Reflecting coatings lower the emissivity of surfaces and which decreases absorption and increases reflection.

The measurements conducted for this thesis included temperatures of furnace and test pieces, excess oxygen, carbon monoxide, and gas consumption with restricted and full heating power. The effect of load weight on heating speed and energy consumption was investigated.

During these experiments it was found out that the most important factor for energy efficiency and heating speed was excess oxygen related to air/fuel -ratio. For faster product flow, a batch should be charged into the hot furnace even with half load.

As a result, this work enables Sulzer Pumps Finland Oy to use a more environment friendly and energy-efficient heat treatment process with shorter production time using continuous flow of material.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	6
1.1	Sulzer-konserni	6
1.2	Työn tavoitteet	6
2	YLEISIMMÄT VALUKAPPALEIDEN LÄMPÖKÄSITELYUUNIT VALIMOISSA	7
2.1	Yleistä	7
2.2	Lämpökäsittelyn tarkoitus	8
2.3	Kammiouunit	8
2.4	Vaunu-uunit	9
2.5	Läpityöntöuunit	10
2.6	Sulzer Pumps Filand Oy:n Karhulan valimon lämpökäsittelyuunit	11
2.6.1	Karhulan valimon uunikapasiteetti	11
2.6.2	Pienet maakaasukammiouunit	11
2.7	Pienen 1 ja 2 uunin rakenne	13
2.8	Koeuunin kuumennusjärjestelmä	13
2.9	Olosuhteet	14
2.9.1	Yleistä	14
2.9.2	Lämpötila	14
2.9.3	Paine	15
3	LÄMMÖNSIIRTO	15
3.1	Lämmönsiirron teoria	16
3.1.1	Lämpösäteily	16
3.1.2	Musta kappale	17
3.1.3	Emissiivisyys	19
3.1.4	Kaasujen säteily	20
3.1.5	Lämmönjohtuminen	21
3.1.6	Kiinteiden aineiden lämmönjohtavuus	22
3.1.7	Lämmönsiirto konvektiolla	22

3.1.8 Lämmönsiirto valukappaleeseen	23
3.2 Lämpötilanmittaus ja säätö	23
3.3 Termoelementit	25
4 UUNIEN ENERGIATALOUS	28
4.1 Energia sisään	28
4.2 Energia ulos	29
4.3 Energioiden kokonaistase	30
5 TULENKESTÄVÄT MATERIAALIT LÄMPÖKÄSITTELYUUNEISSA	30
5.1 Lämpökäsittelyuunien tulenkestävät materiaalit	30
5.2 Vuorausmateriaalien pinnoittaminen	31
5.2.1 Emissiiviset pinnoitteet	32
5.2.2 Heijastavat pinnoitteet	33
5.3 Sulzerin lämpökäsittelyuunien tulenkestävät materiaali	34
6 LÄMPÖKÄSITTELYKOKKEET	35
6.1 Toimenpiteet ennen kokeita	35
6.2 Koejärjestelyt	35
6.3 Lämpötilan mittaukset	38
6.4 Savukaasumittaukset	40
6.5 Suoritettut toimenpiteet	41
6.6 Koemittaukset	43
6.6.1 Kokeet pinnoittamattomalla uunilla	44
6.6.2 Kokeet pinnoitetulla uunilla	44
6.7 Tulokset	46
6.8 Suoran noston kokeet	46
6.9 Hitaan noston kokeet	50
7 YHTEENVETO	53
LÄHTEET	54

1 JOHDANTO

1.1 Sulzer-konserni

Sulzer on perustettu Sveitsissä 1834. Nykyisin konserni koostuu neljästä eri divisioonasta: Sulzer Pumps, Sulzer Metco, Sulzer Chemtech ja Sulzer Turbo services. Vuonna 2012 Sulzer-konsernin myynti oli yli neljä miljardia Sveitsin frangia eli yli 3,2 miljardia euroa, ja se työllisti hiukan alle 18 000 työntekijää. (Sulzer Ltd 2013.)

Sulzerin suurin divisioona on Sulzer Pumps. Se työllisti vuonna 2012 yli 8 500 työntekijää, ja sen myynti oli yli kaksi miljardia Sveitsin frangia eli noin 1,7 miljardia euroa. Se on yksi maailman johtavista pumpun valmistajista, jonka valmistamat pumput ja sekoittimet on suunniteltu toimimaan vaativissa olosuhteissa prosessiteollisuudessa, voimalaitoksissa sekä veden ja jäteveden käsittelyssä. Sulzer Pumpsilla on 22 valmistavaa tehdasta ja 170 myynti- ja huoltopistettä ympäri maailmaa. (Sulzer Ltd 2013.)

Vuonna 2000 Sulzer-konserni osti Ahlström Pumput Oy:n. Yritystoston myötä syntyi Sulzer Pumps Finland Oy. (Sulzer Ltd 2013.) Sulzer Pumps Finland Oy valmistaa ja huoltaa pumppuja ja sekoittimia, ja se työllistää yli 500 työntekijää Suomessa. Karhulassa sillä on valimo, pumpputehdas, varaosakeskus ja huoltoyksikkö. Lisäksi sillä on huoltokeskukset Mäntässä ja Oulussa. Karhulassa sijaitsee myös Sulzerin Pumppujen Suomen tuotekehityskeskus. (Sulzer Pumps Finland intranet 2013.)

Vuonna 2011 Sulzer osti Cardo Flow Solutions -nimisen yrityksen, jonka tuotemerkejä ovat Scanpump ja ABS. Tällä yritysostolla Sulzer Pumps vahvisti markkinaosuuttaan jätevesimarkkinoilla. (Sulzer Ltd 2013.)

1.2 Työn tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää Sulzer Pumps Finland Oy:n Karhulan valimon lämpökäsittelyuunien energiatalouden parantamiseen ja lämpökäsittelyyn liittyvän panoksen suuruuden vaikutusta tuotannon virtauttamiseen. Panoksen suuruutta peilataan lämpökäsittelykustannuksiin. Teoriaosuudessa käsitellään lämpökäsittelyuunien lämmönsiirtoilmiöitä, uunin energiataloutta, jäännöshappea sekä korkea- ja matalaemissiivistä pinnoitusta.

Sulzer Pumps Finland Oy:n Karhulan valimolla on seitsemän maakaasua käyttävää ja kolme sähköllä toimivaa lämpökäsittelyuunia, joissa valukappaleet lämpökäsitellään lopullisen homogeenisen kiderakenteen saavuttamiseksi.

Työn luvussa 6 tutkitaan energiankulutusta pinnoittamattomalla ja pinnoitetulla uunilla sekä uunin panoksen painon vaikutusta normaaleissa tuotantoajoissa energiankutukseen. Tutkimukset tehdään lämpökäsittelemällä koekappaleita, jotka on varustettu termoelementein, kertapanosteisessa koeuunissa. Työn lopputuloksena on myöhemmin dokumentoitavat ajo-ohjeet tuotannolle ja huolto-ohjeet kunnossapidolle.

2 YLEISIMMÄT VALUKAPPALEIDEN LÄMPÖKÄSITELYUUNIT VALIMOISSA

2.1 Yleistä

Lämpökäsittelyuunit jaetaan yleensä kertapanosteisiin ja jatkuvatoimisiin uuneihin. Valukappaleiden lämpökäsittelyuunit eivät sinänsä erityisesti poikkea metalliteollisuudessa käytettävistä uuneista, vaan on uunityyppejä, jotka soveltuvat moniin käyttötarkoituksiin. Kertapanosteisista uuneista yleisimmät valimoissa käytössä olevat tyypit ovat kammiouuni ja vaunu-uuni. Jatkuvatoimisia uuneja ovat tunneliuuni ja rullarinauuni, joita käytetään enimmäkseen terästeollisuudessa. Viimeksi mainittuja käytettäessä on lämpökäsiteltävät valukappaleet asetettava panostuskoreihin. Valimon tuotantorakenteesta riippuu, mikä on sopivin lämpökäsittelyuuni. (Autere, Ingman & Tennilä 1986, 473 - 484.)

Yleensä uunityyppejä käytetään valimoissa seuraavasti:

(1) Pienet sarjakappaleet

Valmistetaan suurissa sarjoissa. Pienet sarjakappaleet lämpökäsitellään jatkuvatoimisissa uuneissa ja kappaleet panostetaan koreihin lämpökäsittelyn ajaksi.

(2) Keskikokoiset kappaleet

Yksittäisvalmistus tai valmistus pieninä sarjoina. Lämpökäsittelyjen vaihtelumahdollisuudet ovat laajat. Keskikokoiset kappaleet lämpökäsitellään kertapanosteisessa vaunu-uunissa. Panostus voidaan suorittaa esim. trukilla.

(3) Suuret kappaleet

Yksittäisvalmistus tai valmistus pieninä sarjoina. Lämpökäsittelyjen vaihtelumahdollisuudet ovat näissäkin laajat. Suuret kappaleet lämpökäsitellään kertapanosteisessa vaunu-uunissa. Panostus voidaan suorittaa esim. nosturilla. (Autere, Ingman & Tennilä 1986, 478 - 484.)

Uunien kuumennukseen käytetään kaasua tai sähköä.

2.2 Lämpökäsittelyn tarkoitus

Valukappaleita lämpökäsitellään monista syistä. Ei-toivottujen mikrorakenteiden poistamiseksi ja jotta kappaleen kiderakenne homogenisoituisi. Lämpökäsittely yleensä parantaa aineen ominaisuuksia, jonka jälkeen saadaan yleensä standardin vaatimukset täyttävä materiaali. Lämpökäsittely voi myös olla asiakkaan vaatimuksena. (Niemi 2010,1.)

2.3 Kammiouunit

Yleisin ja yksinkertaisin kertapanosteinen lämpökäsittelyuuni on kammiouuni. Uunissa voidaan suorittaa kaikki tavallisimmat lämpökäsittelyt. Kammiouunin rakenne on esitetty kuvassa 1. Kun uunin työskentelylämpötilaksi on tarkoitettu alle 600 °C, käytetään polttokaasuissa tai sähkölämmityksessä uuni-ilman pakkokiertoa. Yli 600 °C:n työskentelylämpötiloissa uuni voidaan kuumentaa suoraan uunitilaan johdetuilla polttimoilla tai erilaisilla arinan alaisilla lämmitysratkaisuilla. Edellisessä tapauksessa on kyseessä suora kuumennus, jälkimmäisessä tapauksessa epäsuora kuumennus. Uuni vuorataan yleensä shamottitiilistä tai -massoista tai molemmista. Nykyisin käytetään enemmän tulenkestäviä keraamisia kuituja. Lämpövuotojen ehkäisemiseksi tulee uunin luukkujen rakenteeseen ja kuntoon kiinnittää huomioita. Jatkuvässä käytössä panostusluukun tiivisteet kuluvat ja alkavat vuotaa, mikä kasvattaa lämpötilaeroa uunissa. Luukun nostovaijerikin voi palaa poikki, kun kuumat palokaasut purkaantuvat ulos luukun rakosista. Kammiouunin panostukseen voidaan käyttää trukkia, silloin kun kappaleet ovat sopivan kokoisia ja uunityöskentely on suunniteltu tapahtuvan trukkien avulla. (Autere, Ingman & Tennilä 1986, 478.)



Kuva 1. Kammiouuni

2.4 Vaunu-uunit

Vaunu-uunit ovat periaatteessa kammiouunin kaltaisia (kuva 2). Uunin pohjan eli arinan muodostaa liikkuva vaunu, jolle uuni panostetaan valukappaleilla. Vaunuja voi olla yhtä uunia kohden kaksikin, jotta uunin käyttöä saadaan tehostettua. Toisaalta tällainen ratkaisu vaatii enemmän tilaa itse tehdashallissa. Uunit soveltuvat suurienkin valukappaleiden lämpökäsittelyyn. Uunit panostetaan ja lasti puretaan yleensä nostureilla käsiteltävien kappaleiden koon takia. Pienemmät kappaleet voidaan lastata tulenkestävästä teräksestä tehdyille lämpökäsittelyritilöille. Tällöin ritilällinen käsiteltäviä kappaleita nostetaan yhdellä kertaa uuniin ja uunista pois. Kuumennus voi tapahtua, kuten kammiouuneissakin, suoraan uunitilaan johdetuilla palokaasuilla tai epäsuorasti kuumentamalla vaunun alaiset kanaalit. Lämpökäsitteltävien kappaleiden suurehkon painon takia on vaunu rakennettava vahvaksi. Suoritettaessa kappaleille jännitysmöykäykäsittelyjä on vaunu-uuneilla savukaasujen pakkokierrolla varustettu uuni edullisin ja ilman pakkokiertoa oleva uunitilaa suoraan lämmittävä epäedullisin. Uunin vuorauksessa käytetään vastaavia materiaaleja kuin kammiouunissa. (Autere, Ingman & Tennilä 1986, 479.)

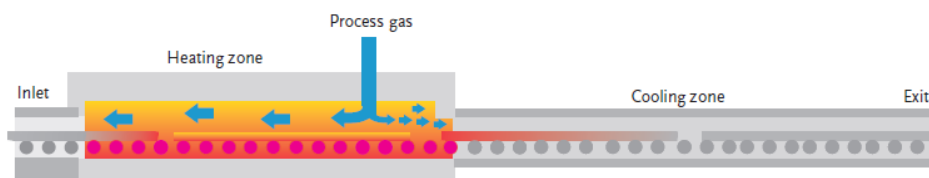


Kuva 2. Vaunu-uuni

2.5 Lämpöuunit

Yleisin uuni pienille valukappaleille on rulla-arinauuni kuva 3. Uuni on pitkä, monipuolinen, jatkuvatoiminen uuni, joka on tavallisesti jaettu eri vyöhykkeisiin. Lämpökäsittävät kappaleet panostetaan koreihin, jotka kulkevat uunissa etukäteen valitun lämpökäsittelyohjelman mukaisesti. Uunin yhteyteen voidaan liittää erilaisia lämpökäsittelyn kannalta tarpeellisia yksiköitä, kuten sammutus-, normalisointi-, perlitointi- ja päästövyöhykkeet. Valuraudan ja pallografiittivaluraudan lämpökäsittelyissä tällaisia uuniyksiköitä on yleisessä käytössä. Uunien rakenne sallii lämpökäsittelylinjan automatisoinnin niin, että uunin voi panostaa ja purkaa yksi työntekijä. Vuorauksen rakenteet ovat samantapaisia kuin kammio- ja vaunu-uuneissa. (Autere, Ingman & Tennilä 1986, 479 - 482.)

Figure 1: Schematic cross section of a roller hearth furnace with indication of the atmosphere flow pattern.



Kuva 3. Periaatekuva rulla-arinaunusta

2.6 Sulzer Pumps Filand Oy:n Karhulan valimon lämpökäsittelyuunit

2.6.1 Karhulan valimon uunikapasiteetti

Valimolla on seuraava uunikapasiteetti. Kolme isoa maakaasuvaunu-uunia, joiden noin mitat ovat, korkeus 3,5 m, pituus 5 m ja leveys 4 m. Näiden panoksen bruttopaino, on yleensä 10 t – 12 t ja netto 3 t – 5 t. Neljä pientä maakaasukammiounia, joiden noin mitat ovat, korkeus 1,2 m, pituus 2 m ja leveys 1,7 m. Näiden panoksen bruttopaino on useimmiten 2 t – 2,5 t ja netto 1 t – 5 t. Kolme sähköuunia, joiden mitat vastaavat pieniä maakaasu-uuneja.

2.6.2 Pienet maakaasukammiouunit

Materiaaleittain Sulzerin Karhulan valimolla poistetaan valukanavistot ja syöttökuvut ennen tai jälkeen lämpökäsittelyn. Valukappaleet panostetaan uuneihin tuotannosuunnittelun antamassa toimitusaikajärjestyksessä, kuitenkin huomioiden materiaalin vaatima lämpökäsittelyohjelma. Kuvassa 4 esitetään Sulzerin pieni 2 -lämpökäsittelyuuni tyhjänä.



Kuva 4. Pieni 2 -lämpökäsittelyuuni Sulzer Karhulan valimo

Valukappaleen suurin kuumennusnopeus riippuu materiaalista, kappaleen muodosta ja siitä, kuinka nopeasti lämpötila voidaan nostaa pitovaiheeseen. Liian suuri kuumennusnopeus voi aiheuttaa repeämiä, halkeamia tai muodonmuutoksia. Paksuseinäisiä kappaleita on lämmitettävä hitaammin verraten ohuempi seinämäisiin kappaleisiin, koska lämpötilaerot sisustan ja pinnan välillä ovat paksuissa suuremmat. Valukappa-

leissa lämmönjohtokyky on hiukan pienempi kuin muovatuissa. Lämpötilan noston jälkeen seuraa lämpökäsittelyn pitovaihe. Pitovaiheen on oltava niin pitkä, että halutut rakennemuutokset ennättävät tapahtua. Valukappaleessa on suotautumia, joiden taasaantumisen edellyttää pitkiä pitoaikoja. Valukappaleiden homogenointikäsittelyihin ei voida sellaisenaan soveltaa muovattujen metallien pitoaikoja. Homogenisointi lämpökäsittelyn jälkeen voidaan tietyissä tapauksissa käyttää varsin lyhyitä pitoaikoja. Jännitystenpoistohehkutuksessa riittää, että kappale on läpikotaisesti saavuttanut tavoitelämpötilan, kun taas adusointikäsittely vaatii jopa useiden vuorokausien pitoajan. (Autere, Ingman & Tennilä 1986, 482 - 483.)

