

# NOEN MASSAN MÄÄRITTÄMINEN SAVUSTA

Johan Mangs & Olavi Keski-Rahkonen  
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka  
PL 1803, 02044 VTT

## TIIVISTELMÄ

Savun tiheyden ja tuoton määrityksissä palokokeissa on yleensä mitattu valon vaimenemista savussa. Tuloksilla on voitu vertailla eri aineista ja eri olosuhteissa muodostuvia savuja keskenään, mutta yksinkertaista kytkentää savussa olevien yhdisteiden kokonaisuudessaan ei ole ollut käytettävissä. Savusta huomattavin osa on nokea eli mikrokiteistä hiiltä. Valon vaimennusmittauksesta saadaan tulo, jonka tekijöinä ovat savun ominaismassavaimennuskerroin, savun massapitoisuus sekä valon kulkema matka, joka koeolosuhteissa tunnetaan. On osoittautunut, että ominaismassavaimennuskerroin on likimäärin vakio kaikille liekehtivän palon savuille. Siten on mahdollista määrittää noen massa savusta suoraan valon vaimennusmittauksesta, joka yleensä on osa standardisoiduista palotestausmenetelmistä. Tässä esitetään tämä yksinkertainen menetelmä. Tietoa noen tuotosta tarvitaan palosimulointiohjelmien syöteparametrina sekä savun ja noen leviämisen arvioinnissa sekä ohjelmistojen palomallien pätevöittämisessä.

## JOHDANTO

Valosäteen osuessa ilmassa leijuviin jähmeisiin tai nestemäisiin hiukkasiin (aerosoliin) valo vaimenee Bouguerin (Lambertin-Beerin) yhtälön mukaisesti. Tulevan valon intensiteetin  $I_0$  ja matkan  $L$  jälkeen vaimentuneen valon intensiteetin  $I$  suhde on

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-kL) \quad (1)$$

missä valon vaimennuskerroin  $k$  riippuu tulevan valon aallonpituudesta sekä hiukkasten koosta, muodosta ja optisista ominaisuuksista [1]. Tulevasta säteestä poistuu energiaa joko absorboitumalla tai siroamalla. Vaimennuskerroin  $k$  on absorptiovaimennuskertoimen ja sirontavaimennuskertoimen summa

$$k = k_{abs} + k_{sca} \quad (2)$$

Tulipaloissa syntyvä savu on kaasumaisten palamistuotteiden ja pienten neste- tai jähmeiden hiukkasten seos, jonka kemiallinen koostumus ja hiukkaskokojakauma riippuu palaneesta materiaalista ja ympäristöolosuhteista. Syntymishetkellä hiukkaset ovat läpimitaltaan 30 ... 50 nm pallukoita, mutta ne ryhmittyvät nopeasti yhteen monimutkaisiksi fraktaalimaisiksi löysiksi rykelmiksi, joiden läpimitta ulottuu mikrometrialueelle [2]. Ulkoisen lämmönlähteen aiheuttamassa pyrolyysissä tai kytevässä palossa muodostuu vaaleanväristä, pieniä pisaroita sisältävää savua, jossa sironnan osuus valon vaimenemisessa on suurempi kuin absorptio. Liekehtivän palon tummassa savussa palamisreaktiossa syntyneet pienet hiilipallukat yhdistyvät rykelmiksi, jossa absorptio on määrävä tekijä valon vaimenemisessa. Pääosa liekehtivän palon savuhiukkasista (noesta) on hiiltä.

