

AKUSTISET TULIPESÄN LÄMPÖTILAN MITTAUKSET

P. Martikainen

Valtion teknillinen tutkimuskeskus

Poltto- ja lämpötekniikan laboratorio

FYSIKAALISET PERUSTEET

Heikon paineaallon ja siten myös akustisessa tulipesän lämpötilan mittauksessa käytettävän äänen nopeus kaasussa on

$$\alpha = (\gamma RT/M)^{1/2} = K\sqrt{T} \quad (1)$$

missä

γ = ominaislämpökapasiteettien suhde c_p/c_v

R = yleinen kaasuvakio, $R = 8,314 \text{ J/mol/K}$

T = lämpötila, K

M = moolimassa, kg/kmol

c_p = kaasun ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa, kJ/kgK

c_v = kaasun ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa, kJ/kgK

Äänen nopeudelle savukaasussa saadaan hyvä arvio seuraavalla menettelyllä. Lasketaan äänen nopeus kaavan (1) avulla. Käytetään moolimassana M mooliosuuksilla painotettua moolimassaa

$$M = x_{H_2O}M_{H_2O} + x_{N_2}M_{N_2} + x_{O_2}M_{O_2} + x_{CO}M_{CO} + x_{CO_2}M_{CO_2} \quad (2)$$

ja lämpökapasiteettien suhteena γ ideaalikaasuapproksimaatiota

$$\gamma \approx C_{pm}/(C_{pm} - 1) \quad (3)$$

missä C_{pm} on mooliosuuksilla painotettu moolinen lämpökapasiteetti vakioaineessa ja lämpötilassa T .

$$C_{pm} = x_{H_2O}C_{pmH_2O} + x_{N_2}C_{pmN_2} + x_{O_2}C_{pmO_2} + x_{CO}C_{pmCO} + x_{CO_2}C_{pmCO_2} \quad (4)$$

Ääniaallon kulkuaika t tunnetulla kaasupolulla saadaan

$$t = \int_0^L \frac{1}{[\gamma(x) R T(x)/M(x)]^{1/2}} dx \quad (5)$$

missä L = ääniaallon kulkema matka. Akustisissa tulipesän lämpötilan mittauksissa on oletuksena, että äänen nopeus mittaustulilla riippuu lämpötilan vaihtelusta eikä niinkään moolimassan tai kaasun ominaislämpökapasiteettien suhteen vaihtelusta. Useassa tapauksessa tämä approksimaatio on oikea. Niinpä voimme merkitä moolimassaa $M(x)$ ja lämpökapasiteettien suhdetta $\gamma(x)$ lyhyesti M ja γ . Mittauspolun keskilämpötila on siten

$$T = ML^2/\gamma R t^2 \quad (6)$$

missä

L = ääniaallon kulkema matka

t = ääniaallon kulkuaika

Yhtälön (6) mukaisesti tulos muuttuu herkästi etäisyyden ja kulkuajan funktiona. Jos halutaan absoluuttisesti tarkka tulos, on antureiden välinen etäisyys asetettava tarkasti. Suhteelliseen tietoon riittää epätarkkakin parametrien asettelu. Ohjaustehtävissä riittää joskus suhteellinen tieto, joskus ei. Normaalisti polttoaineen ominaisuudet ja savukaasun koostumus vaihtelevat heterogeeniselläkin polttoaineella yleensä niin vähän, että kaavan (6) kertoimet M ja γ voidaan pitää vakioina pitkiä aikoja. Ehkä niitä ei tarvitse muuttaa lainkaan. Tarkkuutta voidaan kyllä lisätä yhdistämällä lämpötilan mittaus jatkuvaan kaasuanalyysiin. Kattilan seinien huojautelu voidaan olettaa nollakeskiarvoiseksi häiriöksi, joka suodattuu pois usean mittauslukeman keskiarvotuksessa.

Palamiskaasuissa on tuhka- ja polttoainehiukkaisia. Määritellään partikkeleiden massaosuus savukaasussa (μ) tilavuusyksikössä savukaasua olevien partikkeleiden massan suhteena

tilavuusyksikön suuruiseen kaasumassaan. Laihassa suspensiossa, esim. turvepöly- tai kivihiilipölykattilan tulipesän yläosassa, voidaan käyttää äänen nopeudelle α_s arvioita $/1/$:

$$(\alpha_s/\alpha_0)^2 \approx [1 + \mu c_s/c_p] / [(1 + \mu c_s/c_v)(1 + \mu)]$$

