

Kohdeilmanvaihdon tehokkuuden parantaminen puhallussuihkujen avulla

Raportti VAL B330

Ilpo Kulmala

**Julkaistu Työsuojelurahaston avustuksella
Tampereella 15.9.1998**

	A Työraportti	
	B Julkinen raportti	x
	C Luottamuksellinen raportti	
Raportin nimi Kohdeilmanvaihdon tehokkuuden parantaminen puhallussuihkujen avulla		
Toimeksiantaja/rahoittaja ja tilaus Työsuojelurahasto	Raportin numero VAL B330	
Projekti Kohdeilmanvaihdon tehokkuuden parantaminen puhallussuihkujen avulla	Suoritteen numero V6SU00411	
Laatija(t) Ilpo Kulmala	Sivujen/liitesivujen lkm 24	
Avainsanat Kohdeilmanvaihto, puhallussuihku, nostevirtaus, virtauslaskenta		
Tiivistelmä Kohdeilmanvaihdolla pyritään poistamaan epäpuhtaudet suoraan niiden muodostumispaikaltaan ennen niiden leviämistä työpaikan ilmaan. Perinteisen kohdepoistoratkaisun suurin epäkohta on imun lyhyt vaikutusetäisyys, minkä vuoksi imuaukon on sijaittava hyvin lähellä epäpuhtauslähdettä toimiakseen tehokkaasti. Tämä ei ole aina mahdollista etenkin suurten epäpuhtauslähteiden tapauksessa, jolloin kohdepoiston sieppaustehokkuus jää alhaiseksi. Hankkeen tavoitteena oli parantaa kohdeilmanvaihdon tehokkuutta puhallussuihkujen avulla sekä kehittää ratkaisusta laskentamalli, jonka avulla voidaan määrittää tarvittavat imu- ja puhallusilmavirrat sovelluskohteesta riippuen. Lisäksi tutkittiin $k-\varepsilon$ -turbulenssimallia käyttävän laskentaohjelman mahdollisuuksia ja rajoituksia virtauskentän laskemiseen tilanteessa jossa epäpuhtauslähde on myös lämmönlähde. Tulokset osoittivat, että puhallus voi lisätä kohdepoiston tehollista vaikutusetäisyyttä 2-3 -kertaiseksi pelkkään imuun verrattuna. Laskentamallin avulla voidaan laskea ilman virtauskenttä luotettavasti, kun puhallussuihkun liikemäärä pidetään sopivalla alueella. Nostevirtausten keskimääräiset nopeus- ja lämpötilakenttien laskenta onnistuu tyydyttävällä tarkkuudella $k-\varepsilon$ -turbulenssimallilla. Tuloksia voidaan parantaa turbulenssimallin vakioiden huolellisella valinnalla. Suurin ongelma oli laskentaverkosta riippumattoman ratkaisun saavuttamisessa.		
Allekirjoitukset Tampereella 15.9.1998		
Markku Lumme Tutkimuspäällikkö	Ilpo Kulmala Erikoistutkija	Seppo Enbom Tarkastanut
Jakelu: Työsuojelurahasto 5 kpl VTT Valmistustekniikka/VAL4, 10 kpl		
VTT Valmistustekniikka Turvallisuustekniikka PL 1701 33101 TAMPERE	Puh.vaihde: (03) 316 3111 Faksi: (03) 316 3499 Sähköposti: Ilpo.Kulmala@vtt.fi WWW: http://www.vtt.fi/manu/safety	

Alkusanat

Teollisuudessa kohdeilmanvaihto on yksi tärkeimmistä keinoista ilman epäpuhtauksien hallitsemiseksi. Epäpuhtauksien kulkeutuminen ja siten myös kohdepoiston tehokkuus riippuu ilman virtauskentästä epäpuhtauslähteen ja imuaukkojen läheisyydessä. Ilman virtausta kuvaavat yhtälöt ovat kuitenkin hyvin monimutkaisia ja niiden ratkaiseminen onnistuu vain numeerisesti. Virtauksen ja siihen liittyvän lämmönsiirron simulointi on tullut mahdolliseksi vasta 1970-luvun alussa. Laskennan edellytykset paranevat kuitenkin jatkuvasti tietokoneiden ja laskentamenetelmien sekä fysikaalisten mallien kehittyessä ja on hyvin todennäköistä että virtauslaskenta on keskeinen työkalu tulevaisuudessa. Menestyksellisen käytön edellytyksenä on kuitenkin, että tunnetaan laskennan rajoitukset sekä fysikaalisten mallien toimivuus eri tilanteissa.

Tutkimus kuuluu projektiin ”Vapaa ja pakotettu konvektio”, jonka projektipäällikkönä on tekn. lis. Ari Miettinen Teknillisestä korkeakoulusta. Tutkimuksen johtoryhmään kuuluivat Esko Virtanen (Tekes), Eero Hättinen (ABB Installaatiot Oy), Antero Aittomäki (TTKK), Ilkka Jokioinen (Valmet Oy), Esko Järvinen (CSC Tieteellinen laskenta Oy) sekä Jorma Pekkinen (Halton Oy). Projekti on osa kansallista Virtausdynamiikan teknologiaohjelmaa, missä pyrittiin edistämään virtauslaskennan käyttöä teollisuuden sovelluksissa. Tämä raportti liittyy kohdeilmanvaihdon tutkimukseen, jonka tavoitteena oli parantaa kohdeilmanvaihdon tehokkuutta sekä kehittää suunnittelumenetelmiä. Tutkimus tehtiin VTT Valmistustekniikassa. Hanke toteutettiin Tekesin ja Työsuojelurahaston rahoituksella. Hankkeen valvojana Työsuojelurahastossa oli Peter Rehnström.

Tampereella syyskuussa 1998

Ilpo Kulmala

Sisällysluettelo

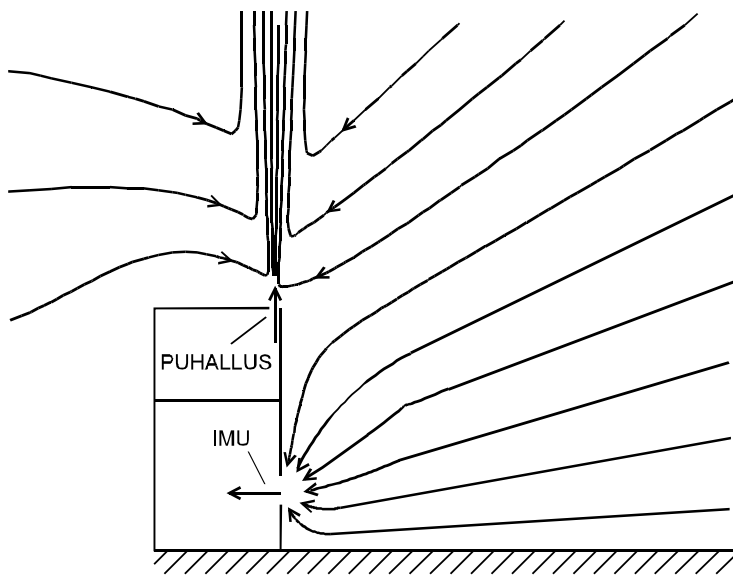
1	Johdanto	4
2	Tavoitteet	5
3	Tehtävät ja menetelmät	6
3.1	Puhalluksella tehostettu imu.....	6
3.2	Pistemäisen lämmönlähteen synnyttämä virtaus- ja lämpötilakenttä	14
3.3	Yhdistetyn imun ja nostevirtausten laskenta	18
4	Yhteenveto ja jatkotutkimustarpeet	23
5	JULKAISULUETTELO	24

1 Johdanto

Työilman laadulla on merkittävä vaikutus työntekijöiden terveydelle ja viihtyisyydelle sekä työn tuottavuudelle. Teollisuudessa työilman laatua heikentävät epäpuhtaudet, joita vapautuu ilmaan erilaisista päästölähteistä. Näiden epäpuhtauksien hallintaan käytetään yleisesti kohdeilmanvaihtoa, jolla pyritään poistamaan epäpuhtaudet suoraan muodostumispaikaltaan ennen niiden leviämistä työpaikan ilmaan. Varsinkin tilanteissa joissa työntekijä työskentelee epäpuhtauslähteen läheisyydessä, kohdeilmanvaihto on usein ainoa tehokas keino epäpuhtauspitoisuuksien alentamiseksi riittävän alhaiselle tasolle.

Tavanomainen kohdepoisto imee ilmaa tasaisesti joka puolelta, myös imuaukon takaa missä ilma on yleensä puhdasta. Tämä johtaa nopeuksien nopeaan alenemiseen kun etäisyys imuaukosta kasvaa. Alhaiset nopeudet ovat puolestaan herkkiä ympäristön ja epäpuhtauslähteen itsensä muodostamille häiriövirtauksille heikentäen kohdepoiston tehokkuutta. Käytännössä imun maksimi vaikutusetäisyys on n. puolen metrin luokkaa, mikä ei riitä laajojen epäpuhtauslähteiden, kuten altaiden tehokkaaseen hallintaan.