Valkoinen valurauta on lähtökohtana ns. adusoidulle eli tempervaluraudelle. Valun jälkeen valuille suoritetaan halutun lujuusluokan ja tempervalurautatyypin mukainen pitkä lämpökäsittely adusointi, jonka yhteydessä karbideiksi sitoutunut hiili erkautuu matriisista kerämaisiksi grafiittierkaumiksi. (Kivivuori & Härkönen 2009, 217.)

Adusoinnissa valua pidetään 950 ... 1070 °C lämpötilassa hapettavassa atmosfäärissä useiden, jopa kymmenien tuntien ajan. Lämpökäsittelyssä sementtiittiin sitoutunut hiili joko poistuu kokonaan rakenteesta tai muodosta pyöreitä grafiittikeräsiä. Graaffipallot ovat pyöreän muotonsa ansiosta vähemmän haitallisia materiaalin lujuus- ja sitkeysominaisuuksia ajatellen. Tempervalurautojen ominaisuudet vastaavat läheisesti pallografiittivalurautoja. (Kivivuori & Härkönen 2009, 217.)

Usein pitoaikaa määriteltäessä käytetään nyrkkisääntönä yksi tunti ainepaksuuden tuumaa kohti. Edellä olevaa määritelmää käytetään Sulzerin Karhulan valimolla, määriteltäessä pitoaikaa lämpökäsittelyissä, ellei muuta vaadita. (Autere, Ingman & Tennilä 1986, 483.)

Valukappaleet voidaan jäähdyttää lämpökäsittelyn jälkeen monilla eri tavoilla. Yleisimmät jäähdytysmenetelmät ovat hitaimmasta nopeimpaan seuraavat:

- uunin mukana
- ulosvedetyllä arinalla tai pois nostettuna
- ilmapuhalluksella joko uunissa tai sen ulkopuolella
- sammutuksella leijupatjaan
- sammutuksella öljyyn
- sammutuksella emulsioon

- sammutuksella suolakylpyyn
- sammutuksella veteen.

Jäähdytystapa määritellään metallurgisten tavoitteiden ja kappaleen muodon perusteella. Voidaan pyrkiä joko mahdollisimman jännityksettömään rakenteeseen hitaalla jäähdytyksellä tai saamaan aikaan rakennemuutoksia nopealla jäähdytyksellä. Kappaleen muoto asettaa ylärajan jäähdytysnopeudelle. Muodon muutosten ja repeämien vaara on suuri paksuissa kappaleissa, joissa esiintyy hyvin erilaisia ja jyrkästi vaihtuvia seinämänpaksuuksia. Valumateriaalin pieni lämmönjohtokyky ja hauraus vaikuttavat samaan suuntaan. (Autere, Ingman & Tennilä 1986, 483 - 484.)

2.7 Pienen 1 ja 2 uunin rakenne

Neljästä pienestä maakaasu-uunista kaksi on valmistanut Wellman Incandescent Furnace CO. Ltd. vuonna 1967, ja niille on annettu nimet pieni 1 -uuni ja pieni 2 -uuni. Arkistosta löydettyjen asiakirjojen mukaan uunien toimittajana on ollut E Sarlin Oy. Molempia uuneja on vuosien saatossa modernisoitu useaan otteeseen. Molemmissa uuneissa on kaksi Pyronics 601 NM -merkkistä moduloivaa poltinta joiden maksimiteho on 180 kW/poltin. Pikku 1 -uunissa on 1980-luvun lopulla asennettu keraaminen kuituvuoraus seiniin ja kattoon, ja vuorausta on vuosien varrella jouduttu korjaamaan. Pikku 2 -uunin keraaminen kuituvuoraus on kokonaan uusittu vuonna 2005. Koeuunina käytettiin pikku 2 -uunia. (Ahlström Oy:n ostoasiakirjat vuodelta 1967.)

2.8 Koeuunin kuumennusjärjestelmä

Koeuunissa on kaksi Pyronicsin moduloivaa poltinta, joista otetaan tehoa ulos 150 kW/poltin. Molemmat polttimet ovat takaseinän alaosassa ja niin lähellä uunin arinaa, kuin ne on mahdollista asentaa. Honeywell-automaatiojärjestelmä säätää polttimoiden kaasuvirtauksia mittaamalla uunin atmosfäärin lämpötilaa uunin katossa olevien termoelementtien avulla. Molempien polttimoiden tehoa säädetään samanaikaisesti. (Pyronics Bulletin 2011.)

Polttoaineena käytetään maakaasua. Maakaasu on pääosin metaania sekä pieniä määriä etaania, propaania, butaania ja tyyppiä sisältävä kaasuseos. Suomeen tuodaan maakaasua Venäjältä (Siperiasta), ja sen koostumus taulukossa 1 (Gasum-tuotetiedote 2012, 1.)

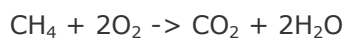
Taulukko 1. Venäläisen maakaasuun koostumus (Gasum-tuotetiedote 2012, 1 - 3.)

Metaania CH ₄	> 98 tilavuus - %
Etaania C ₂ H ₆	< 1 tilavuus - %
Propania ja muita hiilivetyjä C ₃ H ₈ , C ₄ H ₁₀	< 0,5 tilavuus - %
Typpeä N ₂	< 1 tilavuus - %
Alempi- eli nettolämpöarvo H _j (H _u)	36 MJ/m ³
Tiheys	0,72kg/m ³ (normaaliolotilassa 0 °C 1,01325 bar)
Suhteellinen tiheys	0,56 (ilma = 1)

2.9 Olosuhteet

2.9.1 Yleistä

Lämpökäsittelyuunien lämpö saadaan maakaasun palamisreaktiosta, jossa ilman happi reagoi polttoaineen palavien komponenttien kanssa. Kemiallinen reaktio tai hapettuminen palamisessa luovuttaa energiaa ja valoa. (Gasum-tuotetiedote 2012, 2.)



Maakaasun palamisessa syntyy hiilioksidia ja vesihöyryä. Palamisilma sisältää typpeä (ilmassa on typpeä noin 79 tilavuus - % ja happea 21 tilavuus - %). Korkeassa lämpötilassa (> 1 400 °C) palamisolosuhteiden ja hapen osapaineen mukaan pystyy pieni määrä tyypestä hapettumaan tuottaen typen oksideja. (Gasum-tuotetiedote 2012, 3.)

Poltettaessa maakaasua liian alhaisella palamisilmalla syntyy hiilimonoksidia (CO) eli häkää. Häkä luokitellaan erittäin myrkylliseksi kaasuksi, koska se estää veren hapensiirtokyvyn pieninäkin pitoisuuksina (HTP15 min = 75 ppm). (Gasum-tuotetiedote 2012, 3.)

2.9.2 Lämpötila

Karhulan valimon tuotannossa olevat valukappaleet lämpökäsitellään ainakin kerran. Materiaaleittain kappaleiden lämpötila nostetaan lämpökäsittelyn aikana 1 050 – 1 200

°C:seen, jolla poistetaan ei-toivottuja mikrorakenteita ja saadaan standardin vaatimukset täyttävät materiaaliset ominaisuudet valukappaleelle. Pitolämpötila voidaan nostaa joko vapaasti tai rajoitetusti käyttämällä jopa tasausportaita lämpötilan nostovaiheessa. (Sulzerin sisäiset lämpökäsittelyohjeet 2012.)

2.9.3 Paine

Lämpötalouden kannalta on tärkeä, että lämpökäsittelyuunien atmosfäärin paine on oikea. Uunia ympäröivää tilaa pienemmillä paineilla lämpötalous heikkenee uunin imiessä kylmää ilmaa ovien ja luukkujen kautta. Ympäristöä suuremmilla paineilla kuumat kaasut vastaavasti pakenevat uunista. Lämpötalouden heikkenemisen myötä uunista pakenevat kuumat kaasut voivat aiheuttaa vaaratilanteita ja turvallisuusriskejä tai vahingoittaa uunin rakenteita. Lämpökäsittelyuuneja suositellaan ajettavan hieman ilmakehänpainetta suuremmilla paineilla, jotta lämpöhäviöt ympäristöön ovat mahdollisimman pienet. (Bureau of Energy Efficiency 2005.)

3 LÄMMÖNSIIRTO

Lämpö voi siirtyä kolmella tavalla: johtumalla, säteilemällä ja konvektiolla. Lämpö siirtyy johtumisessa kappaleelta toiselle suorassa kontaktissa. Johtumisen merkitys on vähäinen lämmönsiirrossa verrattuna konvektiolla ja säteilyllä siirtyneeseen lämpömäärään lämpökäsittelyuuneissa. Johtuminen on erittäin tärkeä osa lämmön siirtoa, kun halutaan tietää kuinka nopeasti kappaleen sisäosa saavuttaa pinnan lämpötilan. (Kivivuori & Härkönen 2009, 125.)

Yli 800 °C:n lämpötiloissa säteilyn osuus on merkittävä, sillä silloin teräs hehkuu voimakkaan punaisena tai jopa vaaleana (1 200 °C). Konvektio on lämmönsiirtymistä kappaleesta viereiseen väliaineeseen (nesteeseen tai kaasuun) tai päinvastoin. Kuuma virtaava väliaine luovuttaa lämpöä kylmälle pinnalle virratessaan kappaleen ohi. (Kivivuori & Härkönen 2009, 125 - 126.)

3.1 Lämmönsiirron teoria

3.1.1 Lämpösäteily

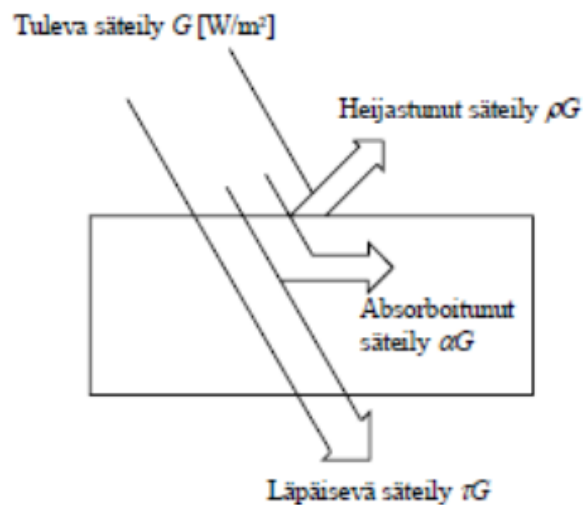
Lämpösäteily on sähkömagneettista aaltoliikettä aivan kuten valo. Tämä eroaa periaatteessa lämmönjohtumisesta, jossa molekyyliäsiiden energia siirtyy värähtelyjen välityksellä, ja konvektiosta, jossa lämpö siirtyy liikkuvan väliaineen mukana. Säteilyyn osallistuvilla sähkömagneettisilla aalloilla voi olla erilainen taajuus (aallonpituus). Lämpösäteilyksi sanotaan säteilyä, jonka aallonpituus $\lambda = 0,8 \dots 400 \mu\text{m}$. Aallonpituuksilla $0,35 \dots 0,75 \mu\text{m}$ säteilyä voidaan aistia myös kappaleen muuttuvana värinä, koska aallonpituudet ovat näkyvän valon asteikolla. Lämpötilan noustessa korkeammaksi säteily tulee näkyväksi ja sen energia kasvaa voimakkaasti. Tosin lämmönsiirron kannalta se on merkittävää alhaisissakin lämpötiloissa. (Wagner 1994, 117.)

Kappaleeseen osuva säteily joko heijastuu siitä, absorboituu (imeytyy) siihen tai menee sen läpi, kuten kuvassa 5 näkyy. Energian säilymisen perusteella heijastuneen, absorboituneen ja läpimenneen säteilyn summan tulee olla yksi (1). (Wagner 1994, 117.)

$$\rho + \alpha + \tau = 1, \quad (1)$$

jossa

- ρ = heijastunut osuus
- α = absorboitunut osuus
- τ = läpimennyt osuus



Kuva 5. Lämpösäteily kappaleeseen

Kiinteät ja nestemäiset kappaleet ovat useimmiten läpäisemättömiä ohuinakin. Läpäisemätön paksuus on metalleilla 1 μm ja nesteillä noin 1 mm. Nestemäisille ja kiinteille kappaleille käytetään kaavaa 2. (Wagner 1994, 117.)

$$\alpha + \rho = 1 \quad (2)$$

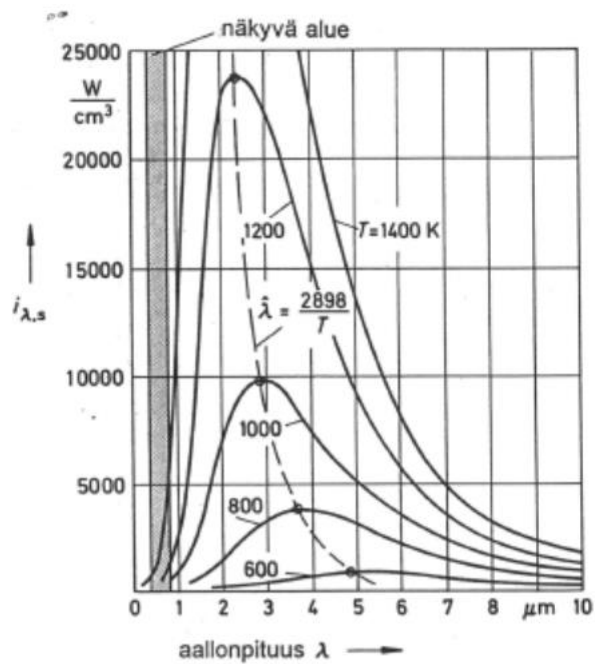
3.1.2 Musta kappale

Mustalla pinnalla tarkoitetaan ideaalista pintaa, jolla on seuraavat ominaisuudet. Musta kappale absorboi ja lähettää suurimman mahdollisen säteily määrän riippumatta säteilyn aallonpituudesta kaikissa lämpötiloissa. Toisin sanoen ollessaan tasapainossa ympäristön kanssa musta kappale emittoi yhtä paljon lämpöenergiaa kuin se absorboi. (Wagner 1994, 117.)

Tietyissä lämpötilassa säteilyn intensiteetti lähestyy nollaa lyhyillä ja pitkillä aallonpituuksilla ja on maksimiarvossa tietyillä aallonpituuksilla (kuva 6). Ideaalisen mustan kappaleen säteilyintensiteettiä kuvaa Stefan – Boltzmannin laki (3), joka on säteilylas-
kujen perusyhtälö. (Jokilaakso 1987, 112.)

$$q = \sigma T^4, \quad (3)$$

jossa q = lämpövirran tiheys [W/m^2]
 σ = Stefan – Boltzmannin vakio [$5,7 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4$]
 T = lämpötila [K].



Kuva 6. Mustan säteily energiajakauma aallonpituuden funktiona (Wagner 1994, 118.)

Säteilyintensiteetti on pienempi todellisella kappaleella kuin mustalla kappaleella. Lämmönsiirtotarkasteluihin riittää kuitenkin yleensä, kun kappaletta pidetään harmaana. Mustan ja harmaan kappaleen säteilytehot (4) poikkeavat toisistaan emissiivisyyskertoimella ε , jolloin harmaan kappaleen säteilee aina vähemmän kuin musta kappale. (Jokilaakso 1987, 114.) Taulukossa 2 on lämpösäteilyyn liittyviä kappaleen nimityksiä (Wagner 1994, 117).

$$W = \varepsilon W_b = \varepsilon \sigma T^4, \quad (4)$$

jossa

W = säteilyteho [W/m^2]

W_b = teknisen kappaleen säteilyteho [W/m^2]

ε = emissiivisyys

σ = Stefan – Boltzmannin vakio [$5,7 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4$]

T = systeemin lämpötila [K].

Taulukko 2. Lämpösäteilyyn liittyviä kappaleen nimityksiä (Wagner 1994, 117.)

Nimitys	Kappaleen ominaisuus
Musta	Imee kaiken siihen osuvan säteilyn ($\alpha = \varepsilon = 1$)
Valkoinen	Heijastaa kaiken säteilyn
Harmaa	Imee kaikista aallonpituuksista saman osuuden ($\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda$)
Värillinen	Heijastaa säteilyn osuessa tiettyjä aallonpituuksia paremmin (vastaten ”väriään”)
Heijastava	Heijastaa kaiken tulevan säteilyn pintanormaaliin nähden samassa kulmassa
Himmeä (matta)	Heijastaa tulevan säteilyn kaikkiin suuntiin

3.1.3 Emissiivisyys

Todellinen pinta lähettää säteilyä samassa lämpötilassa vähemmän kuin musta kappale. Tämän suhteen nimi on emissiivisyys ε . (Wagner 1994, 117.)

Kappaleen emissiviteetti on yhtä suuri kuin sen absorbtiviteetti, kun sen lämpötila on sama kuin ympäristön. Yleisesti, lukuun ottamatta mustia ja harmaita kappaleita, kappaleen absorbtiviteetti ja emissiviteetti eivät ole yhtä suuria, elleivät ne ole termisessä tasapinossa ympäristön kanssa. (Jokilaakso 1987, 114.)

Säteilylaskuja voidaan käytännössä huomattavasti yksinkertaistaa käyttämällä Kirchhoffin lakia. Kirchhoffin lain mukaisesti kappaleen emissiviteetti on samansuuruinen kuin sen absorbtiviteetti, kun sen lämpötila on sama kuin ympäristön (5). (Jokilaakso 1987, 114.)