$$\approx 1/[1 + \mu c_p/c_v] \quad (7)$$

missä c_s = partikkeleiden ominaislämpökapasiteetti

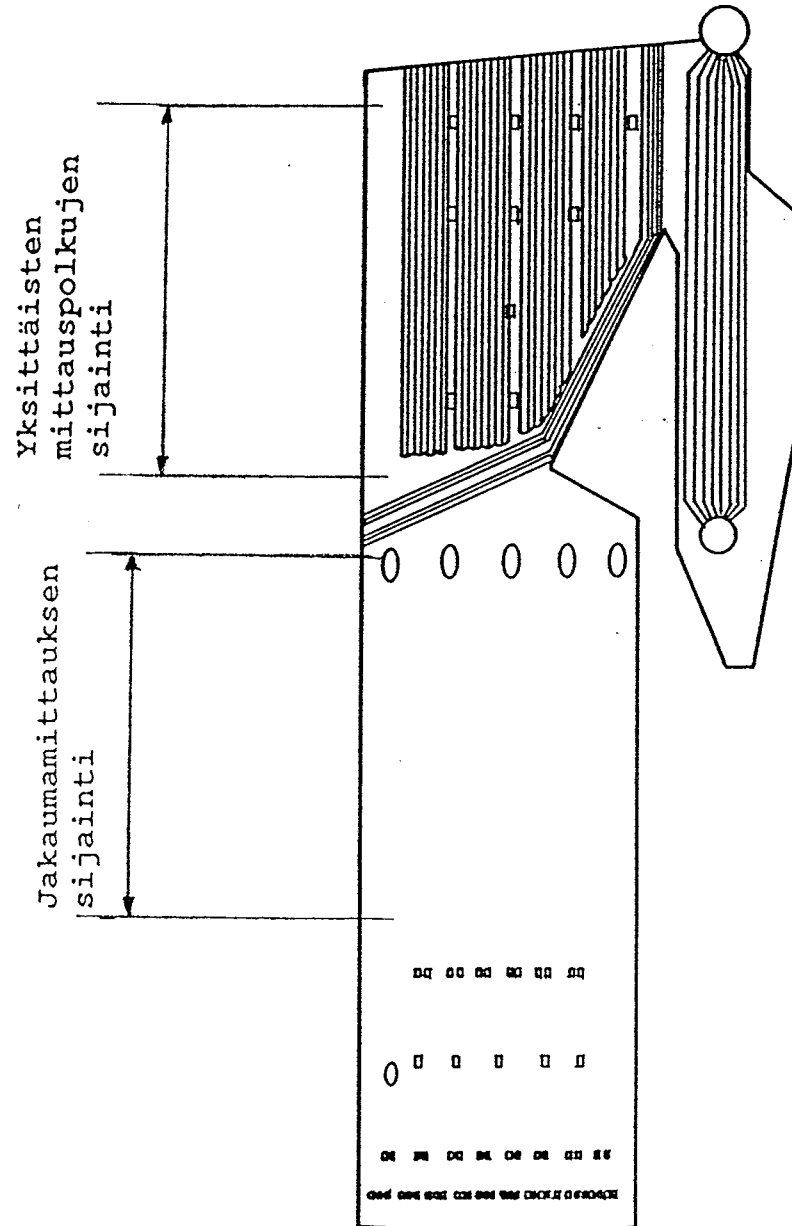
α_s = äänen nopeus suspensiossa

α_0 = äänen nopeus puhtaassa kaasussa

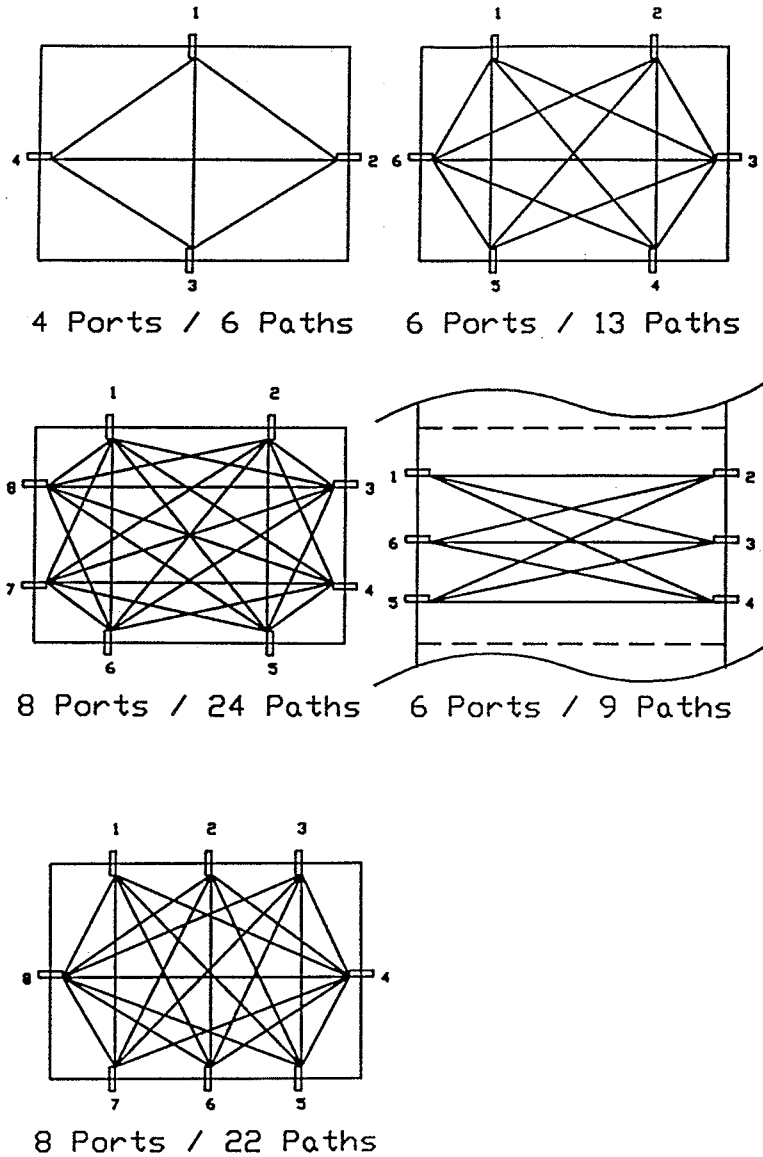
μ = partikkeleiden massaosuus kaasussa

LÄHETINVASTAANOTTIMIEN SIOITTELU JA JAKAUMAMITTAUS

Lämpötilan jakaumamittauksessa tarvitaan neljästä kahdeksaan (4 - 8) lähetinvastaanotinta, jotka voidaan määritellä toiminnallisesti lähettimiksi, vastaanottimiksi tai lähetinvastaanottimiksi. Lähetin toisensa jälkeen antaa akustisen pulssin, vastaanottimet kuuntelevat. Akustiset muuntimet sijaitsevat kattilan piirillä sopivin välein suunnilleen samalla korkeudella. Suuren kattilan piirillä