

TEOLLISUUSUUNIEN ENERGIAEHIKUUUS

Teollisuusunien energiatehokkuus

Motiva Oy

Copyright Motiva Oy, Helsinki, 01/2015

Esipuhe

Teollisuusuuni on usein tehtaan merkittävin yksittäinen energiankäyttäjä, usein jopa määrävässä asemassa, minkä vuoksi sen energiatehokkuuteen ja ylijäämälämmön hyödyntämiseen on kiinnitettävä erityistä huomiota.

Teollisuusuunien energiatehokkuus TUET-projekti on Motivan koordinoima yritysten kanssa yhteistyössä tehty käytännön läheinen selvitys teollisuusuunien energiatehokkuuden parantamiseksi taloudellisesti kannattavilla toimilla. Projektin tulokset on esitetty tässä oppaassa, joka on suunnattu erityisesti uunien parissa päivittäin toimiville henkilöille.

Työssä tarkasteltiin projektiin osallistuneiden yritysten omia uuneja, niihin liittyvää toimintaa sekä energiatehokkuuden parantamista. Nämä uuneihin kohdistuneet tarkastelut muodostivat rungon koko työlle. Yritysten uunien energiatehokkuuden parantamista sekä niiden ylijäämälämmön hyödyntämisen tehostamista käsiteltiin työpajoissa yhdessä muun projektiryhmän kanssa. Projektissa hyödynnettiin myös laitetoimittajien/-valmistajien sekä palveluntuottajien osaamista ja kokemuksia teollisuusuuneista.

Tähän raporttiin on koottu ohjeita teollisuusuunien energiatehokkuuden parantamiseksi niin rakenteellisten ratkaisujen kuin toiminnallisten toimenpiteiden avulla. Lisäksi oppaassa on esitetty joitain mukana olleiden yritysten uunien ongelmia ja niihin sovellettavissa olevia ratkaisuja. Ohjeet perustuvat mm. saatuihin tietoihin, paikalle tarkasteluihin ja työpajoissa käytyihin keskusteluihin.

Projektiin osallistuivat seuraavat yritykset: HKScan Oy, Iittala Group Oy Ab, J.M. Huber Finland Oy, Kuusakoski Oy, Metso Minerals Oy ja Sulzer Pumps Finland Oy ja sekä laitevalmistajista Oy Aga Ab ja Sarlin Oy Ab. Lisäksi hankkeeseen osallistuvat myös Rodbay Oy ja Motiva Services Oy. Tämän raportin ovat tehneet yhteistyössä projektipäällikkö Teemu Turunen Motiva Services Oy:stä, johtava asiantuntija Lauri Suomalainen Motiva Oy:stä sekä toimitusjohtaja Sami Vapalahti Rodbay Oy:stä. Motivassa projektipäällikkönä on toiminut Lauri Suomalainen, muut projektissa mukana olleet ovat yksikönpäällikkö Hille Hyytiä, johtava asiantuntija Pekka Ahtila sekä viestintäpäällikkö Minna Mattsson.

Sisällysluettelo

Esipuhe	3
Sisällysluettelo	4
1 Uunit osana teollisuuden prosesseja	6
1.1 Uunien lämmönsiirrosta	7
2 Teollisuusuunityypit ja niiden rakenteet	11
2.1 Yleistä	11
2.2 Polttoainepohjaiset uunit	11
2.2.1 Esimerkkejä polttoainepohjaisista uuneista	11
2.2.2 Poltintekniikka	14
2.3 Sähköuunit	15
2.4 Hörylämmitteiset uunit	16
2.5 Uunien apujärjestelmät	17
2.5.1 Höyry- ja lauhdejärjestelmä	17
2.5.2 Ilmajärjestelmät	18
2.5.3 Jäähdytysjärjestelmät	19
2.5.4 Kaasujärjestelmät	20
2.5.5 Lämmöntalteenotto	20
2.5.6 Paineilmajärjestelmä	22
2.5.7 Kuljetinjärjestelmät	22
3 Teollisuusuunien energiatehokkuuden mittaaminen ja analysointi	24
3.1 Uunin energiatase	24
3.2 Uunin kiinteiden mittausten ja tunnuslukujen hyödyntäminen	25
3.3 Palaminen	28
3.3.1 Polttoprosessin lyhyt kuvaus	28
3.4 Savukaasujen mittaaminen	30
3.5 Sähkötehomittaukset	32
3.6 Ilman ominaisuuksien mittaaminen	33
3.7 Lämpökamerakuvaus	35
3.8 Nesteen virtausmittaukset	36
3.9 Mittausten virhelähteet ja -tarkastelut	37
3.10 Uunin sisäiset endoskooppikuvaukset	38
4 Uunien energiatehokkuuden parantaminen	39

4.1	Mittaamisen ja seurannan kehittäminen	40
4.2	Lämmityksen hyötysuhteen parantaminen	41
4.2.1	Ilma-kaasusuhteen säätö	41
4.2.2	Polttimien suuntaus	42
4.2.3	Palamisnopeuden hallinta	43
4.2.4	Perinteisen polttotekniikan korvaaminen happipolttomenetelmällä	44
4.3	Lämpövuotojen pienentäminen	47
4.3.1	Uunin eristyksen parantaminen	47
4.3.2	Uunin sisäpuolinen pinnoitus	49
4.4	Palo/poistokaasun lämpösisällön hyödyntäminen muualla prosessissa	50
4.4.1	Palamisilman esilämmitys	50
4.4.2	Raaka-aineen esilämmitys	51
4.4.3	Lämmön hyödyntäminen kiinteistön ja veden lämmityksessä	51
4.4.4	Uunin lämpöhäviöiden hyödyntäminen	51
4.5	Muut energiatehokkuustoimenpiteet	52
4.5.1	Prosessiajan seuranta ja optimointi	52
4.5.2	Uunin täyttöaste	53
4.5.3	Sähkövastusten kunnon seuranta	53
4.5.4	Uunin suora ja epäsuora lämmitys	53
4.5.5	Apujärjestelmien toiminnan tehostaminen	54
4.5.6	Uunin saneeraus	56
4.5.7	Loistehon kompensointi	56
4.5.8	Huipputehon minimointi	57
4.5.9	Uunin olosuhteiden hallinta	57
4.5.10	Eräitä lämmöntalteenottoratkaisuja	59
5	Energiatehokkuuden vaikutus uunin päästöihin	61
5.1	Hiilivedyt (CO ja CO₂)	62
5.2	Typen oksidit (NO_x)	63
5.3	Rikin oksidit (SO_x)	64
	Lähteet	66

1 Uunit osana teollisuuden prosesseja

Uunit ovat yksi eniten energiaa kuluttavimmista laiteryhmistä teollisuudessa. Teollisuusuunit eroavat toisistaan riippuen niiden käyttökohteesta ja teollisuudenalasta. Yleisesti teollisuusuunilla tarkoitetaan suljettua kammiota tai astiaa jossa lämmitetään tuotetta. Lämmityksen tarkoituksena voi esimerkiksi olla sulatus, kypsytytys, kuivatus tai kovetus. Seuraavassa on lueteltu tyypillisimpiä uuneja eri teollisuudenaloilta:

- Konepajateollisuus
 - lämpökäsittelyuunit, pinnoitteiden ja maalien kovetusuunit
- Metalliteollisuus ja valimot
 - sulatusuunit, lämpökäsittelyuunit
- Muovi- ja kemianteollisuus
 - kovetusuunit, haihdutusuunit, raaka-aineen tai välituotteen lämmitys uunit
- Metsäteollisuus
 - meesauunit, kuivatusuunit
- Sementti- ja betoniteollisuus
 - poltto-, kovetus- ja kuivatusuunit
- Lasiteollisuus
 - sulatus- ja lämpökäsittelyuunit
- Tiili- ja keramiikkateollisuus
 - poltto, kovetus ja kuivatusuunit
- Elintarviketeollisuus
 - lämmitys-, kuivatus- ja kypsytytuunit.

Uunit voidaan jaotella jatkuvatoimisiin uuneihin ja panosuuneihin. Uunit voidaan jaotella myös niiden hyödyntämien energiamuotojen perusteella seuraavasti:

- Polttoainetta käyttävät uunit
- Sähkölämmitteiset uunit
- Höyryllä lämmitettävät uunit
- Edellisten yhdistelmät

Teollisuusuunit eroavat toisistaan niin rakenteeltaan kuin olosuhteiltaan. Merkittävimmän eron uunien välille tekee kuitenkin niissä prosessoitavan tuotteen ominaisuudet. Kuvassa 1 on vertailtu kahta erityyppistä teollisuusuunia.

Lasin sulatusuuni

- Tuotteen lämpötila ~ 1400 °C
- Lämmitys kaasulla tai sähköllä
- Lasi siirretään sulassa muodossa varsinaisesta sulatuskammiosta seuraavaan vaiheeseen
- Uunissa ei erillistä ilmansyöttöä, mutta sulaan lasimassaan muodostuu uunissa tiheyseron vaikutuksesta luonnollinen kierto, joka tasaa lämpötilaa sulatuskammiossa
- Tuotteen läpimenoaika uunissa hyvin pitkä (jopa 1 vrk)
- Uunin rakenteena monikerroksinen tiilimuuraus sekä massiivinen lämmöntalteenotto

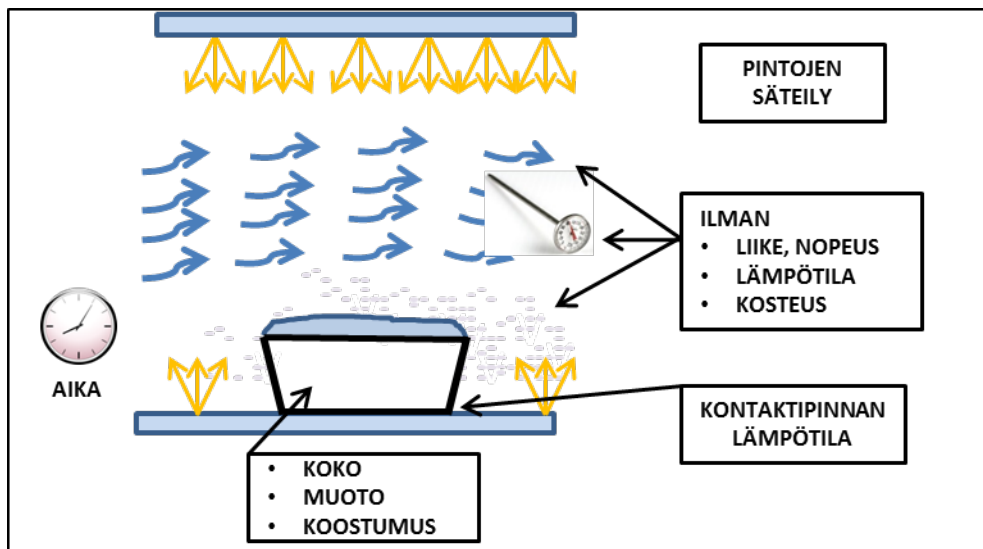
Keraamisen laatan kovetusuuni

- Tuotteen lämpötila ~ 500 °C
- Lämmitys vyöhykkeittäin kymmenillä kaasupolttimilla
- Laatta kulkee kuljettimella koko matkan uunissa ja sitä seuraavalla jäähdytysvyöhykkeellä
- Lämmönsiirtoa tehostetaan tulo- ja poistoilmapuhaltimilla
- Tuotteen läpimenoaika varsin lyhyt (esim. 1 h)
- Uunin rakenteena tyypillisesti huokoisia eristetiiliä

Kuva 1. Esimerkki teollisuusuunien eroavaisuuksista

1.1 Uunien lämmönsiirrosta

Useiden tuotteiden valmistaminen vaatii oikeankaltaisen lämpökäsittelyn; oikean lämpötila, prosessin kesto sekä muut ympäröivät olosuhteet, joten uunit on aina suunniteltava ko. tarkoitukseen soveltuvaksi. Esimerkiksi elintarviketeollisuuden uuneissa on monesta muusta toimialasta poiketen huolehdittava oikeasta uuni-ilman kosteudesta, kuva 2.

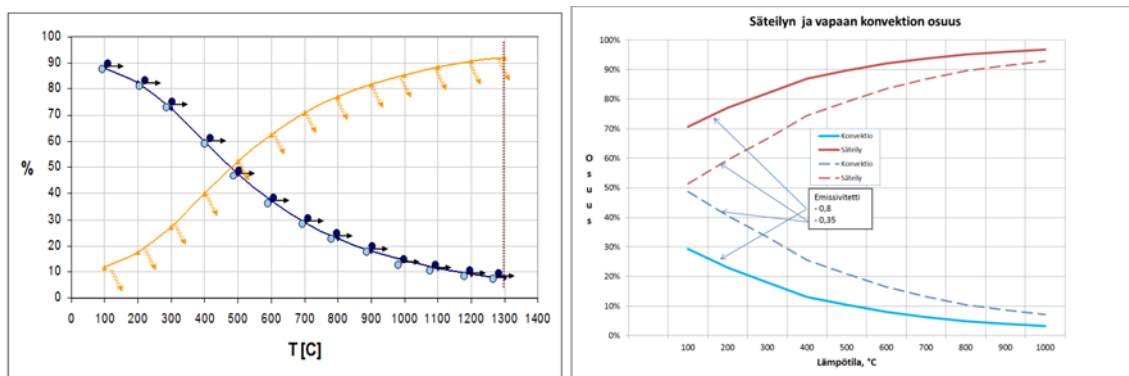


Kuva 2. Paistouunin paistamiseen vaikuttavat tekijät.

Uuneissa tapahtuva lämmönsiirto perustuu pääasiassa konvektioon ja säteilyyn, johtumisen osuus käytännössä aina erittäin pieni. Lämmön siirto konvektiolla on monessa lämpökäsittely-uunissa erityisesti matalammissa lämpötiloissa merkittävä. Konvektioon vaikuttavat voimakkaasti ilmanvirtaukset (vapaa tai pakotettu) sekä tarkasteltavan pinnan suunta (vaaka, pysty) sekä tietysti vallitseva lämpötilaero.

Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, jota jokainen kappale lähettää pelkästään lämpötilansa perusteella. Toisin kuin johtumis- ja konvektiolämmönsiirron tapauksissa säteilylämmönsiirto ei vaadi erillistä väliainetta.

Säteilylämmönsiirto on hyvin monimutkainen prosessi, johon vaikuttavat mm. säteilevän ja vastaanottavan pinnan lämpötilat ja säteilyominaisuudet, säteilyn aallonpituudet jne. Pinnan emissiivisyys määrittää pinnan lähettämän säteilyn ja samassa lämpötilassa olevan mustan kappaleen lähettämän säteilyn osamääränä. Emissiivisyyttä merkitään symbolilla ϵ ja se on aina välillä $0 < \epsilon < 1$. Säteilylämmönsiirto on täysin hallitseva korkeammassa lämpötiloissa konvektioon verrattuna, kuva 3.



Kuva 3. Konvektiivisen ja säteilylämmönsiirron vertailua uunissa (Oy Aga Ab) ja vapaassa tilassa.

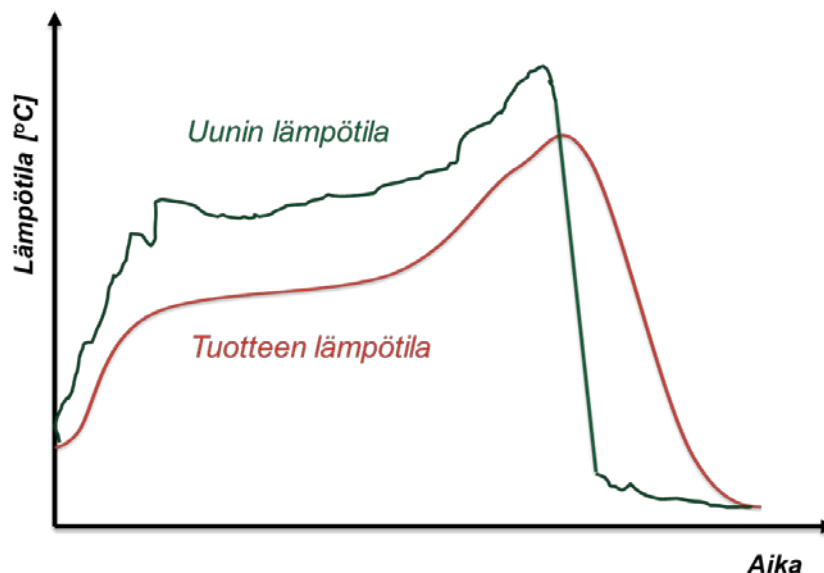
Uunista ulospäin suuntautuvat häviöt on mahdollista laskea uunin rakenteiden läpi johtuvan ja uunin avoimien aukkojen kautta säteilevän lämpötehon (W) osalta alla olevalla kaavalla (Technische universiteit of Eindhoven).

$$Q_2 = \sum [(A_i / R_{ii}) \cdot (T_{wi} - T_0)] + A_k \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4$$

$$R_{ii} = \frac{1}{a_i \cdot \Delta T_2^{0.25} + 4 \cdot \epsilon_2 \cdot \sigma \cdot T_{avg}^4} + \sum \frac{d_i}{\lambda_i}$$

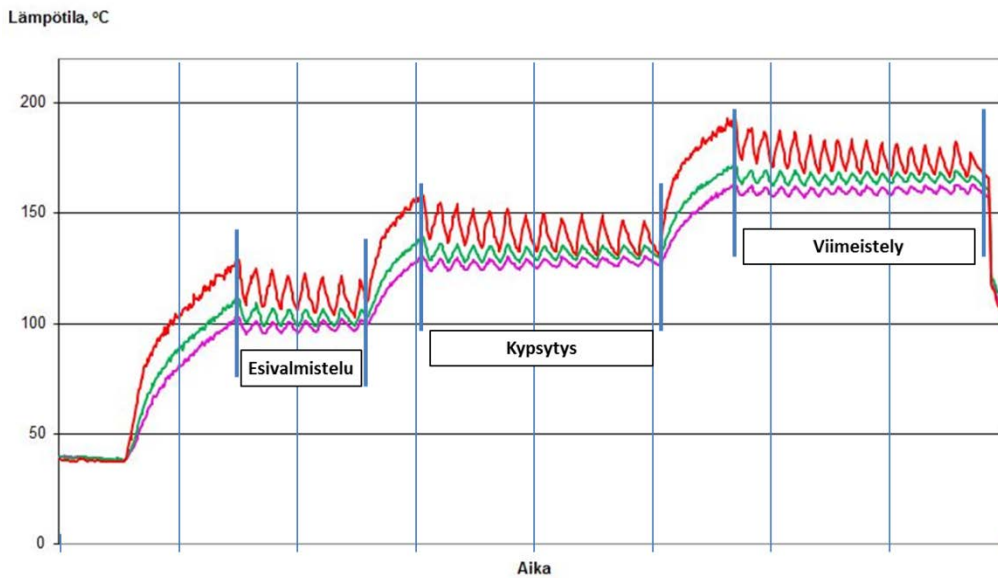
Merkintä	Yksikkö	Selite
A_i	m ²	Seinämän ala
R_{ti}	m ² K/W	Seinän lämpövastus
T_{wi}	K	Seinän lämpötila
T_0	K	Lämpötila uunin ulkopuolella
A_k	m ²	Avoimien pintojen kokonaisala
ϵ	-	Säteilevän alan emissiivisyyskerroin
σ	5,67·10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴	Stefanin–Boltzmannin vakio
T_s	K	Säteilevän alan lämpötila
ΔT_2	K	Lämpötila ero uunin seinän läheisyyden ja ympäristön välillä
α_1	W/m ² K	Vakio: holville 2,25, sivuseinille 1,94 ja pohjalle 1,26
ϵ_2	-	Uunin seinän emissiivisyyskerroin
T_{avg}	K	Uunin seinän läheisyyden ja ympäristön lämpötilan keskiarvo
$\sum d_i/\lambda_i$	m ² K/W	Eristysparametri

Uunissa tuotteet joutuvat erilaisiin ja vaihteleviin olosuhteisiin. Tyypillisiä esimerkkejä olosuhteiden muuttumisesta lämmitysprosessin aikana löytyy useilta toimialoilta. Kuvassa 4 on esitetty elintarviketeollisuuden tuotteen lämpötilan kehittyminen uunissa sekä uunin eri vaiheissa kokeman lämpötilan kehitys.



Kuva 4. Esimerkki teollisuusuunin olosuhteista uunituksen aikana

Kuvassa 5 on esitetty kemian toimialalla toimivan yrityksen sähköuunin lämpötilan kehittyminen ja käyttäytyminen uunituksen eri vaiheiden aikana. Uunin toiminnassa on selkeästi kehitettävää uunin säädön ja lämpötilojen tasaisuuden osalta. Säädön toiminnan puutteet heijastuvat paitsi prosessiin ja sen etenemiseen myös mm. tuotteen lämmitykseen ja edelleen laatuun.



Kuva 5. Esimerkki kemian alan sähköuunin säädön toiminnasta ja sisälämpötiloista uunituksen aikana

2 Teollisuusuunityypit ja niiden rakenteet

2.1 Yleistä

Teollisuusuuneissa on yhteistä lämmitystavasta tms. riippumatta prosessin hallintaan liittyvä automaatiikka, johon voidaan katsoa kuuluvan myös kaikki turvallisuuteen liittyvät laitteet ja järjestelmät. Uunin ohjaus voi olla toteutettu yksinkertaisella ohjauskeskuksella tai se on liitetty ohjelmoitavaan keskusohjausyksikköön, johon on liitetty kaikki tuotantoon, prosessilaitteiden hallintaan, mittaukseen ym. liittyvät toiminnot ja tiedonkeruu. Nykyaikaisissa automaatiojärjestelmissä on mahdollista tuottaa reaaliaikaista tietoa (esim. ns. liikennevalot) operaattoreille ja ohjata näin heidän mahdollisuuksiaan uunien energiatehokkuuden parantamisessa.

Prosessiautomaation hyödyntäminen edellyttää työtä, mutta antaa mahdollisuuksia tarkastella paitsi itse prosessin kulkua tuotantoajossa myös mm. apujärjestelmien ja laitteiden toimintoja uunin varsinaisen toiminnan ollessa pysähdyksissä. Onko kuljetin kytketty prosessin toimintaan, ovatko poistopuhaltimet pysähdyksissä ja sulkupellit kiinni, mitkä laitteet ovat päällä ja miksi jne. Myös nämä pienet asiat ovat tärkeitä energiatehokkuuden kannalta.

Kaikkien uunien osalta on tärkeää, että automaatiikka ei rajoita niitä toimia, joilla energiatehokkuutta halutaan parantaa. Mikäli mittausten kattavuus/puute tai laitteiden säädön epätarkkuus toiminnan ääriarajoilla on este energiatehokkuuden parantamiselle, kannattaa selvittää miten tämä kyseinen asia saada kuntoon. Muussa tapauksessa tavoitteita ei saavuteta, energiaa tuhlaantuu ja yritys menettää kilpailukykyään.

2.2 Polttoainepohjaiset uunit

Polttoainepohjaisen uunin lämmön tuottamiseen käytetään palamisprosessia. Polttoaine voi olla kaasumaista (esimerkiksi maakaasu, propaani, butaani tai prosessikaasu), nestemäistä (esimerkiksi öljy tai prosessin nestemäiset sivutuotteet) tai kiinteää (esimerkiksi hiili tai koksi). Lämmönsiirto uuniin ja sitä kautta tuotteeseen voi olla joko suoraa tai epäsuoraa. Suorassa lämmityksessä joko polttimen liekki tai savukaasu lämmittää tuotetta.

Epäsuorassa lämmityksessä energia siirretään savukaasusta lämmönvaihtimella toiseen väliaineeseen, joka puolestaan lämmittää uunia tai tuotetta. Tästä esimerkkinä ovat monet elintarviketeollisuuden uunit, joissa kaasupolttimella tuotettu lämpö siirretään uuniin ilmaa väliaineena hyödyntäen.

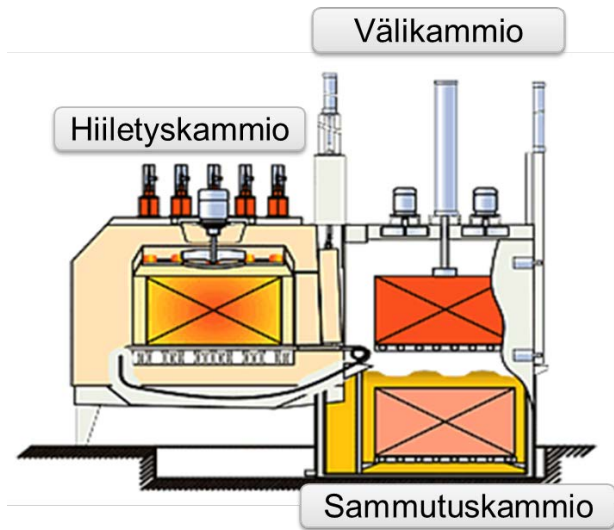
2.2.1 Esimerkkejä polttoainepohjaisista uuneista

Panostoinen lämpökäsittelyuuni

Lämpökäsittelyuuneja käytetään esimerkiksi valukappaleiden ei-toivottujen mikrorakenteiden poistamisessa sekä kappaleen kiderakenteen homogenisoinnissa. Lämpökäsittelyllä voidaan myös muokata aineen ominaisuuksia käyttötarvetta vastaavaksi. Yleisimmin käytettyjä panostoisia lämpökäsittelyuuneja ovat kammiouuni ja vaunu-uuni.

