



VTT Technical Research Centre of Finland

Lämpimien ja laajojen epäpuhtauslähteiden kohdeilmanvaihdon suunnitteluohje

Kulmala, Ilpo; Welling, Irma; Hynynen, Pasi

Published: 31/01/2003

Document Version
Publisher's final version

License
Unspecified

[Link to publication](#)

Please cite the original version:
Kulmala, I., Welling, I., & Hynynen, P. (2003). *Lämpimien ja laajojen epäpuhtauslähteiden kohdeilmanvaihdon suunnitteluohje*. VTT Technical Research Centre of Finland.

VTT
<https://www.vttresearch.com>

VTT Technical Research Centre of Finland Ltd
P.O. box 1000
FI-02044 VTT
Finland

By using VTT Research Information Portal you are bound by the following Terms & Conditions.

I have read and I understand the following statement:

This document is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of this document is not permitted, except duplication for research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered for sale.

Lämpimien ja laajojen epäpuhtauslähteiden kohdeilmanvaihdon suunnitteluohje

TkT Ilpo Kulmala, VTT Tuotteet ja tuotanto
FT Irma Welling, Pasi Hynynen, Lappeenrannan aluetyöterveyslaitos

Tampere 2003



1. Suunnitteluohjeen soveltamisalue

Tässä suunnitteluohjeessa kuvataan kaksi lämpimien ja laajojen epäpuhtauslähteiden kohdeilmavaihtoratkaisua sekä annetaan ilmavirtojen mitoitusohjeet. Lähdealuetta voidaan pitää laajana, kun sen leveys on yli 6 m. Ensimmäinen ratkaisu on perinteinen lähdealueen yläpuolinen kohdepoisto. Yläpuolinen kohdepoisto soveltuu kaikkiin niihin kohteisiin, joissa lähdealueen yläpuolella on tilaa kohdepoistolle. Usein kuitenkin nostureiden käyttö alueella rajoittaa yläpuolisen kohdepoiston käyttöä. Yläpuolisen kohdepoiston tapauksessa myös työntekijän hengitysvyöhyke jää helposti lähteen ja kohdepoiston väliin ja altistuminen tapahtuu vaikka kohdepoiston poistotehokkuus olisi hyvä. Toinen ratkaisu on vaakasuuntainen puhallus-imuratkaisu. Vaakasuuntainen puhallus-imuratkaisu soveltuu kaikkiin lämpimiin ja laajoihin epäpuhtauslähteisiin, mikäli puhallussuihku voidaan sijoittaa lähdealueen yläpuolelle imualueen vastakkaiselle puolelle.

2. Tarvittavat lähtötiedot

Lämpimien lähteiden aiheuttamien ylöspäin suuntautuvien ilmavirtausten, konvektiovirtausten, suuruus riippuu lähteen lämpötilasta ja geometriasta sekä ympäröivän ilman lämpötilasta. Usein ainoat lähtötiedot lähteestä ovat sen halkaisija ja korkeus, syötetty teho ja pintalämpötila.

Yläpuolisen kohdepoiston mitoittamiseen tarvitaan konvektiovirtauksen tilavuusvirtaa ja laajuutta. Puhallus-imuratkaisun mitoittamiseen tarvitaan konvektiovirtauksen virtausnopeutta puhallussuihkun korkeudella.

Tilavuusvirta

Lämpimän pistelähteen aiheuttaman konvektiovirtauksen suuruutta etäisyydellä z lähteestä voidaan arvioida laskentakaavalla

$$q_z = 0,166z^{1,67} F^{0,33} \quad (1)$$

Kaavassa 1 F on nosteparametri, joka on määritelty kaavassa 2:

$$F = \frac{g\Phi}{c_p T_0 \rho_0}, \quad (2)$$

missä g = maan vetovoimakiihtyvyys (9,81 m s⁻²)

$c_p =$ ilman ominaislämpökapasiteetti ($1007 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
 $T_0 =$ ympäristön lämpötila (293 K)
 $\rho_0 =$ ilman tiheys ($1,18 \text{ kg m}^{-3}$)

Ympäristön lämpötilalla 293 K ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) tilavuusvirta voidaan myös esittää muodossa:

$$q_z = 0,005 z^{1,67} \Phi^{0,33}. \quad (3)$$

Konvektiivinen lämpöteho Φ (W) kytkeytyy lämpimän pinnan lämpötilan ja työtilan lämpötilaeroon seuraavasti:

$$\Phi = h_c A_s (T_s - T_0), \quad (4)$$

missä $h_c =$ lämpimän pinnan lämmönsiirtokerroin ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
 $A_s =$ lämpimän pinnan ala (m^2)
 $T_s =$ pintalämpötila
 $T_0 =$ ympäristön lämpötila työtilassa

Konvektiivisille lämmönsiirtokertoimille Hemeon¹ on esittänyt laskentakaavoja, jotka perustuvat lämmönlähteen geometriaan ja lämmönlähteen ja ympäristön väliseen lämpötilaeroon (Taulukko 1). Konvektiiviset lämmönsiirtokertoimet ovat tyypillisesti suuruusluokkaa $5\text{-}20 \text{ W/m}^2\text{K}$.