Eräs potentiaalinen keino tehostaa imun vaikutusetäisyyttä on käyttää puhallussuihkuja imun apuna. Tämä Tanskassa 1960-luvulla keksitty idea on ollut pitkään hyödyntämättä kunnes se on viime vuosina ollut uudelleen virinneen mielenkiinnon kohteena erityisesti Englannissa ja Tanskassa. Tämän keksijänsä mukaan nimetyn Aaberg-huuvan periaatteena on puhalttaa imuaukon virtaussuuntaan vastaan kohtisuoraan kapea suihku, jolloin kyetään estämään ilman imeytymisen imuaukon takaa ja suuntaamaan imu haluttuun kohtaan imuaukon edessä. Ratkaisun toimintaperiaate on esitetty kuvassa 1, jossa on piirretty virtaviivat kaksikulotteisen puhallus- imujärjestelmän tapauksessa. Ratkaisun ongelmana on ollut määrittää imu- ja puhallusilmavirrat oikein, jotta haluttu lopputulos saavutettaisiin. Liian alhaisilla nopeuksilla puhallussuihku taipuu takaisin kohti imuaukkoa kun taas liian suuret nopeudet kaventavat tehollista vaikutusaluetta ja lisäävät epäpuhtauksien leviämistä ympäristöön.



Kuva 1 Puhallussuihkulla tehostetun imun toimintaperiaate.

Kohdeilmanvaihdon kyky poistaa epäpuhtauksia riippuu ratkaisevasti ilman virtauskentästä epäpuhtauslähteen läheisyydestä. Tähän puolestaan vaikuttavat imuaukon virtauskentän lisäksi epäpuhtauslähteen ominaisuudet. Nykyisten kokemuseräisten mitoitusmenetelmien avulla virtauskentän luotettava ratkaiseminen ja epäpuhtauksien leviämisen ennakointi on mahdotonta, ja lopputulosten tehokkuus onkin ollut vaihtelevaa. Tämän vuoksi monimutkaisissa tapauksissa suunnittelun apuvälineenä on perinteisesti käytetty koeratkaisuja, joilla on kokeellisesti etsitty tehokas vaihtoehto. Optimaalisen ratkaisun etsiminen kokeellisesti on kuitenkin varsin työlästä. Lisäksi tulosten soveltaminen muunlaisiin tilanteisiin on epävarmaa. Toisaalta virtauslaskennan ja tietokoneiden kehittyminen on mahdollistanut tilanteiden ratkaisun numeerisestikin, mutta laskennan käyttö teollisuusilmanvaihdon sovellutuksiin on toistaiseksi ollut vähäistä. Eräs syy on ollut epävarmuus tulosten luotettavuudesta.

Virtauslaskentaohjelmassa ratkaistaan tavallisesti jatkuvuus-, liikemäärä- ja energiayhtälöt jolloin tuloksena saadaan nopeuskomponenttien, paineen ja lämpötilan keskiarvot laskentapisteesä. Lisäksi tarvitaan malli kuvaamaan turbulenssin nopeusheilahtelujen synnyttämien näennäisten lisäjännitysten vaikutusta virtaukseen. Nykyisin käytännön sovellutuksissa yleisin turbulenssimalli on kahden yhtälön k - ϵ -malli, jolloin ratkaistaan approksimoitua yhtälöitä myös turbulenssin kineettiselle energialle k sekä sen dissipaatiolle ϵ . Saadut epälineaariset osittaisdifferentiaaliyhtälöt on mahdollista ratkaista vain numeerisesti. Tällöin laskenta-alue jaetaan erillisiin osatilavuuksiin ja hilapisteisiin, joissa yhtälöt diskretisoidaan ja muuttujien arvot ratkaistaan iteroimalla. Yhtälöiden suuresta määrästä johtuen laskenta tarvitsee tehokasta konekapasiteettia.

Kohdepoistoratkaisuja sovelletaan usein tilanteisiin, joissa epäpuhtauslähte on ympäristöään kuumempi. Virtauskenttä on tällöin imun sekä lämpötilaeroista aiheutuvien vapaiden konvektiovirtausten yhdistelmä. Tilannetta monimutkaistaa edelleen se että kohdepoiston virtauskenttään voi vaikuttaa lisäksi puhallussuihkun virtauskenttä. Laskennan tarkkuuden kannalta on siten oleellista, että sekä puhalluksella varustetun kohdepoiston virtauskenttä että nostevirtaukset kyetään mallintamaan luotettavasti.

2 Tavoitteet

Tutkimuksen hankkeen tavoitteena oli tehostaa kohdeimua puhalluksen avulla sekä kehittää tilannetta kuvaavia laskentamalleja virtauskentän ratkaisemiseksi. Lisäksi tavoitteena oli tutkia k - ϵ -turbulenssimallia käyttävän laskentaohjelman mahdollisuudet ja rajoitukset virtauskentän ratkaisemiseksi tilanteessa jossa epäpuhtauslähte on myös lämmönlähde.

Puhallussuihkulla tehostetun imun tapauksessa virtauskenttä muodostuu rajakerrostyyppisestä tasosuihkusta sekä imun synnyttämästä lähes kitkattomasta virtauksesta. Tilannetta voidaan yksinkertaistaa olettamalla virtaus kitkattomaksi ja pyörteettömäksi, jolloin on ratkaistava vain yksi muuttuja (virta- tai potentiaalifunktio). Analyttisen ratkaisun vaatima laskentaohjelma on huomattavasti yksinkertaisempi kuin virtauslaskentaohjelma ja se voidaan ratkaista tehokkaalla mikrotietokoneella. Mallin toimivuudesta on kuitenkin olemassa vain vähän tietoa. Tämän hankkeen eräänä tehtävänä oli tutkia potentiaalivirtausmallin luotettavuutta puhallus-imu -ratkaisun mallintamisessa.

3 Tehtävät ja menetelmät

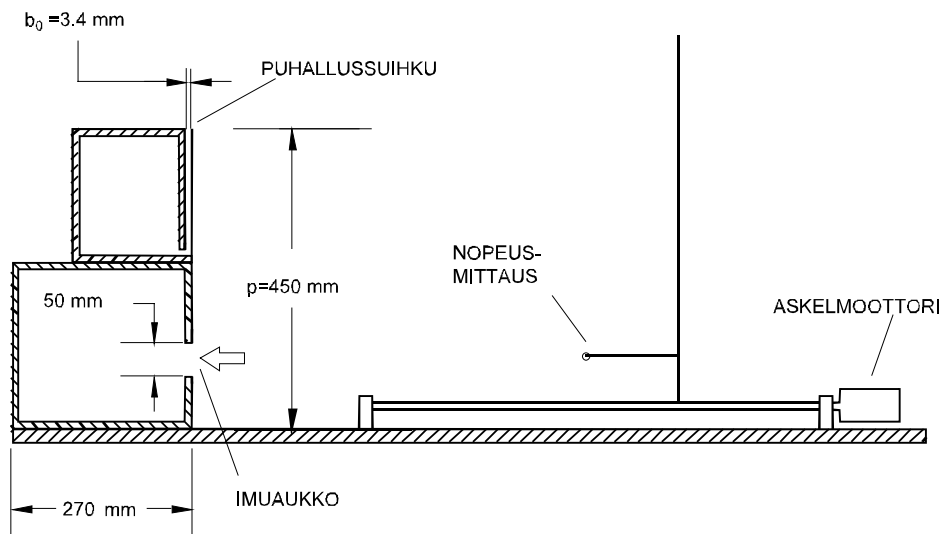
Hankkeessa laskettiin teollisuusilmanvaihdon sovellutusten kannalta tärkeitä virtaustapauksia. Tutkittavat tilanteet olivat

- puhalluksella tehostetun kohdeimun virtauskenttä
- pistemäisen lämmönlähteen synnyttämä virtaus- ja lämpötilakenttä
- konvektiolähteen ja imun yhdistetty virtauskenttä.

Laskelmat tehtiin FLUENT-virtauslaskentaohjelmalla. Puhalluksella tehostettu imuratkaisu ratkaistiin myös kitkattomana virtauksena. Laskennat todennettiin laser-doppler anemometrillä (LDA) tai kuumalanka-anemometrillä tehdyillä nopeusmittauksilla sekä merkkiainemittauksilla. Pluumin tapauksessa laskentatuloksia verrattiin myös kirjallisuudesta löytyneihin tietoihin.