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda \quad (5)$$

Todellisen kappaleen emittoima säteilyteho on täten kaavan (6) mukainen. On syytä huomioida, että ε riippuu huomattavasti lämpötilasta. Kun todellinen kappale emittoi ympäristöönsä kaavan (6) mukaisen säteilytehon, sen täytyy myös absorboida ympäristöstä yhtä suuri säteilyteho. (Inkinen & Tuohi 2006, 419 - 420.)

$$P = \varepsilon\sigma AT^4, \quad (6)$$

jossa P = todellisen kappaleen emittoima säteilyteho [W/m^2]
 ε = kappaleen emissiivisyys
 σ = Stefan – Boltzmannin vakio [$5,7 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$]
 A = on kappaleen pinta-ala [m^2]
 T = lämpötila [T].

3.1.4 Kaasujen säteily

Kiinteät aineet emittoivat säteilyä kaikilla aallonpituuksilla, mutta kaasut emittoivat ja absorboivat vain kapeilla aallonpituusalueilla, joita kutsutaan nauhoiksi. Kaasut säteilevät lähes koko tilavuudella, ja ne läpäisevät suurimman osan aallonpituuksia. Poikkeuksia ovat yksi- ja kaksiatomiset kaasut, kuten H_2 , O_2 , N_2 ja He, jotka ovat symmetrisiä, eivätkä sen vuoksi absorboi eivätkä emittoi lämpösäteilyä käytännöllisesti katsoen lainkaan; ne ovat myös käytännössä sille läpinäkyviä. Mikäli palamistuotteissa on epäsymmetrisiä kaasumolekyylejä, kuten CO_2 , H_2O , CO , CH_4 ja NH_3 , ne osallistuvat voimakkaasti lämpösäteilyyn absorboiden ja emittoiden sitä. (Jokilaakso 1987, 119.)

Kaasun emittoima säteily pinta-alayksikköä kohti mustalle pinnalle voidaan laskea yhtälöllä (7):

$$q = \varepsilon_g \sigma T^4, \quad (7)$$

jossa ε_g = kaasun emissiviteetti
 σ = Stefan – Boltzmannin vakio [$5,7 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$]
 T = lämpötila [K].

Hiilidioksidilla ε_g riippuu kaasun lämpötilasta, kaasun kokonaispaineesta sekä hiilidioksidin osapaineen ja efektiivisen kerrospaksuuden tulosta (Jokilaakso 1987, 119 - 120).

Säteilylämmönvaihto on seuraavanlainen kaasun ja ympäröivän pinnan välillä. Kun ympäröivä pinta on harmaa, se heijastaa osan säteilystä takaisin. Pinnoilla, joille $\varepsilon \geq 0,7$, voidaan käyttää yhtälöä (8):

$$q = \sigma \frac{1}{2} (\varepsilon_1 + 1) [\varepsilon_g T_g^4 - \alpha_{g1} T_1^4], \quad (8)$$

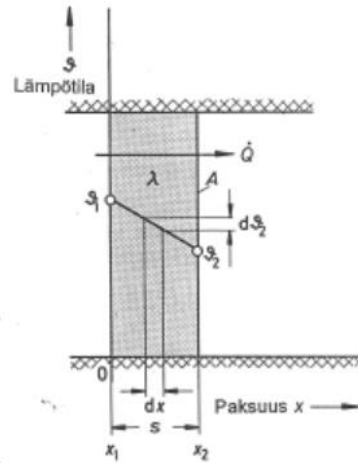
jossa σ = Stefan – Boltzmannin vakio [$5,7 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$]
 ε_1 = pinnan emissiviteetti
 ε_g = kaasun emissiviteetti
 T_g = kaasun lämpötila
 α_{g1} = kaasun absorbtiviteetti
 T_1 = harmaan pinnan lämpötila. (Jokilaakso 1987, 122.)

3.1.5 Lämmönjohtuminen

Lämpötilaeron aiheuttama lämmönjohtuminen tapahtuu kiinteissä aineissa, nesteessä tai kaasussa molekyylien välittämänä. Lämmönjohtuminen on molekyylien välien ilmiö. Lämpöliikkeen kineettinen energia siirtyy molekyylistä toiseen. Tavallisin stationaarisen johtumisen tapaus on tekniikassa lämmönkuljetuksen jatkuva ylläpito tuomalla lämpöä lisää, esimerkiksi lämmönsiirtimissä. Kiinteän kappaleen poikkileikkauksen A läpi virtaa (kuva 7) stationaaristilassa ajassa t lämpömäärä Q . Tämä on Fourierin laki (9). (Wagner 1994, 15.)

$$Q = -\lambda A t \left(\frac{dg}{dx} \right), \quad (9)$$

jossa Q = lämpömäärä [kJ]
 λ = lämmön johtavuus [$\text{W}/^\circ\text{Cm}$]
 dg = lämpötilagradientti [$^\circ\text{C}$]
 dx = etäisyys [m] (Wagner 1994, 15).



Kuva 7. Lämmön johtuminen tasomaisen tasapaksun seinän lävitse (Wagner 1994, 15.)

Lämpö johtuu metalleissa molekyylien värähtelyjen välityksellä, kuten kiinteissä aineissa yleensä, mutta sen lisäksi vielä elektronien välityksellä, jolloin lämmönjohtavuus kasvaa. Kaikki elektronit eivät ole sidottuina paikalleen metalleissa, vaan ne vaeltavat kidehilan väleissä samaan tapaan kuin kaasumolekyylit. Siksi sähköä johtavien aineiden lämmönjohtavuudet ovat merkittävästi suuremmat kuin eristeiden. (Wagner 1994, 16.)

3.1.6 Kiinteiden aineiden lämmönjohtavuus

Kiinteässä materiaalissa lämpöliikkeeseen sisältyvät atomivärähtelyt etenevät siirtäen energiaa eli johtaen lämpöä. Sähköjohteissa ja metalleissa on vapaita elektroneja, joiden lämpöliike aiheuttaa myös lämmönjohtumista. Kidevirheet häiritsevät vapaiden elektronien liikettä. Tällaisia kidevirheitä ovat esimerkiksi kidehilan väärät atomit, joiden puhtaat metallit johtavat paremmin lämpöä kuin metalliseokset. Materiaalin lämpötilalla on vaikutus lämmönjohtavuuteen. Kuitenkin usein lämpötilariippuvuus on melko pientä, joten laskuissa yleensä voidaan käyttää keskimääräisiä lämmönjohtavuusarvoja. Lämmönjohtavuus voi muuttua myös paikan funktiona epähomogeenisissa materiaaleissa, eli lämmönjohtavuuslaskut voivat tulla varsin hankaliksi. (Hemmilä & Utriainen 1991, 136 - 137.)

3.1.7 Lämmönsiirto konvektiolla

Konvektiivisessa lämmönvaihdossa lämmönsiirto tapahtuu siten, että liikkuva väliaine, kaasu tai neste, kuljettaa mukanaan lämpöä. Tämä siirtyy osaksi sekoittumalla,

osaksi johtamalla kappaleen pintafilmiin, josta lämpö johtuu kappaleen pintaan. Konvektiolla tarkoitetaan lämmönsiirtoa väliaineen makropartikkelien välityksellä, kun taas johtuminen oli seurausta mikropartikkelien liikkeestä. (Jokilaakso 1987, 97.)

Konvektio voi olla pakotettu tai vapaa. Pakotetussa konvektiossa väliaineen liike aiheutuu ulkoisen voiman avulla esim. pumpun tai puhaltimen avulla. Vapaassa konvektiossa kaasun tiheys pienenee lämpötilan kasvaessa, minkä vuoksi lämmennyt kaasu alkaa virrata ylös ja tilalle tulee kylmempää ja painavampaa kaasua. Näin syntyy stationäärinen virtaus, ellei lämpötilaa muuteta. (Jokilaakso 1987, 97.)

3.1.8 Lämmönsiirto valukappaleeseen

Lämpö siirtyy valukappaleeseen pääosin neljällä eri periaatteella.

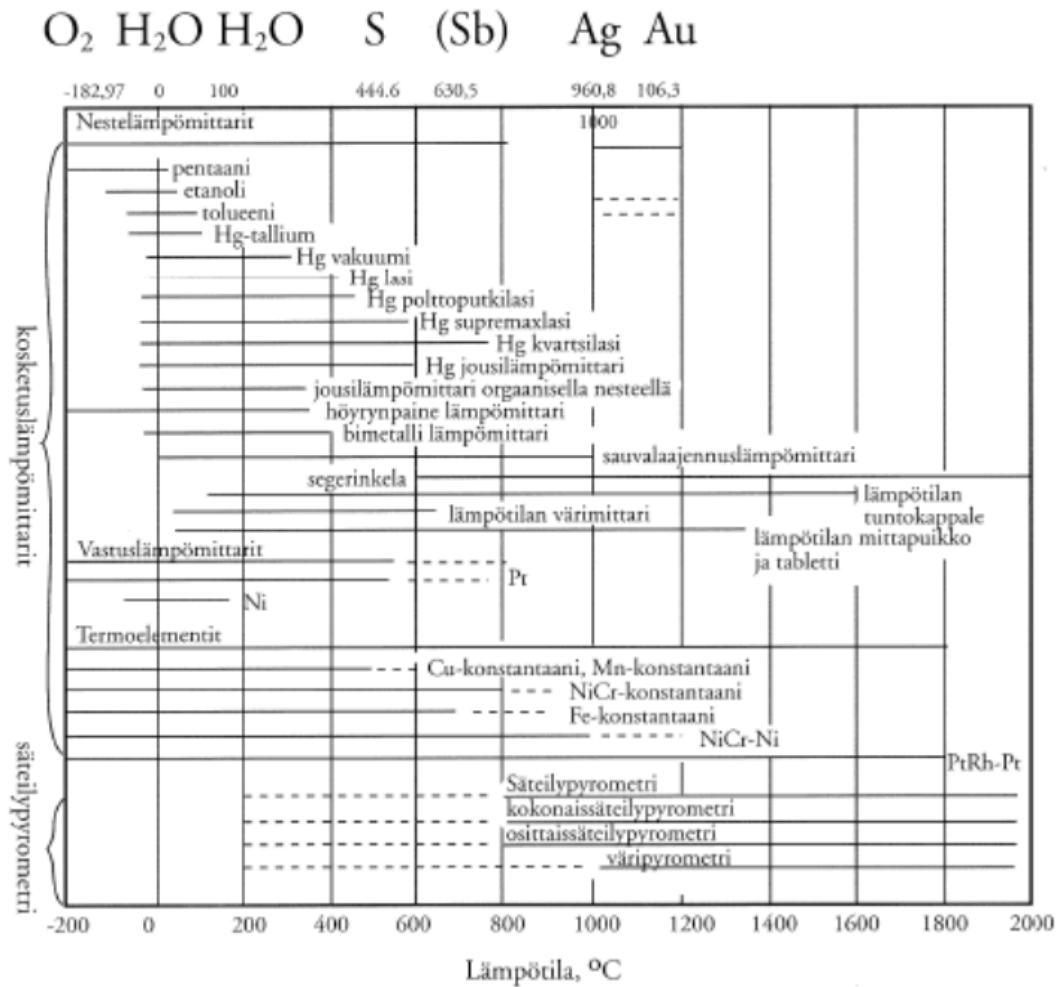
- Säteilyllä liekistä, kuumista palamistuotteista, seinistä ja katosta
- Konvektiolla kuumista kaasuista
- Palamislämpö (vapautuva lämpömäärä) riippuu palavasta aineesta
- Palamisessa syntyvä lämpötila riippuu myös palamisnopeudesta ja lämmitettävistä aineista (esim. poltetaanko ilmalla/hapella) (Heikkinen 2013, 6 - 8.)

Kun lämpövirran määrä ja lämpötila muuttuu ajan mukana missä tahansa systeemin pisteessä, kutsutaan tilannetta epästationääriseksi (epäjatkuvaa, transientti). Tähän luokkaan kuuluvat seuraavat teolliset lämpökäsittelyprosessit; valukappaleiden lämpökäsittely, teelmien jäädytys, tiilien poltto ja kumin vulkanointi. (Jokilaakso 1987, 134.) En käsittele tätä asiaa enempää, koska valukappaleilla lämpökäsittelyn pitoaika (+ tasaantumisaika) määräytyvät eri tavoin kuin valssatuilla materiaaleilla. Varma ja paljon käytetty on amerikkalainen tuuma ja tunti -periaate. Tällöin pitoaika on tunti jokaista kappaleen paksuuden tuumaa kohti. (Sulzerin sisäiset lämpökäsittelyohjeet 2012)

3.2 Lämpötilanmittaus ja säätö

Lämpökäsittelyn lämpötilansäädön tarkoituksena on taata mahdollisimman tarkka ja hyvin hallittu lämpötila uunitilassa. Noin 5...10 C-asteen lämpötilaerot eivät ole haitallisia, eivätkä aiheuta merkittävää hajontaa lämpökäsittelyn tuloksissa. Sallitut lämpötilapoikkeamat ovat varsin pieniä, joten lämpötilan säätöihin ja mittauksiin on syytä

kiinnittää erityistä huomiota. Kuvassa 8 esitetään yleisempien lämpömittareiden käyttöalueet. (Kivivuori & Härkönen 2009, 242.)



Kuva 8. Yleisempien lämpömittareiden käyttöalueet (Kivivuori & Härkönen 2009, 242.)

Erilaiset epävarmuustekijät heikentävät mittaustulosten luotettavuutta. Ennen mittauksien aloittamista on syytä varmistaa, vastaako anturin viesti uunin lämpötilaa ja onko anturi oikeassa kohdassa uunissa. Käytettäessä termoelementtiä on hyvä tarkistaa, että jatkojohdot on kytketty oikein ja ettei termoelementti ole ryöminyt likaa. Termoelementit on kalibroitava säännöllisin väliajoin (vähintään 12 kk:n välein) ja tarkistettava vielä 6 kk:n välein. Toiseksi lämpötilan tasaisuutta uunitilassa on valvottava. Taulukossa 3 on lämpötilan tasaisuusmittausten sallitut poikkeamat ja koestuslämpötilat. (Kivivuori & Härkönen 2009, 242.)

Taulukko 3. Lämpötilan tasaisuusmittausten sallitut poikkeamat ja koestuslämpötilat (Kivivuori & Härkönen 2009, 244.)

Uunityyppi	Sallittu poikkeama $\pm^{\circ}\text{C}$	Koestuslämpötila $^{\circ}\text{C}$
Yleisuunit	10	575, 850, 950
Kaasukehittimet	10	1 000
Kammiouunit	10	800, 900
Kuoppauunit	10	800, 950
Päästöuunit	5	200, 550
Esikuumennusuunit	15	400
Vaihekarkaisukylpy	10	180, 550
Tyhjäuuni	10	800, 1 000, 1 200
Tyhjäuuni	10	550

3.3 Termoelementit

Termoelementtien toiminta perustuu Seebeckin ilmiöön. Termopari muodostuu kahdesta termolangasta, jotka on toisesta päästä liitetty yhteen. Periaatteessa termoelementti voi olla valmistettu mistä tahansa sähköjohtavasta aineparista. Lämmitettäessä kahden erilaisen johtimen liitoskohtaa syntyy johtimiin jännite-ero, jota kutsutaan elektromotoriseksi voimaksi. Lämmitetyn mittauskohdan ja kylmän referenssipään lämpötilaeron kasvaessa kasvaa elektromotorinen voima (emv). Elektromotorisen voiman suuruuteen vaikuttaa myös liitetyt metallit. Mittauskohdan lämpötila saadaan selville mittaamalla em. lämpötilaeron aiheuttama elektromotorinen voima millivolttimittarilla. Mitattuun lukemaan lisätään referenssikohdan ja ko. termoelementtityypille laaditun emv-lämpötilataulukon nollakohtan (lämpötila, jossa elektromotorinen voima on nolla) välinen jännite-ero. Matemaattisen kaavan avulla voidaan laskea mittauskohdan lämpötila. Yleensä emv-lämpötilataulukoiden nollakohta on 0°C . Termoelementeissä käytössä olevat metallit on jaettu kahteen ryhmään. Taulukossa 4 on esitetty tavallisemmat termoparit. Positiivinen johdin on merkitty ensimmäiseksi. (Kivivuori & Härkönen 2009, 243.)

- Epäjalot metallit ja niiden seokset, joista käyttökelpoisimmat metallit ovat Cu, CuNi, Fe, NiCr, NiAl.

- Jalometallit ja niiden seokset, joista käyttökelpoisimmat metallit ovat Pt, PtRh 10 %, PtRh 13 %, PtRh 30 %, PtRh 6 %, PtRh 5 % eli Pallaplat+. (Kivivuori & Härkönen 2009, 243.)

Taulukko 4. Termoparit ja niiden käyttölämpötilat (Kivivuori & Härkönen 2009, 244.)