Valon vaimennukseen perustuvia savun tiheyden mittauksia sisältyy useaan materiaalien palo-ominaisuuksien standarditestausten menetelmään. Nämä ovat joko dynaamisia järjestelmiä missä savun tiheys mitataan palamistuotteiden virtauksesta putkessa, kuten kartiokalorimetri [3], SBI-laite [4] ja palokammio [5] tai staattisia (kerääviä) järjestelmiä kuten savukaappi [6, 7]. Mittauksissa seurataan monokromaattisen (laser) tai polykromaattisen (hehkulamppu) valon vaimenemista määrättyllä matkalla. Tuloksena saadaan yhtälöstä (1) ja dynaamisissa järjestelmissä mitatusta kaasuvirtaamasta savun tuotto yksikkönä  $\text{m}^2/\text{s}$ , tai savukaapin mittojen mukainen optinen ominaistiheys. Tuloksilla on voitu vertailla eri aineista ja eri olosuhteissa muodostuvia savuja keskenään, mutta yksinkertaista kytkentää savussa olevien yhdisteiden kokonaisuudessaan ei ole ollut käytössä. Tietoa noen tuotosta tarvitaan palosimulointiohjelmien syöteparametrina, savun ja noen leviämisen arvioinnissa sekä ohjelmistojen palomallien pätevöittämisessä.

## OMINAISMASSAVAIMENNUSKERROIN

Vaimennuskerroin voidaan esittää savun ominaismassavaimennuskertoimen  $\sigma$  ja savun massapitoisuuden  $M_s$  tulona [8]

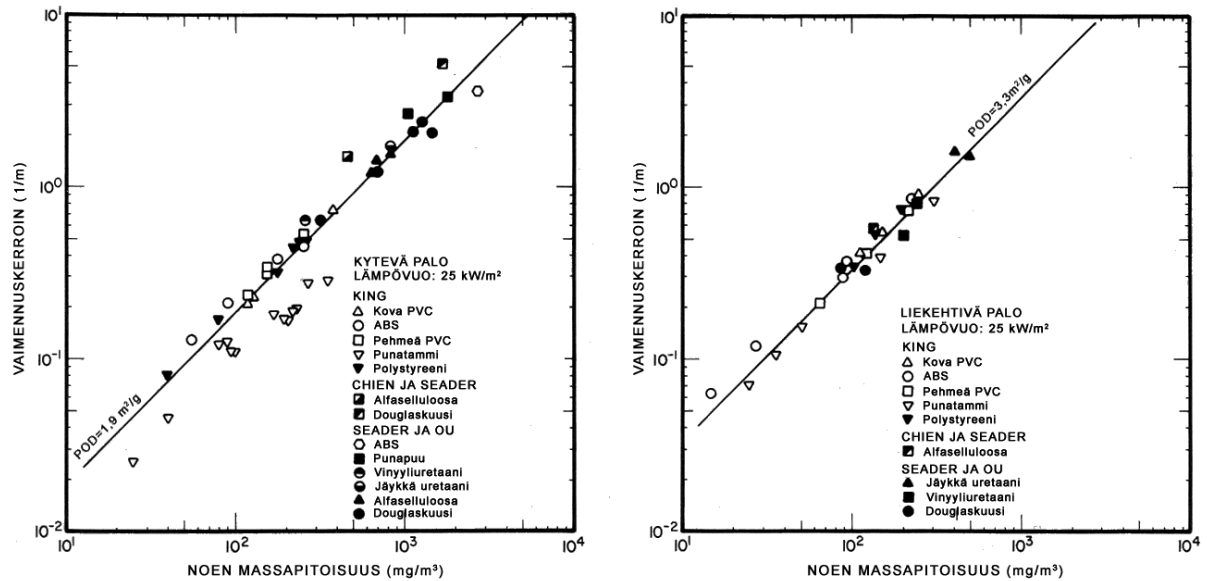
$$k = \sigma M_s \quad (3)$$

Jos ominaismassavaimennuskerroin  $\sigma$  tunnetaan ja vaimennuskerroin  $k$  määritetään kokeellisesti, savun (noen) massapitoisuus voidaan laskea.

On osoittautunut että liekehtivän palon savun ominaismassavaimennuskertoimen  $\sigma$  riippuvuus polttoaineen laadusta ja hiukkaskoosta on heikko. Tässä esitetään lyhyesti muutama asiaa käsittelevä tutkimus.