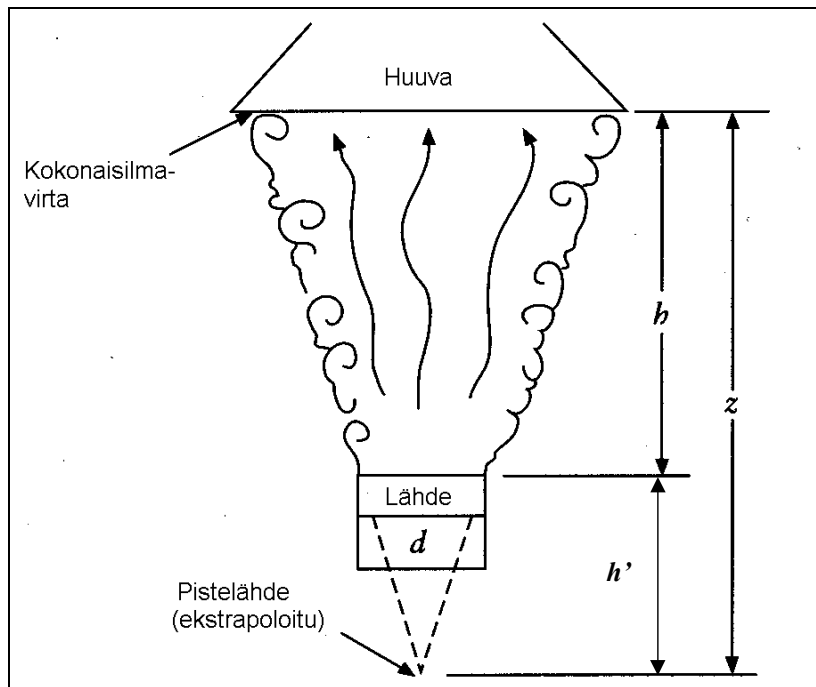
Taulukko 1. Vapaan konvektion lämmönsiirtokertoimia.

Lämpimän pinnan muoto tai asento	Vapaan konvektion lämmönsiirtokerroin ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
Pystysuorat tasot, korkeus yli 0,5 m	$2,0(T_s - T_0)^{0,25}$
Pystysuorat tasot, korkeus alle 0,5 m ($L_v =$ korkeus metreinä)	$1,4((T_s - T_0)/L_v)^{0,25}$
Vaakasuorat pinnat, yläpuoli	$2,5(T_s - T_0)^{0,25}$
Vaakasuorat pinnat, alapuoli	$1,3(T_s - T_0)^{0,25}$
Yksittäinen vaakasuora sylinteri ($L_d =$ halkaisija metreinä)	$1,1((T_s - T_0)/L_d)^{0,25}$
Pystysuora sylinteri, korkeus yli 0,5m ($L_d =$ halkaisija metreinä)	$1,05((T_s - T_0)/L_d)^{0,25}$

Pistelähdettä laajemman lähteen konvektiovirtauksen suuruus lasketaan korvaamalla se sellaisella virtuaalisella pistelähteellä, jonka konvektiovirtaus yhtyy todellisen lähteen konvektiovirtaukseen ja joka sijaitsee etäisyydellä h' todellisesta lähteestä (Kuva 1) eli

$$z = h + h'. \quad (5)$$

Virtuaalisen lähteen paikan määrittämiseen on annettu lukuisia laskentakaavoja, joissa etäisyys vaihtelee 1.5-3.2 d (Taulukko2). Keskiarvona voidaan käyttää $h' = 2d$.



Kuva 1. Laskennassa tarvittavat perusmitat

Taulukko 2. Yhtälöt todellisen ja virtuaalisen lähteen väliselle etäisyydelle, h' (m). d =lähteen halkaisija ja δ =rajakerroksen paksuus lähteen yläreunan korkeudella.

Lähde	Etäisyys todellisen ja virtuaalisen lähteen välillä
18° laajenemiskulmaoletus	3,2 d
25° laajenemiskulmaoletus	2,27 d
Heinsohn ²	1,5 d

Hemeon ¹	$2 d$
Goodfellow ³	$2,58 d^{1,138}$
ACGIH ⁴	$2 d^{1,138}$
Morton ⁵	$1,7 \dots 2,1 d$
Mundt ⁶	$2,1 (d+2\delta)$