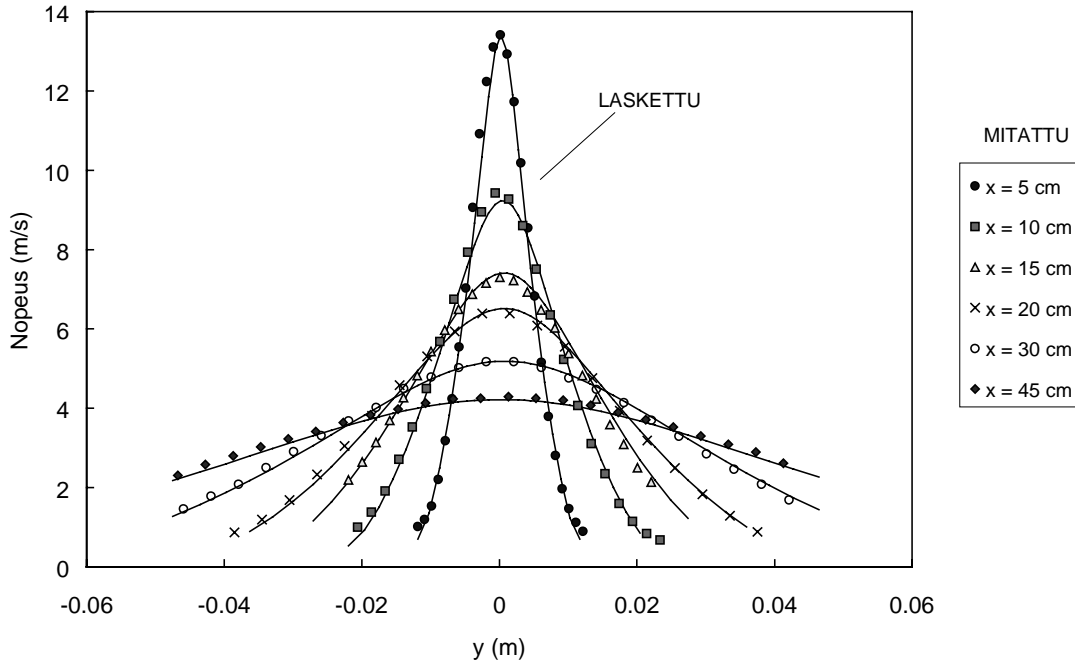
3.1 Puhalluksella tehostettu imu

Puhalluksella tehostettua imua tutkittiin rakomaisen huuvan ja kaksikulotteisen tasosuihkun avulla. Laskentatulosten todentamiseksi laboratorioon valmistettiin prototyyppi, jonka avulla tehtiin ilman virtausnopeus- ja sieppausastemittauksia erilaisilla puhallussuihkun ja poistovirranyhdistelmillä. Ratkaisun ja mittausjärjestelmän periaate on esitetty kuvassa 2.

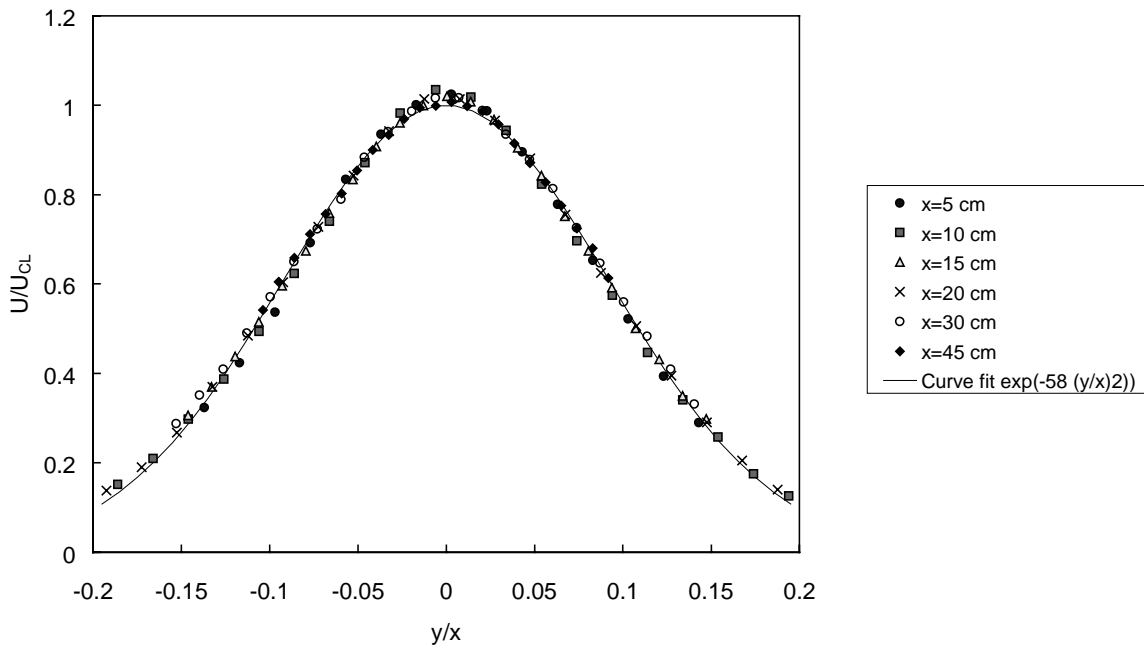


Kuva 2. Tutkimuksessa käytetty puhallus-imuratkaisun mittausjärjestely.

Kaksikulotteinen virtauskenttä laskettiin FLUENTilla käyttäen $k-\epsilon$ mallia sekä myös matemaattisen ratkaisun avulla. Matemaattisessa ratkaisussa puhallussuihkun leveys oletetaan nolaksi ja virtauksen turbulenttisen puhallussuihkun ulkopuolella kitkattomaksi ja pyörteettömäksi, jolloin virtauskenttä voidaan laskea ratkaisemalla potentiaalivirtausta kuvaava Laplacen yhtälö. Suihkun ja imun indusoiman virtauskentän virtafunktio on aiemmin ratkaistu Leedsin yliopistossa ja tämä annetaan reunaehtona avoimilla reunoilla. Koska tapaukselle ei ole analyttistä ratkaisua, virtauskenttä laskettiin numeerisesti approksimoimalla osittaisdifferentiaaliyhtälöt differenssi-menettelmällä. Laskentamallien antamia tuloksia verrattiin keskenään sekä mitattuihin nopeuksiin. Yksityiskohtaiset tulokset ovat raportissa VAL B317.



Kuva 3. Mitatut ja lasketut puhallussuihkun nopeudet etäisyydestä riippuen.



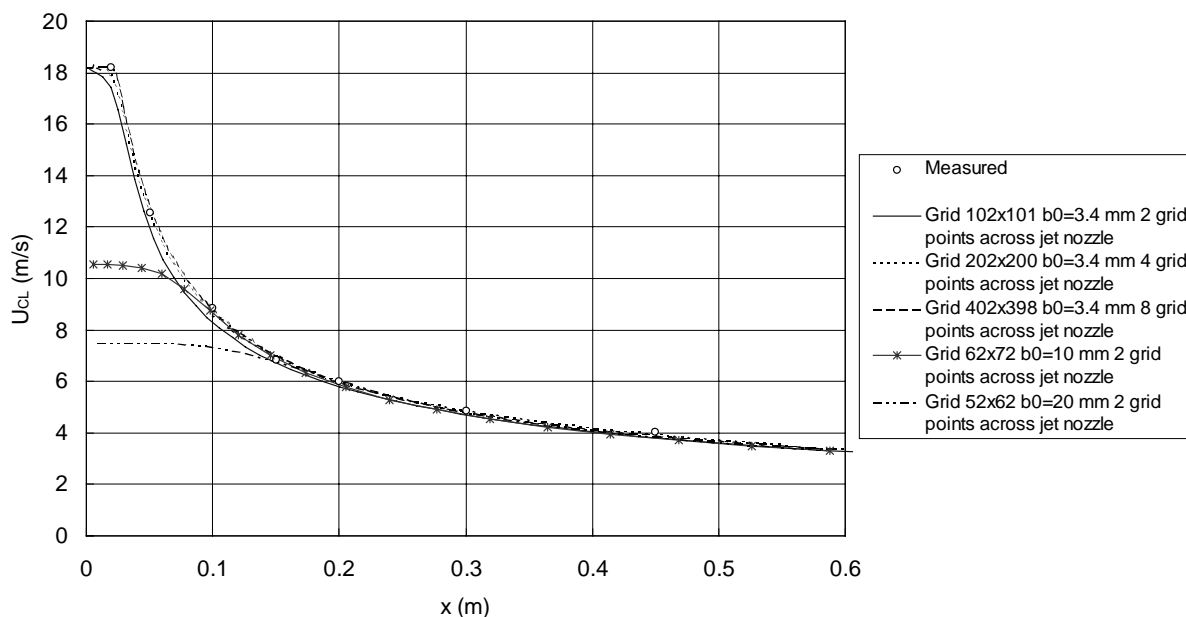
Kuva 4. Mitatut puhallussuihkun dimensiottomat nopeusprofiilit.