ISA-koodi	Termopari	Korkein jatkuva käyttölämpötila	Korkein hetkellinen lämpötila	Huom.
T	Kupari-konstantaani (60 % Cu+ 40 % Ni)	400 °C	530 °C	Termolangat eivät ruostu
J	Rauta-konstantaani (60 % Cu+ 40 % Ni)	700 °C	980 °C	DIN ja ANSI-standardit eroavat n 2 %
K	Chromel (90 % Ni + 10 % Cr) – alumel (94 % Ni + 2 % Al + 3 % Mn + 1 % Si (kutsutaan myös CrNi-Ni tai CrNi-NiAl termolementiksi	1 000 °C	1 260 °C	Chromel-alumel (yh-dysvalloissa), NiCr-Ni (Saksassa)
N	Nicrosil (Ni, Cr, Si, Mg) / NiSi (Ni Si, Mg)	1 200 °C	1 300 °C	Vanheneminen huomattavaa yli 1 550 °C lämpötiloissa
S	10 Platina-rhodium (90 % Pt + 10 % Rh) – platina	1 400 °C	1 650 °C	Vanheneminen huomattavaa yli 1 550 °C lämpötiloissa
R	13 Platina-rhodium (87 % Pt + 30 % Rh) – platina (94 % Pt + 10 Cr)	1 400 °C	1 650 °C	Antaa suuren millivolttituoton
	Rhodium 18 (70 % Pt + 30 % Rh) – platina (94 % Pt + 6 % Rh)	1 500 °C	1 800 °C	Ei tarvitse vertailupisteen kompensointia
E	Konstantaani (60 % Cu+ 40 % Ni) – chomel (90 % Ni + 10 % Cr)	800 °C	1 000 °C	Rinnakkainen K – tyypille, stabiilimpi

Jaloilla metalleilla on huomattavasti korkeampi sulamispiste sekä parempi hapettumiskestävyys ja parempi mittatarkkuus verraten epäjaloihin metalleihin. Hapettavissa tai inerteissä atmosfääreissä tai myös pelkistävässä atmosfääreissä ja tyhjässä käytetään platina-rhodium-termoelementtejä silloin, kun elementtiä suojaavissa keraamisissa suojakuurissa ei ole piidioksidia. Termoelementit on suojattava hyvin kaksireikäisellä, mieluummin rekristallisoidusta alumiinioksidista valmistetulla eristimillä, pois lukien mittauskohta, sillä rhodium saattaa höyrystyä puhtaan platinan pinnalle muuttuen elementin termomekaanisia ominaisuuksia. (Kivivuori & Härkönen 2009, 245.)

Yleisimmin käytetyt termoelementit ovat chromel-alumel-elementti (K-tyyppin elementti). Elementtiä voidaan käyttää myös korkeissa lämpötiloissa, ellei atmosfääri ole pelkistävä. Rikki, vety ja hiilidioksidi tuhoavat sen pinnan yli 1 000 °C:n lämpötilassa. Uusimpina elementteinä on tullut käyttöön N-tyyppin elementti (NiCrSi/NiSi). Tämän elementin pitkäaikainen stabiilisuus on parempi kuin K-tyyppin termoelementtien. (Kivivuori & Härkönen 2009, 245.)

ISA-järjestön (The Instrument Society of America) suositukset termoelementtityypeiksi S, R, J, T, K ja E ovat väljät. Termoelementtien valmistajien analyysit saattavat poiketa edellä esitetyistä analyyseistä, mutta elektromotoriset voimat ovat eri valmistajilla lähelle toisiaan. (Kivivuori & Härkönen 2009, 245.)

Termopari täytyy eristää, mittauskohdasta lukuun ottamatta, keraamisella eristeellä. Usein myös termoelementti suojataan uuniatmosfääriltä suojaputkella. (Kivivuori & Härkönen 2009, 246.)

Termoelementin pidennysjohto tai jatkojohto (extension cables) valmistetaan samasta materiaalista kuin termoelementti. Kaapeli merkitään anturin tyyppimerkinnän jälkeen kirjaimella ”X” esimerkiksi ”KX”. Värimerkinnät ovat olleet hyvin sekavia, ja eri standardien mukaiset värikoodit ja niistä johtuvat virheelliset kytkennät ovat aiheuttaneet suurimmat termoelementtimittauksissa tapahtuneet virheet. (Sarlin 2013.)

- Punainen johdin on ollut suurin virheiden aiheuttaja asennuksissa, koska eri standardeissa punaisen johtimen napaisuus on ollut eripäin.
- IEC-584-3 -standardissa ei punaista väriä esiinny ollenkaan, ja negatiivisen (-) johtimen väri on aina valkoinen.

Kompensointikaapeli (compensating cable) valmistetaan eri materiaalista kuin termoelementti, mutta se antaa termoelementtiä vastaavan jännitteen alhaisissa lämpötiloissa. Kaapelia merkitään anturin tyyppimerkinnän jälkeen kirjaimella ”C” esimerkiksi ”KC”. Samalle termoelementtityypille voidaan valmistaa erilaisilla seoksilla olevaa kaapelia, ja ne merkitään lisäkirjaimella, esimerkiksi ”KCA” ja ”KCB”. Aikaisemmin kompensointikaapelista käytettiin nimitystä tasausjohto. Tasausjohtonimitys tulee ajalta, jolloin käytettiin kiertokäämi-instrumentteja. Niiden mittaussiirin linjavastuksen arvo oli tiedossa, ja kaapelia käytettiin tasaamaan mittaussiirin vastus oikeaksi. (Sarlin 2013.)

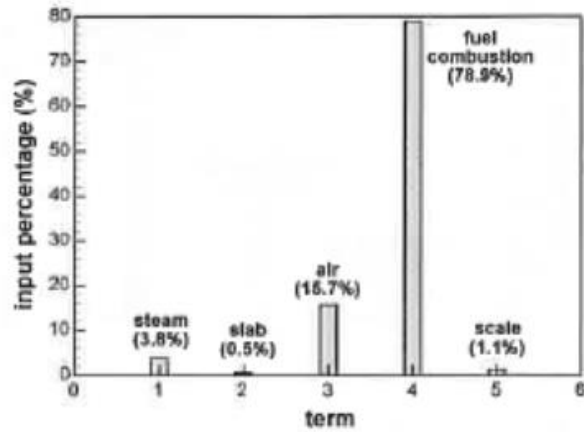
Erityisen tärkeää on tarkistaa termoelementit säännöllisin väliajoin. Tarkistus suoritetaan mittauspaikalla tavallisissa käyttöolosuhteissa vertailemalla uunin anturin antamaa tulosta vertailuanturin tulokseen. Vertailuanturia käytetään vain vertailumittauksiin. Mikäli vertailuanturin lukema poikkeaa uunin oman anturin lukemasta, vika saattaa olla missä tahansa mittauslaitteen osassa. Asia voidaan tarkistaa asettamalla alkuperäinen lankapari paikoilleen ja mittaamalla sen elektromotorinen voima potentiometrillä. Mittaustuloksen perusteella voidaan päätellä, onko vika siinä vai muualla mittausketjussa. (Kivivuori & Härkönen 2009, 256.)

4 UUNIEN ENERGIATALOUS

Lämpökäsittelyuunit luokitellaan kahteen päätyyppiin lämmitysmenetelmän perusteella: polttouunit, jotka käyttävät polttoainetta, ja sähköuunit, jotka käyttävät sähköä. (Bureau of Energy Efficiency 2005). Energian kulutuksen hallinta on hyödyllistä sekä taloudellisesti että ympäristön kestävä kehityksen kannalta. Valukappaleiden lämpötilan nosto liuotushehkuslämpötilaan pitää tehdä minimaalisilla energiakustannuksilla ja niin nopeasti kuin mahdollista, ottaen huomioon materiaalin ja kappaleen muodon aiheuttamat rajoitukset. Mikäli valukappaleen lämpötilan nostoaikaa pidennetään aiheuttomasti, läpimenoaika uunissa pitenee ja energian kulutus kasvaa. Pidennetty lämpökäsittelyaika alentaa tuotannon tehokkuutta. (Chen, Chung & Liu 2005.)

4.1 Energia sisään

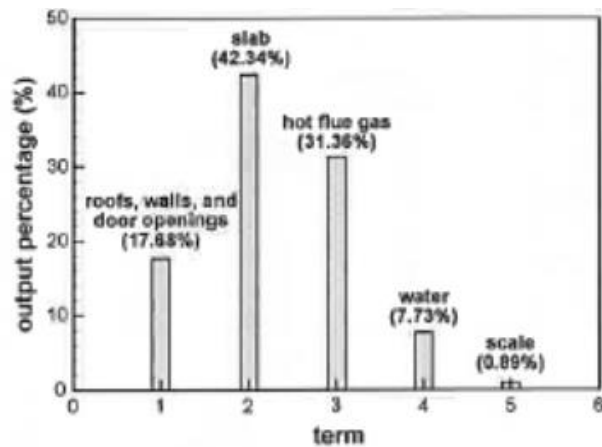
Polttoaineen palamisesta saadaan 78,9 % terästeollisuudessa käytettyjen aihoiden kuumennusuunin energiasta ja 15,7 % rekuperaattorilla esilämmitetystä polttoilmasta. Rekuperatiivisessa poltinjärjestelmässä palokaasut ja kuumennettava polttoilma johdetaan rekuperaattorin lävitse. Nämä erotetaan toisistaan hyvin lämpöä johtavalla väliseinällä. Lämpö siirtyy tehokkaasti palokaasuista polttoilmaan. (Autere, Ingman & Tennillä 1986.) Jäljelle jäävä energia saadaan polttoaineen atomisointiin käytetystä höyrystä, aihion mukana tulevasta lämmöstä ja hilseen muodostumisesta. Kuvassa 9 nähdään uunin sisään menevät energiat. Kuvaaja ei kerro suoranaisesti Sulzerin lämpökäsittelyuunien energiantuontia uuniin, mutta prosentit toimivat suuntaa antavina. (Chen, Chung & Liu 2005.)



Kuva 9. Uunin sisään menevien energioiden prosentuaalinen osuus

4.2 Energia ulos

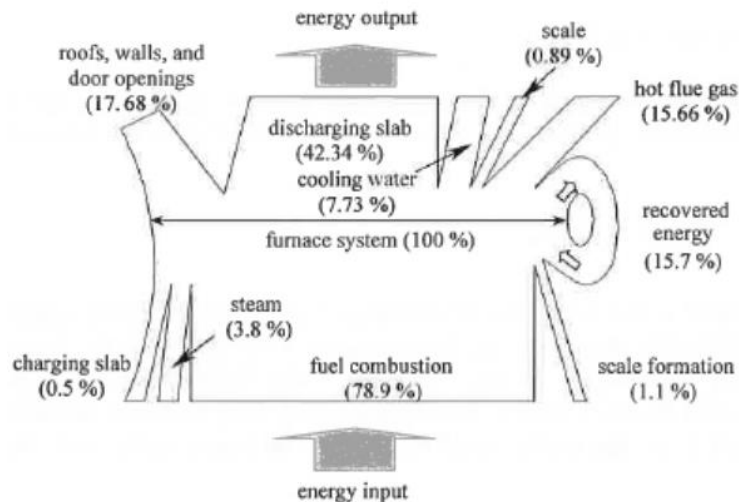
Kuvassa 10 esitetään kuumennusuunien energioiden ulosvirtaukset. Uunin energiasta suurin osa menee aihioihin 42,34 % ja kuumiin savukaasuihin 31,36 %, yhteensä 73,7 %. Panosluukkujen aukaisuihin ja vuorauksiin menevät lämpöhäviöt ovat 17,7 %. Viimeisenä tulevat vesijäähdytys ja hilseen muodostuminen. (Chen, Chung & Liu 2005.)



Kuva 10. Uunista ulostulevien energioiden prosentuaalinen osuus (Chen, Chung & Liu 2005.)

4.3 Energioiden kokonaistase

Kokonaisenergiatase on laadittu tutkimalla kuumavalssaamoa, jossa on kaksi aihionkuumennusuunia, joiden kapasiteetti on 250 t / h. Polttoaineena käytettiin öljyä, joka palaa noin 1 300 °C:ssa. Kuva 11 esittää uunin kokonaisenergiataseen.



Kuva 11. Uunin kokonaisenergiatase (Chen, Chung & Liu 2005.)

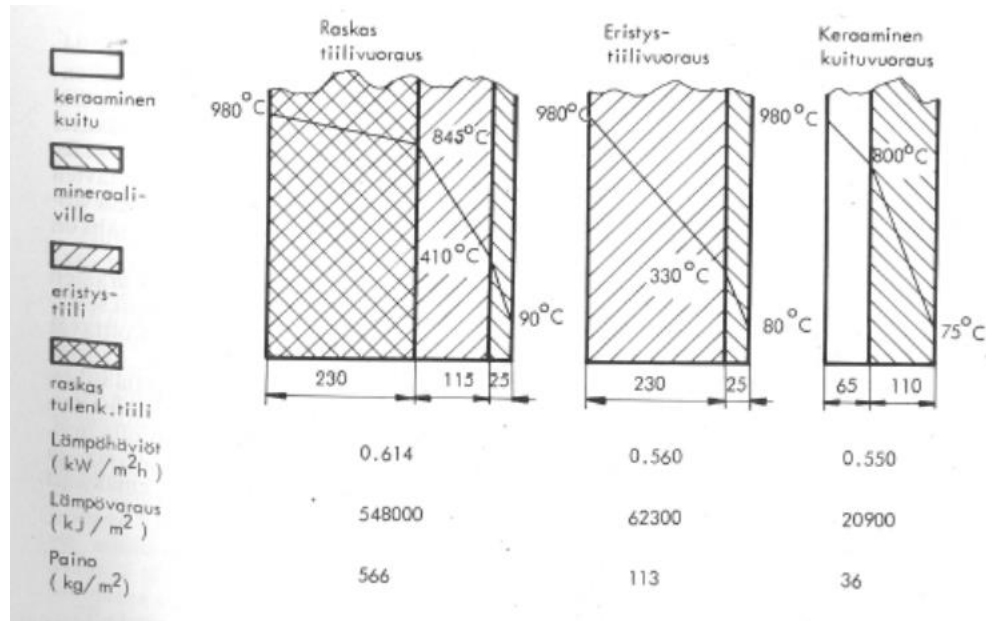
5 TULENKESTÄVÄT MATERIAALIT LÄMPÖKÄSITTELYUUNEISSA

5.1 Lämpökäsittelyuunien tulenkestävät materiaalit

Tulenkestävät materiaalit ovat tavallisesti ainesoksia. Niillä ei siksi ole sulamispistettä vaan sulamisalue. Sulamista edeltää pehmeneminen, jolloin niiden kyky kantaa kuormitusta pienenee asteittain. (Autere, Ingman & Tennilä 1982, 88.)

Perinteisiä tulenkestäviä uunien vuorausmateriaaleja ovat mm. shamotti- ja aloksitiilet sekä vastaavat valettavat ja sullottavat massat. Näiden rinnalle on viimeaikoina valmistettu tulenkestäviä keraamisia kuituaineita alumiinioksidista, alumiinisilikaatista, kaoliinista ja sirconioksidista. Kuidut ovat monirakeisia, halkaisijaltaan muutaman mikrometrin ja pituudeltaan 2 ...20 cm:ä Kuitumateriaaleista voidaan puristaa mitä monimuotoisimpia kappaleita. Tavallisemmin käytettyjä ovat kuitumatot, -levyt ja -villa. (Autere, Ingman & Tennilä 1982, 97.)

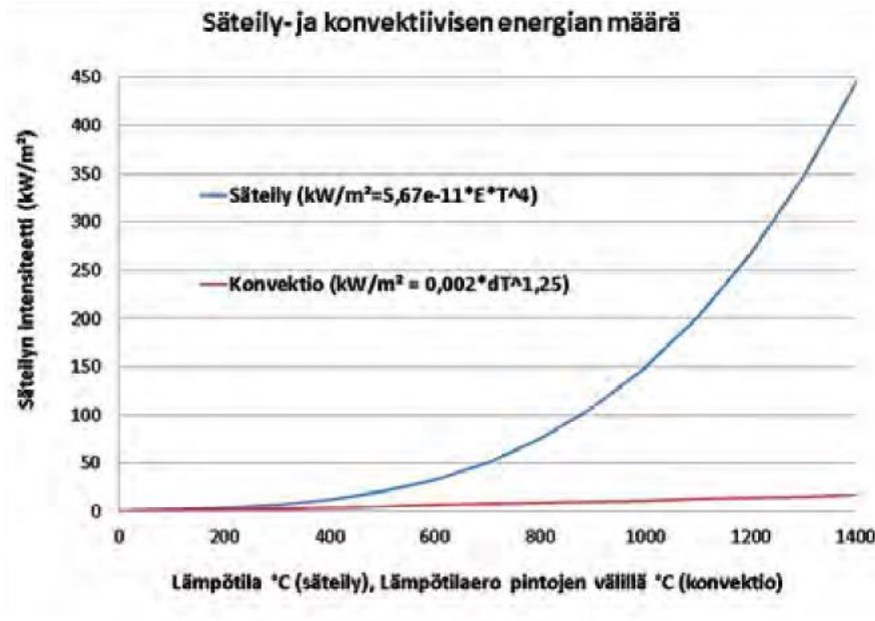
Kuitumateriaalien etuja muihin tulenkestäviin materiaaleihin nähden ovat hyvä lämmöneristys, hyvin pieni ominaispaino ja pieni ominaislämpö. Ne ovat tunteettomia lämpösokeille ja hyvin taivutettavia, mutta ne voidaan sitoa myös kovaksi. Kuitumateriaaleja on helppo työstää. Kuvassa 12 on vertaileva esitys erilaisten tulenkestävien aineiden painosta ja paksuudesta uunin seinämissä, joiden lämpöhäviöt ovat suunnilleen samansuuruiset. (Autere, Ingman & Tennilä 1982, 98.)



Kuva 12. Vertaileva esitys erilaisten tulenkestävien aineiden painosta ja paksuudesta uunin seinämissä, joiden lämpöhäviöt ovat suunnilleen samansuuruiset (Autere, Ingman & Tennilä 1982, 98)

5.2 Vuorausmateriaalien pinnoittaminen

Ensimmäiset maininnat emissiivisyyttä muokkaavien pinnoitteiden käytöstä ovat jo 60-luvulta. Pinnoitteiden havaittiin alentavan energiankulutusta ja suojaavan vuorauksia erityisesti keramiikan poltossa. Vuorausmateriaalien pinnoitteita käytetään korkeiden lämpötilojen sovelluksissa parantamaan lämmönsiirtoa lämpösäteilyllä. Kuvassa 13 esitetään, että lämpötilan noustessa säteilyenergia osuus on huomattava konvekttiiviseen energiaan nähden. (Vasankari & Vapalahti 2011, 52.)