Lämpökäsittelyuunit voivat olla tyypiltään joko panosuuneja tai jatkuvatoimisia. Panosuuneista tyypillisin on kammiouuni, muita vastaavanlaisia uuneja ovat esimerkiksi kuoppauunit ja vaunu-uunit. Kammiouunia lämmitetään tavallisesti sähköllä tai kaasulla. Useimmat kaasulämmitteiset kammiouunit lämmitetään suorasti eli polttokaasu lämmittää suoraan kammiotilaa. Vastaavasti epäsuorassa lämmitysvaihtoehdossa lämmitetään uunia mm. arinan alapuolisilla lämmitysratkaisuilla tai säteilyputkilla katossa tai sivuseinillä.

Itse kammiouuni on tyypillisesti vuorattu samottitiilistä tai -massoista. Kammiouunin yksinkertaistettu toimintaperiaate on esitetty kuvassa 6.



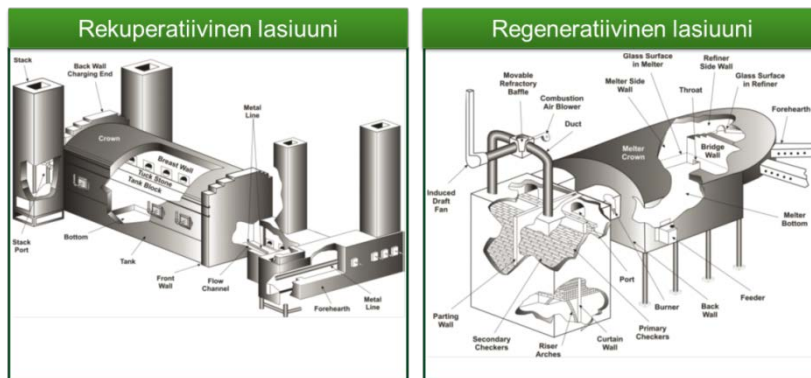
Kuva 6. Kammiouunin yksinkertaistettu toimintaperiaate. (Sintonen)

Jatkuvatoiminen lasiuuni

Jatkuvatoimisessa lasiuunissa sulatetaan ja sekoitetaan sekä lasin neitseelliset raaka-aineet että mahdollinen kierrätyslasi. Sulatus tapahtuu monikerroksisesti tiilillä vuoratussa sulatusholvissa. Varsinaisen sulatusholvin jälkeen lasiuunissa on vyöhyke, jossa sulan lasimassan lämpötila tasataan sopivaksi ja syötetään muotoiltavaksi. Lasiuunit voidaan karkeasti jakaa kahteen perustyyppiin: regeneratiivisiin uuneihin ja rekuperatiivisiin uuneihin.

Regeneratiivisissa uuneissa käytetään varaavaa lämmön talteenottojärjestelmää. Polttimet on tavallisesti sijoitettu palamisilma-/savukaasuaukkojen alle tai niiden sisään. Palamisilma esilämmitetään savukaasujen lämmöllä johtamalla savukaasut läpi kammion, jonka rakenteet ottavat lämmön talteen. Uunia lämmitetään vain yhdeltä puolelta kerrallaan. Tyypillisesti 20 - 30 minuutin jälkeen kaasujen kulkusuunta käännetään ja palamisilma otetaan sisään aiemmin savukaasuilla lämmitetyn kammion kautta. Näin päästään jopa 1400 °C:n esilämmityslämpötiloihin, joilla saadaan aikaan aikaan hyvä termien hyötysuhde. Sivuilta lämmitettävässä regeneratiivisessa uunissa paloaukot ja polttimet on sijoitettu uunin sivuille ja regenerointikammiot ovat uunin molemmin puolin. Päästä lämmitettävän uunin toimintaperiaate on sama, paitsi että molemmat regenerointikammiot sijaitsevat uunin samassa päässä.

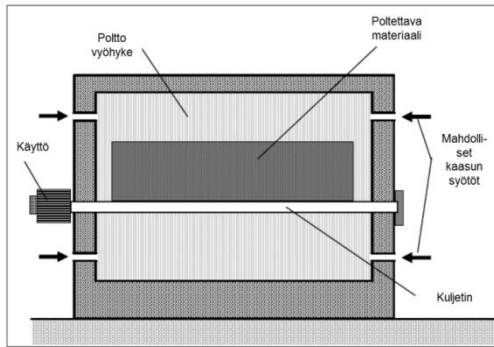
Rekuperatiivisissa uuneissa käytetään lämmön talteenottoon lämmönvaihtimia (joita kutsutaan rekuperaattoreiksi), joissa palamisilmaa lämmitetään jatkuvatoimisesti savukaasuilla. Ilman esilämmityslämpötila jää metallisilla rekuperaattoreilla noin 800 celsiusasteeseen. Rekuperatiivisten uunien ominaissulatusteho (laskettuna sulatuskammion pinta-alaa kohti) on noin 30 % pienempi kuin regeneratiivisten uunien. Polttimet on sijoitettu uunin molemmille sivuille kohtisuoraan lasin virtaussuuntaan nähden ja uunia lämmitetään jatkuvasti molemman puolen polttimilla. Tämän tyyppisiä uuneja käytetään ensisijaisesti silloin, kun halutaan käytön joustavuutta yhdistettynä pieneen alkuinvestointiin. Näin on erityisesti niissä tapauksissa, joissa tuotantomäärät ovat liian pieniä, jotta regeneratiivisten uunien käyttö olisi taloudellisesti kannattavaa. Vaikka rekuperatiiviset uunit sopivatkin erityisesti pienen tuotannon laitoksiin, eivät suuren kapasiteetin uunitkaan (jopa 400 tonnia vuorokaudessa) ole harvinaisia. Kuvassa 4 on esitetty rekuperatiivisen ja regeneratiivisen lasiuunien rakenteet. Lasin sulatusuunin suuresta lämpöä varaavasta massasta (sula lasi ja uunin rakenteet) johtuen lasiuunin toiminta on stabiilia eikä sen toimintaan voi tehdä suuria muutoksia normaalin ajon aikana.



Kuva 7. Esimerkit regeneratiivisen ja rekuperatiivisen lasiuunin rakenteista (Energy and Environmental Profile of the U.S. Glass Industry)

Jatkuvatoiminen keraamisen laatan polttouuni

Keraamisen laatan uunissa laatta poltetaan lopulliseen kovuuteensa tai kovetetaan sen lasite-pinta, kuva 8. Laattaa poltetaan uunissa 30–50 minuuttia riippuen laattalaadusta. Lämpötila nousee polttouunissa korkeimmillaan noin viiden minuutin ajaksi yli 1000 °C:seen. Laatat kulkevat uunissa kuljetinhihnan päällä. Itse uunit on tyypillisesti eristetty sisäpuolelta keraamisella tiilellä ja villalla. Polttouunin energialähteenä on neste- tai maakaasu, jota syötetään uuniin useisiin eri kohtiin. Uuneissa voi olla useita kymmeniä, jopa sata kaasupoltinta. Laatan polttouuneissa on tyypillisesti sekä ilman syöttöjä (jäähdytys- ja palamisilma) sekä ilmanpoistoja, joiden kautta savukaasu ja mahdolliset käryt poistetaan uunista.



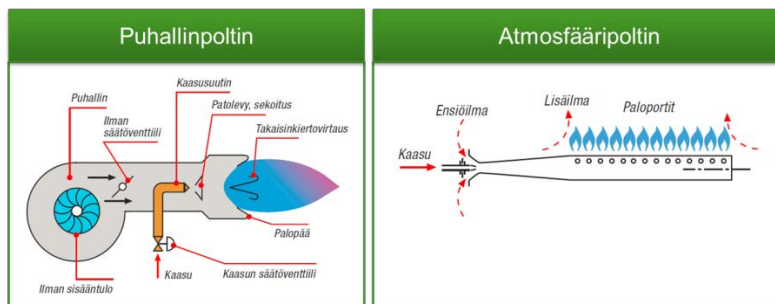
Kuva 8. Esimerkki keraamisen materiaalin polttouunista (European commission)

Merkittävimmät keraamisen laatan polttouunin parametreista ovat uunin täyttöaste, ajonopeus, uunin eri vyöhykkeiden lämpötilatasot sekä poistoilma ja jäähdytysilma määrät.

2.2.2 Poltintekniikka

Kaasupolttimet jaotellaan tyypillisesti niiden sekoitusperiaatteen mukaan esisekoitus- ja suutinsekoituspolttimiin. Esisekoituspolttimessa polttoilma ja kaasu sekoitetaan ennen suutinta. Vastaavasti suutinsekoituksessa polttoilma ja kaasu kohtaavat palotilassa. Monet polttimet ovat käytännössä näiden välimuotoja, joissa osa palamisilmasta sekoittuu kaasuun ennen poltinpäätä ja loput täydelliseen palamiseen tarvittavasta ilmasta ohjataan liekkirintamaan. Esisekoituksella ja palamisilman vaiheistuksella sekä poltinpään muotoilulla vaikutetaan liekin ominaisuuksiin, kuten sen muotoon, pituuteen ja säteilyominaisuuksiin. Myös typenoksidipäästötasoon voidaan vaikuttaa palamisilman sekoitustavalla.

Yleisimmin käytössä olevat suutinsekoitteiset polttimet jaetaan usein polttokaasun ja palamisilman sekoitussuhteiden perusteella kahteen perustyyppiin: atmosfääripolttimiin ja puhallinpolttimiin, kuva 9.



Kuva 9. Puhallinpolttimen ja atmosfääripolttimen toimintaperiaate (Maakaasukäsikirja)

Atmosfääripoltinta käytetään vain pienitehoisissa teollisuuskohteissa (< 1 MW). Palamiseen tarvittava polttoilma imetään polttimen ympäristöstä polttokaasun virtauksen ja kattilan vedon aiheuttaman virtauksen avulla. Primääri-ilma sekoitetaan polttokaasuun venturiputkessa ja sekundaari-ilma virtaa vapaasti liekin ympärillä. Koska sekoittuminen on heikkoa atmosfääripolt-

timessa, täydellinen palaminen pyritään varmistamaan suurella ilmaylimäärällä, mikä heikentää palamisen hyötysuhdetta ja tätä kautta energiatehokkuutta. Toinen polttimen heikkous on pieni paine-ero ympäristön ja palamistilan välillä, minkä vuoksi palaminen on altista ulkoisille häiriöille. Polttimen eduksi voidaan katsoa yksinkertainen rakenne, tehon säädön helppo toteutus ja hiljainen käyntiääni.

Puhallinpolttimessa palamisilma sekoitetaan polttokaasuun puhaltimen avulla. Sekoituksen varmistamiseksi virtaukset kohtaavat lähes kohtisuoraan. Puhaltimen ansiosta tulipesään saadaan halutut virtausolosuhteet ja painetaso, jotta palaminen on tehokasta. Puhallin mahdollistaa myös vakaan ja tarkan säädön. Puhallinpolttin on rakenteeltaan monimutkaisempi ja kalliimpi kuin atmosfääripoltin, mutta hyötysuhteeltaan parempi. Tämän vuoksi lähes kaikki teollisuuspolttimet ovat puhallinpolttimia. Isommilla tehoilla käytetään useampaa poltinta.

Polttimina voidaan käyttää toiminnoiltaan useamman tyyppisiä, kuitenkin siten, että yhdessä uunissa polttimet ovat samanlaisia. Polttimet voivat olla on/off-, high/low-tyyppisiä tai sitten moduloivia, jolloin niiden tehoa voidaan säätää portaattomasti. Tavanomaisin ratkaisu on usea on/off-poltin yhdessä uunissa.

2.3 Sähköuunit

Kappalevarateollisuuden koveutus-, kuivaus- ja lämpökäsittelyuuneista merkittävä osa lämmitetään sähköllä. Myös pienemmät lasiuunit ovat tyypillisesti sähkölämmitteisiä. Sähkölämmitteisten uunien hyötysuhde on yleensä korkea, jopa 90 %. Toisena etuna sähköuuneilla on polttoainelämmitteisiin uuneihin nähden niiden säädön tarkkuus ja nopeus. Sähkölämmitteissä uuneissa on kuitenkin otettava huomioon yleisesti sähkölämmitykselle ominaiset tekijät, kuten sähkön loisteho ja kulutushuippujen aiheuttamat kustannukset.

Sähkölämmitys jaetaan suoriin ja epäsuoriin lämmitysmenetelmiin. Suorissa menetelmissä sähkö aiheuttaa suoraan kappaleiden lämpenemisen. Lämmitys tapahtuu johtamalla sähkö kappaleeseen, synnyttämällä lämpö induktiolla tai aiheuttamalla atomien ja molekyylien liikkeen nopeutumista esimerkiksi mikroaalloilla. Epäsuorassa lämmityksessä lämmitetään vastusta tai väliainetta ja energia siirretään kappaleeseen käyttämällä johtumista, siirtoa, säteilyä tai näiden yhdistelmää. Taulukossa 1 on esitetty suoria ja epäsuoria lämmitysmenetelmiä.

Suoria kuumennusmenetelmiä	Epäsuoria kuumennusmenetelmää
Konduktiokuumennus (suora vastuskuumennus)	Epäsuora vastuskuumennus
Induktiokuumennus	Epäsuora valokaarikuumennus
Dielektrinen kuumennus	Infrapunakuumennus
Elektronisuihkukuumennus	Plasmakuumennus
Laserkuumennus	
Suora valokaarikuumennus	

Taulukko 1. Suoria ja epäsuoria lämmitysmenetelmiä

Sähkölämpötekniikoiden tehokkuutta ja käyttökustannuksia voidaan arvioida esim. korvaussuhteen avulla, joka kuvaa kuinka monta fossiilisilla polttoaineilla tehtyä lämpöenergiayksikköä voidaan korvata sähkölämpötekniikalla tehdyllä sähköenergiayksiköllä. Tyypillisiä korvaussuhteen arvoja yleisimmille sähkölämpötekniikoille (Orfeuil):

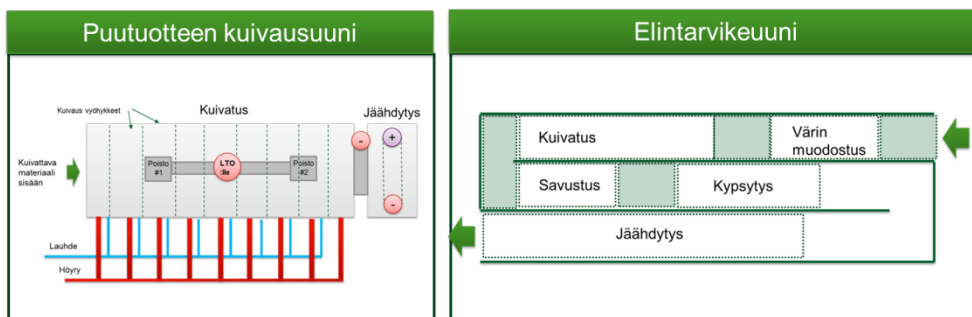
Konduktiokuumennus	4 – 6
Induktiokuumennus	3 – 5
Laserkuumennus	3 – 6

Teollisissa uuneissa tyypillisimmin käytetyt sähkölämmitysmenetelmät ovat konduktiokuumennus ja epäsuora vastuskuumennus.

2.4 Hörylämmitteiset uunit

Hörylämmitteisiä uuneja hyödynnetään teollisuudessa lähinnä kuivatustarkoituksessa esimerkiksi puutuoteteollisuudessa. Lisäksi erityisenä käyttökohteena ovat elintarviketeollisuuden uunit, joissa höyryn avulla pidetään sopiva kosteus valmistettavalle tuotteelle. Esimerkiksi leipäuuneissa voidaan hörylämmityksen lisäksi puhaltaa höyryä suoraan uunikammioon. Höyry muokkaa leivän kuoren ominaisuudet sopiviksi halutun kiinteyden ja ulkonäön aikaansaamiseksi.

Hörylämmitteiset uunit eroavat rakenteeltaan toisistaan riippuen valmistettavan tuotteen ominaisuuksista ja laatuvaatimuksista. Kuvassa 10 on esitetty kahden hörylämmitteisen uunin yksinkertaistettu rakenne.



Kuva 10. Puutuotteen kuivausuunin ja elintarvikeuunin yksinkertaistettu rakenne

Puutuotteen kuivausuunissa kuivatus tapahtuu yhdessä kuivatuskammiossa, jota lämmitetään useammalla lämmitysvyöhykkeellä. Kierrätysilman lämmitys tapahtuu kuivauskammion päällä olevassa välikattotilassa, johon sijoitettu hörylämmönvaihdin ja kiertoilmapuhallin. Lämmitetty ilma puhalletaan välikattotilasta suutinlaatikoiden kautta puumateriaalin pintaan tai sekaan. Lämmitysvyöhykkeissä ilmankierto tapahtuu poikkisuuntaan puuraaka-aineen kulkusuuntaan nähden. Puumateriaalista haihtunut vesi poistetaan poistokanaviston kautta, joka on sijoitettu kuivauskammion päälle.

Elintarviketeollisuuden esimerkki on lihatuoteuuni, joka muodostuu neljästä eri tuotantovaiheesta. Jokaiseen vaiheeseen luodaan prosessinvaiheelle ominaiset olosuhteet (lämpötila ja

kosteus). Eri prosessivaiheiden lämpötilaa säädetään höyrylämmönvaihtimien höyryn syötön avulla ja vastaavasti kosteutta säädetään suoralla höyryn syötöllä tuloilmaan. Lämmönsiirto tuotteen välittömään läheisyyteen tapahtuu ilman avulla, minkä takia jokaisessa vaiheessa on sekä tulo- että poistoilmaelimiä. Olennaista tämän tyyppisessä uunissa on, että eri vaiheiden ilmavirrat eivät saa sekoittua.

2.5 Uunien apujärjestelmät

Uuni tarvitsee toimiakseen lukuisia apujärjestelmiä, jotka luovat uuniin sen vaatimat olosuhteet tai takaavat sille raaka-aineen tai energiansyötön. Yleisimpiä uunien apujärjestelmiä ovat:

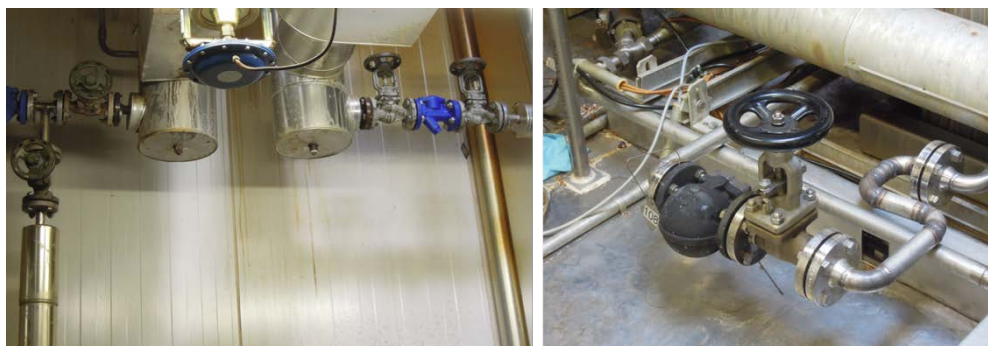
- höyry- ja lauhdejärjestelmä
- ilmajärjestelmät
- jäähdytysjärjestelmät
- kaasujärjestelmät
- lämmöntalteenotto
- paineilmajärjestelmä.

Kaikki edellä mainitut apujärjestelmät on kytkettävä mahdollisimman suurelta osin prosessin toimintaan tarpeettoman energiankulutuksen välttämiseksi.

2.5.1 Höyry- ja lauhdejärjestelmä

Höyry- ja lauhdejärjestelmällä tarkoitetaan kaikkia höyryn jakamiseen ja lauhteenkeräilyyn tarvittavia laitteistoja (kuva 11). Tyypillisesti höyry- ja lauhdejärjestelmä muodostuu sisältää seuraavista osista:

- höyry- ja lauhdeputkistot
- lauhteenpoistimet
- säätö- ja ohjausventtiilit
- lauhdesäiliöt
- lauhduttimet
- höyrynsyöttölaitteistot
- höyrylämmönvaihtimet.

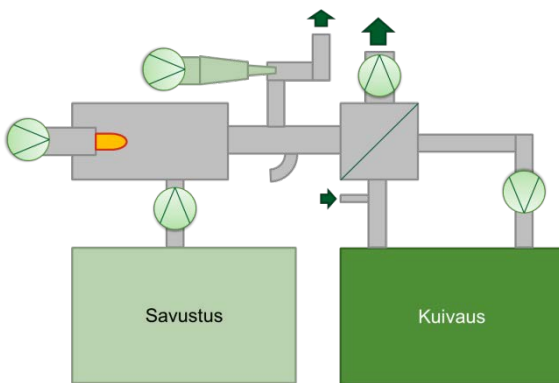


Kuva 11. Vasemmalla kahden eripaineisen höyryverkoston putkistoa, oikealla uimurilauhteenerotin.

Höyry- ja lauhdejärjestelmän toimivuus on tärkeää sekä prosessin toimivuuden kannalta että energiatehokkuuden kannalta. Höyryä käyttävien uunien tarkasteluissa höyry- ja lauhdejärjestelmä on otettava aina olennaiseksi osaksi tarkastelua, erityisesti on huolehdittava lauhteenpoistimien oikeasta toiminnasta. Myös putkistojen eristyksistä on huolehdittava säännöllisesti, sillä ne pyrkivät kolhiintumaan ajan myötä.

2.5.2 Ilmajärjestelmät

Ilmajärjestelmillä tuodaan tuoretta, raitista ilmaa uuniin tai siitä poistetaan prosessi-ilmaa tai savukaasuja. Ilmajärjestelmät muodostuvat puhaltimista, ilmakanavista, säätö- ja sulkupelleistä, säätölaitteista sekä prosessiteknistä erityislaitteista (esim. lämmöntalteenottolaitteet, suuttimet ja ilmaverhot). Kuvassa 12 on esitetty esimerkkinä periaatekuva lihauunin ilmajärjestelmästä.



Kuva 12. Esimerkki lihauunin kahden toisiinsa sidoksissa olevan prosessivaiheen ilmajärjestelmästä

Ilmajärjestelmät on aina otettava mukaan uunien energiatehokkuuden parantamista koskeviin tarkasteluihin. Niiden toimivuus tai toimimattomuus näkyy usein suoraan uunin olosuhteissa ja toiminnan stabiilisuudessa.

Käyttäjän on hyvä huomata, ettei sekoituspeltien asentoa osoittava asteikko normaalisti kerro ilma- tai kaasuvirtausten suhdetta. Kanavistojen keskinäisellä paine-erolla on merkittävä vaikutus ko. ilmavirtoihin. Lisäksi on otettava huomioon, että sekoituspeltien asentoa muutettaessa virtaukset muuttuvat epälineaarisesti. Tieto todellisista ilmavirroista saadaan vain erillisillä mittauksilla.

Ilmajärjestelmien toiminnan kannalta on tärkeitä varmistaa, että vuodot on eliminoitu ja pellit sulkeutuvat tiiviisti. Huonosti sulkeutuva pelti tai vioittunut peltimoottori heikentää olennaisesti prosessin säädettävyyttä.

2.5.3 Jäähdytysjärjestelmät

Teollisuusuunien jäähdytysjärjestelmät voidaan jakaa kahteen luokkaan seuraavasti:

- avoimet jäähdytysjärjestelmät
- suljetut jäähdytysjärjestelmät.

Avoimessa jäähdytysjärjestelmässä jäähdyttävä väliaine johdetaan jäähdytettävän laitteen läpi ja sen jälkeen takaisin sen alkulähteeseen (esim. jäähdytysvesiallas tai joki). Tyypillisesti jäähdyttävänä väliaineena on vesi. Jäähdytykseen voidaan käyttää myös ilmaa, mutta sen pienempi ominaislämpökapasiteetti edellyttää suurempia massavirtoja ja näin ollen sähkötehoa. Avoimissa järjestelmissä jäähdytystä saadaan tehostettua veden haihtumisella esimerkiksi haihdutus-tornissa.

Avoimessa vesijäähdytyksessä on käytettävä teollisuusvettä (järvi-, joki-), jolloin kustannukset pysyvät kohtuullisina. Puhdistetun talousveden käyttö aiheuttaa merkittävät kustannukset yritykselle.