Dobbins ja muut mittasivat raakaöljyn savun optisia ominaisuuksia aallonpituuksilla 450, 630 ja 1000 nm [9]. Tulokset osoittavat, että  $\sigma$  pysyi vakiona 1,5 tunnin kokeen aikana vaikka nokirykelmien lukumäärätiheys pieneni tekijällä 24 pääosin rykelmien yhteenliittymisestä johtuen. Samanaikaisesti noen massapitoisuus laski tekijällä kolme johtuen keräytymisestä ja tarttumisesta kaikille mittauskammion sisäpinnoille erilaisten mikroskooppisten prosessien seurauksena. Tulos on yhteensopiva samassa julkaisussa esitetylle teoreettiselle ennusteelle.

Seader ja Ou tutkivat erilaisten materiaalien savuja muunnetussa standardisavukaapissa [10], missä hehkulamppusta tuleva valo oli monokromatisoitu interferenssisuotimella 546,7 nm aallonpituudelle. Standardisavukaapissa valo havaitaan ilmaisimella, jonka vastekäyrä on ihmisen näköä vastaava. Monokromatisoinnin vaikutus optisen tiheyden maksimiarvoon standardiolosuhteissa (kytevä palo) osoittautui pieneksi, ero oli 3...8 % paperi- ja douglaskuusinäytteille [11]. Noen massapitoisuus määritettiin suodatintekniikalla. Kokeissa havaittiin, että ominaismassavaimennuskerroin  $\sigma$  oli melko riippumaton näytteen koostumuksesta, vaimennuskertoimen  $k$  ja massapitoisuuden  $M_s$  välinen riippuvuus oli lineaarinen (kuva 1). Liekehtivän palon savulle saatiin keskiarvoksi  $\sigma = 7,6 \text{ m}^2/\text{g}$  ja savulle pyrolyysistä ilman liekkiä keskiarvoksi  $\sigma = 4,4 \text{ m}^2/\text{g}$ . Kaikissa kokeissa säteilytaso oli  $25 \text{ kW}/\text{m}^2$ .

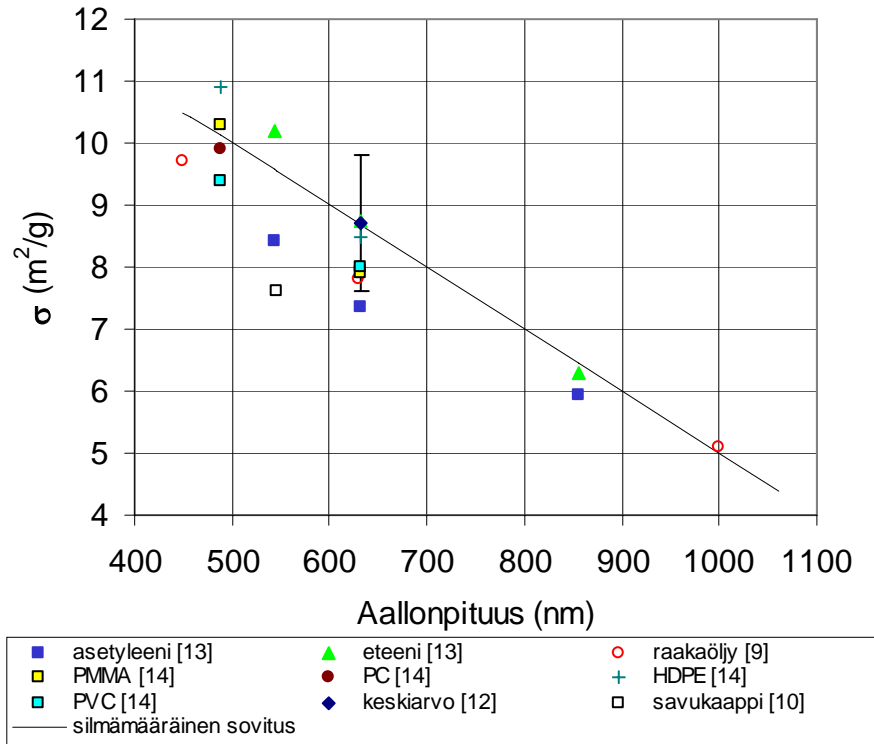


Kuva 1. Vaimennuskertoimen (tässä muodossa  $\frac{1}{L} \log_{10} \left( \frac{I_0}{I} \right)$ ) ja noen massapitoisuuden välinen riippuvuus savukaapissa [10]. a) savu pyrolyysistä ilman liekkejä, b) liekehtivän palon savu.