Kun useita lähteitä sijaitsee lähekkäin, konvektiovirtaukset yhtyvät ja tilavuusvirta voidaan kirjoittaa konvektiivisten lämpötehojen summan ($\Sigma \Phi$) avulla :

$$q_z = 0,005 z^{1,67} (\Sigma \Phi)^{0,33} . \quad (6)$$

Virtausnopeus

Pistelähteen konvektiovirtauksen pystysuuntainen virtausnopeus keskiakselilla, maksiminopeus, korkeudella z voidaan laskea yhtälöllä:

$$v_z = 0,128 z^{-0,33} \Phi^{0,33} . \quad (7)$$

3. Yläpuolinen kohdepoisto

Yläpuolisen poiston poistoilmavirta, q_{zH} , tulee mitoittaa konvektiovirtauksen ilmavirtaa q_{vs} jonkin verran suuremmaksi (Kuva 2). Heinsohn² suosittelee

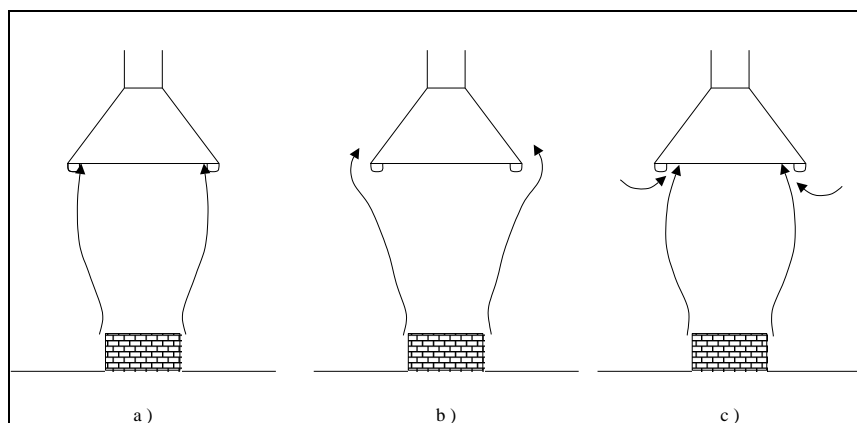
$$q_{zH} = 1,21 q_z . \quad (8)$$

Yläpuolisen poiston poistoilmavirran lisäksi tarvitaan huuvin laajuus sen sijoituskorkeudella. Konvektiovirtauksen laajuus voidaan laskea, kun oletetaan pluumin avauskulmaksi kokeellisesti havaittu 18°-25° . Käytännön olosuhteissa konvektiovirtaukset ovat hyvin epästabiileja ja niissä esiintyy huojumista. Mikäli huuva joudutaan sijoittamaan korkeammalle kuin 1 m lämmönlähteestä, Heinsohn suosittelee huuvin halkaisijaksi puolta efektiivisestä etäisyydestä (h+h'). ACGIH³:n suositus on

$$d_f = d_p + 0,8h , \quad (9)$$

missä d_p = konvektiovirtauksen halkaisija, joka saadaan kaavasta

$$d_p = 0,5z^{0,88} \quad (10)$$



Kuva 2. Huuvan suorituskyky erilaisilla ilmavirroilla: a) $q_{zH} = q_z$ b) $q_{zH} < q_z$ c) $q_{zH} > q_z$

4. Puhallus-imuratkaisu

Epäpuhtauksien poistamiseksi on kohdepoiston luotava päästölähteen tasalle ilmavirtaus, joka kykenee kuljettamaan vapautuvat epäpuhtaudet kohti imuaukkoa. Imuaukko imee ilmaa tasaisesti joka puolelta, jolloin sen aikaansaama nopeus laskee hyvin nopeasti kun etäisyys poistoaukosta kasvaa. Alhaiset imunopeudet eivät puolestaan kykene voittamaan ympäristön häiriövirtauksia eikä päästölähteen omasta liikemäärästä johtuvia virtauksia, jolloin epäpuhtaudet jäävät sieppautumatta. Tämän vuoksi pelkkä imu ei riitä laajojen epäpuhtauslähteiden hallintaan.

Puhallussuihkun avulla voidaan kasvattaa kohdepoiston vaikutusetäisyyttä merkittävästi. Suuntaamalla vaakasuuntainen suihku päästölähteen yli kohti imuhuuvaa voidaan päästölähteen tasalle luoda hallitusti ilmavirtaus, jonka nopeus on riittävän suuri epäpuhtauksien ohjaamiseksi kohti poistoa. Lähdealueella vapautuvat epäpuhtaudet nousevat konvektiovirtausten vuoksi ylöspäin, jolloin ne sieppautuvat puhallussuihkun matkaan kohti poistoaukkoa.

Puhallus-imuratkaisu on suunniteltava ja mitoitettava huolellisesti, jotta saavutettaisiin haluttu lopputulos. Oleellisia tekijöitä ovat

- puhalluksen ja imun oikeat ilmavirrat
- puhallussuihkun nopeusjakauman tasaisuus

- poistoaukon nopeusjakauman tasaisuus
- puhallussuihkun suuntaus.