Puhallus-imujärjestelmän luotettavan mallinnuksen edellytyksenä on, että puhallussuihku kyetään laskemaan tarkasti. Tämän vuoksi mittauksia tehtiin eri korkeuksilla puhallussuihkun yläpuolelta ja tuloksia verrattiin laskettuihin arvoihin (kuva 3). Kuten kuvasta havaitaan, mitatut nopeudet ovat hyvin yhtäpitäviä laskettujen arvojen kanssa.

On mielenkiintoista todeta, että kun suihkun nopeus jaetaan keskiakselin nopeudella U_{CL} ja tulokset esitetään dimensiotoman etäisyyden y/x funktiona, tulokset asettuvat varsin hyvin samalle käyrälle, joka voidaan esittää muodossa

$$\frac{U(x, y)}{U_{CL}} = \exp(-B(y/x)^2), \quad (1)$$

missä vakio $B = 58$ (kuva 4). Tämä vastaa hyvin kirjallisuudesta löytyneitä arvoja.



Kuva 5. Keskiakselin mitatut ja lasketut nopeudet.

Kuvassa 5 on esitetty mitatut ja lasketut keskiakselin nopeudet eri laskentaverkkojen tiheyksillä. Lisäksi kuvassa on esitetty nopeuksia tilanteessa, jossa laskentamallin puhallussuihkun leveys on poikennut todellisesta. Approksimointien tarkoituksena oli tutkia mahdollisuuksia mallintaa puhallussuihku pitämällä sen liikemäärä vakiona, kun sen leveys kasvaa. Tulokset osoittivat, että likimääräistys on mahdollista ja että sen avulla voidaan vähentää laskenta-aikaa merkittävästi.

Ellei puhallusta käytetä, ilmaa imetään joka puolelta, myös imuaukon takaa, jolloin nopeudet laskevat äkisti etäisyyden kasvaessa imuaukosta. Tilannetta kuvaava dimensioton virtafunktio on esitetty kuvassa 6 ja vastaavat tasanopeuskäyrät kuvassa 7. Virtafunktio on tehty dimensiotomaksi jakamalla se poistoilmavirralla. Tasanopeuskäyrät on puolestaan saatu jakamalla lasketut nopeudet imuaukon keskimääräisellä virtausnopeudella.

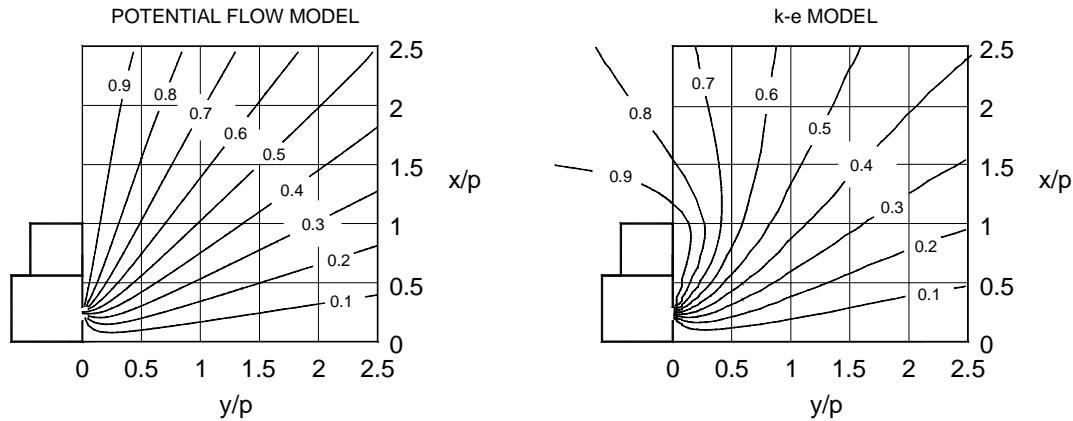
Puhallussuihkun käyttö muuttaa virtauskenttää merkittävästi (kuvat 8 ja 9). Puhallus saa aikaan ilmaverhon, joka estää puhtaan ilman imemisen imuaukon takaa samalla kun se indusoi ilmaa imuaukon etupuolelta. Puhalluksen ansiosta imuaukon etupuolelle muodostuu alue, jota rajoittaa ns. jakava virtaviiva, jolla dimensiotoman virtafunktion arvo on 1. Tämän virtaviivan alapuolelta virtaus kulkeutuu kohti imuaukkoa ja yläpuolelta kohti puhallussuihku.

Puhalluksella tehostetun ratkaisun toimivuuteen vaikuttaa merkittävimmin dimensioton toimin-

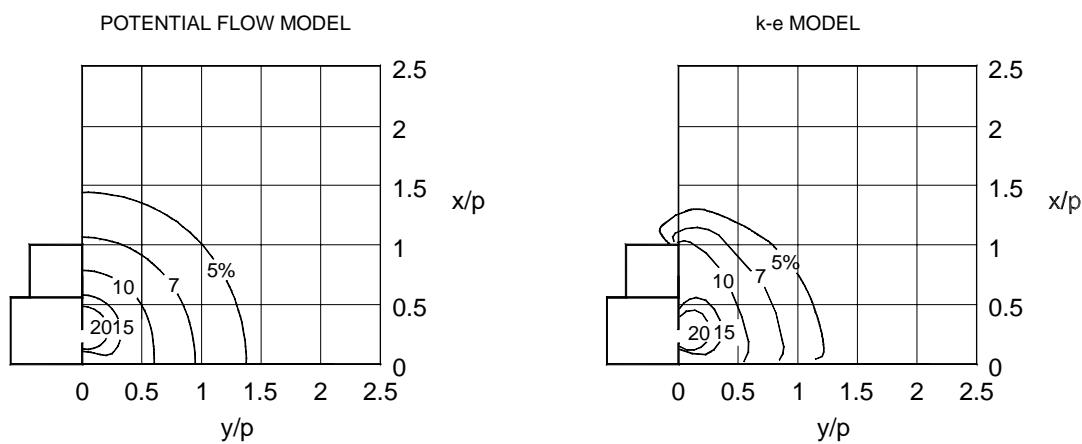
taparametri G_f , joka on verrannollinen puhallussuihkun liikemäärän ja poistoilmavirran suhteeseen.

$$G_f = \frac{1}{2q} \left(\frac{3b_0 U_0^2 p}{\sigma} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

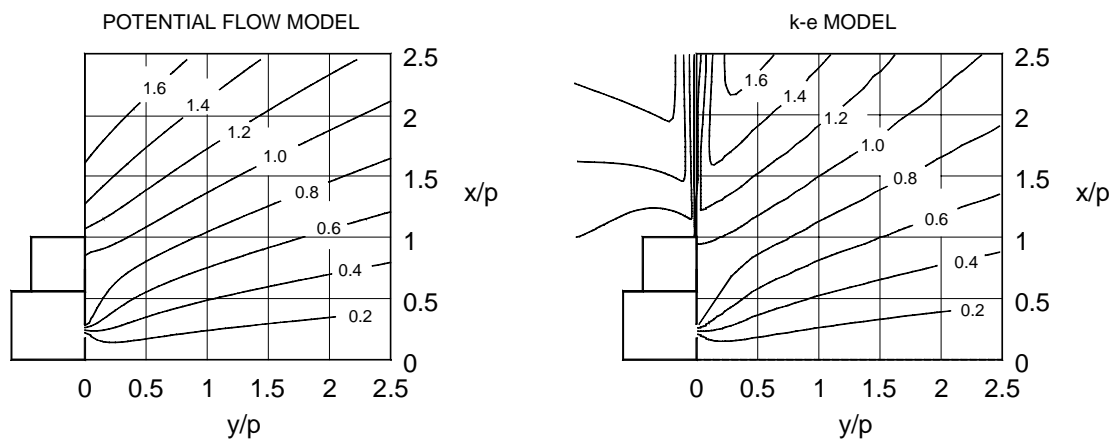
missä q on poistoilmavirta, b_0 on puhallusraon leveys, U_0 nopeus puhallusraossa, p suihkun korkeus tason pinnasta ja σ kokeellinen vakio, jonka arvo on 7.67.