Mulholland ja Croarkin [12] suorittivat ominaismassavaimennuskertoimen kokeellisten tuloksien katsauksen, kattaen seitsemän koesarjaa ja yhteensä 29 polttoainetta. Mittaukset oli suoritettu aallonpituudella 633 nm vapaan palamisen liekinjälkeisessä savussa. Keskiarvoksi näistä kokeista saatiin  $\sigma = 8,7 \text{ m}^2/\text{g}$  ja epävarmuudeksi  $1,1 \text{ m}^2/\text{g}$  95 % luotettavuusvälillä.

Kuvaan 2 on kerätty muutamasta kirjallisuuslähteestä ominaismassavaimennuskertoimen arvoja eri aallonpituuksilla ja eri polttoaineilla. Aallonpituudella 633 nm on merkitty näkyviin Mulhollandin ja Croarkinin keskiarvo epävarmuusarvioineen sekä aallonpituudella 547 nm Seaderin ja Oun keskiarvo. Pisteisiin on silmämääräisesti sovitettu suora.

Mulholland ja Croarkin keskustelevat lyhyesti pyrolyysin, kytevän palon ja happirajoitteisen palon savun vaimennuskertoimista  $\sigma$ . Pyrolyysin tai kytevän palon savun  $\sigma$  on pienempi ja vaihtelevampi,  $4...5 \text{ m}^2/\text{g}$ . Absorption osuus on pienempi ja sironnan osuus on suurempi vaimennuksessa, ja sirontavaimennuskerroin on herkempi hiukkasten koon vaihtelulle. Nokisemman liekehtivän palon savussa absorptiolla on suurempi rooli kun sironnalla, ja absorptiovaimennuskerroin on suhteellisen epäherkkä hiukkaskoon vaihtelulle. Happirajoitteisille paloille vaimennuskerroin  $\sigma$  saattaa olla pienempi, esimerkiksi palaminen suljetussa tilassa, missä pyrolysoitumisnopeus on suurempi kuin sen täydelliseen palamiseen tarvittavan korvausilman saanti. Eteenille mainitaan 18 % pienempi arvo  $\sigma$ :lle kokeessa missä korvausilman saanti oli  $1/3$  täydellisen palamisen tarpeesta. Savujen, joiden hiukkaset muodostuvat muusta kuin hiilestä, ominaismassavaimennuskertoimet saattavat poiketa tässä esitetyistä arvoista.



Kuva 2. Kokeellisia liekehtivän palon savun ominaisvaimennuskertoimia  $\sigma$ . keskiarvo (tumma vinoneliö) on Mulhollandin ja Croarkinin keskiarvo epävarmuusjanoineen [12] ja savukaappi (ruutu) on Seaderin ja Oun [10] keskiarvo (vrt. kuva 1a). Kokeellisiin pisteisiin on silmämääräisesti sovitettu suora.

## JOHTOPÄÄTÖKSET

Yleisimpien orgaanisten aineiden liekehtivän palon savun ominaismassavaimennuskertoimen  $\sigma$  on osoittautunut likimäärin vakioksi. Vapaan palamisen savuille on kirjallisuudessa esitetty aallonpituudella 633 nm kokeellinen keskiarvo  $\sigma = 8,7 \text{ m}^2/\text{g}$ , jonka epävarmuus on n. 13 %. Vakioarvoa käyttäen saadaan noen massapitoisuus suoraan valon vaimennusmittauksesta.

Savukaapissa palamisolosuhteet poikkeavat vapaan tilan palosta jonkin ajan kuluttua kokeen alkamisesta, koska standardiolosuhteissa kaappi on suljettu. Seaderin ja Oun keskiarvo liekehtivän palon savulle savukaapissa poikkeaa noin 13 % kuvan 2 sovitussuorasta, mikä ei ole suurempi kuin Mulhollandin ja Croarkinin epätarkkuusarvio.