Kuva13. Säteilylämmön määrä konvektiivisen lämpöön verrattuna lämpötilan mukaan (Vasankari & Vapalahti 2011, 52.)

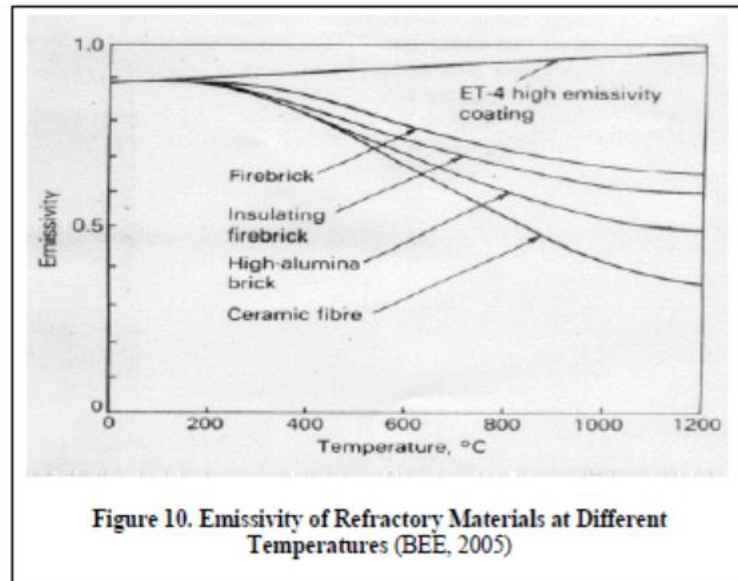
Pinnoitteet muodostuvat kolmesta pääkomponentista, jotka ovat runko-, emissiivisyys- ja sidosaine (Vasankari & Vapalahti 2011, 52).

Runkoaineena käytetään tulenkestäviä materiaaleja kuten pii- ja alumiinioksiedeja tai alumiini- ja zirkonniasilikaattia. Emissiivisyyttä muokataan transitiometallien oksideilla, jotka ovat Cr_2O_3 , SiC , CoO_2 , FeO_3 , NiO , CeO_2 ja ZrO_2 . Kuivumis- ja tarttumisominaisuudet määritellään sidosaineiden avulla. Yleisemmin käytetään vesipohjaista liuosta, silikaatti- tai fosfaattisuspensiota, joka sitoutuu pintaan maalin tavoin. *Keraamisten pintojen tapauksessa korkeat lämpötilat johtavat lopulta keraamissidoksiin pinnoitteen ja pinnan välillä ja metallien tapauksessa kiinnittyminen voi tapahtua diffuusiorajapintana.* (Vasankari & Vapalahti 2011, 52.) Pinnoitetta sivelemällä tai ruiskuttamalla levitetään erittäin ohut 10 μm – 1,5 mm kerros. Korkean lämpötilan pinnoitteista on tieteellisiä julkaisuja erittäin vähän, ja saatavilla olevien kaupallisten pinnoitteiden analyysit ovat salaisia. (Vasankari & Vapalahti 2011, 52.)

5.2.1 Emissiiviset pinnoitteet

Kuvassa 14 esitetään eristysmateriaalien emissiivisyysarvoja. Tulenkestävien materiaalien alhaisen 0,4 emissiivisyyden vuoksi palamiskaasujen emittoima ”nauhamainen” säteily heijastuu suurimaksi osaksi uunin seinän pinnasta aallonpituusjakauman pysyessä muuttumattomana. Nauhamainen muuttumaton säteily absorboituu uudestaan

kaasun nauhamaiseen spektriin, jolloin aihioihin osuva säteilyteho laskee. (Dipen, Chauhan, Misra & Shukla 2012.)



Kuva 14. Tyypillisiä eristysmateriaalien emissiivisyyssarvoja (Bureau of Energy Efficiency 2005.)

Uunin eristeessä oleva ohut pinnoitekalvo parantaa eristeen korkean lämmön emissiivisyyttä, jopa välille 0,85 – 0,95. Suurempi emissiivisyys pienentää uunin seinästä heijastuneen säteilyn määrää. Heijastuvan säteilymäärän pienentyessä uunin seinään absorboituneen ja emittoituneen säteilyn määrä kasvaa. Toiseksi emittoitunut säteily jakaantuu koko aallonpituusalueelle heijastuneesta säteilystä poiketen. Toisin sanoin kaasun laajentunut aallonpituusjakauma tasoittuu ja säteilyenergia jakaantuu isommalle aallonpituusalueelle. Laajentuneen aallonpituusalueen ansiosta suurempi osa seinien säteilystä kohtaa lämmitettävät kappaleet, koska uuni atmosfäärissä virtaavat kaasut eivät absorboi säteilyn laajentunutta aluetta. (Dipen, Chauhan, Misra & Shukla 2012, 2 - 4.)

5.2.2 Heijastavat pinnoitteet

Eristeen pinta lämpenee säteilyn vaikutuksesta vain muutaman mikrometrin syvyydeltä, jonka jälkeen lämpö siirtyy johtumalla. Tämä aiheuttaa eristeen pintoihin suuria lämpötilagradientteja, jotka tuhoavat eristeen pintaa. Heijastuvuus suojaa uunin eristeitä suurilta lämpötilan vaihteluilta estäen lämmön johtumasta rakenteeseen. Heijas-

tavien pinnoitteiden tarkoitus on pienentää eristeen emissiivisyyttä, joten eristeen lämpösäteilyn määrä kasvaa ja absorboituneen säteilyn määrä pienenee. Heijastavat pinnoitteet pienentävät seinän lävitse häviävää lämpöhukkaa heijastamalla suuren osan lämpösäteilystä takaisin uunin. (Vasankari & Vapalahti 2011, 52.)

5.3 Sulzerin lämpökäsittelyuunien tulenkestävät materiaali

Taulukossa 5 esitetään eri kuitueristeiden jatkuvat suositellut käyttölämpötilat rakenneanalyysin mukaan. Sulzerin valimon lämpökäsittelyuuneissa käytetään Unifraxin valmistamia Durablanket S-keräämisiä kuitueristeitä. Taulukossa 6 esitetään Unifraxin tuotteiden tyypilliset ominaisuudet. Koeuunissa on 200 mm paksu eristys seinissä, ovenssa ja katossa. Arina on muurattu shamottitiilistä, ja sen paksuus on 350 mm. Shamottitiilien päälle on vielä asennettu 25 mm:n keraaminen kuitueriste. (Unifrax 2009.)

Taulukko 5. Jatkuva suositeltu käyttölämpötila kuitueristeille ja niiden analyysi (Unifrax 2009.)

Käyttölämpötila (°C)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	ZrO ₂ (%)
1 150	43 – 47	53 – 57	-
1 250	52 – 56	44 – 48	-
1 325	33 – 35	37 – 50	17 – 20

Taulukko 6. Unifrax-tuotteiden tyypilliset ominaisuudet (Unifrax 2009.)

Typical Product Properties

	Duraback	Durablanket S	Durablanket HP-S	Durablanket 2600
Color	White	White	White	White
Temperature Grade*	982°C (1800°F)	1260°C (2300°F)	1316°C (2400°F)	1430°C (2600°F)
Recommended Operating Temperature	1800°F	2150°F	2200°F	2450°F
Melting Point	1648°C (3000°F)	1760°C (3200°F)	1760°C (3200°F)	1760°C (3200°F)
Fiber Diameter	2-4 microns (mean)	2.5-3.5 microns (mean)	2.5-3.5 microns (mean)	3.5 microns (average)
Specific Heat @ 1093°C (2000°F)	1130 J/kg °C (0.27 Btu/lb °F)	1130 J/kg °C (0.27 Btu/lb °F)	1130 J/kg °C (0.27 Btu/lb °F)	1130 J/kg °C (0.27 Btu/lb °F)
Specific Gravity	2.73 g/cm ³	2.73 g/cm ³	2.73 g/cm ³	2.73 g/cm ³
Average Tensile Strength (ASTM 686-76)	—	4 lb/in ² min. @ 4 PCF 6 lb/in ² min. @ 6 PCF 7 lb/in ² min. @ 8 PCF	—	—

6 LÄMPÖKÄSITTELYKOKKEET

6.1 Toimenpiteet ennen kokeita

Ennen varsinaisten kokeiden aloittamista on syytä toteuttaa seuraavan listan mukaiset toimenpiteet, joilla varmistetaan, että tutkimus saadaan vietyä onnistuneesti lävitse:

- Polttimien ja poltinjärjestelmän on oltava huollettu ja toimiva.
- Uunin vuorauksen ja ovien tiiveys on varmistettava.
- Uunin savukaasua on kyettävä ohjaamaan uuninpaineen hallitsemiseksi.
- Energiankulutus sekä savukaasun ja uunin lämpötilat on kyettävä mittaamaan ja kirjaamaan sähköisesti mieluiten yhteen järjestelmään.
- Savukaasuanalyysin perusteella polttimet säädetään pienimmälle mahdolliselle jäännöshapen määrälle ilman, että savukaasun häkäpitoisuus nousee. Säädoissä on otettava huomioon lämpötilan vaikutus palamiseen, ja moduloivien polttimien ollessa kyseessä on huomioitava moduloinnin vaikutus polttosuhteessa.
- Uunin lämmityshistorian ja lämmityskuorman on oltava vertailukelpoisia. Uuninrakenteiden osuus energian kulutuksessa on villavuoratussa panosuunissa 30 %. Tiilillä tai massalla vuoratuissa uuneissa se on paljon suurempi.
- Uunin lämpötilan mittaaminen on luotettavin, kun mitataan kappaleen sisälämpötilaa.

6.2 Koejärjestelyt

Koejärjestelyissä mitattiin jatkuvatoimisena uunin ja savukaasun lämpötilaa, kaasuvirtausta ja ohjaimen tehoproosenttia. Tiedot tallennettiin Brainchild VR18 -laitteella, jossa on yhdeksän kanavaa erilaisille signaaleille. Tiedon tallennusväli oli kymmenen sekuntia.

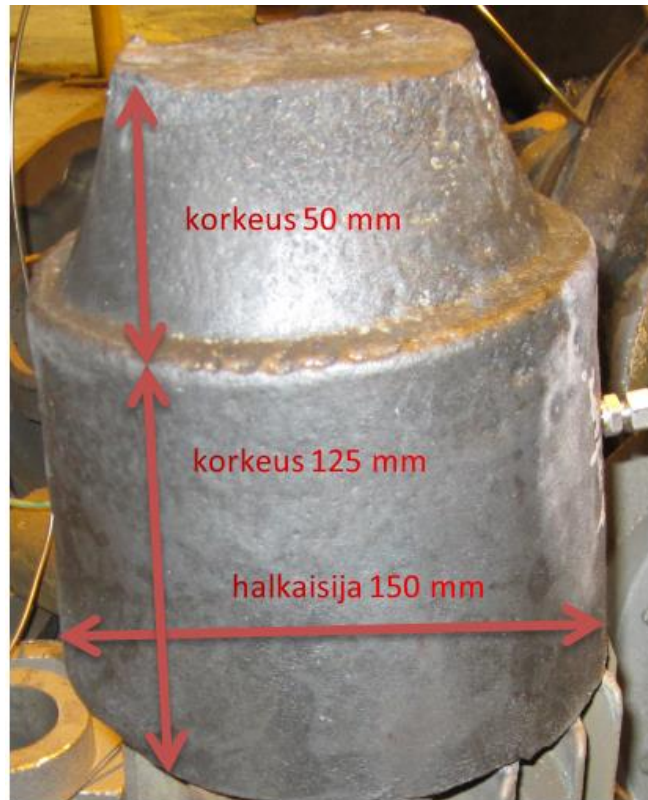
Neljässä ensimmäisessä kokeessa (kokeet 1, 2, 3 ja 4) koekappaleina käytettiin noin 27 kilogramman painoisia S235 -teräksestä valmistettuja aihioita, jotka oli instrumentoitu kahdella termoelementillä. Tarkemmat kuvaukset kokeista esitetään luvuissa 6.3 – 6.6.2. Uunissa oli lisäksi oma lämpötilanmittaus uunin ohjaamista varten. Ensimmäisissä kokeissa koeaihiot oli lastattu kahden lämpökäsittelyritilän päälle. Kahden lämpökäsittelyritilän käytöllä koepanoksen paino saatiin vastaamaan yleisemmin käytettyä uunipanoksen painoa. Kuvasta 15 nähdään ensimmäisissä kokeissa käytetyt

koejärjestelyt ja oikeassa reunassa on S235 -teräksisen koekappaleen mitat ja kahden anturin paikat.

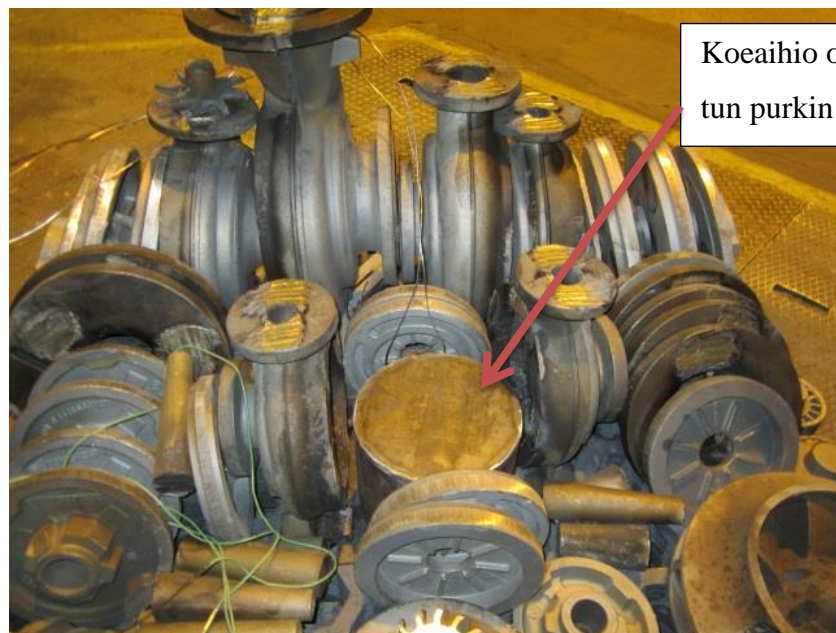


Kuva 15. Ensimmäisten kokeiden koejärjestelyt ja -aihion mitat ja kahden anturin paikat

Kokeissa 5 ja 6 käytettiin Sulzerin materiaalista valmistettua koeaihiota, joka oli lastattu tuotantokappaleiden mukana uunipanokseen. Sulzerin materiaalin koeaihiot oli myös instrumentoitu kahdella termoelementillä. Kuvassa 16 esitetään Sulzerin materiaalin koeaihio. Kokeissa 5 ja 6 oli tarkoitus vertailla energiankulutusta ja lämpötilan nousuvaiheen nopeutta täydellä ja vajaalla uuninpanoksella. Ensimmäisessä (koe 5) Sulzerin materiaalin kokeessa koekappale oli asennettu purkin sisään, eli suoranainen uunin seinämien ja katon lämpötilansäteily oli estetty. Kuvassa 17 nähdään koe 5:n koejärjestelyt. Vajaanpanoksen kokeessa koe 6:n koeaihio oli ilman säteilysoojaa kappaleiden mukana uuninpanoksessa. Kuvassa 18 nähdään koe 6:n koejärjestelyt.



Kuva 16. Sulzerin materiaalin koeaihio kokeissa 5 ja 6



Kuva 17. Koe 5 Sulzerin materiaalista ja täysi uunipanos



Kuva 18. Koe 6 Sulzerin materiaalista, vajaa lasti

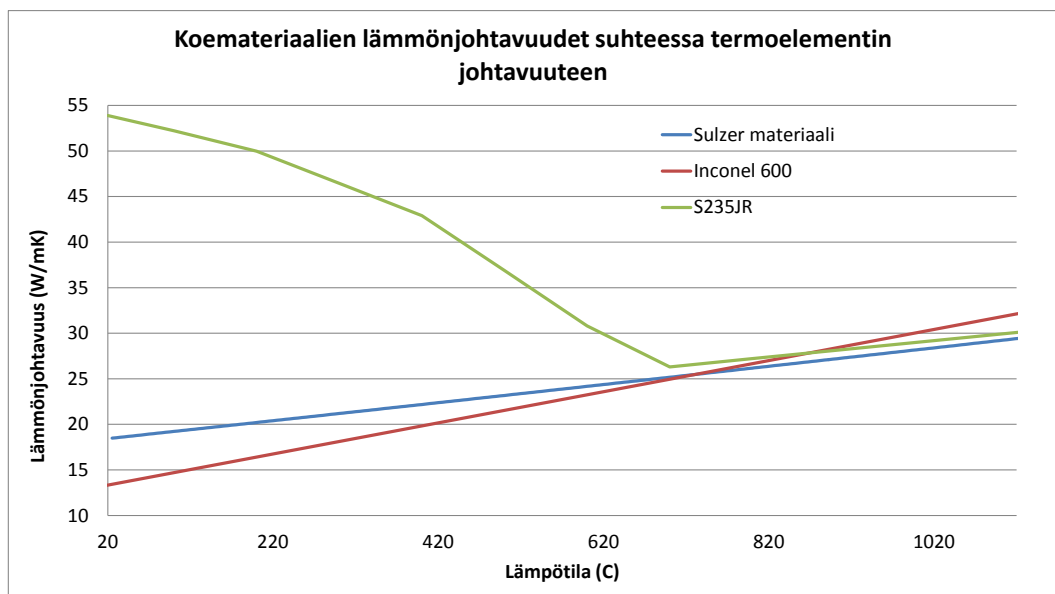
6.3 Lämpötilan mittaukset

Uunin, savukaasun ja näytekappaleiden sisälämpötilat mitattiin kolmemillisellä Inconel 600-vaippaisilla K-tyyppin antureilla. Uunin ohjaukseen käytettiin paksuja, ke-raamilla suojattuja termoelementtejä, jotka kestävät paremmin jatkuvaa käyttöä uuni-olosuhteissa. Kuvassa 19 nähdään S235 -teräksestä valmistettu koekappale ja K-tyyppin antureiden paikat aihiossa.