parin metrin tasoero antureiden sijoittelussa voidaan kompensoida parametrien asetuksella jakaumamittauksen juuri kärsimättä. Kuvassa 1 on esitetty mittausyhteiden tavanomainen sijainti kattilan korkeussuunnassa. Kuva 2 esittelee lähetinvastaanottimien sijainteja kattilan piirillä. Mittausyhteen aukko tulipesään on n. 5 - 15 cm.



Kuva 1. Mittausten tyypillinen sijainti kattilan korkeussuunnassa.

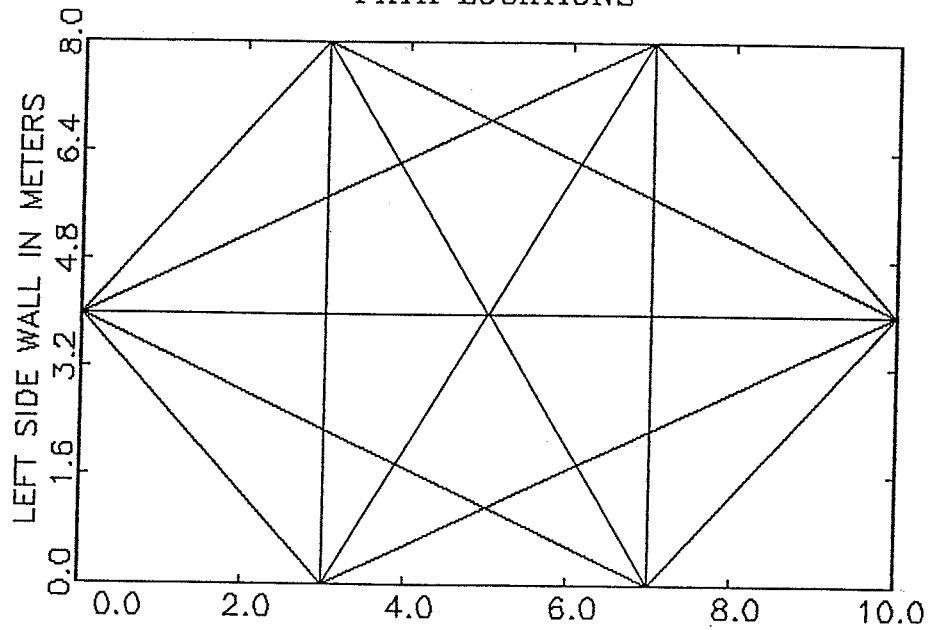


Kuva 2. Lähetinvastaanotinten sijoittelu kattilan piirille.

Usein mittauksissa käytetään modifioituja tarkkailuluukkuja. Mittausäänien aallonpituus on suunnilleen yhdeaukon piirin suuruinen. Tämä merkitsee valitettavasti huonoa akustista sovitusta kaasutilan ja muuntimen välillä.