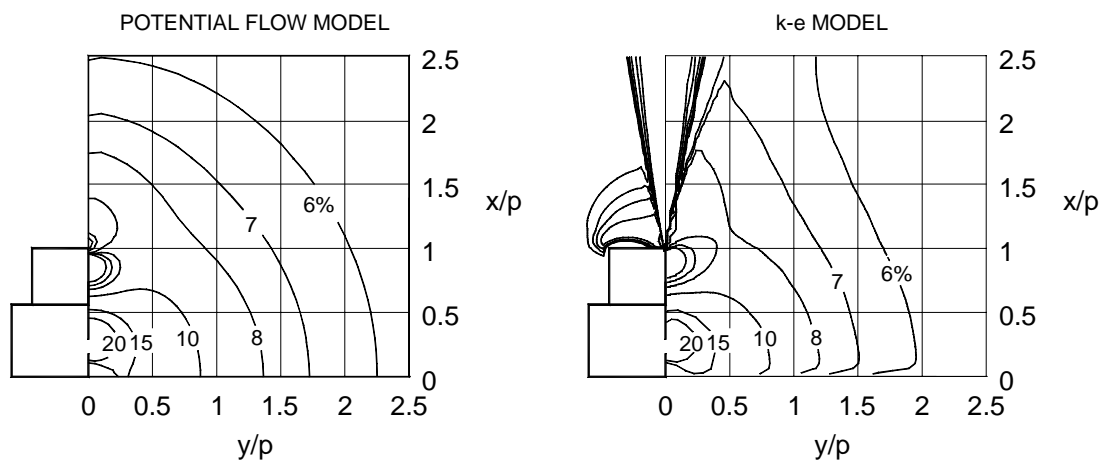
Kuva 6. k - ϵ - ja potentiaalivirtausmallilla lasketut virtaviivat tapauksessa jossa puhallusta ei käytetä. Virtafunktio on skaalattu poistoilmavirran suhteen.



Kuva 7. k - ϵ - ja potentiaalivirtausmallilla lasketut tasanopeuskäyrät tapauksessa jossa puhallusta ei käytetä. Luvut ovat prosentteja nopeudesta imuaukossa

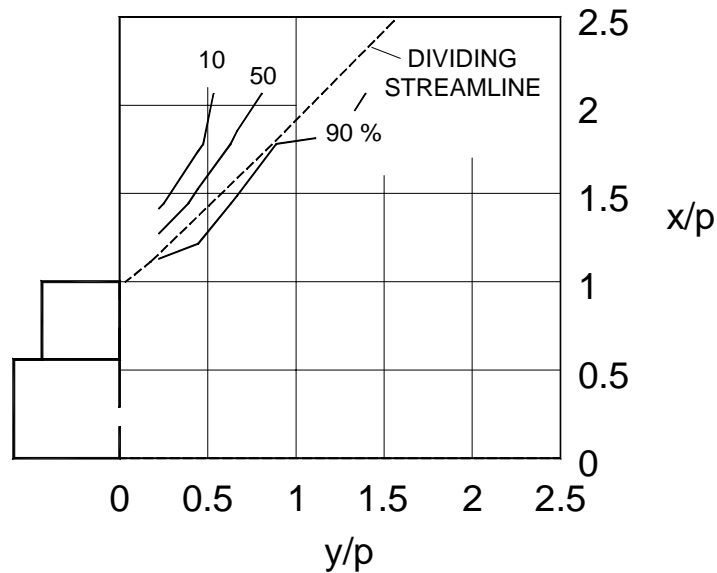


Kuva 8. *k-ε*- ja potentiaalivirtausmallilla lasketut virtaviivat tapauksessa $G_f = 0.74$.

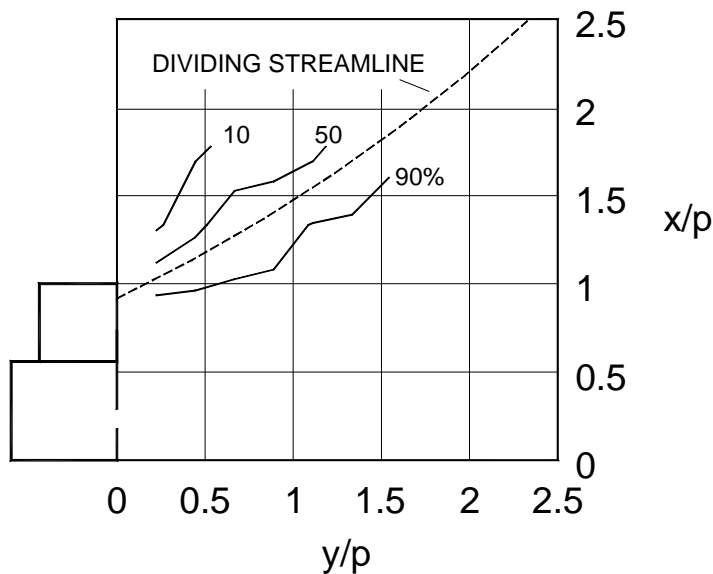


Kuva 9. *k-ε*- ja potentiaalivirtausmallilla lasketut tasanopeuskäyrät tapauksessa $G_f = 0.74$.

Kitkattoman virtauksen ratkaisu antoi samansuuntaisia ratkaisuja kuin *k-ε*-malli, kun toimintaparametrin G_f arvo oli riittävän pieni. Erot tulivat merkittäviksi kun $G_f > 1.44$.

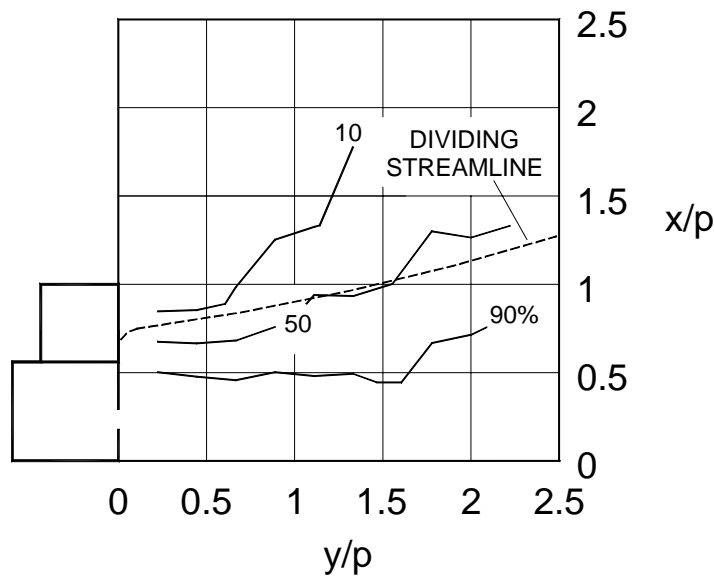


Kuva 10. Mitatut sieppaustehokkuudet tapauksessa $G_f = 0.36$.



Kuva 11. Mitatut sieppaustehokkuudet tapauksessa $G_f = 0.74$.

Mikäli virtauksessa ei olisi lainkaan turbulენტtista dispersiota, seuraisivat epäpuhtaudet virtaviivoja ja sieppausaste olisi askelfunktio jolla olisi arvo 1 jakavan virtaviivan alapuolella ja 0 tämän yläpuolella. Todellisuudessa ilman pyörteily levittää epäpuhtauksia laajemmalle ja sieppausaste muuttuu vähemmän jyrkästi. Kuvissa 10 - 12 on merkkiaineella mitattuja sieppaus-tehokkuuksia eri tilanteissa. Kuviin on piirretty myös k-ε mallilla saatu jakavan virtaviivan sijainti. Kuvista havaitaan, että kun toimintaparametrin G_f arvo kasvaa, siirtyy jakava virtaviiva

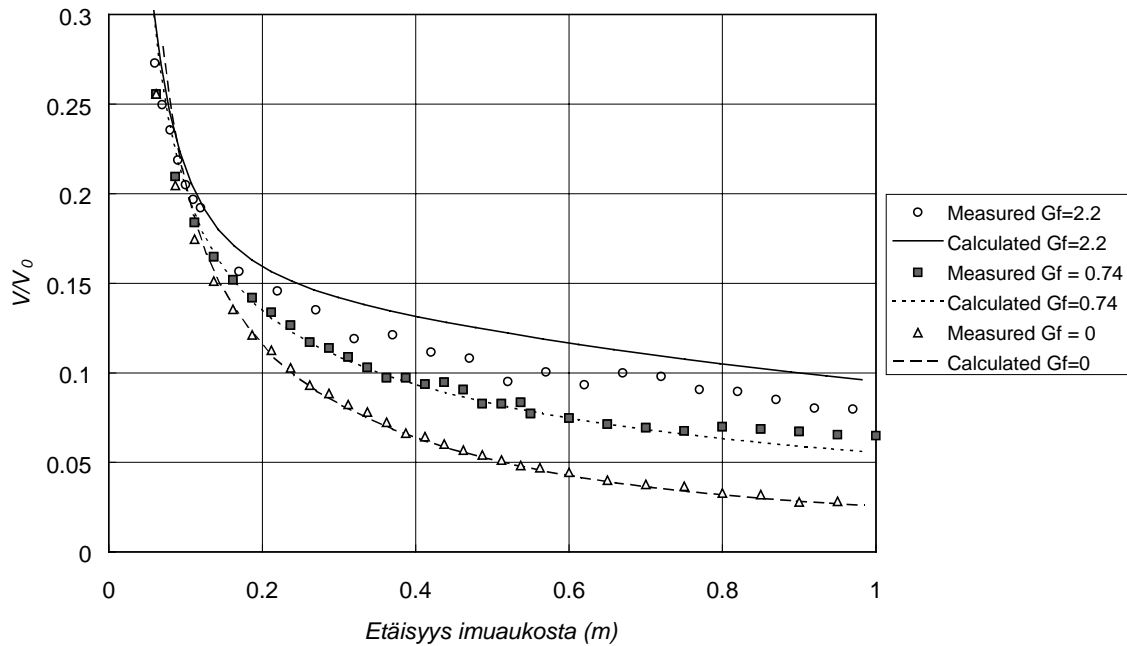


Kuva 12. Mitatut sieppaustehokkuudet tapauksessa $G_f = 2.2$.

kohti vaakatasoa. Periaatteessa jakava virtaviiva vastaa käyrää, jolla sieppausasteen arvo on 50 %. Kuten kuvista nähdään, laskentatulokset vastaavat melko hyvin mitattuja arvoja.