4.1 Puhallussuihku

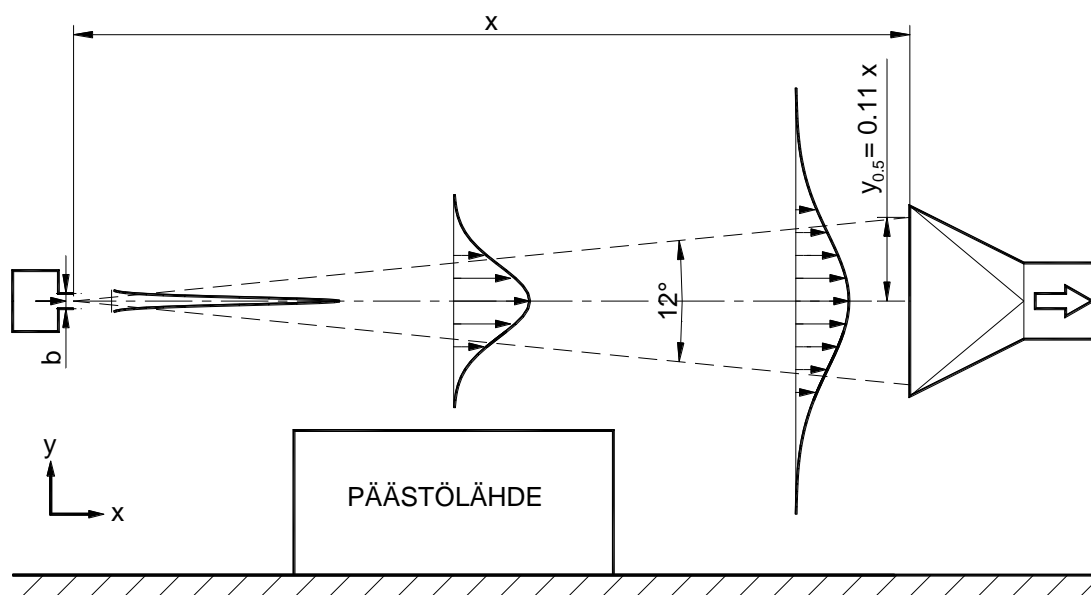
Puhallus-imuratkaisussa paras lopputulos saavutetaan, kun puhallussuihkuna käytetään vapaata tasosuihkuja. Tämä saadaan aikaiseksi puhaltamalla ilmaa yhtenäisestä pitkästä raosta, jonka korkeus on vakio. Ulospurkautuvan suihkun nopeus laskee turbulentsien leikkausjännitysten vuoksi samalla kun suihku tempaa mukaansa ympäröivää ilmaa, jolloin suihkun tilavuusvirta kasvaa. Kun suihkun leveys on riittävän suuri, voidaan suihku tarkastella kaksikulotteisena virtauksena.

4.1.1 Puhallussuihkun muoto ja suuntaus

Tasomaisen rakosuihkun keskimääräinen nopeusjakauma eri etäisyyksillä sekä laajenemiskulma on esitetty kuvassa 3. Virtauksen leikkausjännitysten takia keskimääräisestä nopeusjakaumasta tulee jatkuva käyrä jolla on maksimiarvo suihkun keskiakselilla. Suihkun leviäminen on muotoa

$$y_{0.5} = 0.11 x \quad (11)$$

missä $y_{0.5}$ tarkoittaa kohtaa jossa suihkun keskimääräinen nopeus on laskenut puoleen sen maksiminopeudestaan.



Kuva 3. Puhallussuihkun keskimääräinen nopeusprofiili ja aukeamiskulma.

Puhallussuihkun nopeuden on oltava mahdollisimman tasainen puhallusraossa. Tasainen nopeusjakauma saavutetaan, kun puhallusraon pinta-ala on riittävän pieni puhallussuihkun kanavan poikkileikkausalaan verrattuna:

$$\frac{b \cdot L}{W \cdot H} \leq 0.25, \quad (12)$$

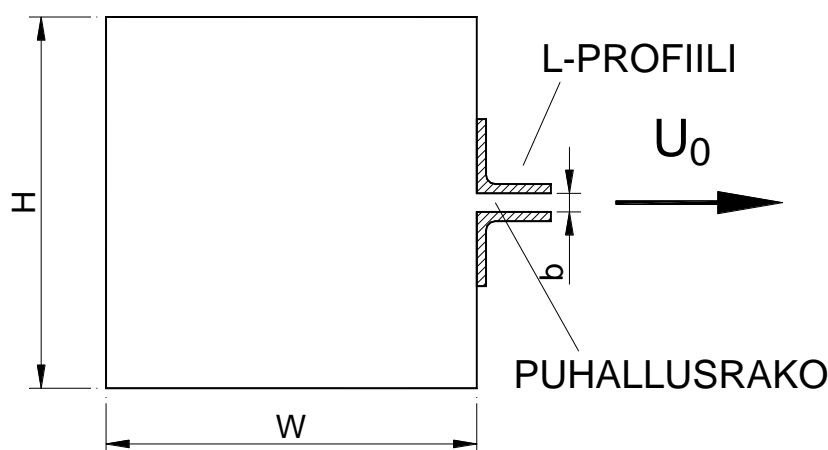
missä b = raon korkeus

L = raon pituus

H = puhalluskanavan korkeus

W = puhalluskanavan leveys

Puhallusraon korkeuden on oltava vakio, jotta suihku olisi tasainen. Eräs keino toteuttaa tasainen puhallussuihku on käyttää L-profiilia kuvan 4 mukaisesti.