Suljetussa järjestelmässä vesi tai veden ja jäätymisenestoaineen (esim. glykoli) seos kiertää piirissä vuorotellen lämmiten ja jäähtyen olematta kontaktissa ympäröivään ilmaan. Suljetut järjestelmät jaetaan yksiosaisiin, jolloin ensiöpiiriä jäähdytetään esimerkiksi ulkoilmalla tai vedellä, ja kaksiosaisiin, jolloin ensiöpiiri on suljettu ja toisiopiiri voi olla avoin tai suljettu.

Teollisuusuunien yhteydessä on käytössä kaikkia edellä mainittuja menetelmiä ja niiden yhdistelmiä.

Pumpattavan veden määrä kannattaa pitää mahdollisimman pienenä ja pyrkiä maksimoimaan järjestelmän suunnitteluarvojen puitteissa ulostulevan veden lämpötila, sillä pumppauksen tehontarve on verrannollinen virtausnopeuden toiseen potenssiin.



Kuva 13. Esimerkki lasin jäähdytyksestä vedellä

Jäähdytysjärjestelmissä on ehdottomasti otettava huomioon lämmönsiirtopintojen likaantumisen ajan myötä. Tämä korostuu erityisesti avoimissa järjestelmissä, missä järjestelmään tulee jatkuvasti uutta vettä. Likaantuminen näkyy heikentyneenä jäähdytystehona, mikä heikentää prosessin toimivuutta, sekä jäähdytysveden pumppaustarpeen lisääntymisenä. Jälkimmäinen näkyy suoraan sähkökulutuksen kasvuna. Jäähdytystarve voi myös olla erilainen eri tuotteille, jolloin jäähdytysjärjestelmän ohjattavuus nousee olennaiseen osaan tätä osakokonaisuutta tehostettaessa.

Uunista poistettavia kuumia kappaleita jäähdytetään kastamalla ne huonelämpöiseen tai hieman lämpimämpään nesteeseen. Lämmön hyödyntäminen nesteestä ei yleensä ole kovin kannattavaa, sillä lämpötilataso on alhainen ja toiminta useimmiten jaksottaista. Lämpöpumpun käyttö on käytännössä ainoa mielekäs vaihtoehto kannattavuustarkastelujen pohjaksi.

2.5.4 Kaasujärjestelmät

Kaasujärjestelmillä tarkoitetaan kaikkia kaasun jakoon ja käyttöön liittyviä järjestelmiä. Kaasujärjestelmät voivat toimia kokonaan kaasufaasissa tai osittain neste-/kaasufaasissa. Kun tehtaalle tulee kaasuputki, järjestelmä toimii kokonaan kaasufaasissa. Vastaavasti kun tehtaalla hyödynnetään nesteytettyjä kaasuja, osa järjestelmästä toimii nestefaasissa (ennen höyrystimiä).

Kaasujärjestelmien olennaisimmat komponentit ovat

- kaasulinjat
- säiliöt (neste- ja kaasufaasi)
- kaasun höyrystimet
- varojärjestelmät onnettomuustilanteita varten
- säätölaitteet (venttiilit ja toimilaitteet)
- kaasun käyttölaitteet (esim. polttimet tai muut prosessilaitteet).

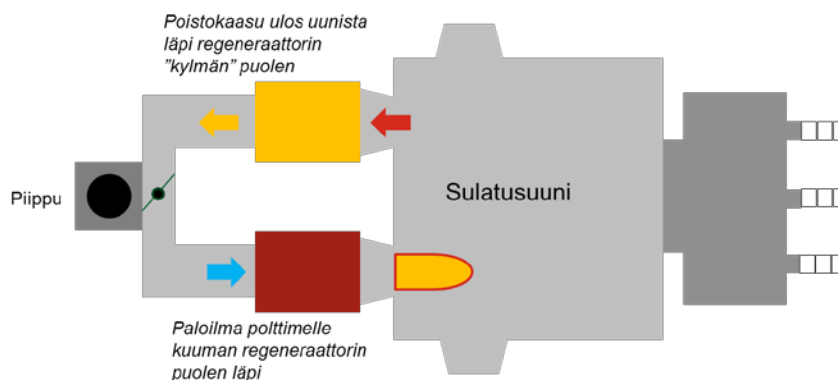
Uunien tapauksessa kaasua hyödynnetään polttoaineena, jolloin merkittävään osaan nousee kaasupolttimien mitoitus, ohjaustavat ja niiden kunnossapito. Kun uunilla hyödynnetään nesteytettyä kaasua, on tärkeää tarkastella myös kaasun höyrystimen toimintaa ja sen energiatehokkuutta.

2.5.5 Lämmöntalteenotto

Uunien osalta lämmöntalteenotto on merkittävin energiatehokkuuden osa-alueeksi. Tässä yhteydessä lämmöntalteenottoratkaisut jaetaan kolmeen osaan:

- ulkoiset lämmöntalteenottoratkaisut
- kiinteästi uunirakenteeseen liittyvät lämmöntalteenottoratkaisut (regeneratiiviset uunit)
- rekuperatiiviset tai regeneratiiviset polttimet.

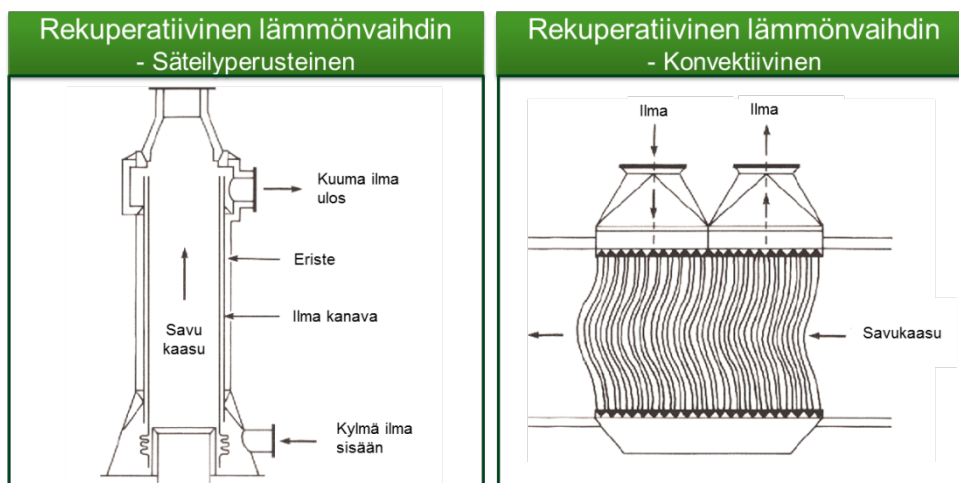
Tyypillisesti jatkuvatoimisissa isoissa teollisuusuuneissa on regeneratiivinen lämmöntalteenotto, jossa lämpöä sidotaan regeneraattorin tiilirakenteeseen (Kuva 14).



Kuva 14. Esimerkki regeneratiivisesta uunista ja sen lämmöntalteenotosta

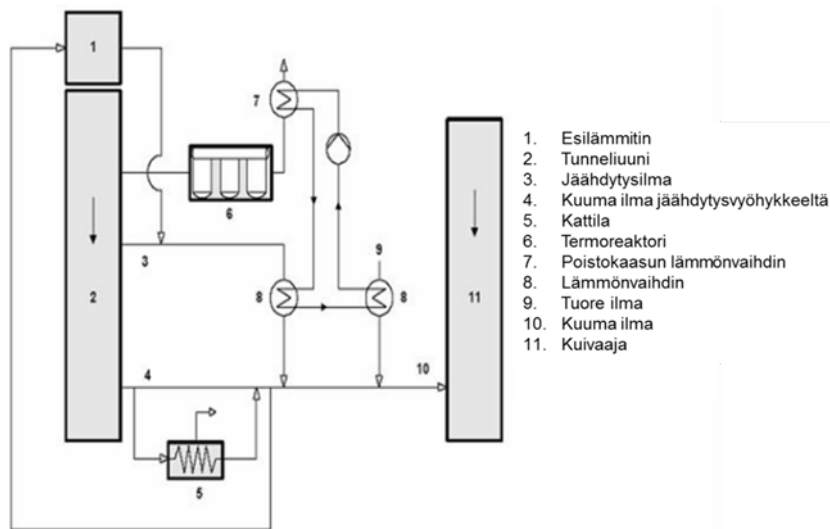
Vastaavasti pienemmissä uuneissa tyypillisimpiä ovat erilaiset rekuperatiiviset lämmöntalteenotot, joissa toimintaperiaatteena on joko säteily tai siirto (konvektio) (kuva 15).

Ehkä vielä yleisemmin tänä päivänä uuneissa käytetään rekuperatiivisia tai regeneratiivisia polttimia, jolloin uunista poistuvan lämmön hyödyntämisen samanaikaisuuskerroin on erittäin hyvä.



Kuva 15. Rekuperatiivisten lämmönvaihdinten rakenne (EMT-India)

Olellista kaikissa lämmöntalteenottoratkaisuissa on se, että talteenotettu lämpö saadaan hyödynnettyä mahdollisimman tehokkaasti prosessissa. Lämmöntalteenoton toisena puolena on aina kustannusnäkökulma (mihin lämpötilaan/energiamäärään saakka lämmön talteenotto on kannattavaa). Tässä tarkastelussa on huomioitava myös lämmönsiirtomatkat muuhun prosessiin sekä lämmöntalteenoton ja lämmöntarpeen samanaikaisuus. Uunin lämmöntalteenottoa on aina tarkasteltava kokonaisuutena ottaen huomioon myös ympäröivän prosessin asettamat reunaehdot. Kuvassa 16 on esitetty esimerkki lämmönkäytön kokonaihallinnasta.



1. Esilämmitin
2. Tunneliuuni
3. Jäähdytysilma
4. Kuuma ilma jäähdytysvyöhykkeeltä
5. Kattila
6. Termoreaktori
7. Poistokaasun lämmönvaihdin
8. Lämmönvaihdin
9. Tuore ilma
10. Kuuma ilma
11. Kuivaaja

Kuva 16. Esimerkki lämmöntalteenoton kokonaishallinnasta keraamisessa teollisuudessa

Lämmöntalteenottolaitteiden lämpöpintojen puhtaudesta on pidettävä huolta säännöllisesti. Toisilla laitoksilla se tarkoittaa kerran vuodessa toisilla kerran kuukaudessa tai useamminkin.

Lämmöntalteenottojärjestelmän toiminnan tehokkaan hyödyntämisen vuoksi se on mitta-
roitava huolellisesti sekä lämpötilojen että virtausten osalta sekä ensiö- että toisiopuolelta. Li-
kaantunut LTO-laite aiheuttaa energialaskun kasvua, mutta vielä haitallisempaa on sen vaiku-
tukset uuniprosessille virtausten kuristuessa ja painesuhteiden muuttuessa.

2.5.6 Paineilmajärjestelmä

Tyypillisesti teollisuusuunin energiatehokkuuden parantamisessa paineilmajärjestelmä ei näyt-
tele merkittävää osaa, mutta koko tuotantolaitosta tarkasteltaessa merkitys voi olla suuri.

Paineilmaa käytetään joissain uuneissa mittausinstrumenttien jäähdytyksessä ja puhtaana
pitämisessä. Näissä kohteissa kannattaa pohtia vaihtoehtoisia ratkaisuja, mm. matalapainepu-
halluksen käyttöä, sillä paineilman jatkuva puhalluskäyttö on huomattavan kallista. Ainakin ko-
uunin paineilman kulutus kannattaa selvittää perusteellisesti kompressorihuoneesta alkaen, sillä
hyvinkin tavanomainen paineilmaverkoston vuoto on suuruusluokkaa 20-30 %. Lisäksi on muis-
tettava, että paineilma tuotetaan sähköllä, josta suuruusluokaltaan 85- 90 % muuttuu lämmöksi
ilman puristamisen yhteydessä ja vain n. 5...10 % käytetystä sähköstä saadaan hyötykäyttöön.
Tätä puristuksessa syntyynyttä lämpöä hyödynnetään tavallisesti tehtaalla lämmityksessä. On-
gelmaksiksi muodostuu usein kesäaika, jolloin hyödyntämiskohteita on rajoitetusti.

2.5.7 Kuljetinjärjestelmät

Jatkuvatoimisissa uuneissa on kuljettimia, jotka siirtävät materiaalia uuniin ja sieltä ulos tuotan-
non määrittelemässä tahdissa. Kuljettimen hankinnassa soveltuvuus, käyttövarmuus, helppo-
huoltoisuus ym. ovat keskeisimmät valintakriteerit. Kuljettimen pieni lämpökapasiteetti (vähäi-

nen massa, materiaali) vähentää osaltaan käytettävää lämmitysenergiaa, mikä korostuu epäjatkuvässä käytössä, jolloin rakenteet ehtivät jäähtyä. Kuljettimien tarvitsema sähkönkulutus on pieni verrattuna uunin energian kokonaiskulutukseen.

Kuljetin aukot ovat uunin lämpötekniikan osalta ongelmallisia. Niistä pitää tehdä mahdollisimman pienet, jotta tuotanto mahtuu niistä sisälle ja niiden haittavaikutukset olisivat vähäiset. Aukkojen suojaksi voidaan laittaa erilaisia prosessin mukaan toimivia läppiä, lämmönkestäviä verhoja, roikkuvia kettinginpätkiä tms. Tärkeintä on, että aukko on vapaalta pinta-alaltaan mahdollisimman pieni ja suojattu ulkopuolisilta häiriövirtauksilta.

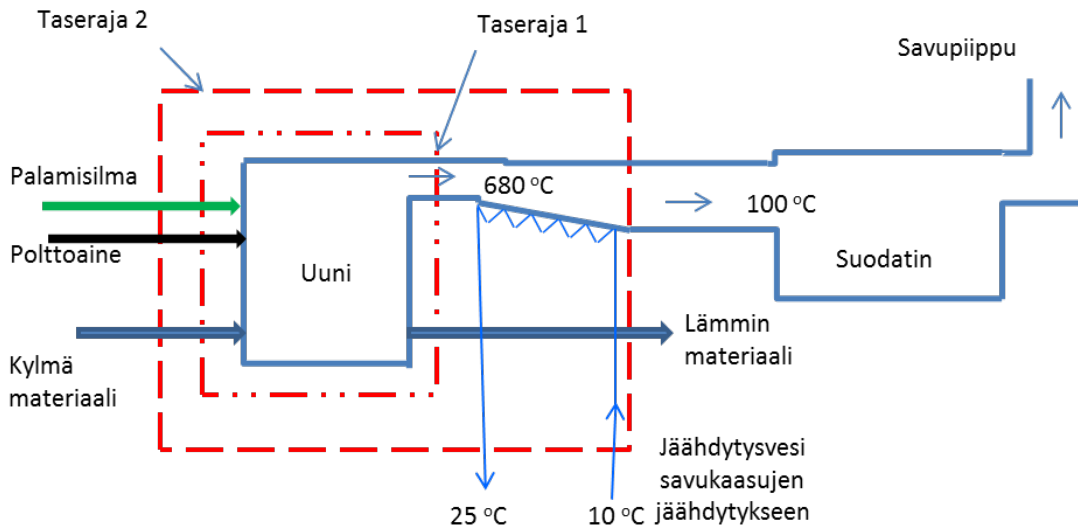
Kuljetinaukkojen ympäristön häiriöttömyydestä on myös huolehdittava. Aukon kohdalla tapahtuvat ilmavirtaukset ja niiden voimakkaat vaihtelut häiritsevät uunin lämpötasapainoa, mikä vaikuttaa myös laatuun. Erityisesti ovien lähistöllä esiintyy tämän kaltaisia virtauksia, jotka on eliminoitava vaikkapa liikuteltavin sermin. Tämä ongelma korostuu, kun uuni on sisältä yhtä suurta suoraa tilaa.

Esimerkiksi maalauksen kuivatuslinjastoilla uunitila voi on ylhäältä auki. Tällöin aukkoon kannattaa asentaa esim. toisiaan vasten painautuvat joustavasta materiaalista tehdyt kaistaleet, jotka estävät lämmön karkaamasta ylhäältä, mutta jotka eivät haittaa kappaleiden siirtoa linjalta.

3 Teollisuusuunien energiatehokkuuden mittaaminen ja analysointi

3.1 Uunin energiatase

Energiatehokkuutta parannettaessa on uunille alkuvaiheessa määriteltävä energiatase, joka määrittelee tarkasti ja aukottomasti ne rajat, joiden perusteella uunin käyttämä energia sekä siihen liittyvä tuotanto ja muut toiminnot voidaan mitata. Energiatase voidaan määritellä siten, että se sisältää vain uunin rakenteineen (sis. mm. polttimet) tai sitten taseraja voidaan määritellä laajemmaksi, jolloin tarkastelun piiriin otetaan myös esim. lämmöntalteenottolaitteet. Kuvassa # on esitetty esimerkki uunista ja sen eritasoisista taserajoista. Tärkeintä on, että tarkasteltavat asiat voidaan mitata luotettavasti.



Kuva 17. Yksinkertainen esimerkki uunin taserajoista

Kaikki taserajat ylittävät energiavirrat on mitattava, siis sekä lämpö-, polttoaine-, sähkö-, vesi- että materiaalivirrat ja niiden osalta tapahtuvat muutokset. Lisäksi on kyettävä mittaamaan mm. paineilman kulutus. Tarkastelut voidaan myös rajata pienempiin osa-alueisiin, esim. uunia palvelevat polttimet tai puhaltimet, mutta tällöin on pidettävä mielessä, että silloin tarkastellaan osakokonaisuutta.

Tasetarkastelun alkuvaiheessa voidaan käyttää karkeampaa tasetta suuruusluokkien selvittämiseen ja tarkentaa sitä ajan myötä omiin tarpeisiin sopivaksi. Tasetarkastelu on mahdollista tehdä myös taloudellisten parametrien perusteella, jolloin käytettyjä energia- ja materiaalivirtoja määriä tarkastellaan europohjaisina.

Tasetarkastelussa on otettava huomioon myös mm. laitteiden, rakenteiden ja tuotantovirtojen lämpökapasiteetit ja niissä tapahtuvat hitaat muutokset. Erityisesti tämä korostuu mm. kertaluonteisissa panosuunien tarkasteluissa, joissa lämpötilojen vaihtelut ovat suuret. Tarkastelujakson on oltava riittävän pitkä, jotta tarkastelusta saadaan luotettavia tuloksia.

Energiatehokkuuden tunnusluvut

Teollisuustuotannolle tyypillinen luku on *ominaisenergiankulutus* (OEK tai SEC eli specific energy consumption), joka ilmaisee energian kulutuksen tuotantomäärää kohden (esim. MWh/t, GJ/t).

Tuotantomäärä on laskettava laatuksiteerit täyttävän tuotannon perusteella, ei siis uunin läpi kulkeneen kokonaismäärän mukaan, johon sisältyvät sivuvirrat ja hylkytuotteet.

Jos tuotannossa tarvitaan useampia energiamuotoja, kuten höyryä, sähköä ja kaasua, lasketaan näiden kaikkien energioiden summa muutettuna samaan yksikköön kuten MWh. Tämänkaltaisissa tilanteissa europohjainen tarkastelu ohjaa taloudellisesti merkittävämpien energiavirtojen tarkasteluun.

Ominaisenergiankulutus ei suoraan kerro prosessin tai tuotannon tehokkuudesta tai tehotomuudesta mitään, mutta se vaaditaan vertailujen tekemiseen. Vertailu voidaan tehdä esimerkiksi (i) teoreettisesti laskettuun kulutukseen, (ii) referenssiprosessiin tai (iii) kyseisen tarkkailtavan prosessin aiempaan energian kulutukseen.

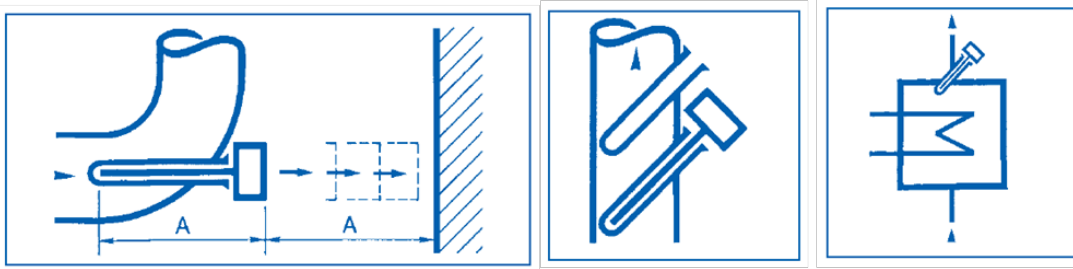
Tunnusluku voi myös olla laaduton vertailuluku, jossa ominaisenergiankulutusta verrataan referenssilukuun. Vertailulukuna voidaan käyttää esimerkiksi (i) parasta käytettävissä olevaan tekniikkaan (Best Available Technology, BAT), (ii) aiemmin mitattua ominaisenergiankulutusta tai (iii) teoreettista lämmitykseen kuluva energiaa. Tällaista lukua kutsutaan energiatehokkuusindeksiksi (ETI).

Tunnusluvut on muistettava päivittää säännöllisesti. Viimeistään kun tavoite on saavutettu, on määritettävä uusi tavoite. Tunnusluvut on muistettava tarkistaa aina muutosten jälkeen. Näitä muutoksia voivat olla tuotantoon tai itse uuniin liittyvät toimet. Joka tapauksessa tunnusluvut on tarkistettava vuosittain.

3.2 Uunin kiinteiden mittausten ja tunnuslukujen hyödyntäminen

Teollisuusuneissa on paljon mittauksia, joita voidaan hyödyntää tarkasteltaessa uunin energiatehokkuuden tilaa ja sen kehittymistä. Mittausten avulla prosessia voidaan hallita ja kehittää. Toisaalta mittareiden on oltava kunnossa ja kalibroituja sekä operaattoreiden on osattava lukea mittareita ja tehtävä oikeita tulkintoja mittaustulosten perusteella.

Antureiden asennus ja –paikat on valittava ja tarkistettava huolella, jotta mittaustulokset vastaavat mahdollisimman tarkkaan mitattavan suureen todellista arvoa. Anturit on suojattava mekaanisilta kolhuilta sekä tarvittaessa lämpösäteilyltä. Mittareiden asennuksessa on otettava huomioon myös niiden huolto- ja kunnossapitomahdollisuudet, kriittisimpien mittaustuloksen tarkistusmahdollisuus prosessin ollessa käynnissä sekä mittaamispaikan sijainti mahdollisimman lähellä mitattavaa kohdetta, kuva 18.



Kuva 18. Mittareiden asennuksessa huomioon otettavia asioita, mm. huolto- ja kunnossapito, kriittisimmät mittaukset sekä mittaamispaikan sijainti. (Siemens)

Uunin lämpötila

Tyypillisesti teollisuusuuneihin on sijoitettu useita eri lämpötilamittauksia joko itse uunitilaan tai sen rakenteisiin. Näiden lämpötilamittausten avulla saadaan kuva lämpötilan jakaantumisesta eri kohdissa uunia sekä lämpötilavaihteluista eri toimintatilanteissa.

Lämpötila-antureiden osalta on tärkeätä, että niiden mittaustulos on mahdollisimman tarkka prosessin keskeisimmällä lämpötila-alueella. Modernit lämpökäsittelyuunit ovat oikein suunniteltuina tarkkoja myös matalissa lämpötiloissa. Lämpötila-anturit on muistettava kalibroida säännöllisesti.

Uunin lämpötilan tasaisuudesta on pidettävä huolta. Epätasaisen lämpötilajakauman syyt on selvitettävä mahdollisimman pian, jotta siitä ei aiheutuisi haittaa tuotannolle lisääntyneenä epäkuranttina tuotantona.

Kappaleen tai tuotteen lämpötila

Uunin lämpötilan lisäksi on hyödyllistä mitata valmistettavan tuotteen lämpötilaa. Esimerkiksi tyhjöuuneilla ja keramiikan poltossa jo on pitkään määritelty uunin todellinen lämpötila kappaleiden lämpötilan kautta. Tyhjöuuneilla on mitattu uuniin laitettujen kappaleiden lämpötilaa ja keramiikkateollisuudessa on käytetty keiloja tai keraamirenkaita osoittamaan mitä kappaleille tapahtuu missäkin ajassa. Energiatohokkuuden ja lopputuotteen laatuominaisuuksien kannalta on välttämätöntä tarkastella sekä uunin lämpötilan mittausta että tuotteiden todellisen lämpötilan mittausta.