Kuva 19. S235 -valmistettu koekappale ja K-tyypin antureiden paikat

Epävarmuudeksi nousee kappaleiden sisäisten lämpötilojen suhteen Inconel 600:n parempi lämmönjohtavuus korkeissa lämpötiloissa, kuten kuvassa 20 voidaan huomata. Tämä ei kuitenkaan nosta lämpötilaa, mutta se vaikuttaa tulokseen, kuinka nopeasti lämpötila saavutetaan koekappaleen keskipisteessä. Ongelman pienentämiseksi näytteiden termoelinten johdot pinnoitettiin heijastavalla pinnoitteella, jonka tiedetään alentavan materiaalin pintalämpötilaa 20 – 50 °C. Se ei kuitenkaan ole riittävä täysin poistamaan epätarkkuutta.



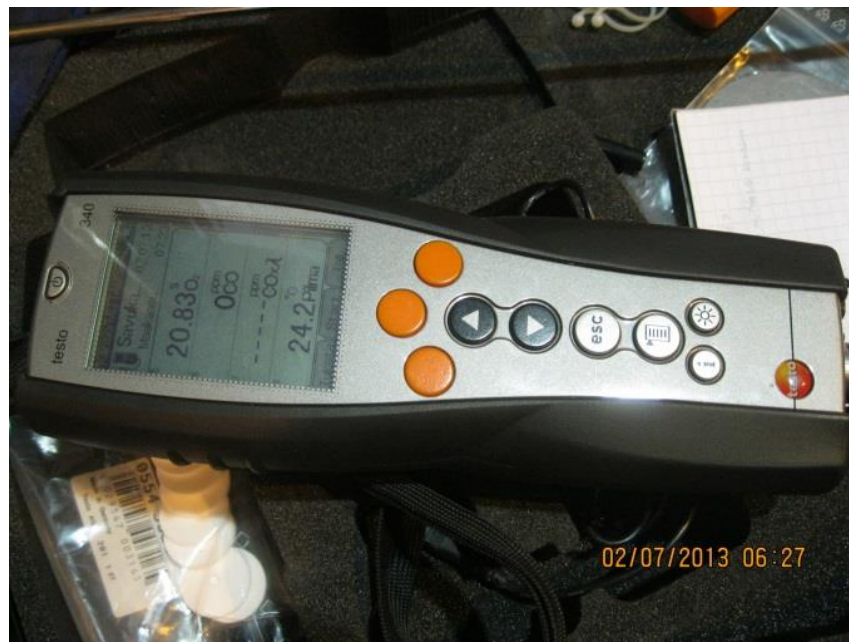
Kuva 20. Materiaalien lämmönjohtavuuksia

6.4 Savukaasumittaukset

Savukaasuanalysointina käytettiin Testo 340 -savukaasuanalysointia. Savukaasumittaukset suoritettiin savukaasuputken poratusta reiästä keskeltä putkea. Kuvassa 21 nähdään savukaasumittarin anturi ja mittausreiän vieressä oleva savukaasun lämpötilanmittausanturi. Kuvassa 22 nähdään kuva mittauksissa käytetystä Testo 340 -savukaasuanalysointia.



Kuva 21. Savukaasuputki, jossa ovat vierekkäin anturit savukaasulle ja lämpötilalle

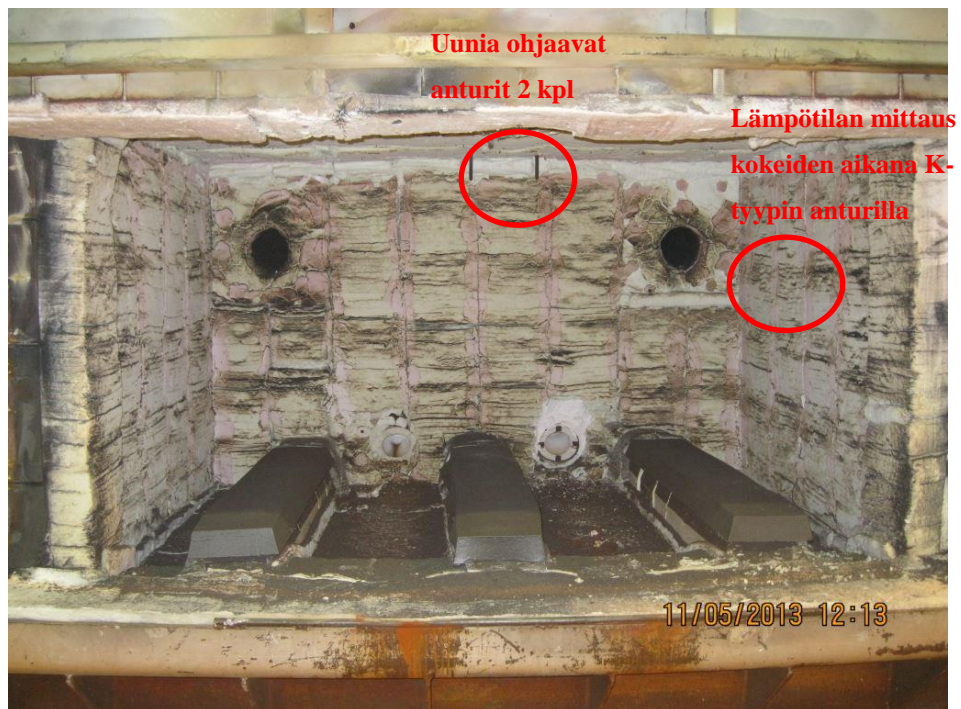


Kuva 22. Savukaasumittauksissa käytetty Testo 340 -savukaasuanalysointilaitteisto

6.5 Suoritetut toimenpiteet

Kuvassa 23 nähdään uunivuoraukset sellaisina, kuin ne olivat ennen kokeiden aloittamista. Uuni on ollut kaiken aikaa tuotantokäytössä, ja uunia on pidetty hyvin toimivana. Kuitenkin ennen mittauksien aloitusta vuorauksia korjattiin siten, että katossa sekä katon ja seinän nurkissa olleet, silmällä havaittavat, rakokset sullottiin täyteen villaa. Lisäksi savukaasukanavien aukkoja pienennettiin hiukan.

Kuvassa 23 nähdään lämpötilan mittausantureiden paikat. Paikat on merkitty punaisilla renkailla. Uunin lämpötilaa ohjaavat termoelementit ovat katossa ja kokeiden aikainen kolmenmillinlanka-anturi on oikeassa seinässä.



Kuva 23. Uunin vuoraus ennen kokeiden aloitusta ja lämpötila-antureiden paikat uunissa.

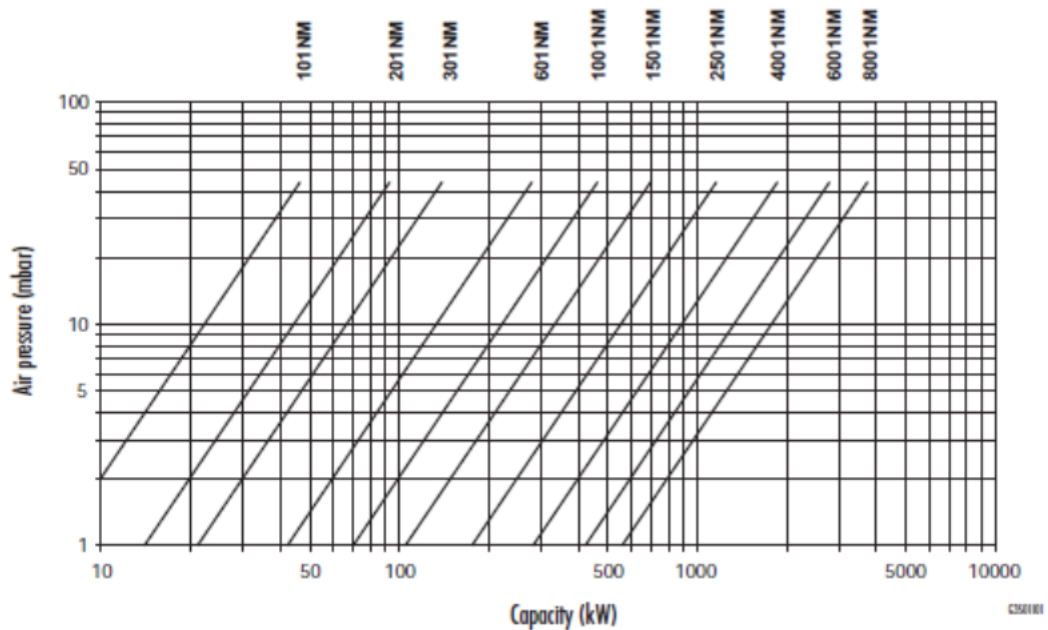
Mittaustuloksissa kävi ilmi, että jäännöshappi 100 %:n teholla oli 8 % ja että kaasuvirtauksen lisäys 75 %:sta 100 %:iin nosti tehoa vain noin $1 \text{ nm}^3/\text{h}$, eli maksimiteho oli tuolloin vain 310 kW. Vika paikannettiin ja korjattiin, jolloin uunin kokonaisteho nousi 360 kW:iin. Samalla teho rajattiin 75 %, jotta uunin käyttämä maksimiteho pysyisi edelleen n. 300 kW:ssa. Näin ilman poltinsäätöjä jäännöshappi putosi 5,5 %:n luokkaan 100 %:n teholla ja 3,5 %:n luokkaan 75 %:n tasolla. Tämän jälkeen tehdyt pol-

tinsäädöt pudottivat jäännöshapen 1,75 %:n tasoon 75 %:n teholla. Kun teho muuttuu, jäännöshappi kasvaa, koska ilma-kaasuseossuhteen ohjaaminen on epätarkkaa. Tätä ilmiötä ei, ikävä kyllä, kyetty poistamaan.

Kuvassa 24 esitetään koeuunissa olevat moduloivat polttimet, joita on kaksi. Kuvasta 25 voidaan nähdä polttimen tehonalue ilmanpaineen funktiona.



Kuva 24. Pyronics 601NM, moduloiva polttin, joita on kaksi kappaletta koeuunissa (Pyronics Bulletin 2011.)



Kuva 25. Polttimen teho [kW] (Pyronics Bulletin 2011.)

6.6 Koemittaukset

Koemittaukset mitatuilla kappaleilla tehtiin pinnoitetulla ja pinnoittamattomalla uunilla seuraavasti:

Suorat nostot:

1. **Pinnoittamaton**, säädetty uuni, suora nosto 1 100 °C + 3 h:n pito, pinnoittamaton näyte, S235, kylmä uuni, paino 1 995 kg, maksimiteho 75 %.
2. **Pinnoitettu**, säätämätön uuni, suora nosto 1 100 °C + 3 h:n pito, pinnoittamaton näyte, S235, kylmä uuni, paino 1 999 kg, maksimiteho 75 %.
3. **Pinnoitettu**, säädetty uuni, suora nosto 1 100 °C + 3 h:n pito, pinnoittamaton näyte, S235, kylmä uuni, paino 1 999 kg, maksimiteho 57 %.
4. **Pinnoitettu**, säädetty uuni, suora nosto 1 100 °C + 3 h:n pito, pinnoittamaton näyte, S235, kylmä uuni, paino 1 999 kg, maksimiteho 100 %.
5. **Pinnoitettu**, säädetty uuni, suora nosto 1 100 °C + 5 h:n pito, pinnoittamaton näyte, Sulzer materiaali, kuuma uuni, näyte teräksessä valmistetussa suojakotelossa, paino arvio 2 200 kg.
6. **Pinnoitettu**, säädetty uuni, suora nosto 1 100 °C + 5 h:n pito, pinnoittamaton näyte, Sulzer materiaali, kuuma uuni, näyte teräksessä valmistetussa suojakotelossa, paino 1 676 kg.

Hitaat nostot:

7. **Pinnoittamaton**, säädetty uuni, hidas nosto 50 °C/h 1 100 °C + 3 h:n pito, pinnoitettu ja pinnoittamaton näyte, S235, kylmä uuni, paino 2 022 kg.
8. **Pinnoitettu**, säädetty uuni, hidas nosto 50 °C/h 1 100 °C + 3 h:n pito, pinnoitettu ja pinnoittamaton näyte, S235, kylmä uuni, paino 2 026 kg.

Mittaustuloksia on kuitenkin kertynyt enemmän, koska huollon aikana on jouduttu ajamaan testiajoja muunnetuissa olosuhteissa ja vertailemaan muutosten vaikutusta ennen koekappaleiden käyttöä. Mittauksia on jatkettu myös kokeiden jälkeen tuotantokappaleiden lämpökäsittelyillä vahvistamaan koemittauksia. Näistä käy ilmi uunin luukun tiiveyden ja uunipanoksen painon merkitys energiankulutukseen. Tehdyt kokeet poikkeavat suunnitellusta, koska tehdyissä koemittauksissa ja testilämmityksissä

kävi jo ilmi tiettyjen kokeiden tarpeettomuus. Raportoidut tuotantokokeet ovat numerot 5 ja 6, ja niiden tarkoitus oli peilata energian kulutusta täydellä ja vajaalla panoksella.

6.6.1 Kokeet pinnoittamattomalla uunilla

Hyvää oli, että mittauslaitteisto asennettiin jo hyvissä ajoin ennen kokeiden alkua, koska näin saatiin arvokasta mittaustietoa, ennen kuin uunia alettiin säätää. Erityisen arvokasta oli, arvioida, kuinka suuri merkitys jäännöshapella on uunin energiatehokkuuteen. Koska näitä mittauksia saatiin vain yksi, piti lisäaineisto saada aiemmista tuotantoajoista. Näin varmistettiin, että mittaus edustaa tavanomaista lämpökäsittelyä ennen uunin säätöä.

Säädön jälkeen tehtiin uunin testilämmitys ja nopean sekä hitaan lämmityksen kokeet. Kokeet olivat onnistuneita ja vaikuttivat tuloksiltaan uskottavilta aiemmin mitattuihin verrattuna. Lomien vuoksi varsinaista tuotantoa oli vähän, joten uuni päätettiin pinnoittaa pian kokeiden jälkeen aikataulun kireyden vuoksi.

6.6.2 Kokeet pinnoitetulla uunilla

Kuvassa 26 esitetään koeuuni pinnoituksen jälkeen. Uunin pinnoitus onnistui ilman ongelmia. Pinnoituksen jälkeen esiintyi ongelmia oven paikalleen asentamisessa, ja siksi jouduttiin tekemään muutamia testilämmityksiä ennen varsinaista koelämmitystä kappaleen kanssa. Testilämmitykset ja koe numero 2 osoittivat, ettei itse pinnoituksella ollut merkittävää vaikutusta energiankulutukseen. Kaavailtu hitaan noston koelämmitys jätettiin tekemättä ja uunin uudelleen säätämisen mahdollisuuksia alettiin testata.



Kuva 26. Koeuuni pinnoituksen jälkeen

Säätämisessä päädyttiin laskemaan jäännöshappi aina 0,75 %:n tasolle asti, 75 %:n teholla. Jotta teho saatiin pysymään lähellä 300 kW:a, jouduttiin maksimiteho pudottamaan 57 %:iin. Kokeessa numero 3, 1 100 °C:n lämpötilassa, uuni kykeni polttamaan kaasun puhtaasti jopa 0,44 %:n tasolla, mutta kylmästä käynnistetty uuni kuitenkin tuottaa häkää ensimmäisen 15 minuutin ajan yli 13 ppm. Sovittiin, että happimäärää nostetaan, ennen kuin varsinainen tuotanto aloitetaan.



Kuva 27. Pinnoitus mahdollistaa alhaisen jäännöshappitason

Koska uunin tuotantoaikaa haluttiin lyhentää, nostettiin uunin teho 100 %:iin. Samalla havaittiin, ettei tehonsäätö ole lineaarinen ja ilman määrä kasvoi kaasumäärää enemmän. Se johti tilanteeseen, että häkä poistui eikä uunille tarvinnut tehdä happea lisäävää muutosta. Näin kokeen 4 tulokset kertoivat, kuinka nopeaksi uuni nykyisellään saadaan.