Tulokset osoittivat, että molemmat mallit ennakoivat hyvin virtauskenttää tilanteessa, jossa parametrin G_f arvo on optimaalisella alueella. Matemaattinen malli ei tosin laske oikein virtausnopeuksia suihkun alueella, mutta tällä ei ole merkitystä ratkaisun toimivuuden kannalta. Matemaattinen malli ei myöskään kykene ennakoimaan suihkun taipumista, mikä puolestaan ratkaistiin melko hyvin k - ε -mallilla. Laskentatarkkuus heikkeni molemmilla malleilla puhallussuihkun liikemäärän kasvaessa. Matemaattinen malli yliarvioi nopeuksia jonkin verran enemmän kuin k - ε -malli.

Puhalluksen vaikutus imuaukon keskiakselin virtausnopeuksiin on esitetty kuvassa 13. Tuloksista nähdään, että mitatut ja lasketut arvot vastaavat hyvin toisiaan toimintaparametrin arvoilla 0 ja 0.74. Sen sijaan tilanteessa, jossa $G_f = 2.2$ mitatut nopeudet ovat selvästi alhaisempia kuin ennustetut. Tämä saattaa johtua siitä, että virtaus suuremmilla toimintaparametrin arvoilla ei ollut enää kaksidimensionaalista. Puhalluksen avulla voidaan kasvattaa nopeuksia varsinkin suuremmilla etäisyyksillä imuaukosta. Tyypillisesti käytettyjä kontrollinopeuksia vastaavat etäisyydet kasvavat toimintaparametrin arvosta riippuen 2-3 -kertaiseksi ilman, että poistoilmavirtaa lisätään. Tämä on huomattava parannus kohdepoistojen toiminnalle ja on ilmeistä että ratkaisulla tulee olemaan käyttöä erityyppisten epäpuhtauslähteiden hallinnassa.



Kuva 13. Mitatut ja lasketut imuaukon keskiakselin nopeudet eri tilanteissa.

Laskelmissa ongelmaksi muodostui kapean puhallussuihkun (puhallusraon leveys = 3.4 mm) sekä imun samanaikainen mallintaminen. Suihkun luotettava ratkaisu edellyttää että laskentahilapisteitä on oltava vähintään kaksi suihkun yli. Tämä johtaa kuitenkin hankaliin laskentakoppien muotoihin kun etäisyys suihkusta kasvaa aiheuttaen konvergenssiongelmiä ja lisäksi tarvittavien iteraatioiden lukumäärää. Tämän vuoksi tutkittiin mahdollisuuksia mallintaa tilannetta siten, että suihkun leveyttä kasvatettiin samalla kun sen liikemäärä pidettiin vakiona. Tämä johtaa siihen että aivan suuttimen läheisyydessä suihkun aksiaaliset nopeudet aliarvioidaan ja leveys yliarvioidaan. Todelliseen tilanteeseen verrattuna erot kuitenkin vähenevät etäisyyden kasvaessa ja n. 10 suihkun leveyden mitan päässä suuttimesta erot jäävät pieneksi. Näiden approksimaatioiden avulla laskenta-aikaa ja siten myös laskentakustannuksia voitiin alentaa huomattavasti, kuten taulukosta 1 havaitaan.

Taulukko 1. Laskentaan käytettyjä CPU aikoja.

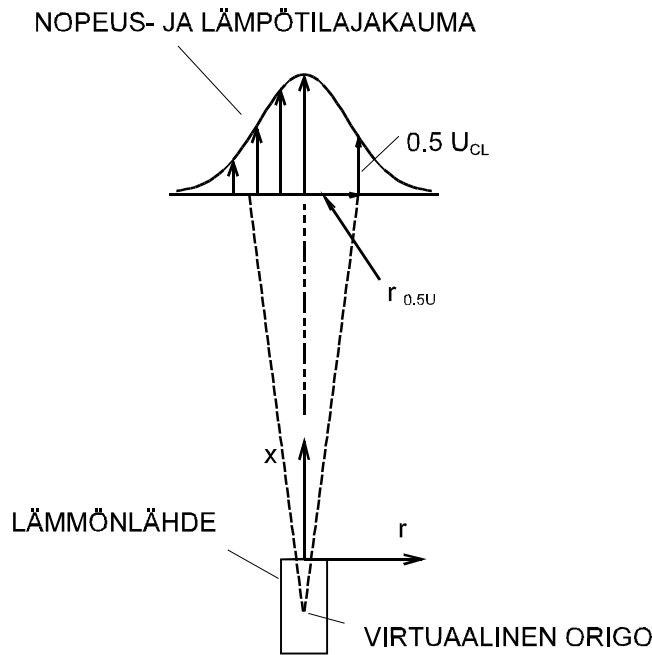
Laskentaverkko	Suihkuraon leveys (mm)	CPU aika (min)
52 x 60	20	2
62 x 70	10	11
102 x 101	3.4	143

3.2 Pistemäisen lämmönlähteen synnyttämä virtaus- ja lämpötilakenttä

Hankkeessa laskettiin häiriöttömässä tilassa olevan lähes pistemäisen lämmönlähteen aiheuttama virtaus- ja lämpötilakenttä. Perustapauksen luotettava mallintaminen on välttämätön edellytys monimutkaisempien tapausten kuten yhdistetyn imun ja lämmönlähteen mallinnukselle. Työssä tarkasteltiin avoimien reunojen sijainnin vaikutusta tuloksiin, etsittiin sopiva laskentaverkko ja laskettiin sekä puhtaan konvektiovirtauksen että nostesuihkun virtauskenttää. Laskenta tehtiin aksiaalisymmetrisenä olettaen vakiopaine avoimilla reunoilla. Puhtaan konvektiovirtauksen tapauksessa annettiin lähtöarvoina sylinterimäisen lämmönlähteen lämpövirran tiheys kuumen kappaleen pinnalla. Nostesuihkun tapauksessa annettiin puolestaan lämpötila ja virtausnopeus. Ympäristön oletettiin olevan tasalämpöinen. Laskennan tuloksia verrattiin laser-Doppler anemometrillä tehtyihin pluumin nopeusmittauksiin sekä kirjallisuudesta löydettyihin arvoihin. Tulokset on esitetty yksityiskohtaisesti raportissa VAL B310.

Laskenta tehtiin suurten Reynoldsin luvun $k-\epsilon$ mallilla kokeillen turbulenssimallin vakioiden vaikutusta tuloksiin. Viime aikoina on tehty paljon työtä nostevirtauksiin parempien sopivien mallien kehittämisessä. Mallien ongelmina ovat kuitenkin suppenemisvaikeudet sekä yksinkertaisempia malleja huomattavasti suuremmat laskentahilat laskentaverkosta riippumattomien tulosten aikaansaamiseksi. Näistä ongelmista johtuen ilmanvaihdon käytännön ongelmien ratkaisuisa käytetään vielä yleisesti kaksisyhtälömalleja. Aiemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että esimerkiksi C_μ on $k-\epsilon$ mallissa optimoitu isotermisten rajavirtausten perusteella ja on todennäköistä, että perustellumpi arvo antaa parempia tuloksia nostevirtausten laskennassa. Yksityiskohtaiset mittaustulokset antavat mahdollisuuden verrata laskenta- ja mittaustuloksia keskenään ja valita parhaiten todellisuutta vastaavat arvot nostevirtausten laskennassa.