Uunin paine

Uunin paineen mittauksella saadaan tietoa sekä uunin energiatehokkuudesta että sen toiminnan tilasta. Uunin paineella voi olla suuri vaikutus esimerkiksi savukaasujen poistumiseen uunitilasta tai jonkin uunin osan vapaajähdytyksen toimivuuteen. Uunin paine voi myös kertoa uunissa olevista vuotokohdista. Energiatohokkuuden kannalta uunia kannattaa ajaa lievästi ylipaineisena, sillä tuolloin uunin luukkujen ja vuorausten ja muiden läpivientien tiiveysongelmat aiheuttavat paljon pienemmän energiahäviön kuin uunin toimiessa alipaineessa. Joitakin uunityyppisiä on ajettava alipaineessa, jolloin tarvittava alipainetaso on pyrittävä minimoimaan.

Suojakaasu

Useissa prosesseissa käytetään suojakaasuja tuotteiden suojaamiseksi hapelta tai muilta epäpuhtauksilta. Näiden kaasujen jatkuva tarkkailu on hyödyllistä, sillä kaasunkulutuksen muutokset kertovat usein suoraan ongelmista prosessissa. Yleensä ongelmat liittyvät uunin tiiveyteen, mutta myös venttiili- ja putkisto-ongelmat ovat mahdollisia.

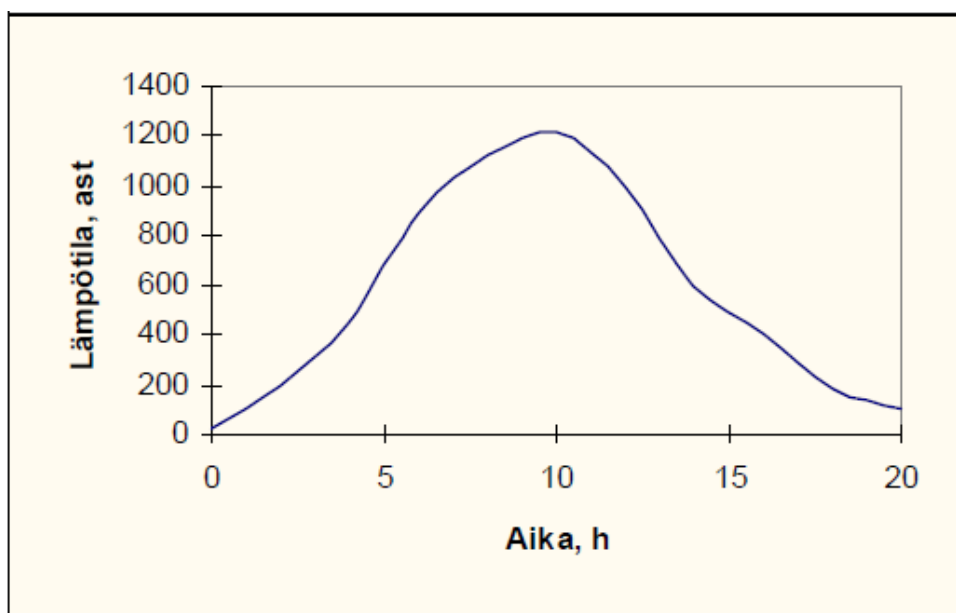
Ovien aukiolo

Monissa prosesseissa uunien ovien aukioloaika ei saada automatisoitua, vaan niiden käytöstä ja toiminnasta vastaa operaattori.

Uunien ovet on pyrittävä pitämään kiinni, vaikka niissä ei olisikaan toimintaa meneillään. Uunien avoimista ovista lämpö purkautuu hallitsemattomasti ko. tiloihin ja nousee katon rajaan lisäen sen lämpöhäviöitä tai tuulettuen ulos.

Uunien prosessiaika

Uunien toiminta-aikoja, lämpötiloja ja muita parametreja seuraamalla saadaan tietoon eri operaattoreiden toimintatapojen ja -mallien eroja. Käymällä tulokset läpi yhteisesti kaikkien operaattoreiden kanssa toimintaan saadaan läpinäkyvyyttä ja sitä on mahdollista kehittää kokonaisvaltaisesti. Toisaalta esimerkiksi prosessiajan piteneminen saattaa viitata myös ongelmiin prosessiohjauksessa. Esimerkkejä prosessin ohjaukseen liittyvistä ongelmista ovat käsittelyajan määräävän termoelementin mittausrvirhe tai lämmitystehon pieneneminen.

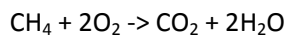


Kuva 19. Tyypillinen lämpötilan ohjauk käyrä keramiikan poltossa (VTT)

3.3 Palaminen

3.3.1 Polttoprosessin lyhyt kuvaus

Hiilivetyjen palamisreaktiot ovat tyypillisesti monivaiheisia tapahtumia. Esimerkiksi metaanin palamisreaktio voidaan yksinkertaistaa seuraavasti:



Poltettaessa metaania, syntyy teoreettisesti vettä ja hiilidioksidia. Reaktiokaavaa hyödyntäen voidaan laskea metaanin puhtaaseen palamiseen tarvittava ilmamäärä.

VAIHE 1. Massasuhteiden laskenta

	Raaka-aineet		Lopputuotteet	
	CH ₄	2O ₂	CO ₂	2H ₂ O
Ainemäärä (n)	1 mol	2 mol	1 mol	2 mol
Moolimassa (M)	12 + 4 x 1 = 16 g/mol	2 x 16 = 32 g/mol	12 + 2 x 16 = 44 g/mol	2 x 1 + 16 = 18 g/mol
Massa (m = n x M)	16 g	64 g	44 g	36 g
Raaka-aineiden ja lopputuotteiden massasuhteet	1 kg	4 kg	2,75 kg	2,25 kg

VAIHE 2. Tarvittavan ilmamäärän laskenta kilogrammoina

Ilman koostumus on seuraava:

- 20,9 tilavuus- % happea => 23,1 massa- %
- 79,1 tilavuus- % typpeä => 76,9 massa- %

Edellisestä vaiheesta saadaan, että yhden metaanikilon palamiseen tarvitaan 4 kg happea, jolloin tarvittava ilmamäärä voidaan laskea hyödyntämällä hapen massaprosenttia ilmassa

$$L_{\min} = 4 \text{ kg} / 0,231 = 17,3 \text{ kg}_{\text{ilmaa}}/\text{kg}_{\text{metaania}}$$

VAIHE 3. Tarvittavan ilmamäärän laskenta tilavuutena

Kun metaanin ja ilman tiheydet tiedetään, voidaan laskea tarvittava ilmamäärä tilavuusyksikössä

- $\rho_{\text{ilma}} = 1,293 \text{ kg/m}^3$
- $\rho_{\text{metaani}} = 0,72 \text{ kg/m}^3$

$$0,72 \text{ kg/m}^3 \times 17,3 \text{ kg}_{\text{ilmaa}}/\text{kg}_{\text{metaania}} / 1,293 \text{ kg/m}^3 = 9,6 \text{ m}^3_{\text{ilmaa}}/\text{m}^3_{\text{metaania}}$$

Olennaista edellisessä esimerkkilaskelmassa on ymmärtää se, että palamisprosessi on hyvin tärkeää saattaa lähelle stoikiometrinen tila (tarvittava ilmamäärä riittävä, mutta mahdollisimman pieni) kun halutaan toimia energiatehokkaasti. Yksinkertaistetusti voidaan sanoa, että mitä enemmän palamistapahtumassa käytetään ilmaa, sitä enemmän joudutaan lämmittämään myös palamistapahtumaan osallistumatonta typpeä. Tämä typen sisältämä lämpömäärä puoles-

taan poistuu ainakin osin savukaasun mukana, heikentäen kokonaisuuden energiatehokkuutta. Tämän takia palamista hyödyntävissä uuneissa yksi tärkeimmistä tunnusluvuista on palamisilman ja polttoaineen välinen suhdeluku. (Maakaasukäsikirja)

Kaasuja koskeissa laskelmissa, mittauksissa ja tarkasteluissa käytetään kaasuja koskevia normaalitilan arvoja, jotka ovat

- lämpötila 273,15 K (0 °C)
- paine 101 325 Pa (normaali ilmanpaine)

jolloin käytetään merkintää Nm³.

Maakaasun osalta kaasumäärä, jolla on 1 m³ tilavuus kuivassa tilassa, määritetään normaali-ilmanpaineessa (1,01325 bar abs.) ja 15 °C lämpötilassa.

		Maakaasu	Propani	Öljy
Tiheys		0,72 kg/m ³	2,01 kg/m ³	0,93 kg/dm ³
Tehollinen lämpöarvo	kWh/Nm ³	10,0	26,0	
	kWh/kg	13,9	13,1	11,3
Teoreettinen palamisilman tarve				
Ilma	Nm ³ /kg	12,8	11,9	10,7
Savukaasu (kostea)	Nm ³ /kg	14,2	12,9	11,3
Teoreettinen hapen tarve				
Happi	Nm ³ /kg	2,8	2,6	2,3
Savukaasu (kostea)	Nm ³ /kg	3,0	7,0	3,0
CO ₂ päästö per 1 MWh	kg/MWh	200	230	260

Taulukko 2. Eräiden polttoaineiden energiasisällöt ja kaasumäärät.

Palamisilman lämpötila

Palamisilman lämpötilalla on suuri vaikutus palamisen tehoon ja käytettävissä olevaan energiaan. Kun uunissa on palamisilman esilämmitys poistuvalla savukaasulla, palamisilman ja poistuvan savukaasun lämpötilan mittaaminen kertoo lämmönvaihdon toimivuudesta ja mahdollisista huoltotarpeista.

Savukaasun lämpötila

Savukaasun lämpötila kuvaa osittain sitä, kuinka paljon energiaa savukaasu on ehtinyt luovuttaa ennen poistumistaan uunista. Muutokset uunin virtauksissa näkyvät nopeasti lämpötilan vaihteluina. Savukaasun lämpötilan lasku ilman toimenpiteitä saattaa viitata uunissa olevaan vuotoon. Ylipaineessa vuoto ei välttämättä näy energiatehokkuuden laskuna, mutta vuotava uuni on turvallisuus- ja kunnossapidollinen riski. Poistuvan savukaasun lämpötilasta voidaan tehdä myös arvioita mahdollisesta hyötysuhteesta.

Uuneissa, joissa savukaasussa on lämmön talteenotto (esim. lämmönvaihdin tai materiaalin suora esilämmitys) voidaan savukaasun lämpötilaa mitata useammasta kohdasta. Esimerkiksi voidaan mitata savukaasun lämpötila uunista poistuessa, ennen lämmönvaihdinta sekä läm-

mönvaihtimen jälkeen. Näin saadaan tietoa uunin kyvystä sitoa lämpöä tuotteisiin, savukaasukanavan häviöistä sekä lämmönvaihtimen toiminnasta.

Jäännöshappi ja hiilimonoksidi

Polttoprosesseissa syötetty liiallinen happi (erityisesti ilman muodossa) on suuri tekijä poltto-prosessin energiatehokkuudessa. Jäännöshappiarvon muuttuminen voi tarkoittaa energiatehokkuuden muutosten lisäksi kunnossapidollisia ja laadullisia ongelmia. Happitason avulla voidaan myös arvioida onko uunissa vuotoja. Jäännöshappitason noustessa käytettävissä oleva energiamäärä laskee. Esimerkiksi uunin poistuvien savukaasujen ollessa yli 1000 °C ja mitatun jäännöshapen 15 %, on hyvin todennäköistä että osa hapesta on tullut savukaasuun vuodosta (polttimien läpi tullessa sellainen ilmavirta ei mahdollistaisi niin korkeaa lämpötilaa).

Häkä on aina merkki epätäydellisestä palamisesta ja saattaa johtua prosessissa olevista ongelmista. Häkä voi olla ongelmallinen myös laadun kannalta. Esimerkiksi terästeollisuudessa on viitteitä siitä, että häkä vaikuttaa hilseen kiinnittymiseen teräksen pintaan ja johtaa ongelmiin sen irrottamisessa.

Ylipaineisen uunin osalta on varmistettava, että lähiympäristö on varustettu asiaankuuluvilla suojalaitteilla ja –merkinnöillä ja että alueella työskentelevillä henkilöillä on henkilökohtaiset suojavarusteet käytössään.

Polttosuhde

Polttosuhteella tarkoitetaan polttimille menevän kaasun ja ilman/hapen suhdetta. Polttosuhteen mittaaminen antaa kuvan polttimen teoreettisesta toiminnasta. Mittausta tarkasteltaessa on kuitenkin huomioitava, että suhteen laskenta perustuu kahteen kaasufaasiin sijoitettuun virtausmittaukseen, jolloin mittausten oikeanlainen normitus ja kalibrointi on erityisen tärkeää.

Sähkötehomittaukset

Sähkötehomittauksia löytyy tyypillisesti sähkölämmitteisistä uuneista, mutta myös suurissa jatkuvatoimissa uuneissa voi olla nk. boostauksia toteutettuna sähköllä. Tehotietoa voi myös saada esimerkiksi puhaltimien taajuusmuuttajilta, mikäli sellaisia on käytössä.

Jokainen uuni on perusteltua varustaa ainakin päämittauksella. Tämä antaa mahdollisuuden energiataseen laadintaan sekä käytön että seisokkiajan kulutuksen seurantaan ja energiatehokkuuden parantamiseen. Laitekohtaisilla alamittauksilla saadaan tarkempaa tietoa kulutuksen ajallisesta ja paikallisesta kulutuksesta.

3.4 Savukaasujen mittaaminen

Savukaasujen ominaisuuksia ei tyypillisesti mitata jatkuvasti, vaan niiden määrittämiseen käytetään kertaluonteisia mittauksia.



Kuva 20. Esimerkki savukaasujen ominaisuuksien mittaamisesta (<http://www.power-technology.com>)

Mittaus voidaan toteuttaa käyttämällä savukaasuanalysointilaitetta, jolla voi tyypillisesti mitata ainakin seuraavat suureet:

- Happi, O_2
- Hiilimonoksidi, CO
- hiilidioksidi, CO_2
- Hiilimonoksidin ja –dioksidin suhde, CO/CO_2
- Typpioksidit, NO, NO_x
- Ilmavirta/kerroin, λ
- Lämpötila, $^{\circ}C, K$
- Paine, Pa.

Olenneista savukaasumittauksissa on valita mittaukselle edustava mittapaikka. Analysointilaitteen mittasondin maksimilämpötila määrittää sen, kuinka läheltä uunitilaa mittaus voidaan tehdä. Vastaavasti mitä kauempana mittauspaikka on uunitilasta, sitä suuremmaksi kasvaa riski, että savukaasun sekaan vuotaa ilmaa vääristäen mittaustuloksia.

Teollisuuslaitosten tapauksessa tyypillisimmät hyödynnettävät mittaussuureet ovat jäännöshappi ja hiilidioksidimäärä, joiden avulla voidaan laskea nk. yli-ilmakerroin, joka kuvaa kuinka paljon teoreettista palamisilman tarvetta enemmän prosessiin on tuotu ilmaa. Jäännöshappi on tyypillisesti tasolla 4-5 %, mutta joissain tapauksissa on mitattu jopa alle 1 % happipitoisuuksia.

Kaasumaisia aineita koskevia mittauksia tehtäessä on varmistauduttava mahdollisuuksien mukaan virtausprofiilin tasaisuudesta, sillä puhaltimet, käyrät, säätöpellit ym. aiheuttavat virtauksiin runsaasti pyörteisyyttä.

Laskelmia tehtäessä kannattaa harkita laskeeko ainevirtoja tilavuus- vai massavirtoina. Tilavuusvirtoja käytettäessä on aina tiedettävä kyseisen aineen lämpötila ja paine, mikä aiheuttaa joskus sekaannuksia asioita käsiteltäessä.

Palamisilman ilmakertoimen ja savukaasujen hiilidioksidi- ja happipitoisuuden välillä vallitsee suora yhteys seuraavasti:

$$\lambda_{\text{CO}_2} = 1 + \left\{ \frac{\text{CO}_{2 \text{ max}} - \text{CO}_2}{\text{CO}_2} \times \frac{V^{\text{tr}}_{\text{min}}}{L_{\text{min}}} \right\}$$

ja

$$\lambda_{\text{O}_2} = 1 + \left(\frac{\text{O}_2}{21 - \text{O}_2} \times \frac{V^{\text{tr}}_{\text{min}}}{L_{\text{min}}} \right),$$

missä

$$\left. \begin{array}{l} \text{CO}_{2 \text{ max}} \quad \text{til-\%} \\ \text{CO}_2 \quad \text{til-\%} \\ \text{O}_2 \quad \text{til-\%} \end{array} \right\} \text{-pitoisuuksia kuivissa savukaasuissa}$$

$$\begin{array}{ll} V^{\text{tr}}_{\text{min}} \quad \text{m}^3/\text{m}^3 & \text{- kuivien savukaasujen teoreettinen määrä} \\ & \text{(stökiometrinen palaminen)} \\ L_{\text{min}} \quad \text{m}^3/\text{m}^3 & \text{- teoreettinen palamisilman tarve} \end{array}$$

Esimerkiksi metaanille yllämainitut yhtälöt näyttävät seuraavilta, kun mitattu CO₂ -pitoisuus on 10,5 til-% ja O₂ -pitoisuus 2,2 til-%

$$\lambda_{\text{CO}_2} = 1 + \left(\frac{11,7 - 10,5}{10,5} \times \frac{8,6}{9,6} \right) \approx 1,1$$

$$\lambda_{\text{O}_2} = 1 + \left(\frac{2,2}{21 - 2,2} \times \frac{8,6}{9,6} \right) \approx 1,1$$

3.5 Sähkötehomittaukset

Sähkötehomittauksia voidaan tehdä tyypillisesti kohteissa, joiden käyttöjännite on 690 V tai vähemmän. Mittaus tehdään tyypillisesti sähkönjakokeskuksesta, jossa syötön jokaiseen vaiheeseen kytketään virtapihdit ja jännitepihdit. Joskus mittauspaikka on sellainen, että jännitepihtejä ei ole mahdollista kytkeä turvallisesti. Tällaisissa tapauksissa käyttöjännite täytyy olettaa, samoin kuin tehokerroin (cos φ) ja tarkastelu tehdä laskennallisesti seuraavasti:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 =$$

$$P = U_{V1} I_1 \cos \varphi_1 + U_{V2} I_2 \cos \varphi_2 + U_{V3} I_3 \cos \varphi_3$$

$$P = 230V * 25 A * 0,85 + 230V * 15 A * 0,85 + 230V * 20 A * 0,85 = 11 730 W$$

$$= 11,7 kW$$

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$$

$$P = 3 * 230V * 20 A * 0,85 = 11,7 kW \text{ tai}$$

$$P = \sqrt{3} * 20A * 400 V * 0,85 = 11,7 kW$$

Seurantamittauksia tehtäessä on tunnettava tarkasteltava prosessi riittävän hyvin, jotta mittausjakson pituus on riittävä ja mittaushetkien väli on riittävän lyhyt, jotta toivotut ilmiöt saadaan luotettavasti mitattua. Tavanomainen mittaushetkien väli on 1 minuutti. Mittausjakson pituus kestää vähintään yhden uunijakson verran. Mittaus on käynnistettävä esim. tuntia prosessin käynnistymistä ja pysäytettävä vastaavasti esim. tunti prosessin päättymisen jälkeen, jotta voidaan varmistua tarvittavien tietojen oikeellisuudesta ja tasosta.

Valokuva virtamittauspihtien kytkennästä on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Esimerkki virtamittauspihtien kytkennästä

3.6 Ilman ominaisuuksien mittaaminen

Ilman ominaisuuksien mittaamisella tarkoitetaan tässä virtaamaa, lämpötilaa ja kosteutta eli kaikkia niitä suureita, jotka tarvitaan sen energiasisällön määrittämiseen. Vallitseva ilmanpaine-kin on joskus otettava huomioon. Tyypillisesti mittaukset toteutetaan kertamittauksena kanavan sisältä (kuva 22).



Kuva 14. Esimerkki ilman ominaisuuksien mittaamisesta

Lämpötilan mittaaminen

Lämpötilan mittaamiseen on saatavilla useita antureita, jotka tyypillisesti ovat joko vastusantureita (PT100) tai termopariantureita. Käytettävällä mittausmenetelmällä ei ole suurta merkitystä ilmamittauksissa muuten kuin mittauksen herkkyyden kannalta. Jos mittauskohta on hyvin turbulентtinen, saattaa mittausulos heilua suuresti, etenkin jos anturissa ei ole riittävästi varaavaa massaa.

Kosteuden mittaaminen

Useiden kosteusantureiden mittausalue rajoittuu maksimissaan 200 asteeseen, jolloin kuumempi ilma on mitattava käyttämällä esimerkiksi ”märkäsukkamenetelmää”. Märkäsukkamenetelmässä mitataan virtauksen lämpötila kahdesti: Anturilla, jossa on päällä kostea ”sukka” sekä ilman sitä. Sitten mitatuista lämpötila-arvoista lasketaan virtauksessa vallitseva kosteus hyödyntämällä psykrometristä taulukkoa.

Virtaaman mittaaminen

Virtaaman mittauksessa käytetään tyypillisesti joko pitot-putkea tai kuumalanka-anemometriä. Kuumalanka-anemometrillä on tyypillisesti varsin matala maksimilämpötila, jolloin se soveltuu parhaiten esimerkiksi avokanavien mittaamiseen. Pitot-putkella on mahdollista mitata kuumia virtaamia ja se sietää hyvin myös epäpuhtauksia ja kosteutta virtaamassa. Pitot-putkimittauksen perusteet on esitetty kuvassa 23. Pitot-putkimittauksissa virtauspoikkipinta on mitattava virtausprofiilien epätasaisuuksien eliminoimiseksi vähintään viidestä eri pisteestä kahdella ristikkäin olevasta halkaisijasta. Mittausmenetelmistä on omat standardinsa, joita on syytä noudattaa, jotta välttyy suurilta mittausvirheilä.

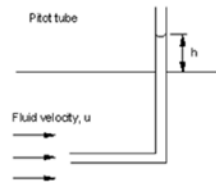
Bernoullin yhtälö

$$p_s + \frac{1}{2}\rho v_s^2 + \rho g z_s \approx p_0 + \frac{1}{2}\rho v_0^2 + \rho g z_0$$

Kun tarkastellaan samaa virtaviivaa, $Z_s=Z_0$ ja $v_0=0$, yksinkertaistuu yhtälömuotoon:

$$\frac{1}{2}\rho v_s^2 = p_0 - p_s \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}}$$

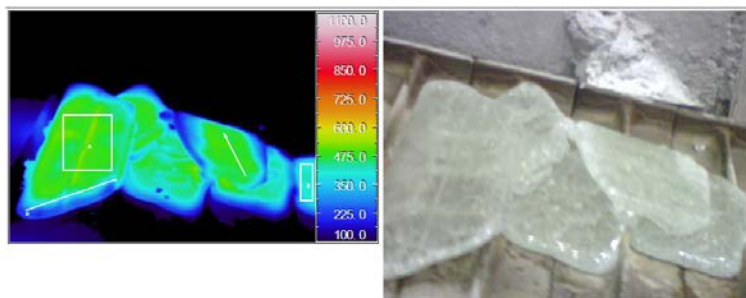
Kun virtausnopeus on tiedossa, voidaan tilavuusvirta laskea kun virtauskanavan poikkipinta-ala on tiedossa. Jotta päästään tarkastelemaan vertailukelpoista massavirtaa, täytyy selvittää kaasun tiheys. Tiheys puolestaan voidaan laskea, kun kaasun paine ja lämpötila on selvillä



Kuva 23. Pitot-putkimittauksen teoriaa

3.7 Lämpökamerakuvaus

Lämpökamerakuvauksia voidaan hyödyntää hyvin monella tavalla teollisuusunien tarkasteluissa. Yksi käyttökohde on tarkastella valmistettavan tuotteen lämpötiloja eri prosessin vaiheissa. Lämpökamerakuvauksella saadaan esimerkiksi informaatiota siitä, miten kappaleen lämpötila laskee jäähtymyksessä ja millainen on sen lämpötilajakauma (kuva 24).



Kuva 24. Lämpökameran hyödyntämisestä valmistettavan tuotteen tarkasteluissa

Toinen tyypillinen käyttökohde lämpökameralle on tarkastella erilaisten rakenteiden, laitteiden ja kytkentöjen kuntoa. Kuvauksella saadaan informaatiota esimerkiksi eristeiden ja laakerien kunnosta sekä vuodoista (kuva 25). Lämpökamera on oiva apu tarkasteltaessa uuneihin liittyvien sähkökytkentöjen kuntoa. Lämpökameralla voidaan parantaa myös työturvallisuutta kartoittamalla kuumat työskentelyalueet.



Kuva 25. Lämpökameran hyödyntäminen rakenteiden tarkasteluissa

Lämpökamerakuvauksissa on kuitenkin aina varmistettava, että kameran lämpötila-alue on riittävä kyseiseen mittaukseen. Tyypillisesti kiinteistöikäytössä olevien lämpökameroiden maksimilämpötila on n. 350 °C astetta, mikä ei ole riittävä kaikkiin uunitarkasteluihin. Toinen huomioitava asia on eri materiaaleille ominainen emissiivisyyskerroin.