Kuva 4. Puhallusraon toteutus L-profiilin avulla.

Puhallussuihku on suunnattava korkeussuunnassa keskelle imuhuuvaa siten että sen keskilinja yhtyy imuhuuvan keskilinjaan. Puhallussuihkun tulisi olla esteetön, jotta se toimisi suunnitellusti.

4.1.2 Puhallussuihkun ilmavirran mitoitus

Puhallussuihkun nopeus mitoitetaan siten että epäpuhtauslähteen tasalla saavutetaan riittävän suuri ilman virtausnopeus. Suihkun tulee olla myös niin voimakas, että suihku jaksaa kantaa imuaukkoon asti.

Puhallussuihkussa tärkein mitoitustekijä on suihkun liikemäärä I/ρ , joka lasketaan puhallusraon pituutta kohden seuraavasti:

$$I = \rho b U_0^2, \quad (13)$$

missä ρ = ilman tiheys (kg/m^3)
 U_0 = nopeus puhallusraossa (m/s)
 b = puhallusraon korkeus (m).

Kaavasta 13 havaitaan, että sama liikemäärä voidaan saavuttaa erilaisilla puhallusraon korkeuden ja nopeuden yhdistelmillä. Suurilla puhallussuihkun rakonopeuksilla tarvittava puhallusilmavirta on pienempi, mutta suuret nopeudet johtavat myös suuriin painehäviöihin ja saattavat aiheuttaa melua. Normaalisti käytettävät suihkun nopeudet ovat luokkaa 10 - 20 m/s.

Puhallussuihkun liikemääräksi (m^3/s^2) suositellaan olosuhteissa joissa esiintyy kohtuullisia häiriövirtauksia (Robinson and Ingham, 1995)

$$I/\rho = 0.14 \dots 0.25 x, \quad (14)$$

missä x on suihkun ja imun välinen etäisyys.

Puhallussuihkun nopeus alkaa vähentyä kun etäisyys puhallusaukosta kasvaa. Tasosuihkun keskiakselin nopeus U_{CL} on kääntäen verrannollinen etäisyyden x neliöjuureen:

$$U_{CL} = 2,6 \sqrt{\frac{I}{\rho x}} \quad (15)$$

Tarvittava nopeus päästölähteen tasalla riippuu päästölähteen ominaisuuksista sekä tilan häiriövirtauksista. Laajan päästölähteen tapauksessa suihkun nopeus vaihtelee, koska lähellä puhallussuihkua nopeus on suurempi kuin päästölähteen imun puoleisessa päässä. Tämän hankkeen yhteydessä saavutettiin kohtuullinen sieppaustehokkuus kun suihkun nopeus oli luokkaa 1 m/s päästölähteen tasalla. Suuremmilla nopeuksilla sieppaustehokkuus kasvaa, mutta lisää samalla poistoilmavirtoja.

Vaakasuuntaiseen puhallussuihkuun sekoittuu ylöspäin nousevia lämpimien päästölähteiden konvektiovirtauksia. Tämän johdosta suihkun lämpötilaero voi kasvaa ympäristöön verrattuna, jolloin suihkuun

vaikuttavat nostevoimat taivuttavat suihkua ylöspäin. Taipuman suuruutta voidaan arvioida kaavalla (Klobut, 1992)