Nostevirtauksissa liikkeellepaneva voima on pluumin ja ympäristön välinen tiheysero. Ilman virtaukset ovat voimakkaasti pyörteileviä ja nopeudet sekä lämpötilat vaihtelevat ajan mukana. Mittaamalla riittävän pitkän ajan voidaan kuitenkin todeta, että keskimääräinen nopeus- ja lämpötilajakauma pluumissa noudattaa normaalijakaumaa ja että pluumi leviää lineaarisesti lämmönlähteen yläpuolella (kuva 14). Periaatteessa mikä tahansa lämmönlähde voidaan käsitellä pistemäisenä lähde-terminä, kun etäisyyden suhde lämmönlähteen kokoon on riittävän suuri.



Kuva 14. Pistemäisen lämmönlähteen synnyttämä keskimääräinen virtauskenttä.

Similaarisella alueella voidaan aksiaalisymmetrisen pluumin keskimääräistä nopeus- ja lämpötilajakaumaa kuvata seuraavasti:

$$U = A_U \left(\frac{F}{x} \right)^{1/3} \exp\left(-B_U \left(\frac{r}{x} \right)^2\right) \quad (3)$$

$$g\beta\Delta T = A_T F^{2/3} x^{-5/3} \exp\left(-B_T \left(\frac{r}{x} \right)^2\right), \quad (4)$$

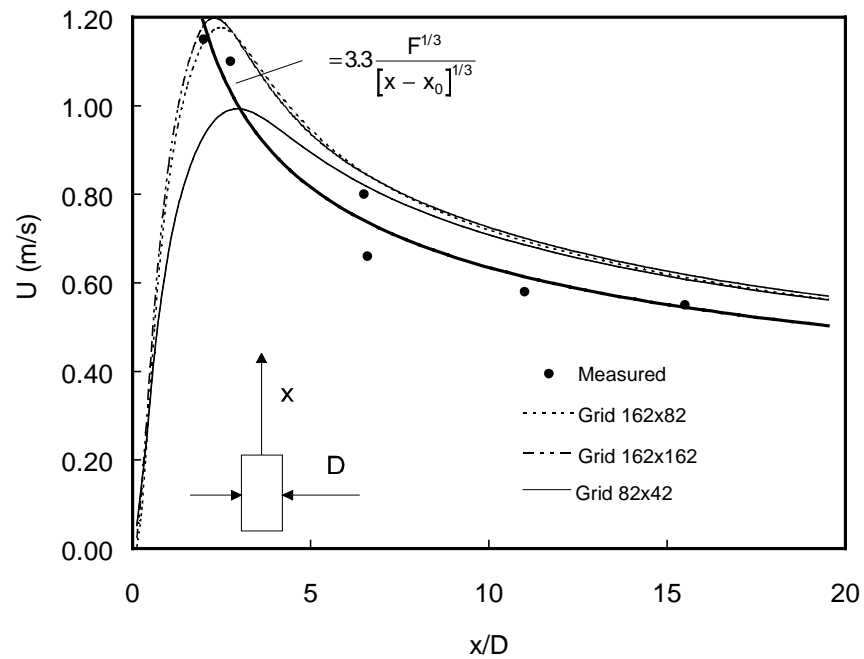
missä A_U , B_U , A_T ja B_T ovat vakioita, x on pystysuora etäisyys lämmönlähteestä ja β on tilavuuden lämpötilakerroin. F on lähteen nosteen voimakkuutta kuvaava tekijä, joka määritellään

$$F = \int_0^\infty gU \frac{\Delta\rho}{\rho_a} dA \quad (5)$$

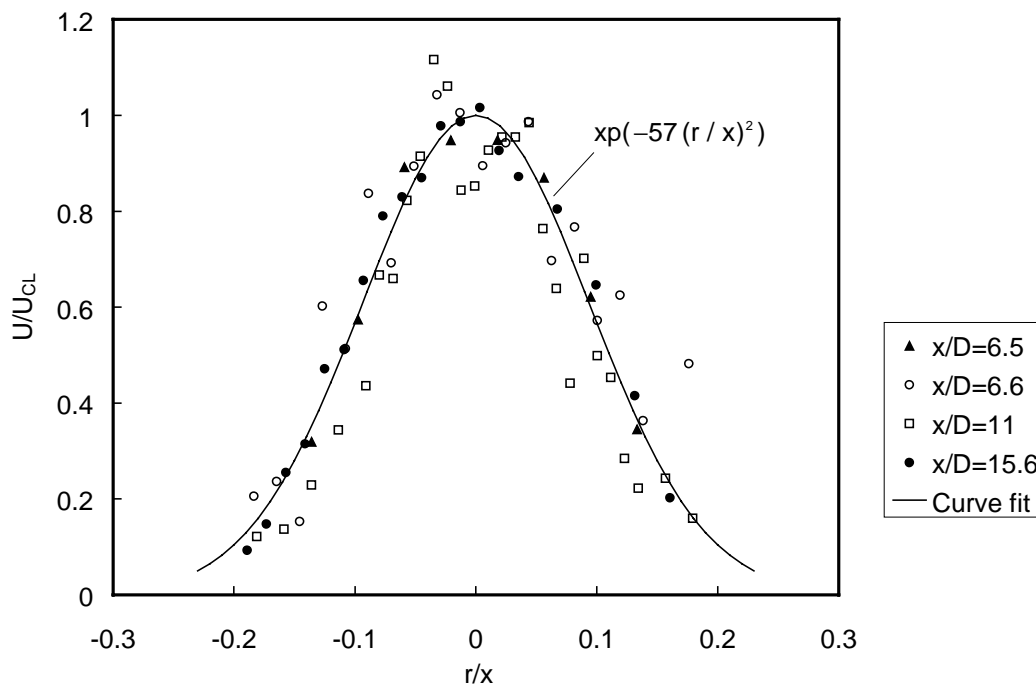
Nostevirtauksessa leikkausjännitystermi on merkittävin turbulenttinen jännitys liikemääräyhtälössä ja sen tarkka mallintaminen on välttämätöntä nostevirtauksien luotettavaksi laskennaksi. Laskennassa kokeiltiin useita eri vakioiden arvoja ja todettiin, että arvoilla $C_\mu = 0.11$ ja $Pr_T = 0.85$ saavutettiin paras leikkausjännityksen yhtäpitävyys kokeellisten arvojen kanssa. Tämä heijastui myös parempana yhtäpitävyytenä mitattujen ja laskettujen nopeuksien välillä.

Kuvassa 15 on esitetty pluumin keskiakselin keskimääräinen laskettu ja mitattu nopeus. Puhtaan pluumin tapauksessa nopeus keskiakselilla on nolla lämmönlähteen pinnalla. Nopeus lisääntyy kuitenkin lyhyellä matkalla kunnes se alkaa vähentyä. Laskentaverkosta riippumattoman tuloksen saavuttamiseksi laskentaverkon tiheyden tulee olla melko suuri (162 x 82 laskentakoppia). Vähäisemmälläkin laskentaverkon tiheydellä voidaan kuvata nostevirtauksen käyttäytymistä

hyvin, kun etäisyys lämmönlähteestä kasvaa, mutta välittömästi lämmönlähteen yläpuolella vaaditaan paljon laskentapisteitä luotettavien tulosten saamiseksi.



Kuva 15. Lasketut ja mitatut keskiakselin nopeudet pluumin yläpuolella.



Kuva 16. Mitatut nopeusprofiilit pluumin yläpuolella. Nopeudet on skaalattu pluumin keskiakselin nopeuden U_{CL} suhteen.

Vaikka pluumien yleisestä käyttäytymisestä ollaan melko yksimielisiä, kaavojen 3 ja 4 vakioiden suuruuksille on eri tutkimuksissa saatu vaihtelevia arvoja. Taulukossa 2 on verrattu laskennan ja mittausten antamia tuloksia kirjallisuudesta löytyneisiin arvoihin. Useimmat taulukon mittaus-tuloksista on saatu nostesuihkuilla tehdyillä mittauksilla. Mittaustuloksissa on huomattavia vaihteluita, mutta tämän tutkimuksen LDA-mittaukset ovat melko hyvin yhteensopivia Shabbirin ja Georgen huolellisesti tehtyjen ja hyvin dokumentoitujen mittausten kanssa. Tavanomaisilla vakioilla k - ϵ malli yliarvioi keskiakselin nopeuden n. 20 %. Modifioituilla vakioilla nopeuden yliarviointi on n. 10 % LDA-tuloksiin verrattuna. Vakioiden arvot eivät vaikuta kovinkaan paljoa lämpö-tilajakauman ennustamiseen.

Taulukko 2. Laskenta- ja mittaustulosten vertailu kirjallisuudesta löytyneisiin arvoihin.