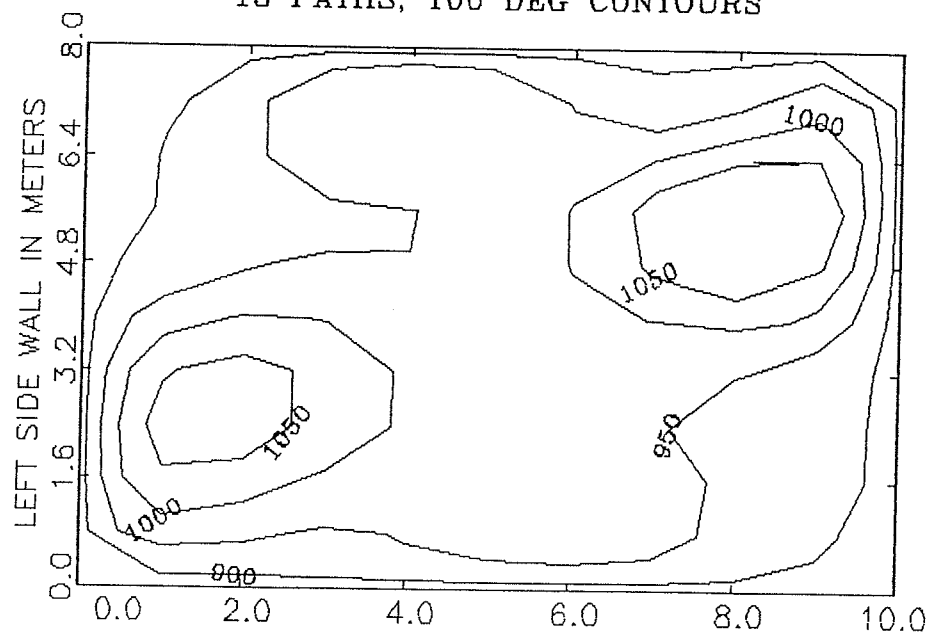
Sept. 8, 1990 12:32:19 PM

PATH LOCATIONS



Sept. 8, 1990 12:28:55 PM

13 PATHS, 100 DEG CONTOURS



Kuva 3. Tyypillinen lämpötilajakauman mittaus.

Lämpötilajakauma voidaan approksimoida Bezier-funktioiden tai Fourier-sarjojen avulla, kun mittauspolkujen keskilämpötilat tiedetään. On huomattava, että kyseessä ei ole tarkka jakaumamittaus, vaan hyvä arvio jakaumalle. Mitä enemmän ja kattavammin keskilämpötilatietoja tarkasteltavasta kaasutasosta on käytettävissä, siten tarkemmin lämpötilajakauma voidaan laskea.

Tyypillinen lämpötilajakauman päivitys vie aikaa minuutista kymmeneen minuuttiin riippuen nuohoustilanteesta ja muusta taustamelusta. Turvepölykattilassa mittaus toimii huomattavasti nopeammin kuin soodakattilassa.

MITTAUSPARAMETRIEN ASETTELU

Käyttökelpoinen lämpötilan mittauksen taajuusalue tulipesissä on 500 - 2000 Hz. Pyrosonic 2000 -järjestelmässä on käytössä ns. Chirp-pulssi. Se on muuttuvataajuinen siniaalto. Käyttäjä asettaa alataajuuden, ylätaajuuden sekä syklien lukumäärän, jossa taajuuden lineaarinen kasvu äänipulssissa tapahtuu. Chirp-pulssi tallennetaan muistiin. Lähetetty pulssi etsitään vastaanotinpäässä taustamelun joukosta kulkuajan määrittämiseksi. Jos akustisen pulssin muoto ei säily tulipesän kaasutilassa riittävän hyvänä, mittauksen tulos hylätään. Muodoltaan Chirp-pulssi on varsin edullinen kohinasta tunnistettavaksi.