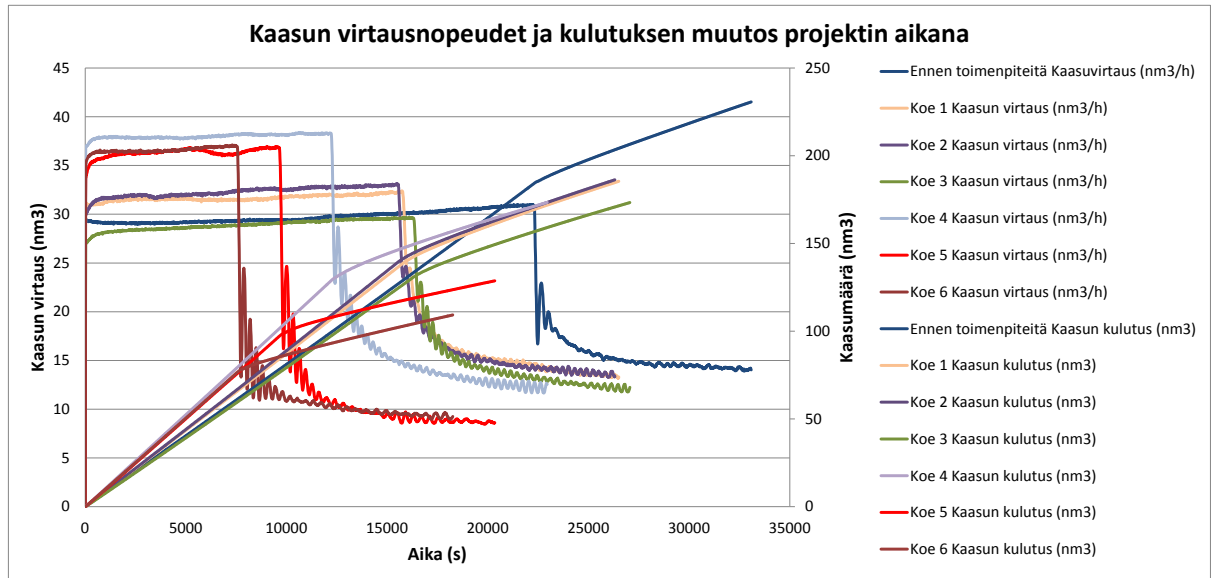
Kokeen 5 tarkoitus oli tutkia, kuinka paljon hitaammin näyte nousee tavoitelämpötilaan, jos se on suljetussa tilassa, johon säteily polttimesta tai seinistä ei vaikuta. Tulokset olivat hyvin yllättäviä ja osoittivat, että palokaasu itse asiassa jäähdyyttää kappaletta. Näiden kokeiden perusteella jäähdytysvaikutus oli 15 °C. Lopuksi kokeessa 6 tutkittiin vielä, kuinka paljon painokiloa kohden käytetty kaasumäärä kasvaa, jos uunissa ajetaan vajaita kuormia.

6.7 Tulokset

Mittauksissa havaittiin, että ylipaineessa olevassa uunissa jäännöshapen vaikutus on ylivoimaisesti suurin, niin energiankulutukseen kuin prosessiin. Ovien vuoto näkyy niin savukaasun lämpötilassa kuin lämpenemisnopeudessa, mutta ei juurikaan kaasumäärässä. Tuloksista voidaan myös havaita uunin alkulämpötilan merkittävä vaikutus lämpenemisnopeuteen, ja energiankulutukseen. Kokeiden 5 ja 6 Sulzerin materiaalin tuotantokappaleiden tulosten perusteella lämpökäsittelyprosessi on nyt niin nopea, että vuorokauden aikana voidaan ajaa kolme lämpökäsittelyä, kun uusi panos lastataan suoraan kuumaan uuniin.

6.8 Suoran noston kokeet

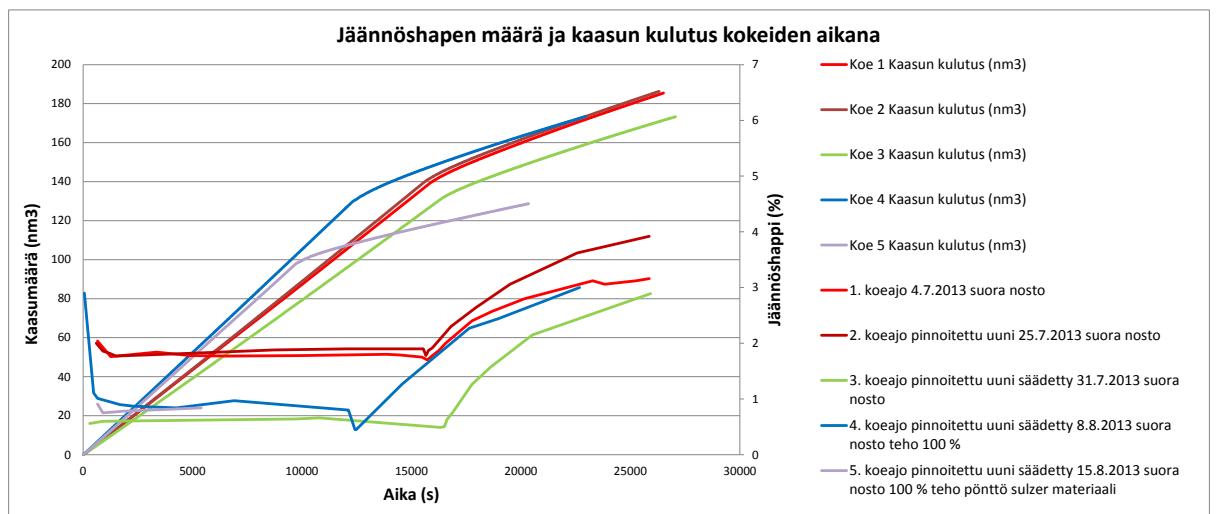
Suorassa nostossa uuni lämmitetään annetulla maksimiteholla pitolämpötilaan 1 100 °C ja tämän jälkeen koekappaleet pidetään pitolämpötilassa 3 tuntia. Koska tehot muuttuvat jo luonnollisesti paineiden vaihteluista ja niitä säädettiin kokeiden aikana, on tarpeellista esittää kaasunkulutuksen lisäksi kaasuvirtauksen määrät.



Kuva 28. Kaasun virtausnopeudet ja kulutuksen kertymä kokeiden aikana

Kokeissa oli eroina kaasunvirtauksen lisäksi ainoastaan jäännöshappi. Lämpötilahistorian vaikutus pyrittiin minimoimaan pitämällä testilämmitys kaksi päivää ennen varsinaista koetta.

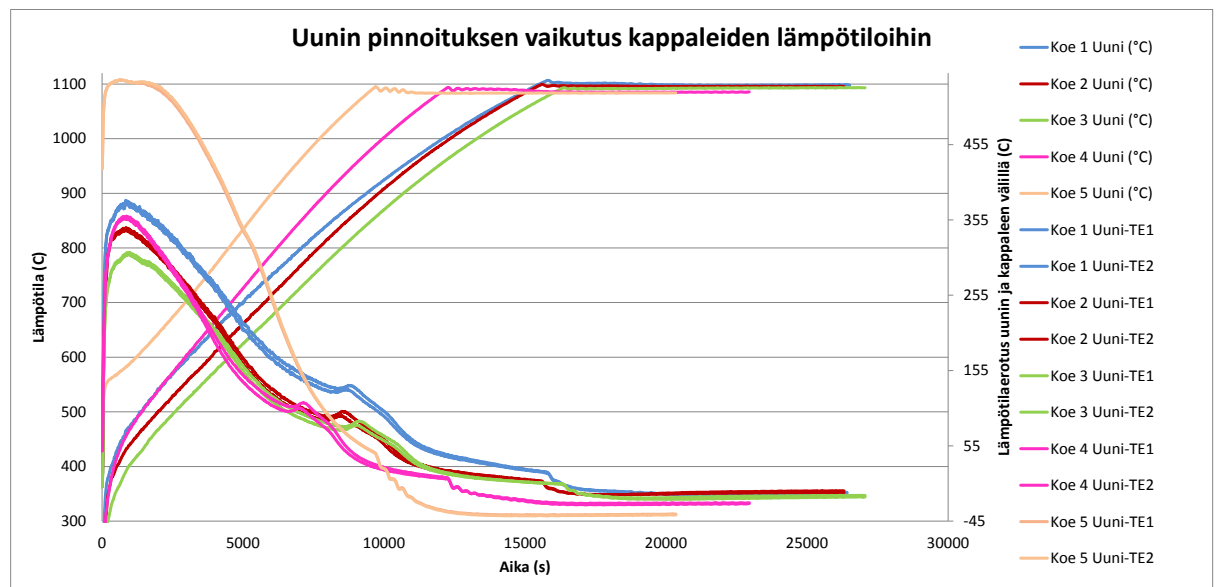
Kuvassa 29 esitetään jäännöshapen ja lämmitystehon vaikutus energiankulutukseen. Uunin tehon nosto 57 %:sta 100 %:iin ei nostanut uunin energiankulutusta ollenkaan. Tämä on yllättävää, sillä suuremman paineen vuoksi viipymäaika savukaasulla pienenee ja tuntuisi todennäköiseltä, että se nostaisi energian kulutusta.



Kuva 29. Jäännöshapen ja tehon vaikutus energian kulutukseen

Hankkeen alussa mittausten ja säätötoimenpiteiden jälkeen uunin jäännöshappi pudotettiin 8 %:n tasosta 1,75 %:n tasoon. Tällä säädöllä säästettiin energiaa noin 18 % ja uunin lämmitysaika lyheni noin 1 h 50 min eli noin 30 %. Pinnoituksen jälkeen jäännöshappi kyettiin pudottamaan pinnoituksen ansiosta noin 0,8 %:iin. Kuumassa uunissa pudottaminen olisi ollut mahdollista aina 0,44 %:iin. Huomioiden kokeen 4 hieman yli 1 % tason voidaan sanoa, että pudotus 1,75 %:sta oli noin 0,75 % ja sen energiansäästöllinen vaikutus yhdessä pinnoituksen kanssa noin 7 %. Enemmän säästettäisiin energiaa, jos uunin jäännöshappi saataisiin hallintaan myös pitovaiheessa. Ajallisesti säästöä ei voida suoraan sanoa, mutta tehot erosivat toisistaan niin, että ne olivat noin 280 kW, 300 kW ja 360 kW kokeissa 3, 2 ja 4. Laskennallisesti arvioitu nopeutuminen olisi noin 500 sekuntia eli noin 3 %.

Uuniin laitettiin suorien nostojen mukana näytekappaleita niin materiaalista S235 kuin Sulzerin omasta teräksestä. Tarkoituksena oli mitata uunin pinnoituksen ja jäännöshapen vaikutusta kappaleiden lämpenemisnopeuteen. Kuvassa 30 esitetään koeaihioiden lämpeneminen suhteessa uuniin. Erityisesti huomioitavaksi nousee kaksi asiaa: uunin atmosfäärin lämpötila on laskenut kokeiden aikana ja kappaleiden lämpötila on aina yli pitolämpötilan 1 100 °C.



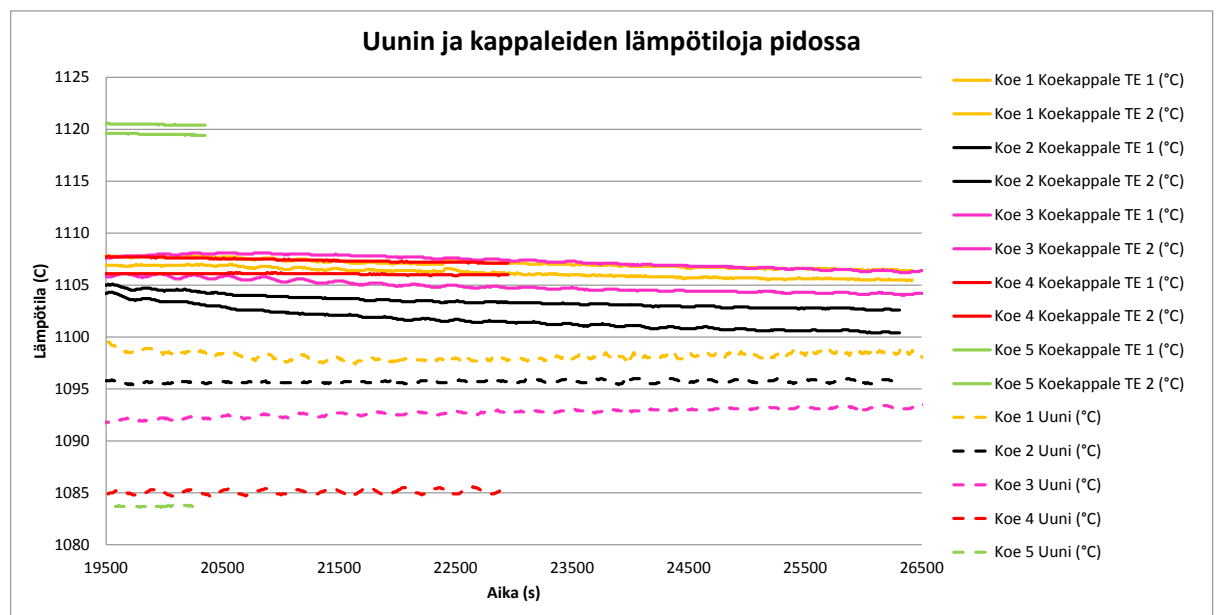
Kuva 30. Uunin ja kappaleiden välinen lämpötilaero kokeiden aikana

Todennäköisesti uunin lämpötilan alhaisuus johtuu siitä, että lämpötila mitataan 3 mm:n metallisella anturilla. Anturin mittauspään halkaisija on hyvin pieni. Se mittaa uunin atmosfäärin lämpötilan eikä uunissa kappaleiden tuntemaa todellista lämpötilaa. Uunia ohjataan paksulla, keraamisella termoelementillä, johon vaikutta uunin säteilyn

teho. Uunia ohjaava termoelementti on kaikissa kokeissa pitänyt uunin lämpötilan 1 100 °C:ssa. Todellinen kappaleen lämpötila on kuitenkin 1 107 °C, eli uunin lämpötilaa voitaisiin laskea 7 °C, jotta kappaleiden lämpötila olisi 1 100 °C.

Kokeessa 5 tutkittiin, kuinka kappaleen sulkeminen teräskuoren sisään hidastaa kappaleen lämpenemistä. Kappale saavuttaa pitolämpötilan 1 100 °C noin 30 minuuttia myöhemmin kuin uuni, mutta kappaleen lämpötila nousee hetken päästä 1 120 °C:seen. Se osoittaa, että uunin savukaasujen virtaukset itse asiassa jäädyttävät kappaleita ja todellisen lämmitysenergian tuottaa säteilylämpö. Koska kappale on täysin suljettu uunin seinien, katon ja liekin säteilyltä, todellinen säteilynlähde on suoja-kuori. Kokeen tarkoituksena oli selvittää uunipanoksen lastauksen merkitys lämpötilan nousunopeuteen, kun uunipanokseen on lastattu mahdollisimman paljon ja tiivisti valukappaleita. Tulos oli kuitenkin rohkaiseva, koska kappaleiden välinen säteily lämmittää kappaleita, ainakin tässä tapauksessa, yhtä hyvin kuin vuorauksen tai liekin säteilylämpö.

Kuvassa 31 esitetään uunin pitovaiheen lämpötiloja: uunin atmosfääri, ohjaava termoelementti ja koekappale. Kappaleet ovat kuitenkin jatkuvasti säilyttäneet noin 1 107 °C lämpötilan. Kokeissa 5 ja 6 uunin atmosfäärin lämpötila on alhaisin, koska säteilyteho on suurempi rakenteiden ollessa kuumemmat kuin kylmästä uunista lähdettäessä.