Tyypillisesti lämpökameroista löytyy ainakin jonkinlainen materiaalikirjasto, josta kullekin materiaalille saadaan käyttöön sille tyypillinen kerroin. Jos kuvattavalla alueella on käytössä useita eri materiaaleja, toteutetaan kuvaus tyypillisesti yhdellä emissiivisyyskertoimella (esim. 0,9) ja muutetaan kullekin materiaalille ominaiset kertoimet vasta analyysivaiheessa.

Lämpökameran käytössä on noudatettava huolellisesti valmistajan ohjeita, jotta mittaustulokset olisivat luotettavia. Esimerkiksi pinnan likaantuneisuus, käytetty pintamaali, mittauskulma ym. vaikuttavat mittaustulokseen.

3.8 Nesteen virtausmittaukset

Nestevirtausmittauksia voidaan uunitarkasteluissa hyödyntää mittaamalla esimerkiksi nesteistä kaasua tai vesivirtaamia lämmönvaihdivien toisiopuolelta. Nestevirtausmittaukset voidaan toteuttaa putken päältä hyödyntämällä ultraäänimittausta (kuva 26). Mittauksen toteuttamiseen tarvitaan seuraavat tiedot:

- mitattava väliaine
- putken materiaali
- putken halkaisija
- mitattavan aineen lämpötila
- putken seinämän vahvuus (voidaan mitata erillisellä mittapöydällä)



Kuva 26. Esimerkki ultraäänimittauksen toteutuksesta

Mittauspaikan valinta on hyvin tärkeää toteutettaessa mittauksia. Mittauspaikalla tulisi olla mahdollisimman pitkä suora putkilinja, eikä mittauspaikan läheisyydessä saisi olla virtausta häiritseviä objekteja (esim. venttiili tai haara). Tämän lisäksi mitattavan nesteen seassa ei saisi olla kaasukuplia, jotka vaikeuttavat ultraäänien etenemistä väliaineessa. Ongelmia mittauksiin voi aiheutua ainakin seuraavissa tapauksissa:

- Mittauspaikan putki käy välillä tyhjänä, jolloin riski ilmalle on suuri
- Mittauspaikka on lähellä nestekaasun höyrystimiä, jolloin takaisinvirtaukset voivat tuoda kaasukuplia mittauspaikalle
- Virtauksen suunta vaihtuu hyvin nopeasti, jolloin normaalia toimintatasoa voi olla vaikea määrittää lyhyellä mittausjaksolla

3.9 Mittausten virhelähteet ja -tarkastelut

Kenttämittauksia tehtäessä on aina oltava mahdollisimman huolellinen. Mittareiden asennuksissa on noudatettava valmistajien ohjeita ja standardeja sekä dokumentoitava mittauspaikat ja -tulokset tarkasti. Tämä mahdollistaa mittausten uusimisen ja tulosten mahdollisimman hyvän vertailukelpoisuuden.

Kaikesta huolimatta mittauksiin sisältyy virheitä, jotka johtuvat mittalaitteista ja niiden asennuksesta sekä käytöstä ja myös mittausmenetelmistä. Nämä asiat on muistettava analysoitaessa mittaus tuloksia ja niissä tapahtuvia muutoksia. Lämpötila-anturin likaantuminen aiheuttaa virhettä mittaus tulokseen ja edelleen valmistusprosessiin. Esimerkiksi mitattaessa vesivirtoja siirreltäväällä ultraäänimittarilla ei aina päästä parhaisiin tuloksiin, mikä johtuu mm. putken sisäpuolelle kertyneestä liasta.

Myös toimilaitteiden kuluminen heikentää toimintaa ja säädettävyyttä ja edelleen prosessin energiataloutta. Esimerkiksi edestakaisin liikkuvan säätöventtiilin toiminnassa lisääntyvä hystereesi, jolloin toimilaitte ei enää liikkukaan toivotulla tavalla, on osa niitä asioita, joita on jatkuvasti valvottava.

3.10 Uunin sisäiset endoskooppikuvaukset

Isoissa jatkuvatoimissa uuneissa sisärakenteiden tilasta ja kunnosta voi olla vaikea saada kuvaa normaalin toiminnan aikana. Tämän takia niissä hyödynnetään määrävälein endoskooppikuvia, joiden avulla päästään näkemään videokuvan muodossa myös uunin sisäosien tila.



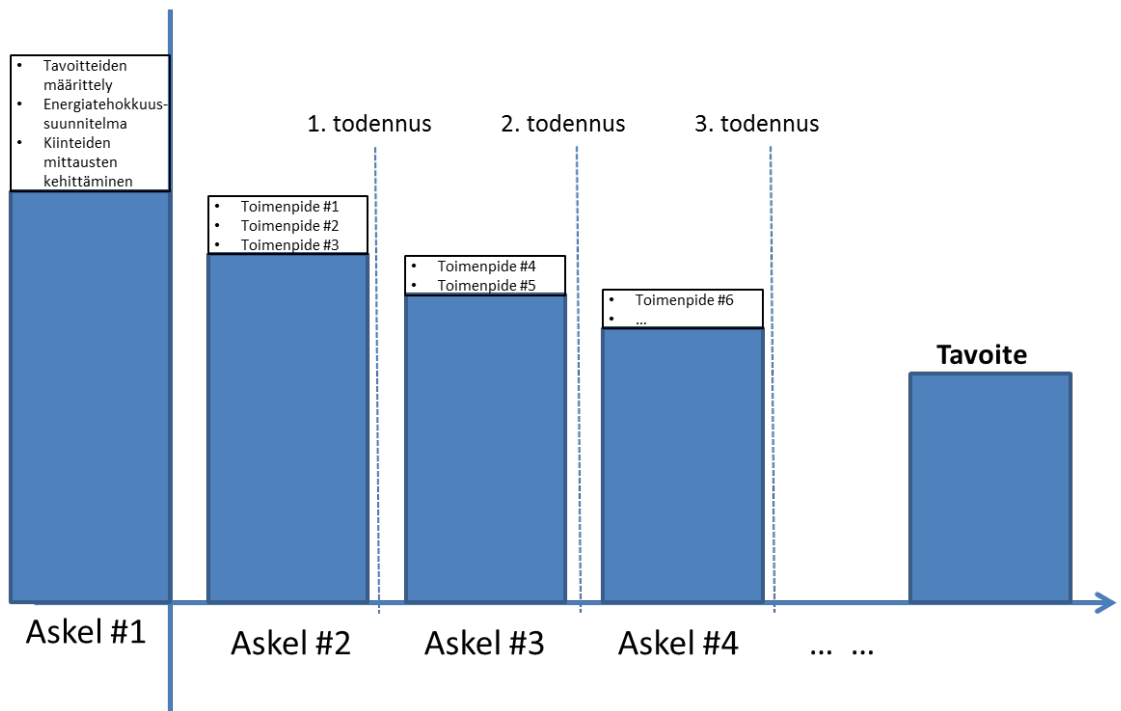
Kuva 27. Uunin sisäinen endoskooppikuvaus (www.fosbel.com)

Tyypillisesti käytetyt endoskoopit ovat vesijäähdytettyjä, joka mahdollistaa n. minuutin kuvauksen kussakin kohteessa.

4 Uunien energiatehokkuuden parantaminen

Energiatehokkuussuunnitelma uunille

Energiatehokkuuden kokonaisvaltainen parantaminen vaatii suunnitelmallisuutta ja työkaluja myös parantamisen hallinnan osalta. Uuneille on hyvä tehdä suunnitelma, jossa hahmotellaan tehostamistoimenpiteet useammalle vuodelle eteenpäin. Kuvassa 34 on esitetty periaate isolle jatkuvatoimiselle uunille tehdystä suunnitelman rakenteesta.



Kuva 28. Uunin energiatehokkuussuunnitelman periaate

Laajemmin tarkasteltuna energiatehokkuussuunnitelma linkittyy olennaiseksi osaksi energiatehokkuuden hallintajärjestelmiä. Lisätietoa Suomessa käytössä olevasta energiatehokkuusjärjestelmästä löytyy seuraavasta linkistä:

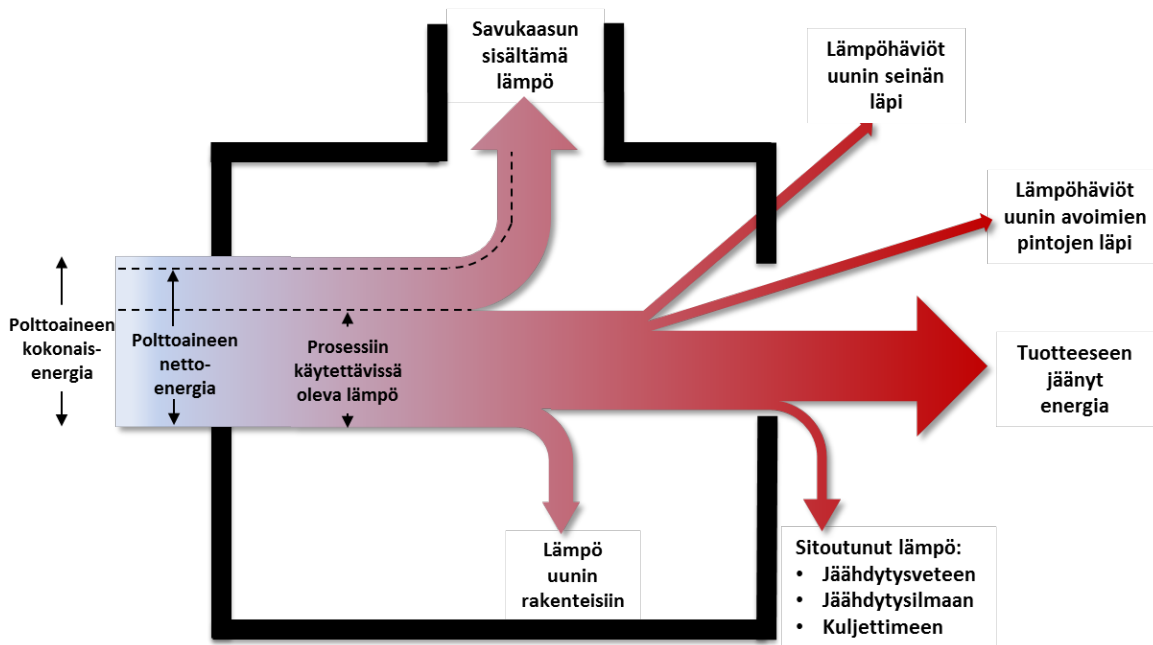
<http://www.energiatehokkuussopimukset.fi/midcom-serveattachmentguid-1dfff35c984002fdf311dfaa82d70d0af8f82cf82c/energiatehokkuusjarjestelma-pdf>

Uunien energiatehokkuustoimet voidaan jakaa seuraaviin alaluokkiin:

- Mittaamisen ja seurannan kehittäminen
- Lämmityksen hyötysuhteen parantaminen
- Lämpövuotojen pienentäminen
- Palo/poistokaasun lämpösisällön hyödyntäminen muulla prosessissa
- Muut energiatehokkuustoimenpiteet.

4.1 Mittaamisen ja seurannan kehittäminen

Mittaamisen ja seurannan kehittäminen on energiatehokkuustyön merkittävä osa-alue. Kokonaisvaltainen energiatehokkuuden parantaminen vaatii aina tuekseen kattavaa mittausinformaatiota. Tämän lisäksi on tarkasteltava, kuinka ja missä muodossa tuotettu informaatio on mahdollisimman hyödyntämiskelpoista käyttäjälle. Uunin energiataseen jakauma kiinnostaa operaattoreita ja kunnossapitohenkilökuntaa, tuotannosta vastaavaa tarvitsee tiedot tuotannosta ja uunin kokonaiskulutuksesta, kuva 29.



Kuva 29. Teollisen poltto-/lämmitysprosessin sankey-diagrammi (U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy)

Käytännössä mittaamisen ja seurannan kehittämiseksi kannattaa tehdä suunnitelma, jossa käydään läpi ainakin seuraavat kokonaisuudet:

- Tarkasteltavan tasealueen rajaaminen
- Kohteen erityispiirteet mittaamisen ja seurannan kannalta
- Käyttäjärühmät ja käyttötilanteet energiatehokkuustiedolle
- Mittausinformaation esittäminen (tunnusluvut, käytettävät sovellukset ja visualisointi)
- Olemassa oleva tiedonsiirron perusrakenne
- Olemassa olevat mittausinstrumentit ja tarpeet lisäinstrumentoinnille.

4.2 Lämmityksen hyötysuhteen parantaminen

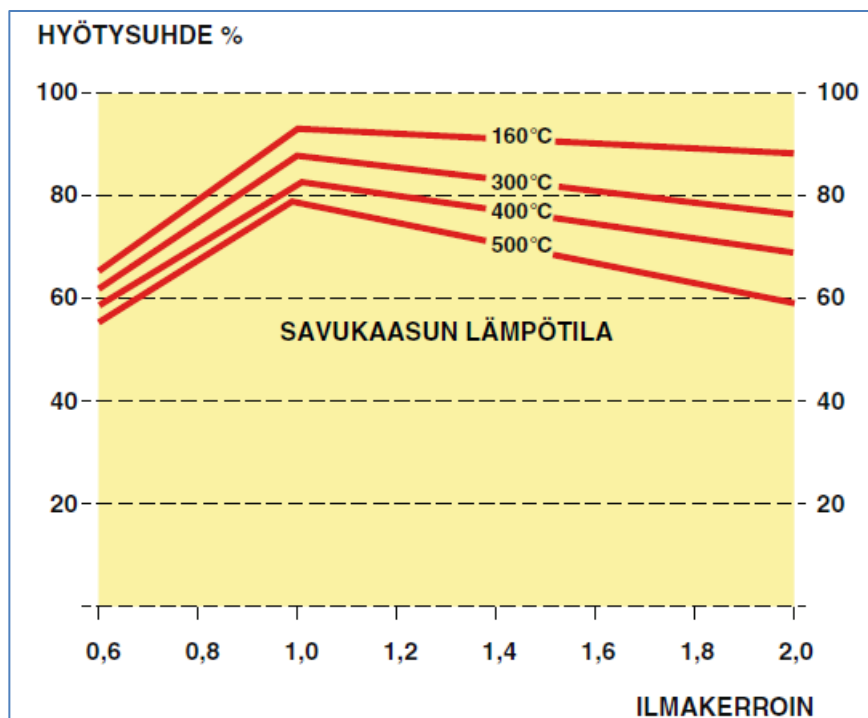
Hyötysuhteen parantaminen tarkoittaa tässä yhteydessä polttoaineiden käytön tehostamista.

4.2.1 Ilma-kaasusuhteen säätö

Polttimen ilma-kaasusuhteen säätötapa riippuu poltintyypistä. Energiatohokkuuden kannalta parasta olisi pyrkiä ajamaan polttimia mahdollisimman pienellä yli-ilmamäärällä kuvan XX mukaisesti. Ilmakertoimien syitä ja vaikutuksia voidaan tarkastella esim. seuraavalla tavalla:

- Ali-ilmakerroin: Liian paljon polttoainetta tai liian vähän palamisilmaa => epätäydellinen palaminen, jolloin lämpötilan saavuttamiseen joudutaan käyttämään enemmän polttoainetta. Samalla syntyy myös häkää.
- Yli-ilmakerroin: Liian vähän polttoainetta tai liian paljon palamisilmaa => joudutaan käyttämään ylimääräistä lämpöenergiaa ilman lämmittämiseen.

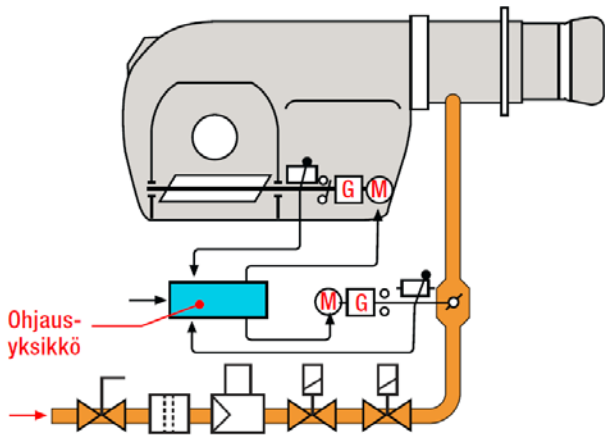
Esimerkiksi savukaasun lämpötilalla 300 °C säätämällä ilmakerroin tasolta 1,4 tasolle 1,1 saavutetaan suuruusluokaltaan 4 % parannus hyötysuhteessa. Vuotuinen energiansäästö voidaan laskea käytetyn energiamäärän perusteella.



Kuva 29. Ilmakertoimen vaikutus maakaasun palamishyötysuhteeseen (Maakaasukäsikirja)

Käytännössä polttimen ilmasuhteen säätö voidaan toteuttaa kahdella tavalla, säätämällä suhdetta toimilaitteen asentotiedon perusteella tai hyödyntämällä virtausmittauksia. Tyypillisesti parempaan säädettävyyteen päästään hyödyntämällä virtausmittauksia sekä polttoaineesta että palamisilmasta.

Polttimen säädön periaate on esitetty kuvassa 30. Siinä on portaattomasti säätävä puhallinpolttin, jossa sekä kaasulla että palamisilmalla on oma moottoriventtiilinsä, joita ohjataan sähköisesti ohjausyksiköllä.



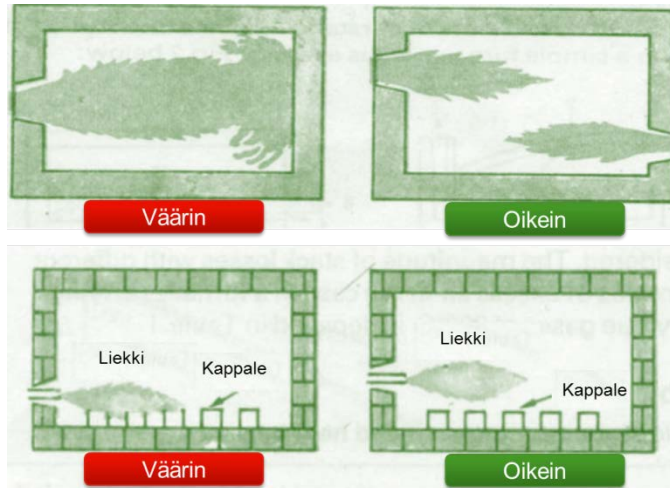
Kuva 15. Esimerkki polttimen säädöstä (Maakaasukäsikirja).

Kun polttimet on viritetty hyvin, on niiden toiminta myös varmistettava jäännöshappi- ja häkämittauksin. Käytettäessä hyvälaatuaista polttoainetta tasaisissa olosuhteissa, riittävät yleensä määräaikaiset jäännöshappimittaukset varmistamaan järjestelmän hyvän toiminnan. Jatkuvaa mittausta ei tällöin tyypillisesti tarvita. Käytettäessä koostumukseltaan muuttuvaa tuotekaasua, on tarkkuuden kannalta tärkeää tehdä polttoaine/happi-suhdeohjaus riippuvaiseksi jatkuvasta jäännöshapen mittauksesta.

Polttimien säädössä, johon liittyy usein myös palamisilman esilämmitys, on säätötyötä tekevän ymmärrettävä koko uunitusprosessin luonne, toiminnan rajat ja tapahtumat. Kuormitusten ja tuotteiden vaihtelut vaikuttavat väistämättä poltinten toimintaan eri tilanteissa.

4.2.2 Polttimien suuntaus

Polttimen suuntauksella palotilassa on merkittävä vaikutus lämmön tasaisen jakautumisen kautta sekä energiatehokkuuteen että lopputuotteen laatuominaisuuksiin. Kuvassa 31 on esitetty tyypillisimpiä virheitä liekin suuntauksessa ja toimenpiteet niiden korjaamiseen.



Kuva 31. Polttimien oikeaoppinen suuntaaminen uunissa (<http://www.emt-india.net/Book2/2.4.pdf>)

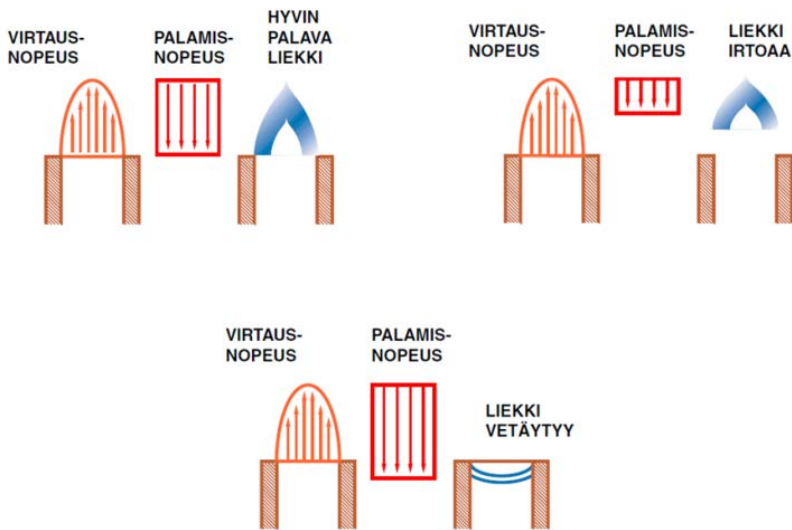
Ohjeita oikeaoppiseen liekin suuntaamiseen:

- Liekki ei saa osua mihinkään kiinteään kappaleeseen uunissa
- Jos uunissa on useampia polttimen liekkejä, ne eivät saa osua toisiinsa
- Liekki ei saa osua uunin seinärakenteisiin
- Kappaleiden suhteen liekin tulisi kulkea uunitilassa juuri niiden yläpuolelta kuitenkin osumatta niihin. Käytännössä tämä vaatii usein liekin suuntaamista hieman yläviistoon
- Liian iso poltin vaikeuttaa uunin lämpötilan säätöä ja samalla lyhentää uunin kestoikää. Parempi vaihtoehto on käyttää useampia pienempiä polttimia.
- Pienissä uuneissa liekki ei saa olla niin pitkä, että se ylettyy uunin avoimiin aukkoihin tai poistokaasuaukkoon.

Tekniikassa on tapahtunut kehitystä näiltä osin ja nykyisin on mahdollista käyttää myös ns. flat-flame-polttimia, jotka voidaan sijoittaa osoittamaan suoraan panokseen.

4.2.3 Palamisnopeuden hallinta

Joissakin tapauksissa palamisnopeuden hallinnalla on vaikutusta uunin toimintaan. Tämä tulee huomioida erityisesti silloin, kun uunin polttimilla ajetaan sen toiminta-alueen ääri-laidoilla. Kuvassa 32 on esitetty miten palamisnopeus vaikuttaa polttimen liekkiin.

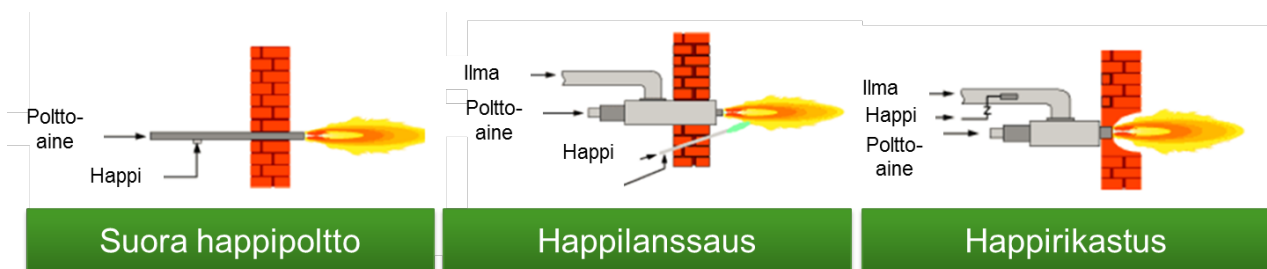


Kuva 32. Palamisnopeuden hallinta (Maakaasukäsikirja)

Hyvin merkittävää on myös miten polttimia ohjataan. Valitsemalla oikea tapauskohtainen ohjaustapa, esim. tahtiohjaus, aikaansaadaan tehokas lämmönsiirto kappaleisiin riskeeraamatta kuitenkaan yllämmön vaaraa silloin, kun tehontarve esimerkiksi pitoaikana on pieni.

4.2.4 Perinteisen polttotekniikan korvaaminen happipoltomenetelmillä

Happipoltossa uunien polttimiin syötetään ilman sijasta happea, jolloin poltossa ei tarvitse lämmittää ilman sisältämää tyypeä polttolämpötilaan. Käytännössä tällä voidaan saavuttaa jopa kymmenien prosenttien energiatehokkuuden parantuminen.