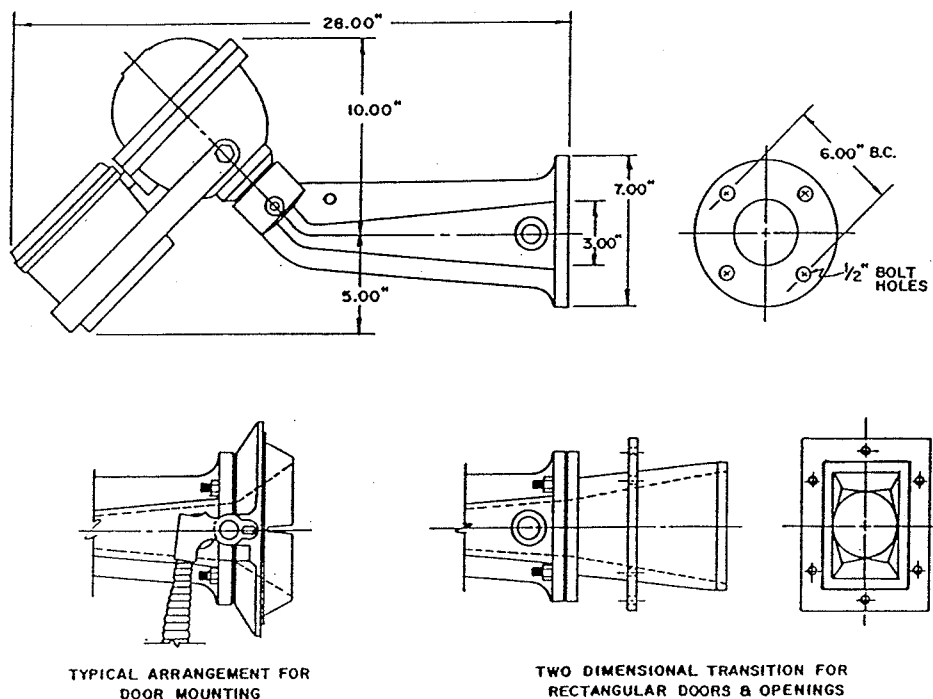
Savukaasun koostumuksen mukaan asetetaan mitattavan kaasun moolimassa M ja lämpökapasiteettien suhde γ . Tulipesän yläosassa nämä parametrit tunnetaan melko tarkasti; poltinalueella ja yleensä sakeimmissa suspensioissa parametrien merkitys ja asettelu on epäselvempi ja vaikeampi. Antureiden välinen etäisyys ja suhteellinen sijainti mittaus-
tasossa tarvitaan lämpötilajakauman laskemiseksi.

Käyttäjä voi itse asettaa jonkin verran laatukriteerejä mittauksen hyväksyttävyydelle. Kun parametrit teollisessa sovelluksessa on kerran aseteltu ja viritetty, ei niihin yleensä ole tarvetta puuttua.

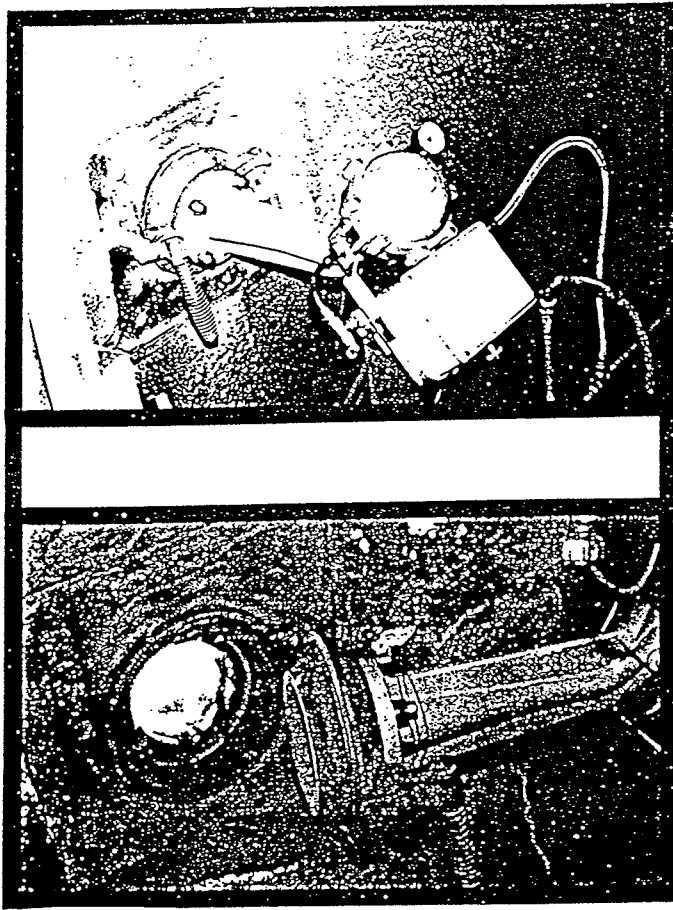
YHDERATKAISUISTA

Kuvissa 5 - 6 on hahmoteltu erilaisia yhderatkaisuja. Kuvan 5 ratkaisussa akustinen muunnin on kiinnitetty modifioituun tarkkailuluukkuun. Jos yhteen alkuperäinen poikkileikkaus on suorakaide, on siihen hyvä asentaa sovituskappale, joka tekee poikkileikkauksesta ympyrän. Torvessa on ajoittainen ilmahuuhtelu, joka poistaa irrallisen tavarat torvesta ja yhteestä. Luukun voi avata ja käyttää muihin tarkoituksiin niin kuin aikasemminkin. Tarvittaessa käyttökelpoinen turvepöly-, kivihiilipöly- ja todennäköisesti myös soodakattilassa. Torven kiinnittäminen avattavaan luukkuun on viisasta myös, jos yhde tehdään vesijäähdytettyyn seinään.