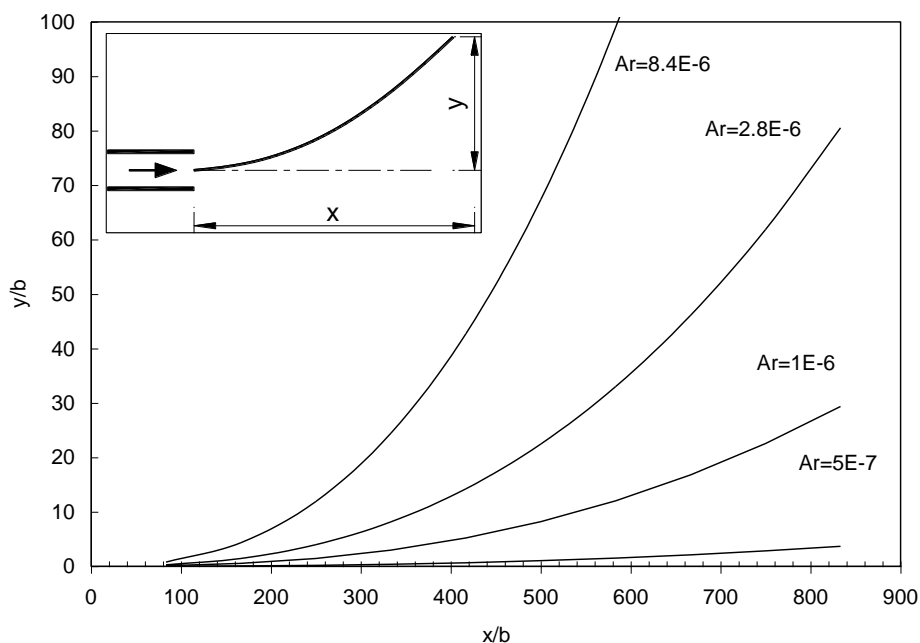
$$\frac{y}{b} = 0.18 Ar \left(\frac{x}{b} \right)^{2.5}, \quad (16)$$

missä b on tuloilmaraon korkeus ja Ar Arkimeden luku, joka kuvaa suihkuun vaikuttavan nostevoiman ja hitausvoiman välistä suhdetta:

$$Ar = \frac{g b \Delta T}{T U_0^2}, \quad (17)$$

missä g on maan vetovoimakiinnoisyys
 b on tuloilmaraon korkeus
 ΔT on lämpötilaero suihkun ja ympäristön välillä
 T on ympäristön absoluuttinen lämpötila (K)
 U_0 on suihkun nopeus raossa.

Yhtälöiden 16 ja 17 käytön hankaluutena on, että ne olettavat suihkun olevan yllämpöistä jo puhallusaukossaan, kun taas puhalluspoistoratkaisuissa suihku lämpiää matkallaan. Taipuman tarkempi



Kuva 5. Yllämpöisen rakosuihkun taipuma.

laskenta onnistuu virtauslaskennan avulla. Kaavojen avulla voidaan kuitenkin arvioida taipuman suuruusluokkaa, kun oletetaan että suihkun

ylilämpö aiheutuu lämpimän päästölähteen luovuttamasta konvektiivisesta lämpötehosta

$$\Delta T = \frac{\Phi}{\rho q_z c_P} \quad (18)$$

missä q_z on suihkun tilavuusvirta. Taipumaa laskettaessa oletetaan, että etäisyys x lasketaan päästölähteen tasalta eteenpäin.

4.2 Poisto

4.2.1 Poiston mitat ja muoto

Poistoaukon tulee sijaita kohtisuoraan suihkua vastaan. Sen leveyden tulee olla yhtäsuuri tai suurempi kuin puhallussuihkun leveys ja korkeus samaa luokkaa kuin suihkun leviäminen (kuva 3).

Toiminnan kannalta on eduksi, jos huuva voidaan asentaa seinälle, jolloin se ei ime tarpeettomasti puhdasta ilmaa huuvan takaa.

4.2.2 Poistoilmavirran mitoitus ja ilmavirran tasaisuus

Etäisyyden kasvaessa puhallusraosta suihkun tilavuusvirta lisääntyy samalla kun sen nopeus alenee. Suihkun tilavuusvirta imuhuuvan tasalla voidaan laskea kaavasta

$$q_{JET} \approx 0,6 \sqrt{\frac{I x}{\rho}} \quad (19)$$

missä I on puhallussuihkun liikemäärä ja x puhallussuihkun ja imuhuuvan välinen etäisyys. Puhallus-imuratkaisut mitoitetaan siten, että poisto poistaa koko puhallussuihkun indusoiman ilmavirran varmuuskertoimella kerrottuna:

$$q_{EXH} = k q_{JET} \quad (20)$$

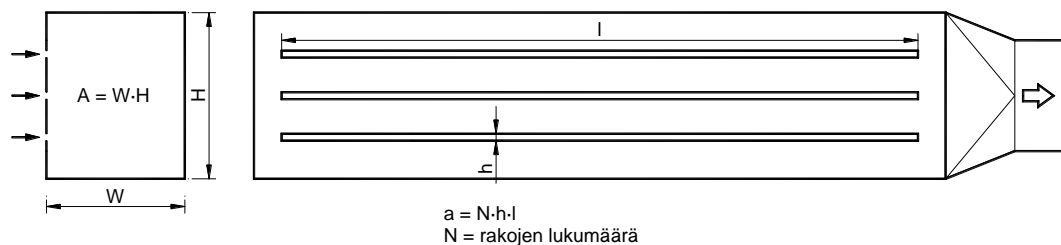
ACGIH (1995) suosittelee, että varmuuskerroin $k = 1.5 - 2$.