Kuva 33. Happipolttto menetelmät (Technische universiteit of Eindhoven)

Tyypillisesti siirtyminen perinteisestä poltosta happea hyödyntävään polttoon vaatii suhteellisen suuren investoinnin uuniin, eikä se tyypillisesti ole kannattavaa pienien uunien tapauksessa. Isoissa ja jatkuvatoimissa uuneissa happipoltttoon siirtyminen voi olla taloudellisesti kannattavaa. Happipolton kannattavuutta arvioitaessa on otettava huomioon hapen hinta.

Ilma sisältää noin 21 % happea ja 79 % tyypeä. Ilmapolttimia käytettäessä palamiseen syötetään välttämättömän hapen lisäksi huomattava määrä tyypeä. Typpi kuumenee, kulkee läpi uunin ja poistuu uunista osana savukaasua. Merkittävä osa typen kuumentamiseen käytetystä

energiasta hukataan savukaasujen kautta. Lämmön talteenotto savukaasuista, eli rekuperaattoreiden ja regeneratiivisten polttimien käyttö, on oleellinen osa modernia ilmapoltinjärjestelmää. Niiden avulla osa savukaasujen energiasisällöstä käytetään palamisilman esilämmittämiseen. Epäkohtana on laitteiden koko, kalleus ja suuri kunnossapidon tarve.

Palamisen tehokkuuteen voidaan vaikuttaa myös lisäämällä palamisilmaan happea (=happirikastus) tai korvaamalla se kokonaan hapella (Taulukko 3). Kun palamisilmaa korvataan hapella, typen osuus savukaasusta pienenee ja liekki sisältää enemmän palotuotteita, jotka säteilevät lämpöä. Näin saadaan aikaan hyvin kirkas liekki, arviolta jopa 300-kertaa kirkkaampi kuin tavallinen ilma-kaasu –liekki.

	Yksikkö	Ilmapoltto	Ilmapoltto	Happilanssaus	Happipoltto
Rekuperäätori		Ei	On	On	Ei
Palamisilman/ hapen lämpötila	°C	20	450	400	20
Happipitoisuus	%	21	21	~ 50	100
Teoreettinen energiantarve	kWh/t	200	200	200	200
Häviöt	kWh/t	40	40	40	40
Savukaasun lämpösisältö	kWh/t	231	113	46	39
Savukaasun lämpötila	°C	1000	1000	950	900
Kuumennuksen hyötysuhde	%	51	68	84	86
Energiantarve	kWh/t	471	353	286	279
	GJ/t	1,69	1,27	1,03	1,00

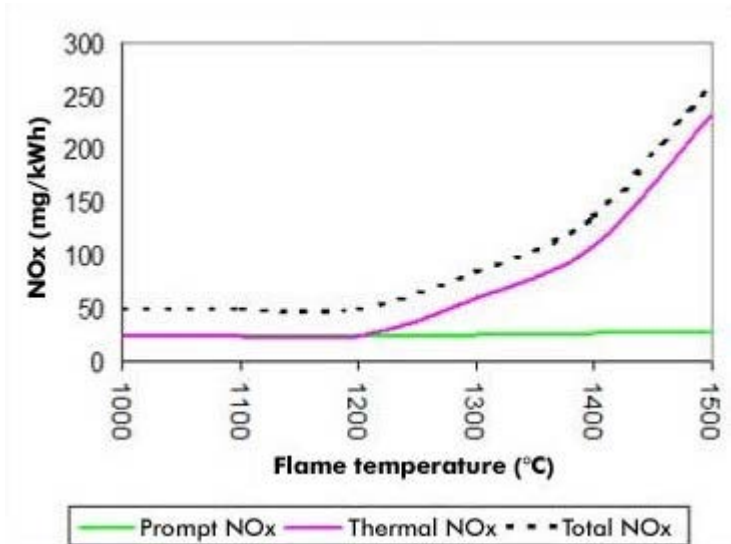
Taulukko 3. Tyypillisiä tunnuslukuja kuumennusuunin ilma- ja happipoltinjärjestelmille.

Hapen käytön seurauksena savukaasuvirta sekä sen mukana poistuva lämpö voivat supistua murto-osaan (taulukko 3). Kaiken kaikkiaan kuumennuksen hyötysuhde paranee. Vaikutus näkyy erityisesti pienentyneenä polttoaineen kulutuksena, mutta myös mahdollisuutena tuotannon lisäämisen. Savukaasun lämmön talteenottojärjestelmiä ei happipoltton yhteydessä uutta järjestelmää rakennettaessa tai saneerattaessa vanhat polttimet happikäyttöisiksi, sillä savukaasuvirrat ovat niin pieniä, ettei lämmöntalteenotto kannata. Olemassa olevan lämmöntalteenottojärjestelmän käyttöä on perusteltua jatkaa happilanssauksen asentamisen jälkeen.

Hiilidioksidipäästöjen väheneminen on suoraan verrannollinen polttoaineenkulutuksen vähenemiseen ja modernilla liekittömällä happipoltintekniikalla myös typen oksidien päästöt vähenevät.

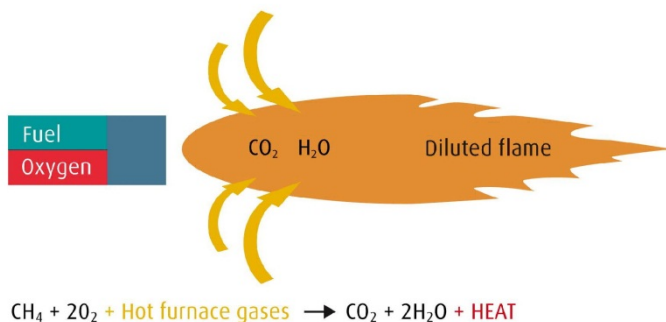
Uudet happipolttosovellukset

Perinteisen happipoltintekniikan yhteen ominaispiirteeseen eli korkeaan liekkiin lämpötilaan liittyy myös ongelmia. Näitä ovat mm. tulenkestäviin pintoihin/rakenteisiin kohdistuva lämpörasitus ja alttius typen oksidien muodostukseen (kuva 34). Happipolton kohdalla typen lähteet ovat polttoaine ja uunin ilmapuodot.



Kuva 34. Typen oksidien muodostuminen on vahvasti riippuvainen liekin lämpötilasta [2].

Näitä ongelmia voidaan pienentää kierrättämällä savukaasua liekkiin ja hajottamalla palaminen tapahtumaan laajemmalla alueella (kuva 35), jolloin palamisessa vapautuva lämpöenergia jakautuu tasaisemmin. Seurauksena on tasainen kuumennusvaikutus sekä NOx-päästöjen vähentyminen. Hyödyt ovat erityisen tärkeitä suurille, jatkuvatoimisille kuumennusuuneille, mutta ne ovat hyödyllisiä myös muissa uuneissa. Liekittömällä happipoltteknikalla on saavutettu erinomaisia tuloksia myös mm. alumiinin sulatusuuneissa tämä sopisi minusta paremmin sinne loppuun NOx asian alle, mutta tähän voisi mainita, että on muitakin tapoja vähentää Noxeja urean syötöt yms..



Kuva 35. Liekittömän happipolton periaatekuva oikealla [3].

Happilanssauksessa olemassa olevaan ilmapoltinjärjestelmään tuodaan uusi toiminto. Menetelmässä osa palamiseen tarvittavasta hapestä tuodaan edelleen ilmapoltinjärjestelmän kautta (esim. 25 %) ja loput ilmapolttimien viereen asennettavien happilanssien kautta. Asennus on yksinkertainen ja nopea, koska vanhoja järjestelmiä ei pureta eikä uusia polttimia asenneta. Tarpeen mukaan happilanssaus voidaan kytkeä käyttöön ja pois, mahdollistaen hapen käytön juuri silloin, kun sille on parhaat edellytykset (mm. tuotantotarve, polttoaineen hinta, hapen edullinen saatavuus).

Hapen käytön kokonaisvaikutukset on aina arvioitava tapauskohtaisesti esimerkiksi elinkaarilaskelmilla, koska investointikustannuksen lisäksi happi aiheuttaa käyttökustannuksia palamisilmaa kalliimman hapen käyttämisestä.

TARKISTA, VARMISTA, KUNNOSTA

Tarkista, että

- ilma-kaasusuhte on oikea
- poltin on oikein suunnattu
- palamisprosessi hallinnassa.

4.3 Lämpövuotojen pienentäminen

4.3.1 Uunin eristyksen parantaminen

Uunin eristysten parantamisella on mahdollista saavuttaa energiasäästöä, mutta sen tarkan potentiaalın määrittäminen voi olla haastavaa. Uunien seinämien kautta tapahtuvat häviöt ovat useimmiten suuruus luokaltaan alle 10 % kokonaiskulutuksesta energian sitoutuessa tuotteeseen ja rakenteisiin sekä poistuessa savukaasujen mukana, joten merkittävää säästöä jälkikäteen tehtävällä eristämällä ei ole saavutettavissa. Tehokkain tapa onkin erisää uunin sisäosia kevyillä eristeillä, jolloin lämmön sitoutuminen rakenteisiin on aikaisempaa vähäisempää.

Tyypillisesti isoissa muuratuissa jatkuvatoimisissa uuneissa eristyksen parantaminen on mahdollista vain huoltoseisokkien yhteydessä. Vastaavasti pienemmissä uuneissa ja erityisesti panosuuneissa eristysten parantaminen on helpompaa.

Vuoraus/eristysrakenteen suunnittelussa on otettava huomioon seuraavat tekijät:

- Yleensä uunin vuorauksiin ei ole hyödyllistä varata suurta määrää energiaa, mutta näin ei kuitenkaan ole poikkeuksetta. Sitoutunut lämpö tasaa lämpötilavaihteluita sekä saattaa nopeuttaa uunin lämpenemistä.
- Vuorauksen pintamateriaalin määrittelevät prosessin olosuhteet. Esimerkiksi villan käyttöä voidaan harkita useissa kohteissa, jos villan pinta käsitellään kestävästi prosessin olosuhteet (mekaaniset, kemialliset ...).
- Erityisesti monikerrosrakenteissa on muistettava, että eristysominaisuuksien muutos muuttaa koko rakenteen lämpötilajakaumaa ja siksi yhdenkin kerroksen muutokset on otettava huomioon muutoksia harkittaessa ja toteutettaessa.

Myös rakenteiden ulkopuolinen eristys on mahdollista ja kannattavaa. Energiantuotannossa kattiloita on eristetty pitkään ulkopuolelta hyvin tuloksin. Perinteisesti eristyksessä on käytetty

villaa mutta uutena mahdollisuutena on käyttää eristyspinnoitteita kuten kuvassa. Kuvan 36 lukujen perusteella karkea säästövaikutus on n. 1 kW/m² eli pyöreästi n. 10 MWh/a.



Kuva 36. Esimerkki ruiskueristyksestä ja sen vaikutuksella pintalämpötiloihin (www.specoating.com)

Nämä materiaalit perustuvat joko lasikuulilla tai keraamikomponenteilla tehtävään eristämiseen. Pinnoitteiden hinta on tavallista villavuorausta suurempi. On kuitenkin monimuotoisia ja – polvisia kohteita, joita villalla on ehkä hankala eristää. Näihin kohteisiin pinnoitteet tarjoavat varteenotettavan vaihtoehdon. Villan korvaaminen pinnoituksella on kannattavaa myös silloin, kun kondensaatio aiheuttaa villavuorauksen eristyskyvyn laskua ja pintojen korroosiota.

Eristyshintojen osalta voidaan esittää joitain suuntaa-antavia karkeita arvioita. Aina on kuitenkin pidettävä mielessä kohteen laajuus, ajankohta, telinetyöt, erityistoiveet ym., joten hinnat pitävät sisällään vain osakustannuksen ja todelliset kustannukset saadaan ainoastaan tarjosten kautta. Villan (100 mm, verkkomato/levy, pelti) osalta hinta on n. 70 – 100 €/m² ja hieman paksumpi (300 mm) 120 €/m² asennettuna. Edellä mainitun uudenlaisen eristyksen materiaalin hinta on 270 €/m², tilaaja voi asentaa pinnoitteen itsekin tai tilata työn urakoitsijan kautta. Vertailun vuoksi mainittakoon, että uunin sisäpuolisen eristyksen (300 mm villaeristys max T 1200) kustannus on suuruusluokkaa 350-400 €/m² tyyppillisen kokoiseen lämpökäsittelyuuniin.

Koska erityismateriaalit eivät kestä suuria rasituksia, energiatehokkuudeltaan hankalin yksityiskohta on uunin sisällä olevat kantavat rakenteet. Kantavat rakenteet saattavat olla keraamisia palkkeja, vesijäähdytettyjä metallisia palkkeja tai rullia tai metallisia telineitä, jotka kaikki sitovat ja siirtävät energiaa madaltaen energiatehokkuutta. Esimerkiksi panostyyppisessä lämpökäsittelyuunissa energiatehokkuutta voidaan parantaa sekä kunnossapitokustannuksia laskea, jos kuorma voidaan kohdistaa koko arinan sijaan vain kantavien palkkien päälle. Tällöin muut osat arinasta voidaan rakentaa paremmin eristäviksi ja suojata vielä pinta likaantumiselta esimerkiksi villamaton avulla. Tällöin uuni on helpompi siivota eikä irtomateriaali pääse arinakivien rakoihin hajottamaan rakennetta. Arinan lämmittämiseen kuluu jopa 20-30 % panoksen kokonaiskulutuksesta, joten asia on selvittämisen arvoinen.

Metalliset rakenteet kannattaa pyrkiä eristämään erityisesti jos ne ovat vesijäähdytettyjä. Eristykseen voi käyttää perinteisiä vuorausmateriaaleja tai lämpöenergiaa heijastavaa pinnoitetta. Lämpötilaerojen pienentäminen teräksessä johtaa energiatehokkuuden lisääntymisen ohes-

sa jopa huomattaviin kunnossapitokustannusten laskuun, sillä metallin sisällä vallitsevat termiset jännitykset ovat suurin syy teräsosien pettämiseen.

Eristyskonseptia valittaessa on syytä kiinnittää suurta huomiota uunin todelliseen käyttöön eli pääasialliseen prosessiin. Onko kyseessä päivittäinen käyttö, jäädytetäänkö uunia välillä jne.? Joskus energiaa kuluu uunia väärin käyttämällä ja väärällä eristyskonseptilla enemmän uunin rakenteisiin kuin itse tuotepanokseen.

Uuniluukut

Eräs erikoiskohde uuneissa on luukkujen vuoraus, sillä luukkurakenne on usein muuta vuorausta ohuempi. Näissä tapauksissa on erittäin hyvä käyttää edistyksellisiä vuorausmateriaaleja kuten mikrohuokosmateriaaleja. Luukun heikompi erityis johtaa helposti lämpötilaeroihin uunissa.

Muun vuorauksen ollessa hehkuvan kuuma luukun alhaisempi pintalämpötila johtaa energian luovutuksen sijaan sen poistumiseen tuotteista luukun suuntaan. Luukuissa käytetään myös ulkopuolista eristystä parantamaan työturvallisuutta ja parantamaan energiatehokkuutta.

Kuljetinaukot

Kuljetinaukkojen suojaamisesta on huolehdittava ja suojalaitteita (luukkuja, verhoja yms.) huollettava säännöllisesti.

Jatkuvatoimisessa uunissa on esimerkiksi sisälämpötila 650 °C, seinämäpaksuus on 0,2 m ja siinä on suojaamaton kuljetinaukko 1 m levyinen ja 0,3 m korkuinen. Tämän kaltaisen aukon kautta siirtyy uunista lämpöä ympäristöön n. 9 kW, mikä siis kuormittaa työntekijöitä. Vuositasolla energiankulutus (8000 h/a) on n. 70 MWh/a. Aukon pienentäminen parantaa myös uunin paineen hallintaa.

Jatkuvatoimisessa uunissa on esimerkiksi sisälämpötila 1200 °C, seinämäpaksuus on 0,5 m ja siinä on luukulla suojattu kuljetinaukko 1 m levyinen ja 0,45 m korkuinen. Luukku on avoin 200 sekuntia tunnissa. Tämän kaltaisen aukon kautta siirtyy uunista lämpöä ympäristöön n. 75 kW. Vuositasolla (8000 h/a), kun otetaan huomioon luukun aukioloaika energiankulutus on n. 35 MWh/a. Aukon pienentäminen parantaa myös uunin paineen hallintaa.

Savukaasupellit

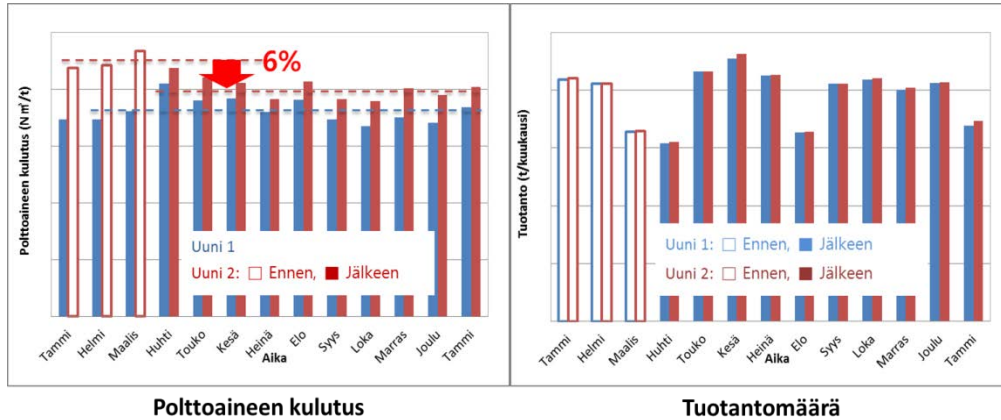
Tuotannon väliaikoina savukaasupellit on hyvä pitää suljettuina huuhtelujaksojen päätyttyä. Tämä vähentää merkittävästi uunin läpi virtaavia ja samalla sitä jäädyttäviä ilmavirtoja. Uunin lähistöllä tätä vetoa ei aistita, sillä vetoisuutta ei esiinny, mutta mittaukset savupiipussa voivat osoittaa ilman virtaavan siellä 1... m/s nopeudella. Säästöä kertyy halliin tulevan vuotoilman sekä uunin uudelleen lämmityksen osalta.

4.3.2 Uunin sisäpuolinen pinnoitus

Uunin sisäpuolisella pinnoituksella on tarkoituksena muokata olemassa olevan pinnan emissiivisyyttä lähelle ääripäitään, joko lähelle nollaa (heijastavaksi) tai lähelle arvoa yksi, jolloin pinta pyrkii absorboimaan kaiken energian ja edelleen emittoimaan lämmön säteilynä takaisin uuniin. Matalaemissiiviset (heijastavat) pinnoitteet pyrkivät vähentämään vuorauksiin menevän säteilyn määrää ja heijastamaan energian takaisin uuniin.

Pinnoitteiden käyttö saattaa johtaa myös prosessin kannalta heikentävään lopputulokseen, jos pinnoituksen vaikutuksia prosessiin ei ymmärretä. Pinnoituksen energiansäästöpoten-

tiaalinen on yleensä oletettu olevan 3 - 15 %. Hyödyt riippuvat mm. aiemman pinnan säteilyominaisuuksista, muista lämpöhäviöistä ja prosessityypistä. Yleisesti voidaan kuitenkin sanoa, että pinnoitteen käytöllä on mahdollista saavuttaa alempi vuorauksen pintalämpötila, vaikka uunin sisäosalla on vastaava kyky siirtää säteilylämpöä kuin ennen pinnoitusta. Kuvassa 37 on esitetty esimerkki yhden teollisuus uunin sisäisestä pinnoituksesta korkeamissiivisellä pinnoitteella.



Kuva 37. Esimerkki uunin sisäisen pinnoittamisen vaikutuksesta (ESCOM)

TARKISTA, VARMISTA, KUNNOSTA

Tarkista, että

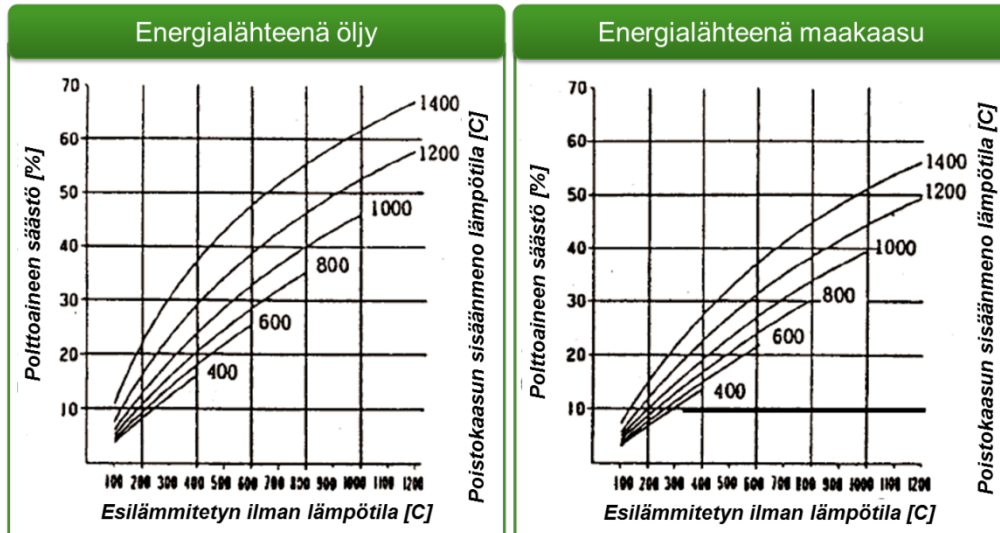
- lämpöeristeet ovat kunnossa
- uuniaukot ja -luukut on tiivistetty
- sisäpuoliset rakenteet ja pinnoitukset ovat kunnossa.

4.4 Palo/poistokaasun lämpösisällön hyödyntäminen muualla prosessissa

4.4.1 Palamisilman esilämmitys

Tyypillinen tapa hyödyntää talteen otettua lämpöä on esilämmittää sillä joko prosessi-ilmaa tai palamisilmaa. Esimerkiksi elintarvikeuuneissa poistoilman energiaa hyödynnetään tyypillisesti uuniin syötettävän ilman esilämmittämiseen. Pienemmissä uuneissa ei tyypillisesti ole käytössä palamisilman esilämmitystä johtuen suhteellisen pienestä palamisilmavirrasta.

Isoissa teollisuusuuneissa palamisilman esilämmittäminen on tyypillisempää. Palamisilman esilämmityksellä voi olla hyvin suuri vaikutus energiatehokkuuteen (kuva 38). Esimerkiksi hyödyntämällä öljykäyttöisessä uunissa (keskiteho 2 MW, poistokaasut 1000 °C, 3000 h/a) palamisilman esilämmitystä siten, että esilämmitetyn ilman lämpötila on 400 °C, niin säästö polttoaineessa on n. 24 % vuositasolla. Tämä vastaa n. 1440 MWh/a säästöjä, maakaasulla vastaavat säästöt ovat n. 19 % eli tasolla 1140 MWh/a. Laskelmat on tarkistettava vastaamaan uunin todellista käyttöä.



Kuva 38. Palamisilman esilämmityksen vaikutus uunin energiatehokkuuteen [EMT- India]

4.4.2 Raaka-aineen esilämmitys

Raaka-aineen esilämmitystä hyödynnetään lähinnä jatkuvatoimisilla uuneilla. Esimerkiksi lasi-uuneilla voidaan lasimurskaa lämmittää suoraan uunin poistokaasulla. Vastaavasti keramiikkauuneilla uunin poistokaasua hyödynnetään raaka-aineen kuivauksessa.

Raaka-aineen esilämmitystä pohdittaessa on kuitenkin tarkasteltava ainakin seuraavia kysymyksiä:

- Onko raaka-ainetta mahdollista lämmittää suoraan poistokaasulla ilman lämmönvaihdinta
- Aiheutuuko lämmityksestä riskejä tuotteen laadulle
- Aiheutuuko lämmityksestä riskejä uunin ajettavuudelle (esim. tukkeumariski syöttimisessä / kuljettimilla)
- Missä kohdassa prosessia raaka-aine kannattaa lämmittää (esim. siilossa, syöttimessä,..)
- Kuinka paljon raaka-ainetta voidaan lämmittää

4.4.3 Lämmön hyödyntäminen kiinteistön ja veden lämmityksessä

Vaikka uunin poistoilman / poistokaasun energiasisällöstä suuri osa olisi hyödynnetty prosessissa, löytyy tyypillisesti matalalämpöisiä energiavirtoja, joita voidaan käyttää esimerkiksi kiinteistön tai prosessiveden lämmityksessä. Kiinteistössä lämmönkäyttökohteita voivat olla ilmanvaihtojärjestelmät ja käyttöveden lämmitys. Prosessiveden osalta uunit ja veden käyttökohde voivat olla kaukana toisistaan, jolloin lämmönsiirron kannattavuus on kyseenalaista.