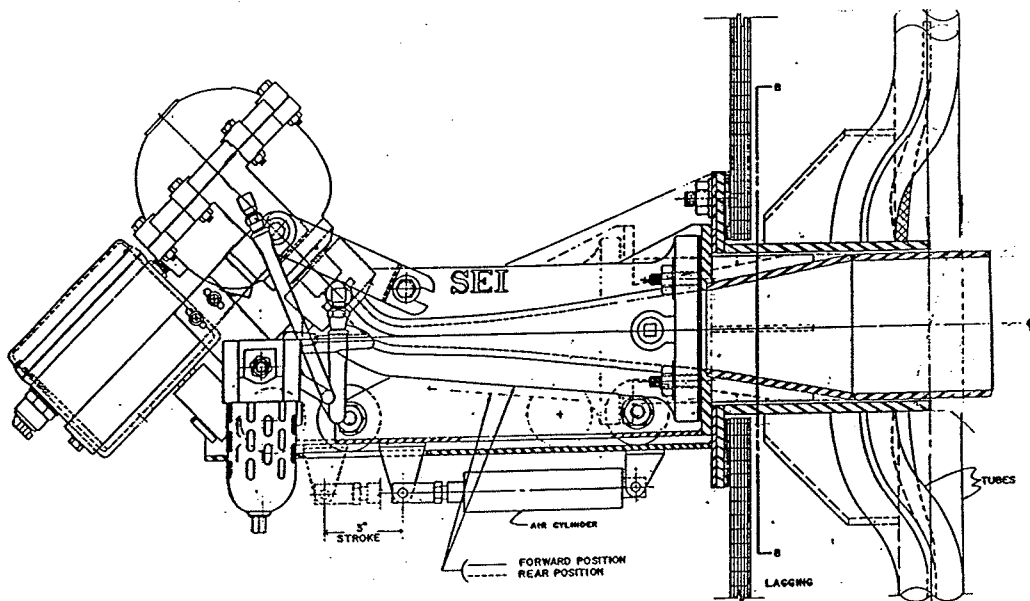
Kuvaan 6 on hahmoteltu lähinnä soodakattilaan tarkoitettu ratkaisu. Eksponentiaalitorvi tasapaksuine jatkeineen on vaunussa. Silloin tällöin vaunu liikkuu edestakaisin ilmasylinterin voimalla. Tasapaksun torven jatkeen on tarkoitus on työntää yhdeputken suulle kertynyttä ainesta takaisin tulipesään. Torvessa on ajoittainen ilmahuuhtelu. Torven jatkeen ja kattilan seinässä olevan kiinteän yhdeputken välissä voidaan käyttää jatkuvaa ilmahuuhtelua. Tämäntapainen ratkaisu oli käytössä Wisaforest Oy:n soodakattilassa; yhteet olivat keskellä huoltoluukkuja.



Kuva 4. Akustinen muunnin ja eksponentiaalitorvi.



Kuva 5. Tarkkailuluukkuun kiinnitetty lähetinvastaanotin.



Kuva 6. Yhde jonkinasteisella mekaanisella puhdistuksella.