Samoin kuin puhallussuihkussa on myös poistoaukon ilmavirran nopeusjakauman oltava tasainen optimaalisen lopputuloksen

saavuttamiseksi. Tasaiseen ilmavirtaukseen päästään kanavoimalla poistoilmaliitännät useammasta kohdasta ja käyttämällä imurakoja. Laajan aukon virtausnopeutta voidaan myös tasata lisäämällä imuaukon kertavastusta esim. käyttämällä reikälevyä.

Imurakoja käytettäessä ilmavirtaus saadaan tasattua kun imuaukon vapaan otsapinta-alan a suhde poistokanavan poikkileikkauspinta-alaan A verrattuna on riittävän pieni (Baturin, 1972):

$$a/A \leq 0.3 \quad (21)$$

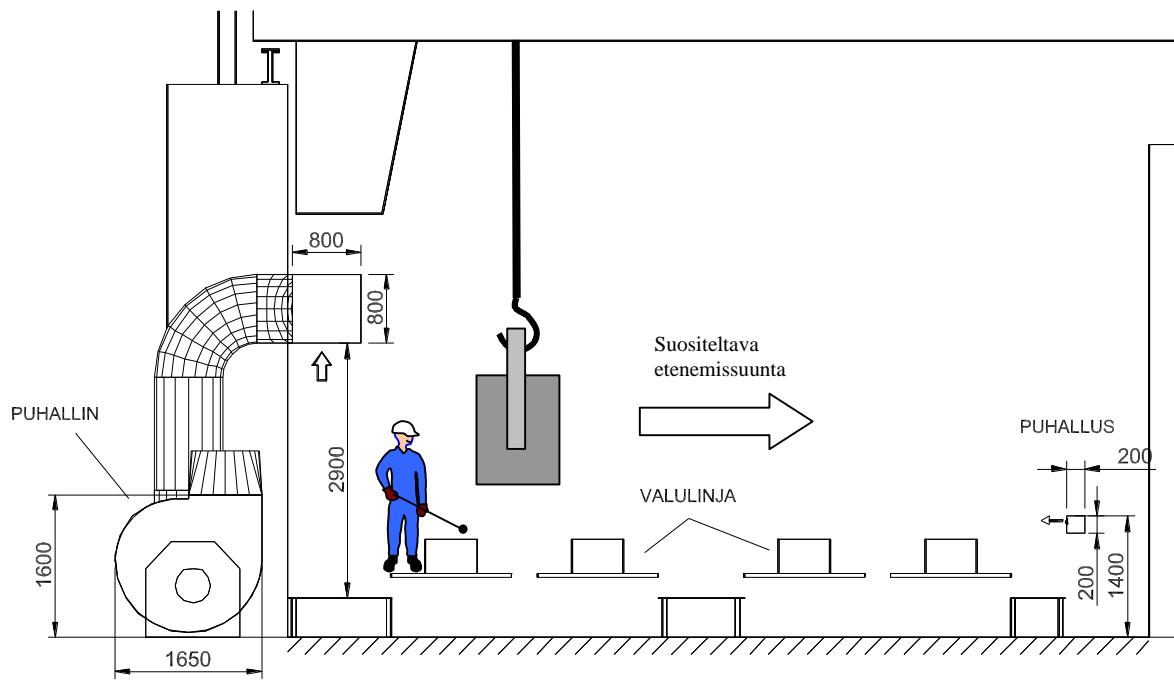


Kuva 6. Imuhuuvan virtausnopeuden tasaaminen rakojen avulla.