4.4.4 Uunin lämpöhäviöiden hyödyntäminen

Uunin lämpöhäviöt lämmittävät halli-ilmaa. Lämpövirrat nousevat katonrajaan ja kertyvät hallin yläosaan patjaksi yläpohjaa vasten. Lämpötila katonrajassa saattaa olla suuruusluokaltaan 50 °C,

jopa korkeampikin, jolloin kattopinta toimii jo laaja-alaisena säteilylämmittimenä. Tätä lämpöä voidaan hyödyntää tehokkaasti rakentamalla uunin yläpuolelle huuva, jolla estetään lämmön leviäminen ja josta lämmin ilma poistetaan lämmön talteenoton kautta.

Työskentelytasolla uunin ympärille asennettavat sermit vähentävät olennaisesti alueella työntekijöihin kohdistuvaa lämpösäteilyä. Tämä korostuu erityisesti uuniluukkujen ja kuljetinaukkojen ympäristössä. Sermi helpottaa työskentelyä uunin lähistöllä erityisesti kesäaikana. Tämä myös tehostaa lämpövirtauksen suuntautumista hallin yläosaan, josta se saadaan hyötykäyttöön.

Mikäli hallin yläosaan noussutta lämmennyttä ei poisteta se sulattaa talviaikana lumen vesikatolta, mikä aiheuttaa usein ongelmia veden jäätyessä ja sulaessa.

TARKISTA, VARMISTA, KUNNOSTA

Tarkista, että

- palamisilman esilämmitys toimii tehokkaasti
- raaka-aineiden esilämmitys on toteutettu
- uunin poistoilman ja savukaasun energia on hyödynnetty tehokkaasti
- uunin lämpöhäviöt käytetään hyödyksi.

4.5 Muut energiatehokkuustoimenpiteet

4.5.1 Prosessiajan seuranta ja optimointi

Prosessitoiminta kannattaa optimoida niin, ettei turhaa lämmittämistä tapahdu. Käytännössä tämä vaatii taustakseen lämmitysajan seurannan sekä kokeellista tietoa riittävästä lämmitysajasta että tietoa kuormitusten vaihteluista.

Monessa tuotantolaitoksissa esimerkiksi senkan lämmitysaika perustuu enemmän kokeemukseen kuin tarkkaan tietoon riittävästä lämmitysajasta. Tämä saattaa johtaa jopa kaksinkolminkertaisiin kuumennusaikoihin ja näin ollen turhiin taloudellisiin kuluihin. Senkan lämmityksen tehostaminen alkaa lämmitystavoitteiden ja toiminnan analysoinnilla, minkä jälkeen luodaan mittausjärjestelyt/-automaatika, joilla voidaan seurata senkan lämmitystä, haluttujen lämpötilojen saavuttamiseen kuluva aikaa ja siihen kuluva energiaa.

Mitattavia lämpötiloja ovat ainakin senkan sisä- ja ulkopinnan lämpötila. Tämän jälkeen aloitetaan muutostoimet ja niihin liittyvät tuotannolliset seurannat. Energiatehokkuuden parantamisella on mahdollista saavuttaa 20 – 30 % säästöt senkan lämmityksessä.

Kun tarkka tieto vaadittavasta prosessiajasta on tiedossa, on prosessiajan seurannasta tehtävä mahdollisimman helppoa henkilöstölle, jotta ohjeistusta voitaisiin noudattaa yksiselitteisesti ja toiminta pysyisi laadullisesti korkealla ja energiatehokkaalla tasolla. Mitä tarkemmat ja yksiselitteisemmät ohjeet ovat, sitä tasaisempaa laatua on odotettavissa.

Prosessiaikaan voidaan vaikuttaa myös tuotannon järjestelyillä. Tuotannon järjestämisessä on tärkeää:

- Uunissa olevien kappaleiden yhtäläiset käsittelyajat
- Selvittää miten pitkään uuni kannattaa pitää peruslämmöllä tuotannon välisinä aikoina
- Selvittää mikä on pienin kuormakoko, joka kannattaa valmistaa jatkuvatoimisesti.

Uuniin ei pidä laittaa samaan aikaan ohuita ja paksuja tuotteita tai pyöreitä ja särmikkäitä tuotteita, sillä niiden käsittelyajat eroavat toisistaan, mikä aiheuttaa väistämättä laatuongelmia toiselle tuotteelle.

Näiden seikkojen selvittäminen vaatii tuotanto- ja mittaustietojen pitkäaikaista huolellista kirjaamista sekä muutosten analysointia. Kun tavoitteet on saavutettu, niin asetetaan uudet tavoitteet. Kaikessa toiminnassa on lisäksi otettava huomioon laitteiden ikääntyminen ja sen tuomat muutokset mittaustuloksiin.

4.5.2 Uunin täyttöaste

Uunin täyttöasteella on merkittävä vaikutus uunin ominaiskulutukseen. Käytännössä tämä näyttelee merkittävää roolia kappaletavarauuneilla (esim. keramiikkauunit ja lämpökäsittelyuunit), joissa valmistettavaa tuotetta voidaan syöttää uuniin hyvin eri määriä suhteessa uunin maksimikapasiteettiin.

Uunin täyttöasteen optimoimiseksi olisi siihen pyrittävä rakentamaan osastointia niin, että lämmitys ja mahdollinen ilmankierto tapahtuvat vain niissä osissa uunia, joissa tuotetta kulkee. Jos tämä ei ole teknisesti mahdollista, on lämmitystä ja ilmakiertoa ohjattava tuotantomäärän perusteella.

Myös panostoimisissa uuneissa panoskoolla on merkitystä uunin energiatehokkuuteen. Tutkittaessa erään valimon panosuunin jatkuvatoimisuuden ja panoskoon vaikutusta energiankulutukseen selvisi, että uunin rakenteet varastoivat n. 25 % yhden käsittelyn energiasta eli jatkuvatoimisuudella voidaan säästää noin 25 % käyttävästä energiasta. Lisäksi selvisi, että kuorman pudottaminen kolmanneksella vei vain puolet kuuman uunin hyödystä eli edelleen lämmitäminen oli n. 12 % tehokkaampaa kuumasta kuin kylmästä uunista. (Vapalahti)

Passiivikuorman vähentämisellä voidaan suoraan vaikuttaa uunin energiatehokkuuden paranemiseen. Tähän voidaan vaikuttaa mm. pienemmillä ja kevyemmällä rakenteilla ja varusteilla, uunien osastoinneilla jne. Mitä vähemmän uunin sisällä on ylimääräistä lämmitettävää lämpökapasiteettia (massa x ominaislämpökapasiteetti), sitä vähemmän energiaa tarvitaan.

Yksi keskeinen tarkastelukohde on panosuuneissa uuniarina sekä jatkuvatoimisissa uuneissa ketju- ym. kuljettimet. Voidaanko ne valmistaa/korvata kannattavasti jollain toisesta materiaalista valmistetulla yksiköllä? Onko mahdollista keventää olemassa olevia rakenteita jne.

4.5.3 Sähkövastusten kunnon seuranta

Vastusten kuntoa kannattaa monitoroida jatkuvaa seuranta hyödyntäen. Tämän lisäksi niiden kunto on hyvä tarkastaa visuaalisesti huoltoseisokkien yhteydessä.

Vastusten sähköisten ominaisuuksien tulisi pysyä pitkään vakioina. Todellisuudessa vastusmateriaalin ominaisvastus kasvaa ajan myötä, jolloin uunin teho laskee. Vastusten mekaaniset mitat eivät saa vaihdella merkittävästi vastusten vanhetessa, sillä suuret muutokset mekaanisissa mitoissa aiheuttavat vastusten rikkoontumisen sekä vastusten irtoamisen tukirakenteista.

4.5.4 Uunin suora ja epäsuora lämmitys

Suora lämmitys on lähes aina epäsuoraa tehokkaampi, koska lämmityksestä poistuu lämmönvaihtimen aiheuttama hyötysuhteen heikkeneminen. Joissakin teollisissa uuneissa lämmitys toteutetaan silti epäsuorasti, vaikka se voitaisiin prosessiteknisesti toteuttaa myös suoraan (ilman

lämmönvaihdinta). Kuvassa 39 on esitetty leipomouunin epäsuoran ja suoran lämmityksen vaikutus sen energiankäyttöön.

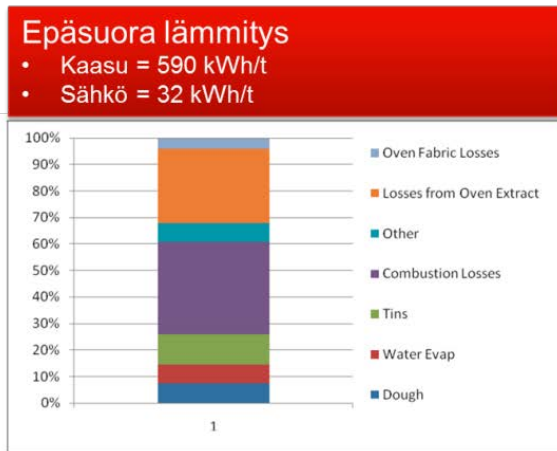


Figure 19: Indirect-fired oven thermal energy balance

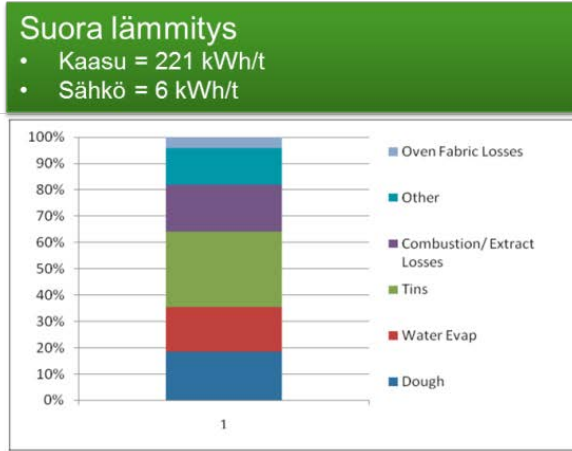


Figure 20: Direct-fired oven thermal energy balance

Kuva 39. Leipomouunin epäsuoran ja suoran lämmityksen vaikutus sen energiatehokkuuteen (Carbon Trust)

TARKISTA, VARMISTA, KUNNOSTA

Tarkista, että

- uunia ei lämmitetä tarpeettomasti
- uuni on mahdollisuuksien mukaan osastoitu vajaakuormaa varten
- uunin täyttöaste panosuunissa on mahdollisimman suuri
- sähkövastukset ovat hyvässä kunnossa
- loistehon kompensointi toimii moitteetta
- huipputeho on minimoitu
- uunin olosuhteet vastaavat tarvetta ja tavoitetta
- uuni toimii energiatehokkaasti.

4.5.5 Apujärjestelmien toiminnan tehostaminen

Apujärjestelmien energiatehokkuuden parantaminen riippuu suuresti niiden rakenteesta ja käyttökohteesta. Seuraavassa on listattu yleisimmät tarkastettavat asiat apujärjestelmistä.

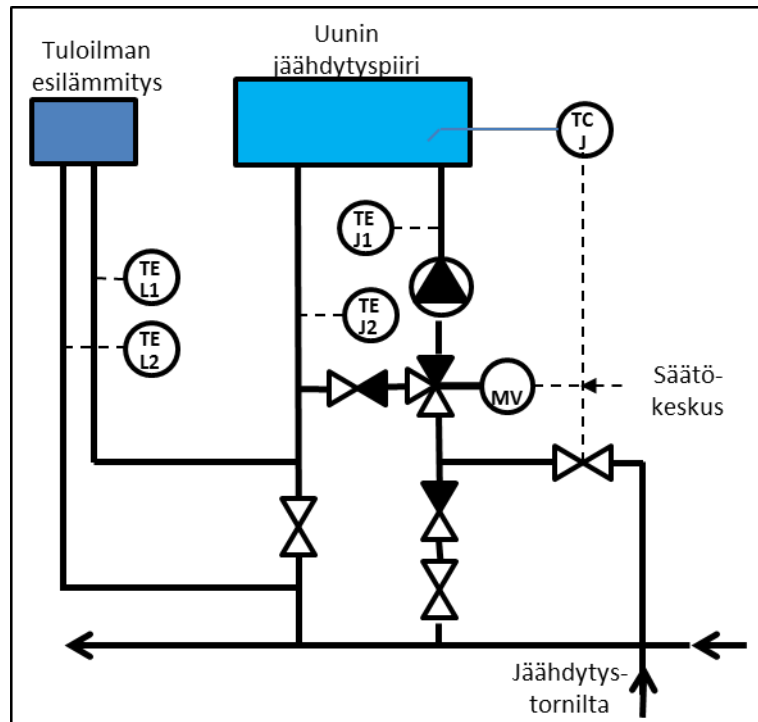
Ilmajärjestelmät

- Kuinka ilmajärjestelmien ohjaus on toteutettu, hyödynnetäänkö taajuusmuuttajia?
- Ohjataanko ilmajärjestelmiä tuotannon mukaan?
- Onko poistoilmoissa lämmöntalteenottoa?
- Ovatko lämpöpinnat puhtaat?

Jäähdytysjärjestelmät

- Miten jäähdytyksen ohjaus on toteutettu?

- Onko mahdollisuus hyödyntää poistettavaa lämpöä? Tarvitaanko lämpöpumpua? Joudutaanko tyytymään vapaajäähdytykseen?
- Onko mahdollista ketjuttaa jäähdytysvirtausta tai nostaa nostaa sen lämpötilaa paremman hyödynnettävyyden saavuttamiseksi, kuva 40
- Onko jäähdytys kytketty prosessiin?



Kuva 40. Esimerkki jäähdytysveden lämpötilan hallinnasta ja lämmön hyödyntämisestä

Höyry- ja lauhdejärjestelmä

- Toimivatko lauhteenpoistimet?
- Onko lauhteenpalautusta mahdollisuus tehostaa?
- Hyödynnetäänkö hönkähöyryä esim. esilämmityksissä?
- Onko höyryvuodot kartoitettu ja minimoitu?
- Vastaavatko höyryn ominaisuudet (lämpötila, paine) prosessin tarpeita?
- Onko putkistojen eristys kunnossa? Myös venttiilien, laippojen, laitteiden yms. osalta?
- Onko tuotannon ulkopuolisen ajan säästömahdollisuudet kartoitettu ja toteutettu?
- Ovatko lämmönsiirtopinnat puhtaat?

Lisätietoa energiatehokkaasta höyry- ja lauhdejärjestelmästä löytyy mm. seuraavista linkeistä:

- http://www.motiva.fi/files/2407/Energiatehokas_h_yry-ja_lauhdej_rjestelm_.pdf
- http://www.motiva.fi/files/4892/H_L_toteutusohje_2011.pdf
- http://www.motiva.fi/files/4893/HOLA_kaytto-kunnossapito_ohjeistus_2011.pdf

Paineilmajärjestelmä

- Onko verkostovuodot tukittu?
- Onko paineilman käyttö kytketty prosessiin?
- Voidaanko paineilman käyttö korvata matalapainepuhalluksella?
- Tuotetaanko paineilma tehokkaasti oikeankokoisilla kompressoreilla?

Lisätietoa paineilmajärjestelmän energiatehokkuuden parantamisesta löytyy seuraavasta linkistä: http://www.motiva.fi/files/1318/PATE-analyysi_Paineilman_energia-analyysmalli.pdf

4.5.6 Uunin saneeraus

Aikansa energiatehokkainkin uuni kuluu ja vaurioituu käytössä ja ajan myötä sen energiatehokkuus ei enää vastaakaan ajan vaatimuksia. Uunit ovat investointeina vankkarakenteisia ja pitkäikäisiä, joten niiden saneerauksella voidaan parantaa vanhankin uunin energiatehokkuutta ja vähentää ympäristövaikutuksia, monesti jopa lisätä tuotantokapasiteettia.

Saneerauksessa keskeisimpiä asioita ovat tuotannon tehostaminen, rakenteiden ja eristeiden kunnon kohottaminen, prosessiautomaatiikan päivittäminen/uusiminen, mittauspisteiden täydentäminen vastaamaan energiataseen vaatimuksia. Lisäksi turva- sekä varolaitteet/järjestelmät on päivitettävä ajankohdan vaatimusten mukaisiksi.

Uunien saneerauksen kannattavuus on perusteltua käyttää elinkaarilaskelmia, jolloin voidaan varioida mm. tuotannon vaihteluiden vaikutuksia.

Paljon voidaan parantaa jo säännöllisellä ennakoivalla huollolla ja tarkastuksella. Korjaamalla ja säätämällä ajoissa puutteet energiankulutus pienenee ja ongelmiin voidaan puuttua ajoissa. Samalla varmistetaan tuotannon kapasiteettia ja laatua. Energiankulutuksen suhteen säännöllisesti tarkistettavia asioita ovat mm.

- uunin eristeet
- uunin pintalämpötilat
- luukkujen toiminnat ja tiivisteet
- lämmitysjärjestelmän toiminta ja säädöt
- lämmönvaihtimien puhtaus
- termoelementit ja niiden kalibrointi
- muiden mittausten kalibrointi
- uunin lämpötilantarkkuus
- turvallisuus
- päästöt.

Työn alla oleva EcoDesign Direktiivi 2009/27/EY tulee asettamaan aikanaan uusia vaatimuksia uunien energiankulutuksen suhteen.

4.5.7 Loistehon kompensointi

Sähköjärjestelmissä syntyvä loisteho vie kapasiteettia sähköjärjestelmissä ja synnyttää lämpöä, mutta sitä ei voi käyttää hyödyksi laitteistoissa. Loistehoa synnyttävät erilaiset laitteet, kuten

esimerkiksi tyristorit ja induktiomoottorit. Loistehoa voidaan kompensoida luonnollisin ja keino-
tekoisin menetelmin.

Luonnollisia keinoja

- Oikein mitoitettut sähkömoottorit ja vaihtamalla vajaalla kuormalla käyvät sähkömoottorit pienempiin
- Estämällä muuntajien ja sähkömoottoreiden tyhjäkäynti
- Sammuttamalla laitteet (esim. hitsauskoneet), kun niitä ei käytetä
- Vaihtamalla induktiomoottorit synkronoituihin moottoreihin

Keinotekoisia keinoja

- Kondensaattoripankki
- Synkronoimattomien moottoreiden ylimagnetisointi.

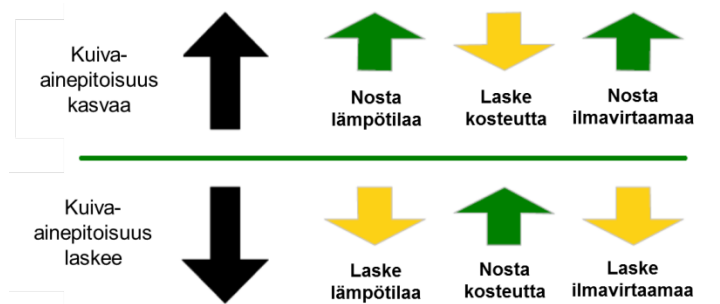
Loisteholle on yleensä määritelty tuotantolaitoskohtainen raja, jonka ylittyessä loistehosta joutuu maksamaan sille määritellyn hinnan. Toisaalta loistehon osalta ei myöskään pidä mennä ylikompensoinnin puolelle.

4.5.8 Huipputehon minimointi

Loistehon lisäksi lisäkustannuksia sähköjärjestelmissä aiheuttaa hetkellisten kuormituspiikkien aiheuttamat tarpeettoman korkeat liittymätehot tai liittymätehon ylitykset. Teollisuuslaitoksille on kehitetty erilaisia tehonseuranta ja -ohjausjärjestelmiä, joilla näitä tehopiikkejä pyritään ehkäisemään. Yhtenä esimerkkinä tällaisesta hallintajärjestelmästä on useita uuneja käyttävä tuotantolaitos, jonka uunien lämmitys on synkronoitu siten, ettei tietty tehotaso ylitä.

4.5.9 Uunin olosuhteiden hallinta

Lämmönsiirrossa ilmaa hyödyntävissä uuneissa on tärkeää tuntea valmistettavan tuotteen ominaisuuksien muutos uunituksessa. Lisäksi on tärkeää tuntea ilman ominaisuudet niin uunissa sisällä kuin poistoilmassa. Esimerkiksi kuivatusuuneissa tuotteen kuiva-ainepitoisuuteen voidaan vaikuttaa kuvan 41 mukaisesti.



Kuva 41. Esimerkki kuivatusuunin merkittävimmistä säätöparametreista (Tangram Technology)

Olosuhteiden kokonaisvaltainen hallinta uunissa vaatii luotettavan ja kattavan mittausinstrumentoinnin sekä automaattisen säädön. Käyttäjän on tiedettävä mm. lämpötilojen ja kosteuden

raja-arvot molempiin suuntiin ja ymmärrettävä mitä poikkeaminen niistä merkitsee, samoin kuin pitoaikojen merkitys ja niistä poikkeaminen. Mahdollisista poikkeamista on tehtävä merkinnät tuotannon pöytäkirjoihin sekä välittömästi selvitettävä niiden aiheuttajat.

Energian myynti ulos tehtaalta

Joissain tapauksissa kaikkea talteenotettua energiaa ei pystytä hyödyntämään omassa prosessissa eikä kiinteistöjen lämmityksessä, jolloin kannattaa kartoittaa lähialueen muiden toimijoiden tarpeet ylijäämälämmölle. Tällaisia voivat olla mm.

- muut toimijat samalla tehdasalueella
- muut toimijat tehdasalueen ulkopuolella
- julkiset alue-/kaukolämpöverkot.

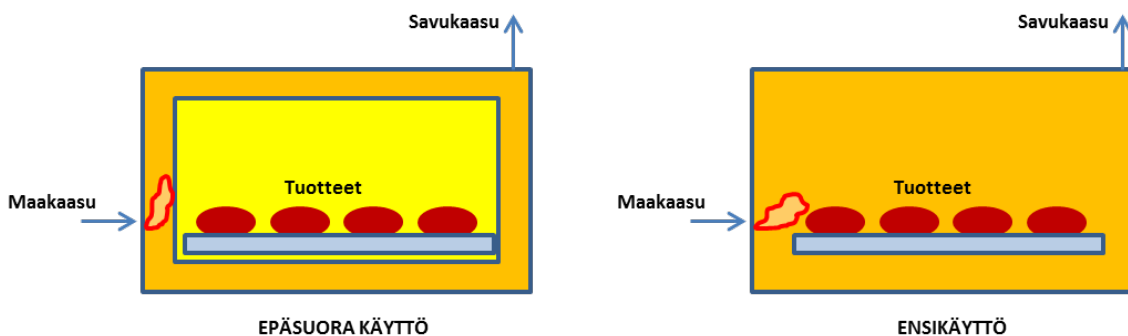
Käytännössä tällaisia järjestelyjä vaikeuttavat esimerkiksi toimitusvarmuusasiat eli kuinka ulkopuoliselle toimijalle taataan lämmöntuotanto esimerkiksi huoltoseisokkien aikana. Myös toimitusjakson pituudella on huomattava merkitys asiaa tarkasteltaessa, tuotantolaitoksen on usein kovin vaikea solmia pitkäaikaisia sopimuksia esim. kunnan kanssa.

Polttoaineen valmisteveron palautus

Maakaasun energiavero on vuoden 2015 alusta alkaen 13,664 €/MWh, josta huoltovarmuusmaksu on 0,084 €/MWh.

Maakaasun valmisteveroa maksetaan kulutuksen mukaan. Loppukäyttäjä voi hakeutua maakaasun rekisteröidyksi käyttäjäksi ja hankkia kaiken käyttämänsä maakaasun verottomasti. Edellytyksenä rekisteröitymiselle on, että käyttäjä hankkii maakaasunsa suoraan maakaasun siirtoverkostosta. Rekisteröitynyt käyttäjä ilmoittaa itse maakaasun verollisen ja verottoman käyttönsä suoraan kuukausittaisella veroilmoituksella. Mikäli maakaasua käytetään verottomaan käyttötarkoitukseen, tule kaasun loppukäyttäjän hakea maakaasun valmisteveroa takaisin tuotantolaitoksen alueen tullitoimipaikasta. Palautusta voi hakea joko kerralla koko vuodelta tai kahdessa erässä puolivuositain. Palautusta voi hakea kolme vuotta hakujakson päättymisestä. Palautuksen edellytyksenä on, että hakija esittää luotettavan selvityksen tuotteiden verottomasta käytöstä.

Valmisteverotonta ja huoltovarmuusmaksutonta on maakaasu, joka käytetään teollisessa tuotannossa raaka-aineena tai apuaineena taikka välittömästi ensikäytössä tavaran valmistuksessa. Ensikäyttö tarkoittaa käytännössä tilannetta, jossa maakaasu ja sen liekki ja/tai savukaasu koskettaa suoraan valmistettavaa tuotetta, kuva 42



Kuva 42. Maakaasun epäsuora käyttö ja ensikäyttö, periaate.