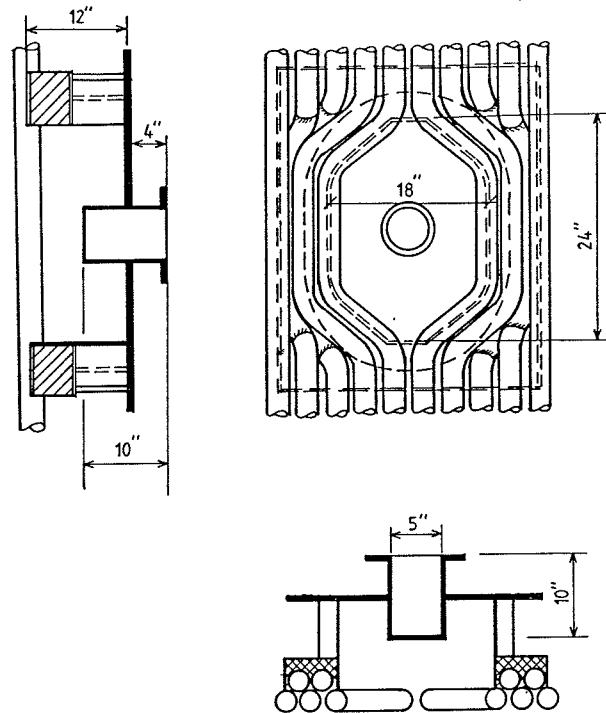
MITTAUSLAITTEISTA

Kaupallisia voimalaitoksiin tarkoitettuja akustisia lämpötilan mittausjärjestelmiä on kahta tyyppiä. Toisessa järjestelmässä akustinen pulssi tuotetaan dynaamisella kaiuttimella ja vastaanotetaan mikrofoniin. Tähän ryhmään kuuluu Babcock & Wilcox :n ja Scientific Engineering Instruments, Inc.:n tuote. Järjestelmään liittyvät tavaramerkit Pyrosonic 2000 ja Thermap ja ehkä nykyään jo muitakin nimityksiä, vaikka kyseessä on oikeastaan yksi ja sama tuote. Pyrosonic 2000 -järjestelmiä on toimitettu yhteensä pari kymmentä, ja niistä valtaosa Yhdysvaltoihin. Euroopassa on tällä hetkellä kaksi järjestelmää; toinen VTT:n poltto- ja lämpötekniikan laboratoriossa Jyväskylässä, toinen Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerkin jätettä polttavassa Essen-Karnapin lämpövoimalaitoksessa. Laitetta on sovellettu kivihiilen ja turpeen pölypoltossa, kaasun ja jätteen poltossa sekä soodakattilaprosessissa. Soodakattilan ohjauksessa Pyrosonic 2000-järjestelmä on kolmessa laitoksessa Yhdysvalloissa. Nämä kohteet ovat James River Corporation (Old Town), Georgia-Pacific Corporation (Crossett) ja Weyerhaeuser Company (Columbus). Suomessa alustava kokeilu on tehty Wisaforest Oy:n soodakattilassa Pietarsaareissa.

Toisentyyppisessä järjestelmässä tuotetaan äänipulssi sähköpurkauksella. Suuri kondensaattori varataan 5 - 10 kV:n jännitteeseen. Lähettimessä on sytytys elektrodi sekä kaksi purkauselektrodia. Kondensaattorin purkaus kaasussa olevien elektrodien kautta antaa äänipulssin. Tällainen tuote on kehitetty Central Electricity Generating Boardin (CEGB) Marchwood Engineering Laboratories:ssa ja sitä markkinoi Combustion Developments, Ltd. Tuotetta on sovellettu tai kokeiltu ruskohiilen ja kivihiilen pölypolttokattiloissa Englannissa, Saksassa ja Yhdysvalloissa. Myös Combustion Engineering on kehittänyt tämän tyyppisen mittausjärjestelmän.

WISAFORST OY:N MITTAUSSOVELLUS

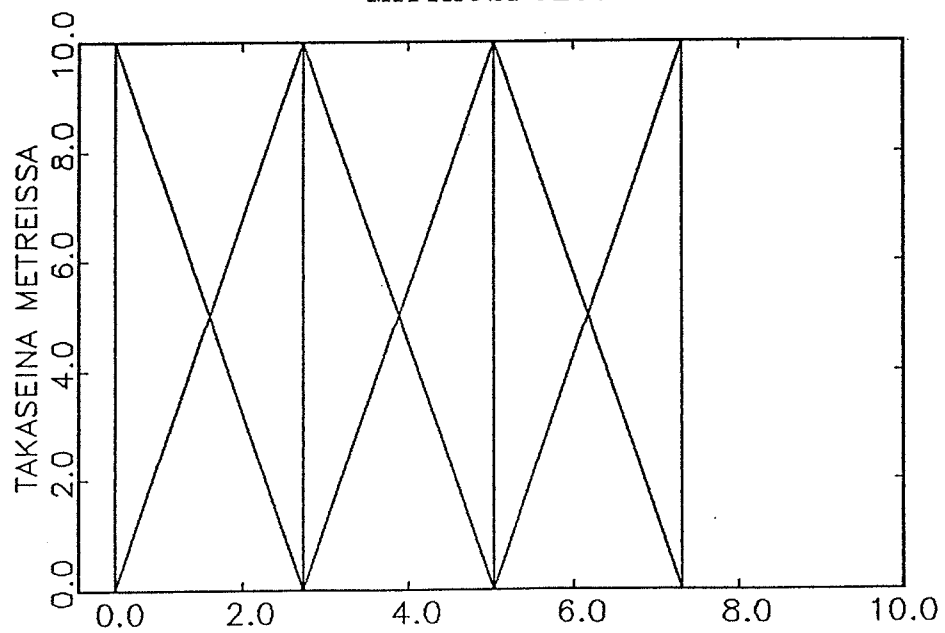
Wisaforest Oy:n mittaussovelluksessa anturit asennettiin huoltotasolla oleviin luukkuihin, vähän kattilan nokan alapuolelle, neljä kummallekin sivuseinälle. Yhteet olivat suunnilleen kuvan 7 mukaisia. Mittauspolut sijaitsivat kuvan 8 mukaisesti. Yksi mittauksissa saatu lämpötilojen tasa-arvokäyrä on esitetty kuvassa 9.