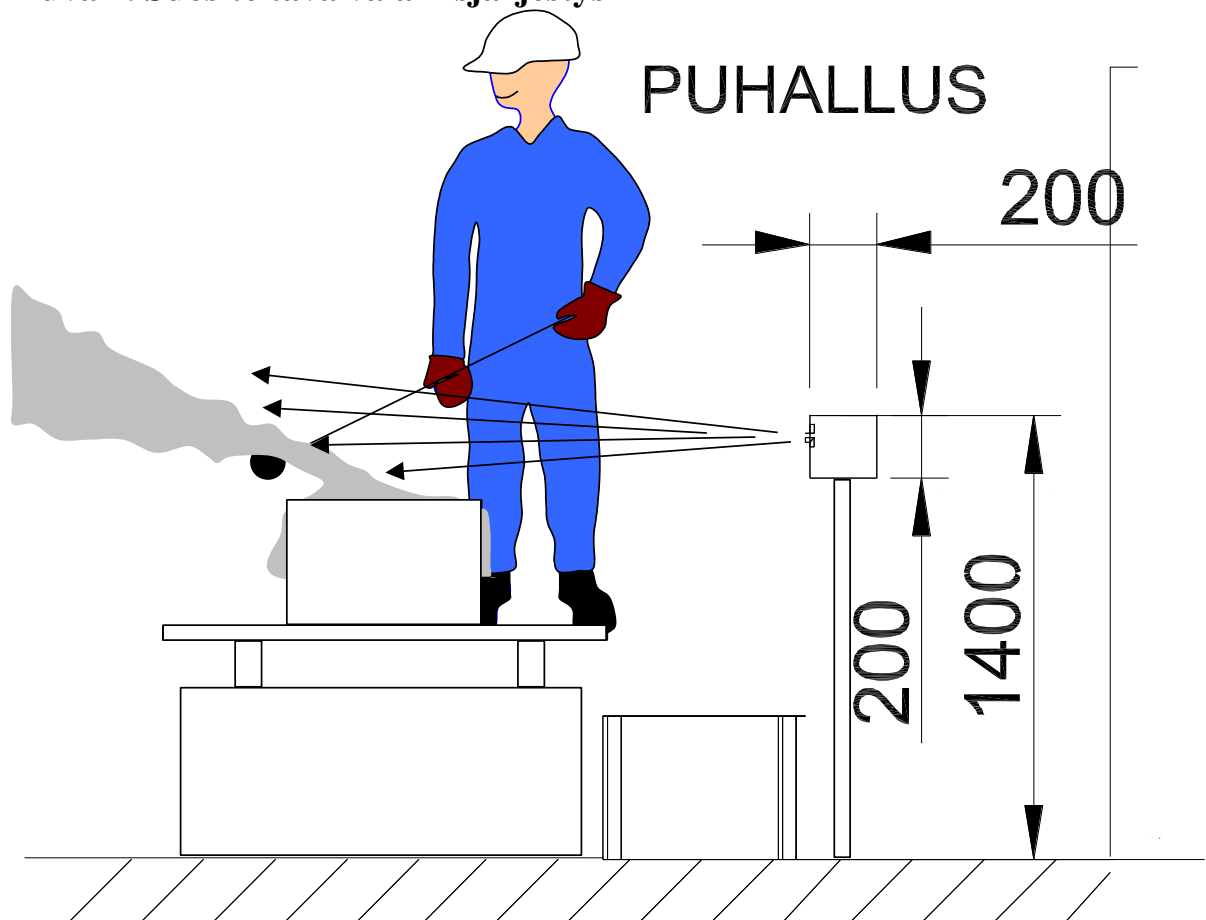
4.1 Työjärjestelyt

Puhallus-imuratkaisua käytettäessä esimerkiksi valulinjoilla tulisi valaminen aina aloittaa poistoa lähinnä olevalta alueelta ja edetä puhallussuihkuja vastaan. Näillä työjärjestelyillä työntekijät etenevät epäpuhtauksia vapauttavalla alueelta kohti puhtaan ilman aluetta (kuva 7)

Mikäli mahdollista työntekijöiden tulisi välttää työskentelyä niin, että puhallussuihku tulee työntekijän selän takaa. Paras työskentelysuunta puhallussuihkuihin nähden on se, jossa työntekijä on sivuttain puhallussuihkuun nähden (kuva 8).



Kuva 7. Suositeltava valamisjärjestys



Kuva 8. Suositeltava työntekijän työskentelysuunta puhallussuihkuun nähden

4.2 Puhallus- ja poistoilmavirtojen älykäs ohjaus

Silloin kun laajaa lähdealuetta käytetään vain osittain, on energiataloudellista kohdentaa puhallus- ja poisto käytetylle alueelle ja säätää ilmavirtoja alueen laajuuden mukaan.

LÄHDELUETTELO

1. W.C.L. Hemeon. Plant and Process Ventilation. 2nd ed. New York: Industrial Press, 1963
2. R.J. Heinsohn, Industrial Ventilation: Engineering Principles. New York: John Wiley&Sons, 1991
3. H.D. Goodfellow. Advanced Design of Ventilation Systems for Contaminant Control. Chem. Eng. Monograph 23. Amsterdam: Elsevier, 1985
4. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) (1998) Industrial Ventilation-A Manual of Recommended Practice. 23rd ed, Cincinnati, OH:ACGIH.
5. Morton, B. R., G. Taylor, and J.S. Turner 1956. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. Proc. Royal Soc., vol 234A, p.1.
6. Mundt, E. 1996. The performance of displacement ventilation systems: Experimental and theoretical studies. Ph.D. thesis. Bulletin No. 38, Building Services Engineering, KTH, Stockholm
7. Baturin, V.V. (1972) Fundamentals of Industrial Ventilation. Pergamon Press, Oxford, Great Britain.
8. Robinson, M. and Ingham, D.B. (1996). Recommendations for the design of push-pull ventilation systems for open surface tanks. Ann. occup. Hyg. Vol 40, No 6, pp. 693-704.
9. Krzysztof Klobut, Jari Palonen. Ilmasuihkut-kirjallisuuskatsaus. TKK, LVI-tekniikan laboratorio
Espoo 1992. 111 sivua.