Myös energiaintensiivisillä yrityksillä on mahdollisuus hakea veronpalautusta. Kun yrityksen tilikauden aikana sähköstä, kivihilestä, maakaasusta, mäntyöljystä, sekä kevyestä ja raskaasta polttoöljystä ja biopolttoöljystä maksamat sekä tilikauden aikana hankkimien näiden tuotteiden hankintahintaan sisältyneet valmisteverot ovat enemmän kuin 0,5 % yrityksen jalostusarvosta, yrityksellä on oikeus ylimenevältä osalta hakea takaisin 85 % tuotteista maksettujen tai niiden hankintahintaan sisältyneiden valmisteverojen määrästä. Näin lasketusta veronpalautuksesta maksetaan vain 50 000 euroa ylittävä osuus. Laskettaessa maksettujen valmisteverojen määrää yritys voi ottaa huomioon hankkimaansa kaukolämpöön ja prosessihöyryyn sisältyneet valmisteverot.

Kun polttoaineita on hankittu verollisena, mutta käytetty verottomaan tarkoitukseen, verottomuus toteutetaan jälkikäteen polttoaineen käyttäjälle hakemuksesta maksettavana palautuksena. Palautusta haetaan Tullilta. Veronpalautusta koskeva hakemus on tehtävä Tullille kuuden kuukauden kuluessa tilikauden päättymisestä.

Lisätietoja on saatavilla Tullin internetsivustoilta <http://www.tulli.fi>

Turvallisuusasioiden huomioon ottaminen

Kaikessa uuneja koskevissa toimissa ja muutoksissa on aina otettava huomioon niitä koskevat turvallisuus-, standardi- ym. asiat. Parhaiten ajan tasalla olevaa tietoa saa TUKES:in internetsivustoilta <http://www.tukes.fi>.

4.5.10 Eräitä lämmöntalteenottoratkaisuja

Lämmöntalteenottoa harkittaessa palamisilman esilämmitys on aina ensisijainen vaihtoehto. Mitä siitä sitten jää yli voidaan hyödyntää prosessiin (esilämmitys, prosessivesi), muualla ko. tuotantolinjalla, tehdasosastolla jne. Lämmöntalteenottolaitteen valinta riippuu mm. seuraavista tekijöistä:

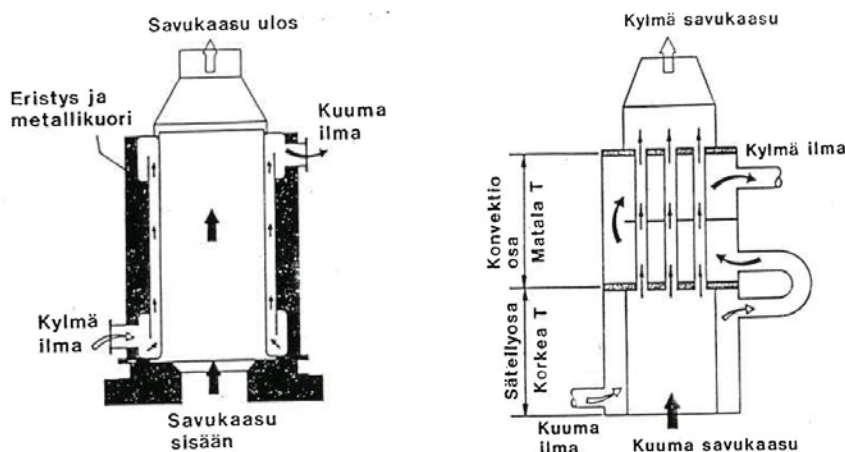
Lämmöntalteenottolaitteen valinta riippuu mm. seuraavista tekijöistä:

- savukaasu-/poistokaasuvirta
- savukaasun/poistokaasun lämpötila- ja painetaso
- savukaasun/poistokaasun kemiallisesti ja fysikaallisesti aktiiviset aineosat ja –määrät
- lämmöntalteenottoaine sekä sen lämpötila ja paine
- laitteiden tilantarve (ja kuljetusreitit)
- laitteiden luotettavuuden, huoltotarpeen ja säädettävyyden asettamat vaatimukset
- lämmöntuoton ja –tarpeen pysyvyydet sekä niiden samanaikaisuudet
- taloudellinen kannattavuus.

Lämmöntalteenottoratkaisuja toteutettaessa on aina myös otettava etukäteen selvää mahdollisimman tarkkaan mitä epäpuhtauksia savukaasu tai poistoilma sisältävät. Tämä on välttämätöntä, jotta laite voidaan varustaa tarvittavilla puhdistuslaitteilla ja -järjestelmillä. Puhdistukseen on varattava myös asialliset tilat. Keskeisimmät puhdistuslaitteita koskevat selvitystarpeet ovat seuraavat:

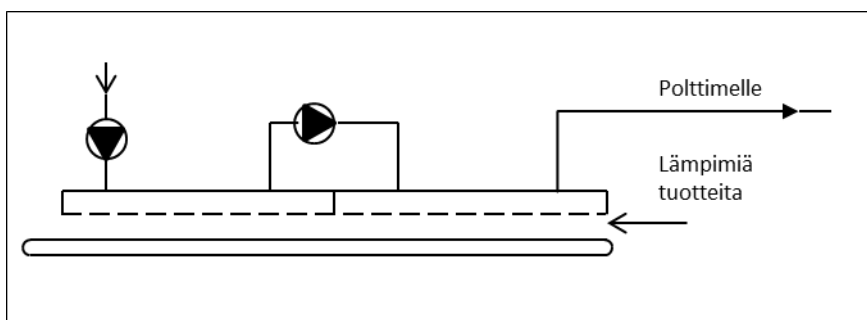
- epäpuhtauden koostumus ja määrä
- puhdistettavan pinnan laatu
- puhdistettavan alueen koko ja muoto
- tavoiteltava puhdistusaste
 - vaikeutuuko puhdistus ajan kuluessa
- puhdistuksen vaikutus laitteistoon
- työsuojelulliset näkökohdat
- jätteongelmat
- taloudelliset tekijät
- puhdistetaanko laitteisto paikallaan
 - voidaanko puhdistus tehdä käytön aikana
 - tarvitaanko varalaitte tai rinnakkaislaitte
- voidaanko laitteisto uusia tarvittaessa.

Jokaisen uunin lämmöntalteenottotarkastelut ja laskelmat on tehtävä juuri kyseisen uunin toiminta-arvojen ja käytön mukaan. Oheisena on esitetty joitain suuntaviivoja lämmöntalteenotto-laitteiden sovellutusmahdollisuuksista.

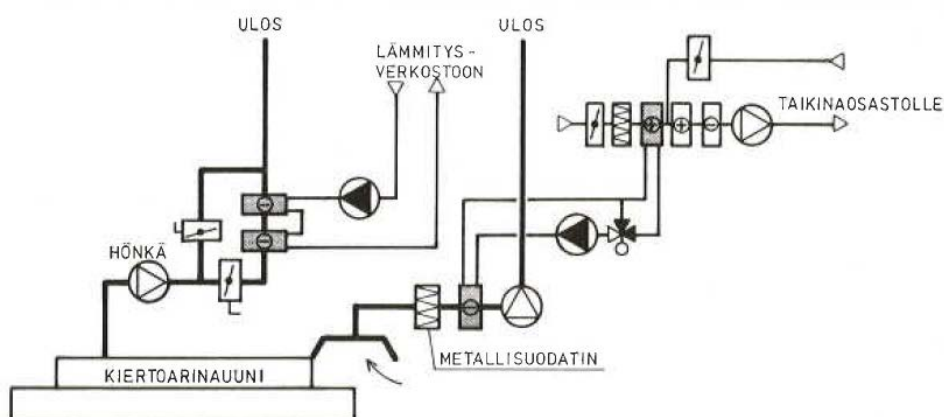


Kuva 43. Tyypillisiä lämmöntalteenottolaitteita (Leppimaa)

Palamisilman esilämmitykseen voi käyttää myös valmiiden tuotteiden luovuttamaa lämpöä, kuva 44



Kuva 44. Lämpimien tuotteiden lämmön hyödyntäminen esimerkiksi palamisilman esilämmitykseen.



Kuva 45. Esimerkki paistouunin LTO-ratkaisuperiaatteista (Neste Oy).

5 Energiatohokkuuden vaikutus uunin päästöihin

Uunien toiminnasta aiheutuvat päästöillä voi olla vaikutusta sen energiatehokkuuteen, sillä ympäristöluvan raja-arvot voivat asettaa rajoituksia sille, kuinka uunia on mahdollista ajaa luvan puitteissa. Käytännössä esimerkiksi regeneratiivisen uunin polttopuolien vaihtoajan voi määrittää syntyvät NO_x -päästöt, jolloin energiatehokkuus muodostuu toisarvoiseksi asiaksi.

Polttoprosessin päästöjen muodostumiseen vaikuttavat mm. seuraavat tekijät:

- Käytettävä polttoaine
 - Kemiallinen koostumus
 - Fysikaaliset ominaisuudet
- Palamisolosuhteet
 - Polttolaitteen rakenne/ominaisuudet

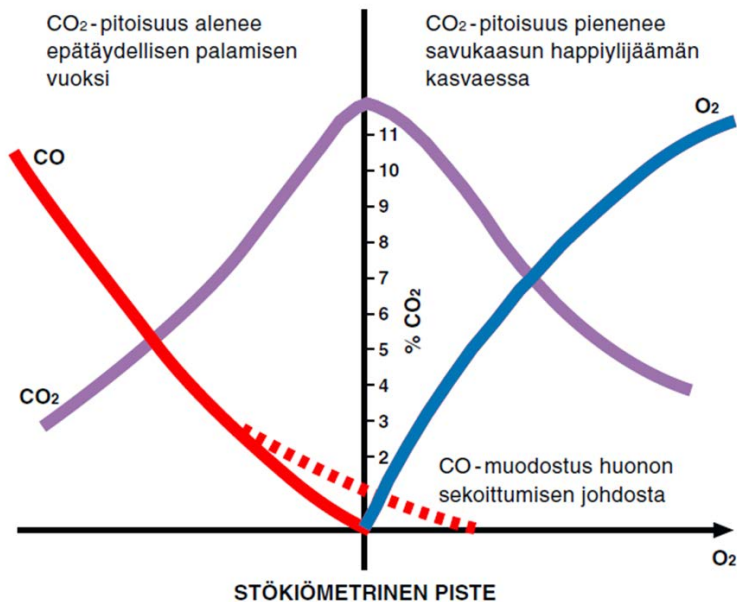
- Prosessin tasaisuus
- Lämpötilojen hallinta
- Sääntötekniikka
- Häiriötilanteiden hallinta.

Merkittävimmät teollisuusuneja koskevat päästöt ovat häkä, hiilidioksidi, typen oksidit ja tiettyissä tapauksissa rikkivedyt.

Oikealla poltintyyppin valinnalla sekä poltinja järjestelmän oikealla ohjauksella voidaan vaikuttaa oleellisesti uunin päästöihin. Uunin tiiveydellä ja polttimen liekin lämpötilalla on myös merkittävä vaikutus NO_x-päästöihin.

5.1 Hiilivedyt (CO ja CO₂)

Uunin poltto-olosuhteilla on suuri vaikutus poltossa syntyviin CO ja CO₂ määriin. Kuvassa 46 on esitetty näiden kaasujen muodostuminen siirryttäessä pois stoikiometrisesta pisteestä.



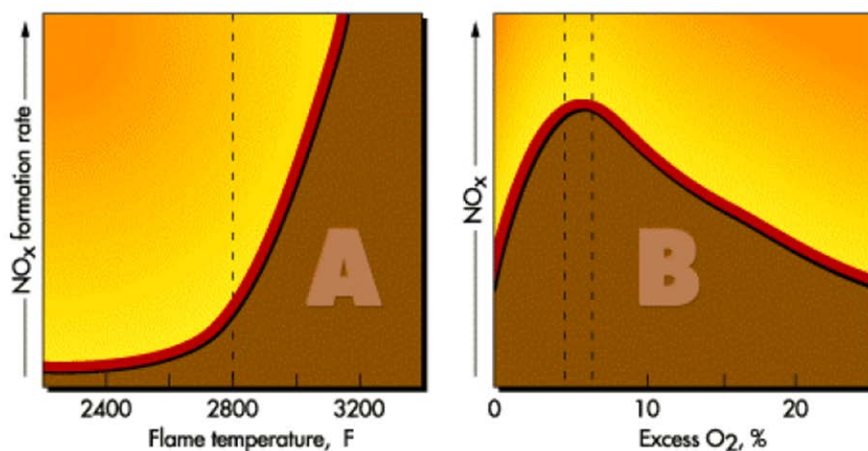
Kuva 46. Hiilivetyjen muodostuminen eri poltto-olosuhteissa [Maakaasukäsikirja]

Suuri ilmaylimäärä heikentää palamishyötysuhdetta. On kuitenkin huolehdittava, ettei palaminen tapahdu ali-ilmalla, koska silloin muodostuu häkää ja savukaasuihin jää palamattomia hiilivetyjä. Jopa nokea voi muodostua. Kun palamista säädetään savukaasumittausten avulla, on varmintä mitata aina sekä happi- että häkäpitoisuus.

Pelkkä happiylijäämän mittaaminen ei takaa täydellistä palamista, sillä häkää voi syntyä myös kaasun ja palamisilman huonon sekoittumisen vuoksi.

5.2 Typen oksidit (NO_x)

Typipäästöt riippuvat käytettävästä polttotekniikasta ja poltto-olosuhteista (Kuva 47).



Kuva 47. Typenoksidien muodostuminen (Tecnische universiteit of Eindhoven)

Typillisimmät NO_x-päästöjen hallintamenetelmät ovat seuraavat:

- primaariset menetelmät
- happipolttaineseoksen käyttö sulatuksessa
- kemiallinen pelkistys polttoaineen avulla
- valikoiva katalyyttinen pelkistys
- valikoiva ei-katalyyttinen pelkistys.

Primaariset menetelmät voidaan jakaa kahteen pääryhmään: "konventionaalisiin" palamisreaktion muutoksiin sekä erikoisrakenteisiin uuneihin ja optimoituihin poltto-oloihin. Konventionaaliset palamisreaktion muutokset perustuvat yleensä seuraaviin seikkoihin: pienennettyyn ilma/polttainesuhteeseen, alennettuun esilämmityslämpötilaan, vaiheittaiseen palamiseen tai typen oksidien syntymistä vähentäviin polttimiin tai näiden yhdistelmiin. Investointikustannukset ovat yleensä melko pienet, ja käyttökustannukset usein alenevat pienemmän polttoaineen kulutuksen ja parantuneen palamisen ansiosta.

Happi-polttaineseoksella lämmitettäessä palamisilma korvataan hapella. Kun suurin osa palamisilman typestä poistetaan, vähenee savukaasujen tilavuus noin kahdella kolmasosalla. Tällöin on mahdollista säästää energiaa, koska ilmakehän typpeä ei tarvitse lämmittää liekkien lämpötilaan. Lämmön vaikutuksesta syntyvien typen oksidien määrä vähenee tehokkaasti, sillä ainoa palamisilmassa esiintyvä typpi on peräisin happi-polttaineseoksen typpijäämästä, nitraattien hajoamisesta sekä mahdollisesti uuniin kulkeutuvasta ylimääräisestä ilmasta.

Kemiallinen pelkistys polttoaineen avulla tarkoittaa menetelmää, jossa savukaasukaasuvirtaan lisätään polttoainetta, joka pelkistää kemiallisesti typen oksidit vapaaksi typeksi. Polttoaine ei pala, vaan hajoaa lämmön vaikutuksesta radikaaleiksi, jotka reagoivat savukaasujen osasten kanssa. Menetelmässä lisääntynyttä energiankulutusta voidaan oleellisesti vähentää käyttämällä energian talteenottojärjestelmiä sekä käyttämällä näitä menetelmiä yhdessä primaaristen menetelmien kanssa.

Valikoivassa katalyyttisessä pelkistyksessä (SCR) NO_x reagoi ammoniakkin kanssa katalyytti-kerroksessa yleensä noin 400 °C:n lämpötilassa. Valikoivan katalyyttisen pelkistuksen kustannukset riippuvat pääasiassa poistokaasujen määrästä ja typpioksidien määrän vähentymisestä.

Valikoiva ei-katalyyttinen pelkistys (SNCR) toimii samalla periaatteella kuin valikoiva katalyyttinen pelkistyskin, mutta reaktiot tapahtuvat korkeammassa lämpötiloissa (800 – 1100 °C:ssa), eikä katalyyttiä tarvita. Valikoiva ei-katalyyttinen pelkistys ei vaadi pölyn poistoa tai happamien kaasujen pesua. Yleensä saavutetaan 30–70 %:n vähennys typpioksidien määrässä.

5.3 Rikin oksidit (SO_x)

Rikkidioksidipäästöjen sisältämä rikki on peräisin polttoaineen sisältämästä rikistä ja teollisuuden tapauksessa raaka-aineiden tai prosessikemikaalien sisältämästä rikistä. Tärkeimmät rikkidioksidipäästöjä aiheuttavat polttoaineet ovat kivihiili, raskas polttoöljy ja turve. Suurin osa rikistä on savukaasuissa ja pieni osa jää poltossa syntyvään tuhkaan.

Pääasialliset SO_x -päästöjen hallintamenetelmät ovat

- polttoaineen valinta
- raaka-aineseoksen koostumuksen muuttaminen
- happamien kaasujen pesu.

Öljyllä lämmitettävissä prosesseissa suurin osa rikkioksideista syntyy polttoaineen sisältämän rikin hapettumisesta. Raaka-aineista peräisin olevien rikin oksidien määrä vaihtelee valmistettavan tuotteen mukaan. Esimerkiksi lasinvalmistuksessa öljyä poltettaessa polttoaineesta syntyvät SO_x -päästöt ovat suurempia kuin raaka-aineista syntyvät. Helpoin tapa vähentää SO_x -päästöjä on alentaa polttoaineen rikkipitoisuutta. Siirtyminen vähemmän rikkiä sisältävän polttoaineen käyttöön ei yleensä aiheuta muita kuin polttoaineen korkeammasta hinnasta johtuvia kustannuksia. Siirtyminen kaasulla lämmittämiseen edellyttää polttimien vaihtoa ja joukon muita muutoksia.

Vastaavasti raaka-aineseoksen muuttaminen voi olla hyvinkin haastava tehtävä, jos itse ydinprosessissa hyödynnetään sulfaatteja.

Kuivan ja puolikuivan kaasujen pesun toimintaperiaate on sama. Reagoiva (absorboiva) materiaali syötetään hienojakoisena poistokaasuvirtaan. Materiaali reagoi rikin eri oksidien kanssa, minkä tuloksena syntyvät kiinteät yhdisteet poistetaan poistokaasuvirrasta sähköstaattisen pölynkerääjän tai pussisuodatinjärjestelmän avulla. SO_x :n poistamiseen käytettävät absorboivat aineet poistavat tehokkaasti myös muita happamia kaasuja. Kuivassa prosessissa absorboiva aine on kuiva jauhe (tavallisesti $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaHCO_3 tai $\text{Na}_2(\text{CO})_3$). Puolikuivassa prosessissa absorboiva aine (tavallisesti Na_2CO_3 , CaO tai $\text{Ca}(\text{OH})_2$) syötetään lietteenä tai liuoksena ja veden haihtuminen jäädyttää kaasuvirtaa.

Näillä menetelmillä saavutettava päästöjen väheneminen riippuu useista eri tekijöistä, kuten poistokaasujen lämpötilasta, käytettävän absorboivan aineen määrästä ja tyypistä (tai tarkasti sanottuna reagenssin ja saasteiden moolisuhteesta) sekä siitä, miten hienojakoista absorboiva aine on.

Lähteet

ERA Technology, Sustainable Industrial Policy – Building on the Eco-design Directive – Energy-Using Products Group Analysis / 2 Lot 4: Industrial and Laboratory Furnaces and Ovens –Tasks 1 – 7 Final Report, 2012

U.S. Department of Energy Office of Industrial Technologies Energy and Environmental Profile of the U.S. Glass Industry, 2002

Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control), Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the, Manufacture of Glass, 2011

European commission, Reference Document on Best Available Techniques in the, Ceramic Manufacturing Industry, August 2007

Tangram Technology, Energy efficiency in ceramics processing, Practical worksheets for industry, Energy worksheets 1 – 8

EMT-India.net, Energy Performance Assessment of Furnaces, verkkojulkaisu <http://www.emt-india.net/Book4/4.2.pdf>, luettu 2014

EMT-India.net, Energy Performance Assessment of Furnaces, verkkojulkaisu <http://www.emt-india.net/Book2/2.4.pdf>, luettu 2014

Suomen kaasuyhdistys, Maakaasukäsikirja, verkkojulkaisu, luettu 2014
Hiiletysterästys, Imatra Steel Oy, 1999

Maurice Orfeuil: 'Electric Process Heating', Battelle Press, USA, 1987

Mika Jussila: Kehittyneen sähkölämpöteknologian käyttö pk-teollisuudessa, Diplomityö, TTKK, 1994

J. Nerg, M. Kuisma, L. Laurila, P. Silventoinen, K. Tolsa, T. Vesterinen, J. Partanen, J. Pyrhönen: 'Alumiiniekikon induktiivinen kuumennus', Tutkimusraportti, LTKK 1998

A.C. Metaxas: Foundations of Electroheat, A Unified Approach, John Wiley & Sons, USA, 1996

Niemi P., ValuAtlas, <http://www.valuatlas.net> - ValuAtlas & Tampereen ammattiopisto – Jälkikäsitteletekniikka, verkkojulkaisu, luettu 2014

U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy, Waste Heat Reduction and Recovery for Improving Furnace Efficiency, Productivity and Emissions Performance
Technische universiteit of Eindhoven, Advanced heating techniques for glass melting, 2002

Hurri T., Lämpökäsittelyuunien energiatehokkuuden parantaminen, opinnäytetyö, Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, 2013

Carbon Trust, Industrial Energy Efficiency Accelerator, Guide to the industrial bakery sector
N. Lou, "digitalfire.com - National Council on Education for the Ceramic Arts (NCECA) Conference Presentation April 2-5, 1997 Las Vegas, NV," [Online]. Available:
http://digitalfire.com/4sight/education/refractory_coatings_offer_new_firing_possibilities_110.html?logout=yes.

A. Vasankari, Diplomityö: Vuorausmateriaalien pinnoittamisen soveltuvuus kuumennusuunien lämpötalouden parantamiseen, Oulu: Prosessimetallurgian laboratorio, Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto, Oulun yliopisto, 2011.

W. Bauer, "Evaluation of the emissivity of a fireproof reflective coating," Department of Engineering for High Temperature Materials and Energy Utilization, University Essen-Duisburg (Julkaisematon), Saksa, 2009.

UNEP, United Nations Environment Program, Division of Technology, Industry and Economy. 2004. Cleaner production-Energy efficiency (CP-EE) manual. 295 s. ISBN: 92-807-2444-4. Saatavissa: http://www.unep.org/publications/search/pub_details_s.asp?ID=33. [Viitattu 14.11.2008].

VTT, Päästömittausten käsikirja Osa 1, Päästömittaustekniikan perusteet, 2007

Lasiteollisuuden BAT referenssiasiakirja

Suomen ympäristökeskus, Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) Suomen keraamisessa teollisuudessa, 2004

Stång M., Nauhavalssaamon askelpalkkiuunien energiatehokasajomalli, Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma, Oulun seudun ammattikorkeakoulu, 2013

- <http://www.kagla-overseas.com/products/vaporizers/ax5/index.html>
- <http://www.fosbel.com/Industries/Glass/Inspections.aspx>

Virta J., Korkean lämpötilan mittausten menetelmät, AALTO-YLIOPISTON TEKNILLINEN KORKEAKOULU, Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos, MIKES Aalto Mittaustekniikka, 2013

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. ja Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka (5. uudistettu painos). Opetushallitus, Edita Oy. Helsinki.

Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. ja Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen (2. painos). IFRF - Suomen kansallinen osasto. Jyväskylä.

- http://www.oilon.com/uploadedFiles/Oilon/Materials/Oilon_6_%20FI.pdf
- www.specoating.com
- <http://www.energiatehokkuussopimukset.fi/midcom-serveattachmentguid-1dffd35c984002fdf311dfaa82d70d0af8f82cf82c/energiatehokkuusjarjestelma-pdf>

Vapalahti, S., Matalaemissiivisen pinnoituksen vaikutus kaasukäyttöisen uunin energiatehokkuuteen, 2013

W. Trinks ja e. al., Industrial Furnaces 6th ed., New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2004.

Article in Tecno Impianti number 3, 2002, "Low emissions gas fired burners", published by Editoriale Elsevier.

Neste Oy, Leipomouunien energiataloudellinen käyttö ja valinta, 1987