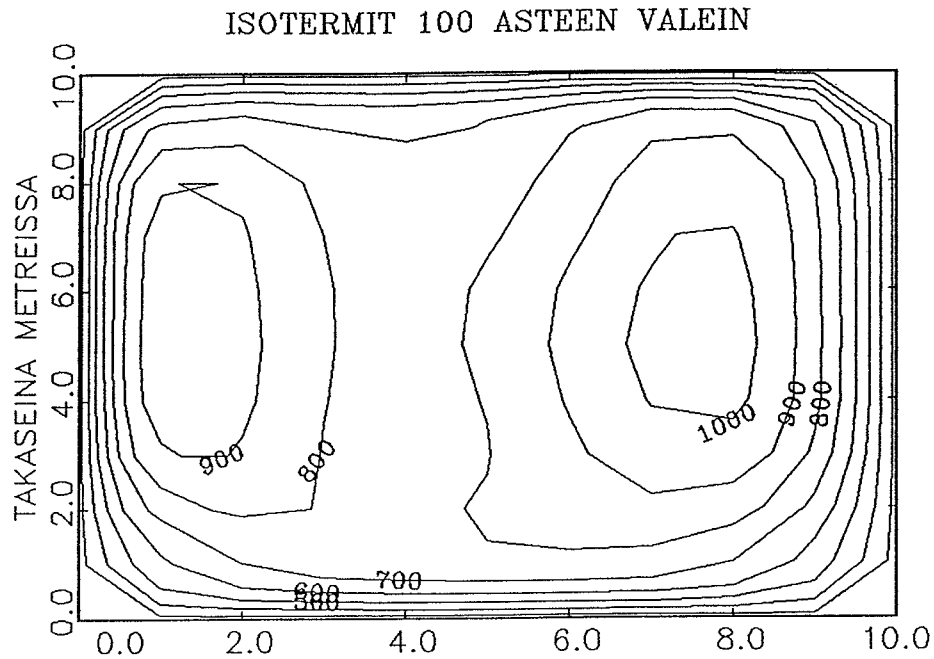
Kuva 7. Soodakattilan huoltoluukkuun kiinnitetty yhde.

Mar. 12, 1990 11:37:53 AM

MITTAUSPOLUT



Kuva 8. Mittauspolut Wisaforest Oy:n mittaussovelluksessa.



Kuva 9. Lämpötilajakauman tulostusesimerkki.

Wisaforest Oy:n sovelluksessa oli antureita vain sivuseinillä. Tämä merkitsi sitä, että lämpötilajakauman arviointi oli luotettavaa vain etu- ja takaseinien välisessä suunnassa. Sivuseinien välisen suunnassa lämpötilajakauman arvionti oli vaikeampaa, lähes mahdotonta.

Jatkuva nuohousmelu häytti mittauksia. Arviolta yli puolet ajasta nuohousmelu oli niin voimakas, ettei mittalaitteen kannattanut signaalia tulipesään lähettää.

Yhteitä pyrittiin pitämään puhtaina kuvan 6 kaltaisella ratkaisulla. Mekaaniset liikkuvat osat, jotka olivat yhteydessä tulipesään muodostuivat ongelmaksi. Yhteen toiminta saattoi olla häiriötöntä useita päiviä; joskus liikkuvat osat jumittuivat neljässä tunnissa. Kuvan 5 kaltainen ratkaisu, avattava luukku, olisi ilmeisesti parempi ratkaisu.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Akustinen pyrometria tarjoaa käytännöllisen tekniikan keskilämpötilan mittaamiseksi yksittäisiltä mittauspoluilta sekä lämpötilajakauman mittaamiseksi tarkasteltavasta kaasutasosta. Lämpötilan jakaumatieto voi helpottaa esim. vinokuormien hallinnassa.

Soodakattila on lähes jatkuvan nuohouksen, muun taustamelun sekä likaavuutensa vuoksi erittäin vaativa mittauskohde. Yhteiden puhtaanapito järjestyy parhaiten manuaalisesti. Automaattiset mekaaniset puhdistusratkaisut voivat työllistää aika tavalla. Sopivasti sijaitsevien yhteiden puute on kynnyksenä vanhoissa kattiloissa. Hyvä lämpötilan jakaumamittaus vaatii yhteitä ainakin kolmelle seinälle.

KIITOKSET

Suomessa akustisen lämpötilan mittauksen tutkimusta on rahoittanut kansallinen Liekki-ohjelma. Liekki-ohjelman lisäksi kiitän saamastani avusta Wisaforest Oy:n, A. Ahlström Oy Höyrykattilatehtaan sekä Imatran Voima Oy:n Rauhalahden voimalaitoksen henkilökuntaa.

KIRJALLISUUSLUETTELO

- 1 Temkin, S. (1981). Elements of Acoustics. New York, John Wiley and Sons, Inc.. 515 pp.