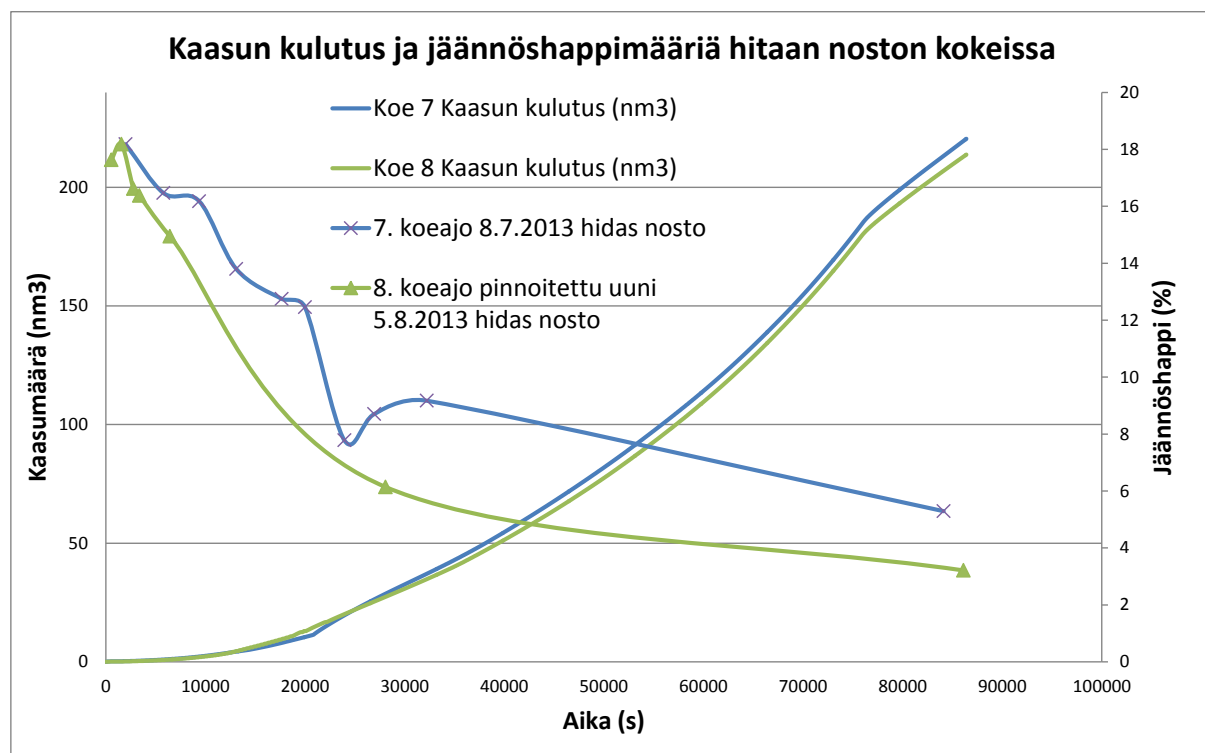


Kuva 31. Pidon aikaisia uunin lämpötiloja lämmitysvaiheen jälkeen eri kokeissa

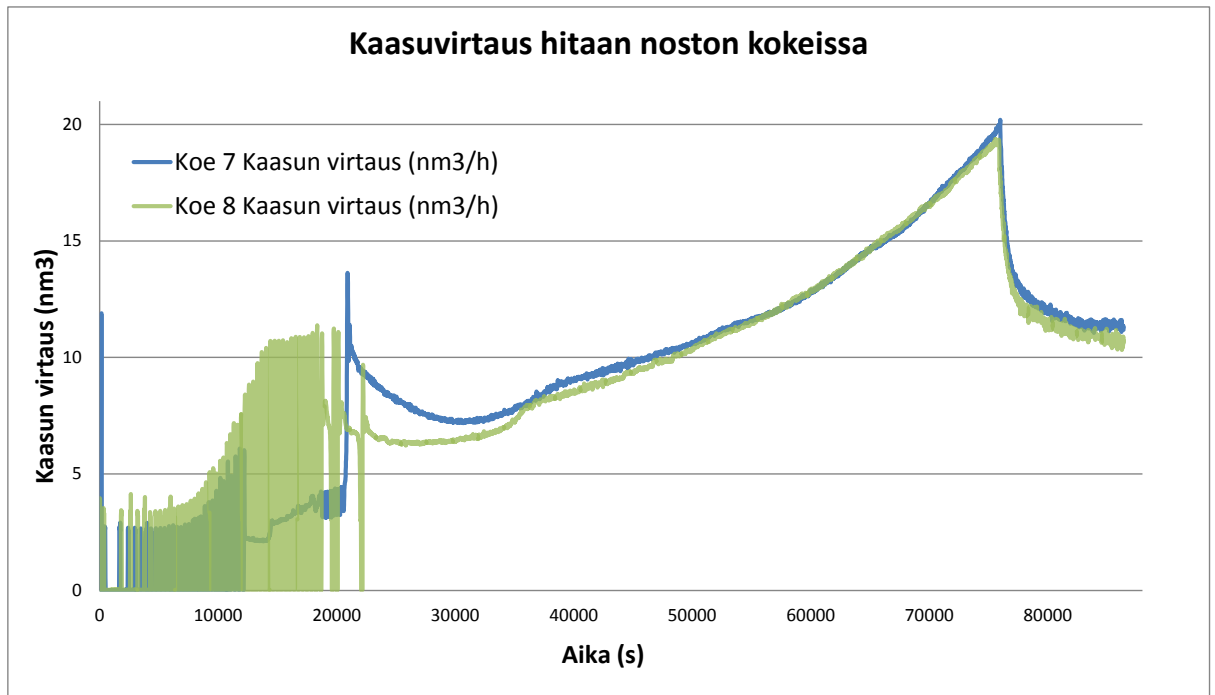
Koska jäähdytys on lisääntynyt, se osoittaa, että uunin lämmitystehon on pitänyt kasvaa. Tätä kasvua ei kuitenkaan saada täysin käyttöön savukaasuvirtausten vuoksi. Tämä viittaa siihen, että retorttityyppinen lämmityskaasu-uuni on energiatehokkain lämmitysmuoto. Tällöin uunin retortin ulkopuolella olevaa lämpötilaa voitaisiin laskea jopa 20 °C.

6.9 Hitaan noston kokeet

Hitaan noston kokeita (lämpötilan nousunopeus 50 °C/h) tehtiin vain kaksi, mikä poikkeaa alkuperäisestä suunnitelmasta, koska jäännöshapen hallinta alhaisilla tehoilla ei ole mahdollista ja suoran noston kokeissa oli tullut ilmi, ettei hyötyjä saada ilman jäännöshapen hallintaa. Kuvassa 32 esitetään kaasunkulutus ja jäännöshappimääriä hitaan noston kokeissa. Kokeen pituuden vuoksi jäännöshappiarvojen ottaminen tasaisesti koko mittauksen ajan ei ollut mahdollista, ja siksi mittaukset ovat vain suuntaa antavia. Kuvassa 33 voidaan havaita, että uunin suhdesäädin ei ole riittävän tarkka säätämään polttoaineen ja ilman seossuhdetta alhaisella tehoilla.

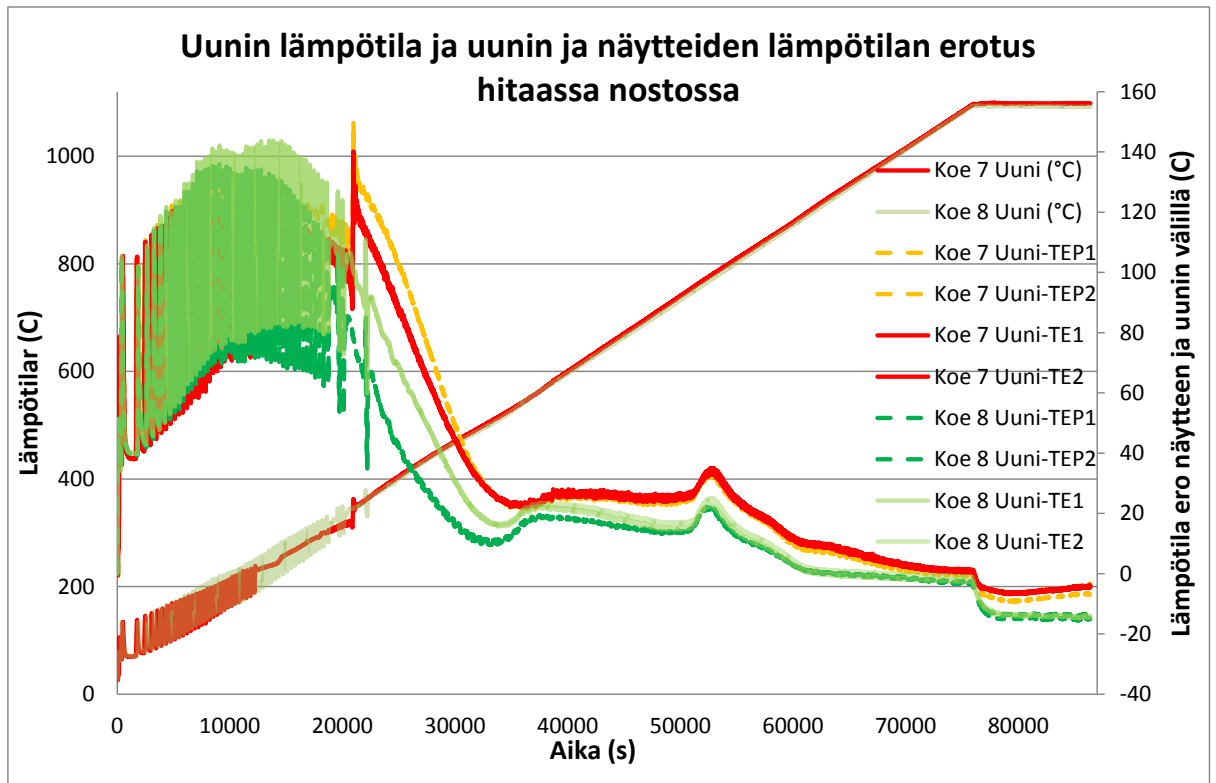


Kuva 32. Kaasunkulutus ja jäännöshappiarvoja hitaan noston kokeissa



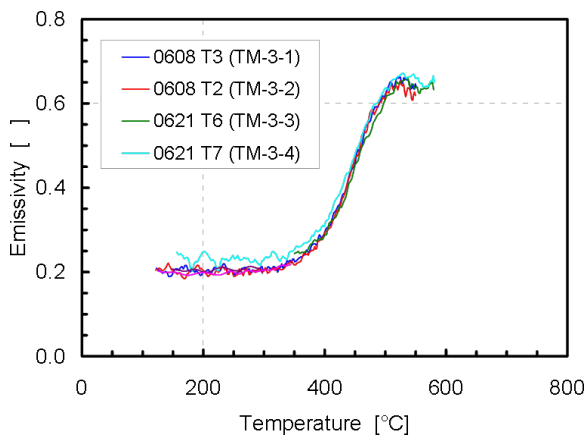
Kuva 33. Kaasuvirtauksen määrä hitaiden nostojen kokeissa

Hitaan noston kokeissa uuniin laitettiin kaksi eri näytettä, toinen tavallinen pinnoittamaton S235 -kappale ja toinen pinnoitettuna mustalla korkeaeemissivisellä pinnoitteella. Tarkoituksena oli tutkia, kuinka paljon nopeammin tällainen kappale lämpenee. Kuvassa 34 voidaan havaita hitaan noston uunin ja koekappaleiden välinen lämpötilaero.



Kuva 34. Hitaan noston uunin ja koekappaleiden välinen lämpötilaero

Tuloksista nousee epäily, että pinnoittamattoman uunin kokeissa numero 7 pinnoitettu ja pinnoittamaton näyte ovat menneet ristiin, koska pinnoitettu näyte on kylmempi. Näytteiden välinen ero on kuitenkin selvä aina 600 °C:seen, minkä jälkeen pinnoitetun uunin tapauksessa molemmat näytteet ovat samassa lämpötilassa. Huomattavaa on, että vaikka kokeiden energiankulutuksessa ei ole juurikaan eroa, pinnoitetun uunin tapauksessa uunin ilman lämpötila on alempi ja näytteet joitakin asteita kuumempia kuin pinnoittamattomassa. Kuvassa 35 on nähtävissä mahdollinen selitys pinnoitteen vaikutuksen pienenemiseen 600 °C:n lämpötilassa.



Kuva 35. Hiiliteräksen emissiivisyys (Paloposki & Liedquist 2005,63)

7 YHTEENVETO

Jo ennen kokeiden alkua suoritettu vanhan uunin mittaaminen, analysointi ja säätäminen osoittivat, kuinka tärkeää uuneissa olisi järjestää huolto ja mittaukset uunin toiminnan seuraamiseksi. Tutkimuksen aikana tehdyillä muutoksilla uunilla saatiin noin 44 %:n energiansäästö ja noin 32 %:n ajansäästö. Projekti osoittaa myös, ettei uunin ikä tai vanha teknologia ole este sille, että siitä saadaan tehokas ja hyvin toimiva työkalu.

Tutkimustulos osoittaa, että ylipaineisilla uuneilla ehdottomasti tärkein energiansäästöllinen toimenpide on pitää huolta polttimien ilma-kaasusuhteesta. Jäännöshapen pudotus tässä tutkimuksessa 8 %:n tasosta 1,75 %:n tasoon tarkoitti 18 %:n säästöä. Pinnoitus mahdollisti, syystä tai toisesta, jäännöshapen pudotuksen 1,75:n % tasosta 0,8 %:n tasoon ja toi noin 7 %:n energiansäästön. Kuumassa uunissa havaittiin jopa 0,44 %:n tason jäännöshappi, mikä viittaa mahdollisuuteen mennä jopa alempiin happitasoihin. Kuitenkin pelkän pinnoituksen vaikutus, ilman lisäsäätöä, oli hyvin pieni niin kappaleiden lämpenemiseen kuin energiankulutukseenkin. Koska niin alhaiseen tasoon ei ilman pinnoitusta päästä, jää epäselväksi, onko tulos pelkän jäännöshapen vai jäännöshapen ja pinnoituksen yhteisvaikutus. Jäännöshapen pudotuksessa on kuitenkin käytännössä oltava varovainen, sillä se saattaa heikentää polttimien kestävyyttä. Ei myöskään pidä unohtaa häikävaaraa, joka on vaakakupin toisella puolella.

Lean toiminnan mukaista on virtauttaa toiminta siten, että tuotteet virtaavat pysähtymättä. Koeuuni on saatu nyt niin nopeaksi, että muodoltaan yksinkertaisia duplex-valukappaleita voidaan ajaa kolme uunipanosta vuorokaudessa. Vaikka uunipanoksen paino on vain puolikas, energiankulutuksessa säästetään lähtötilanteeseen verraten noin 10 % ja prosessiaikaa vapautuu 37 %. Tärkeintä on, että panostetaan kuumaan uuniin. Myös kunnossapitokustannukset alenevat, kun uunin lämpötilan vaihtelut minimoidaan, koska lämpötilannousut ja -laskut rasittavat uunin rakenteita.

Tuloksista jää epäselväksi pienentyvän ilmamäärän vaikutus pidon aikana, koska uunin ohjaus ei kyennyt hallitsemaan ilma-kaasusuhdetta kuin korkeimmalla teholla. Näin ollen syntyneen hilseilyn ominaisuudet ja määrä sekä energiansäästö pidon aikana ovat tutkimatta. Tutkimukseen tarvitaan tutkimusmenetelmä, jossa jäännöshapen määrä on hallinnassa koko lämpökäsittelyprosessin ajan.

LÄHTEET

Ahlström Oy:n ostoasiakirjat vuodelta 1967.

Autere E., Ingman Y. & Tennilä P. 1982. Valimotekniikka 1. Helsinki: Insinööritieto Oy.

Autere E., Ingman Y. & Tennilä P. 1986. Valimotekniikka 2. Helsinki: Insinööritieto Oy.

Bureau of Energy Efficiency. 2005. Ministry of Power, India: Energy Efficiency in Thermal Utilities. FURNACES AND REFRACTORIES. Saatavissa: <http://www.retscreen.net/fichier.php/888/Chapter%2520%2520Furnaces%2520and%2520Refractorie...> [viitattu 18.11.2013].

Chen W.H., Chung Y.C. & Liu J.L 2005. Analysis on energy consumption and performance of heat reheating furnace in a hot strip mill. International Communications in Heat and Mass Transfer, 32 (5):695 - 706.

Dipen V.Chauhan, S.N.Misra, R.N.Shukla. 2012. Synthesis of high emissivity coating for ceramic substrate towards energy conservation. Saatavissa: <http://ijset.com/ijset/publication/v1s3/PP%203640%20Synthesis%20of%20high%20emissivty%20coating%20for%20ceramic%20substrate%20towards%20energy%20DIPEN.pdf>. [viitattu 18.11.2013].

Gasum-tuotetiedote. 2012. Tuotetiedote (pdf). Saatavissa: http://www.gasum.fi/tuotteet/maakaasu/Documents/Maakaasun_tuotetiedote.pdf. [viitattu 18.11.2013].

Heikkinen E-P. 2013. Poltto ja palaminen. Oulun yliopiston luentomoniste. Saatavissa: <http://cc.oulu.fi/~kamahei/y/education/477412S/IMPM-13-06-01.ppt>. [viitattu 18.11.2013].

Hemmilä S. & Utriainen J. 1991. Lämpöoppi. Jyväskylä: Gummerus.

Inkinen P. & Tuohi J. 2006. Momentti 1 Insinöörifysiikka. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy.

Jokilaakso A. 1987. Virtaustekniikan, lämmönsiirron ja aineensiirron perusteet. Hämeenlinna: Otakustantamo.

Kivivuori S. & Härkönen S. 2009. Lämpökäsittelyoppi. Tampere: Esa Print Oy.

Niemi P. Lämpökäsittely -1. 2010. Saatavissa:
http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/PN_jalkikasittely_I.pdf [viitattu 19.11.2013].

Paloposki T. & Liedquist L. 2005. VTT Research notes 2299. Espoo. Saatavissa:
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2299.pdf> [viitattu 19.11.2013].

Pyronics Bulletin. 2011. E3501 rev06 06/03/03. Tuotetiedote. Saatavissa:
<http://www.esacombustion.it/pdf/Catalogo/E3501E.PDF>. [viitattu 20.11.2013].

Sarlin. 2013. Termoelementtilangat ja pidennysjohdot. Tuotetiedote. Saatavissa:
<http://www.sarlin.com/?Deptid=6501>. [viitattu 20.11.2013].

Sulzer Ltd 2013. Sulzer-konsernin kotisivut. Saatavissa: <http://www.sulzer.com>. [viitattu 20.11.2013].

Sulzer Pumps Global intranet 2013. [viitattu 20.11.2013].

Sulzer Pumps Finland intranet 2013. [viitattu 20.11.2013].

Sulzerin sisäiset lämpökäsittelyohjeet. 2012. Kotka: Sulzer Pumps Finland Oy.

Unifraxin 2009. Tuotetiedote. Saatavissa:
[http://www.unifrax.com/prodinfo.nsf/LookupByFormNo/C1421/\\$File/Form%20C-1421Blanket%20%26%20Mat%2010-10.pdf](http://www.unifrax.com/prodinfo.nsf/LookupByFormNo/C1421/$File/Form%20C-1421Blanket%20%26%20Mat%2010-10.pdf). [viitattu 20.11.2013].

Vasankari A & Vapalahti S. 2011. Korkealämpötilapinnoitteet. Materia. 3. Vuorimiesyhdistys-lehti. Saatavissa:
http://www.vuorimiesyhdistys.fi/sites/default/files/materia/pdf/Materia_2011-3.pdf. [viitattu 20.11.2013].

Wagner W.1994. Lämmönsiirto. Helsinki: Painatuskeskus Oy.