Pyrolyysin tai kytevän palon savun vaimennuskertoimet  $\sigma$  ovat kirjallisuuslähteiden mukaan alhaisempia, noin 4...5  $\text{m}^2/\text{g}$ .

Useassa käytössä olevassa standardipalotestauslaitteessa on vakiovarusteena valon vaimennukseen perustuva savun tuoton mittausmenetelmä. Liittämällä tässä esitetty menetelmä niihin, voidaan yksinkertaisella tavalla määrittää noen massa standardikokeista. Käyttöä noen tuoton määrittämiselle löytyy palosimulointiohjelmien syöteparametrina sekä savun ja noen leviämisen arvioinnissa sekä ohjelmistojen palomallien hyvyiden arvioinnissa.

## LÄHDELUETTELO

1. Hinds, W. C. *Aerosol Technology*. New York: Wiley, 1982, 424 s.
2. Faeth, G.M. & Köylü, Ü. Ö. *Soot Morphology and Optical Properties in Nonpremixed Turbulent Flame Environments*, *Combustion Science and Technology*, 1995. Vol. 108, s. 207-229.
3. ISO 5660-2:2002 *Reaction-to-fire tests -- Heat release, smoke production and mass loss rate -- Part 2: Smoke production rate (dynamic measurement)*. Geneva: International Organization for Standardization, 2002. 14 s.
4. EN 13823. 2002. *Reaction to fire tests for building products – Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item*. Brussels: European Committee for Standardization, 2002. 95 s.
5. ISO 9705. 1993. *Fire tests - Full-scale room test for surface products*. Genève: International Organization for Standardization, 1993. 31 s.
6. ISO 5659-2:1994. *Plastics - Smoke generation - Part 2: Determination of optical density by a single-chamber test*. Geneva: International Organization for Standardization, 1994. 29 s.
7. Gross, D., Loftus, J.J. & Robertson, A.F. *Method for Measuring Smoke from Burning Materials*, ASTM STP 422, 1967. S. 166 - 204.
8. Babrauskas, V. & Mulholland, G. *Smoke and soot data determinations in the cone calorimeter. Mathematical modelling of fires*. ASTM Special Technical Publication, STP 983, 1988. S. 83 - 104.
9. Dobbins, R.A., Mulholland, G.W. & Bryner, N.P. *Comparison of Fractal Smoke Optics Model with Light Extinction Measurements*. *Atmospheric Environment*. 1994. Vol. 28, s. 889 - 897.
10. Seader, J. D. & Ou, S. S. *Correlation of the Smoking Tendency of Materials*. *Fire Research*, 1977. Vol. 1, Nro. 1, s. 3-9.
11. Chien, W. P. & Seader, J. D. *Prediction of specific optical density for smoke obscuration in an NBS Smoke Density Chamber*. *Fire Technology*, 1975. Vol. 11, pp. 206 - 218.
12. Mulholland, G.W. & Croarkin, C. *Specific extinction coefficient of flame generated smoke*. *Fire and Materials*, 2000. Vol. 24, Nro. 5, s. 227 - 230.
13. Zhu, J., Choi, M. Y., Mulholland, G. W. & Gritzko, L. A. *Soot Scattering Measurements in the Visible and Near-Infrared Spectrum*. In: Candel, S.; Driscoll, J. F.; Burgess, A. R.; Gore, J. P., (Editors) *Symposium (International) on Combustion, 28th. Proceedings. Volume 1*. July 20-August 4, 2000, Edinburgh, Scotland. Pittsburgh: Combustion Institute, 2000. S. 439-446.
14. Patterson, E. M., Duckworth, R. M., Wyman, C.M., Powell, E.A. & Gooch, J. W. *Measurements of the optical properties of the smoke emissions from plastics, hydrocarbons*

and other urban fuels for Nuclear Winter Studies. *Atmospheric Environment*, 1991. Vol. 25A, No. 11, s. 2539-2552.