Lähde	Menetelmä	A_U	B_U	$r_{0.5U}$	A_T	B_T	$r_{0.5T}$
Rouse et al. (1952)	siipipyöräänemometri ja termoparimittaus	4.7	96	0.084	11	71	0.095
George et al. (1977)	kuulmalanka-ane-mometrimittaus	3.4	55	0.112	9.1	65	0.104
Papanicolaou and List (1988)	LDA, LIF -mittaus	3.85	90	0.088	14.3	80	0.093
Shabbir and George (1994)	kuumalanka-ane-mometrimittaus	3.4	58	0.107	9.4	68	0.10
Ogino et al. (1980)	kuumafilmianemo-metrimittaus	3.4	-	-	9.4	-	-
Tämä tutkimus	k - ϵ laskenta $C_\mu=0.09$, $Pr_T=0.7$	4.1	66	0.102	12.4	68	0.10
	k - ϵ laskenta $C_\mu=0.11$, $Pr_T=0.85$	3.7	58	0.108	12.2	70	0.10
	LDA-mittaus	3.3	57	0.105	-	-	-

Pluumin eri korkeuksilta mitattu aksiaalinopeuden profiili on esitetty kuvassa 16. Tuloksista havaitaan, että pluumimittauksille tyypillisestä hajonnasta huolimatta keskimääräinen nopeus-jakauma voidaan kuvata hyvin normaalijakauman avulla. Laskenta antoi melko hyvin mittausten kanssa yhtäpitäviä nopeusprofiileja.

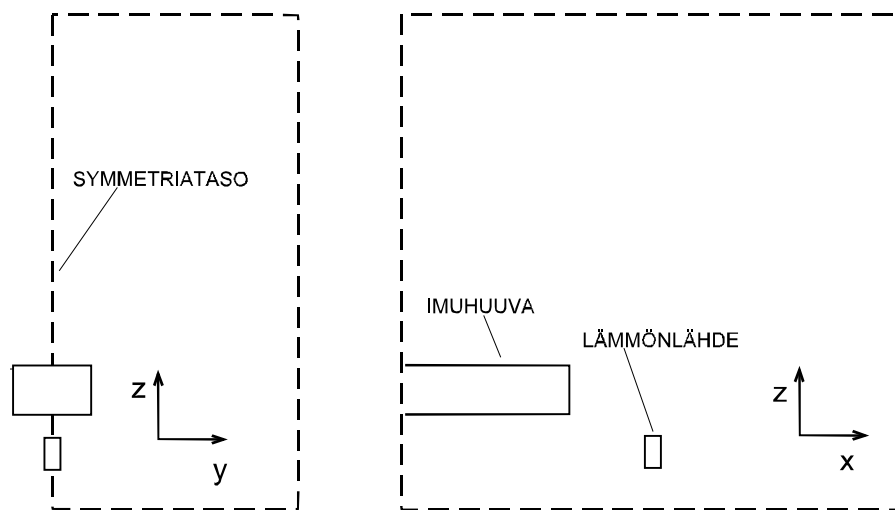
Vaikka aikakeskiarvotetut nopeus- ja lämpötilakentät kyetään laskemaan k - ϵ mallilla kohtuullisen tarkasti, on aksiaalisuuntaisen turbulenssin laskennassa selviä puutteita. Nostetuottotermillä ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta tuloksiin. Käytetyssä kaksiyhtälömallissa oletetaan turbulenssin olevan isotrooppista, mitä se ei nostevirtauksissa ole. On ilmeistä, että tulevaisuudessa tullaan käyttämään kehittyneempiä turbulenssimalleja näiden virtausten simuloinnissa. Kuitenkin k - ϵ mallia käytetään vielä yleisesti joten sen tarkkuuden rajoitukset on syytä tuntea nostevirtausten laskennassa.

3.3 Yhdistetyn imun ja nostevirtausten laskenta

Teollisuusilmanvaihdon sovellutuksissa on yleistä, että epäpuhtauslähde on myös lämmönlähde. Tällöin kohdepoiston mitoittaminen edellyttää, että yhdistetty imun ja pluumin virtaus kyetään ratkaisemaan luotettavasti.

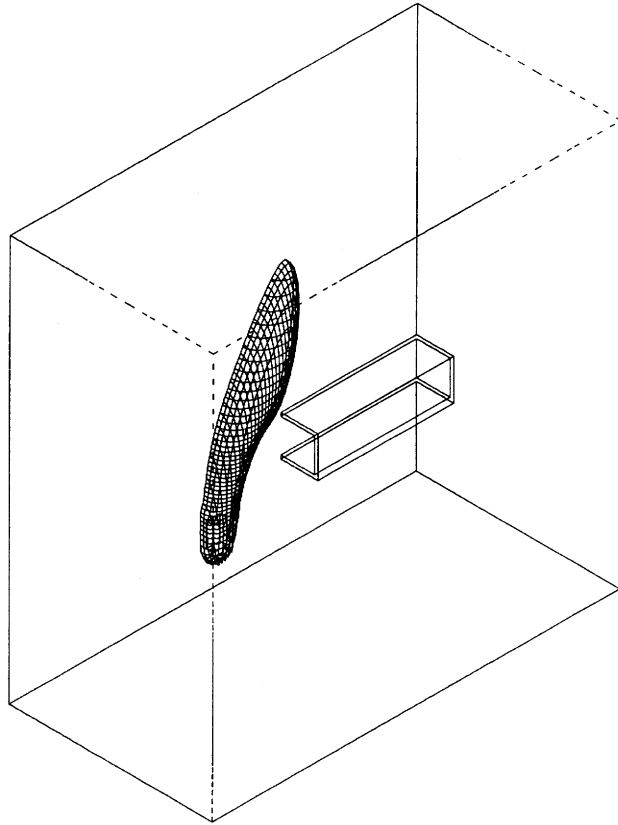
Tavallisin käytännössä esiintyvä tapaus on hitsauksen kohdepoisto, missä imu tapahtuu tyypillisesti sivuttain, jolloin virtaus ei ole enää aksiaalisymmetrinen. Muita vastaavia tapauksia ovat valimoiden senkkojen ja valujen sekä muiden kuumien epäpuhtauslähteiden kohdepoistot. Kohdeimun tulee olla riittävän voimakas, jotta se kykenee taivuttamaan nousevan pluumin kohti imuaukkoa ja sieppaamaan pluumin mukana kulkeutuvat hitsauksessa muodostuvat hiukkas- ja kaasumaiset epäpuhtaudet.

Tutkimuksessa mallinnettiin suorakulmaisen vaakaimun ja imuaukon edessä olevan lämmönlähteen virtauskenttä. Tulokset todennettiin LDA mittauksin sekä merkkiainemittauksin. Laskentatilanteen periaate on esitetty kuvassa 17. Lähtöarvoina annettiin lämpövirran tiheys lämmönlähteen pinnalla sekä imunopeus imukanavassa. Avoimilla reunoilla annettiin vakio painereunaehto. Laskenta tehtiin kahdella eri laskentaverkon tiheydellä (32 x 21 x 36 sekä 62 x 32 x 62 laskentakoppia). Laskennassa imun ja lämmönlähteen etäisyyttä vaihdeltiin siten että se oli sama kuin mittauksissakin.

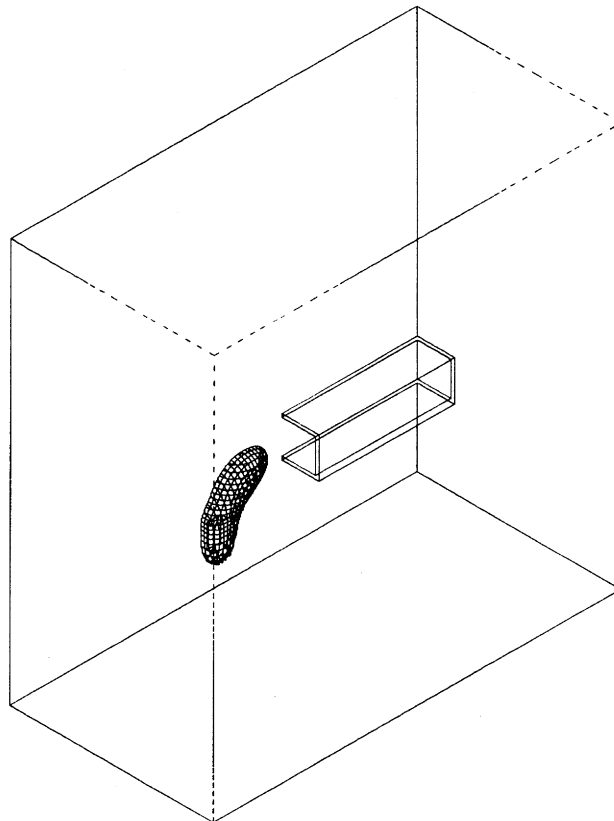


Kuva 17. Mallinnetun tapauksen periaate ja laskenta-alue.

Ilman virtauskentän ratkaisemisen jälkeen sieppausaste laskettiin päästämällä epäpuhtauslähteen kohdalta suuri määrä pieniä hiukkasia ja seuraamalla niiden kulkeutumista. Turbulentissa virtauskentässä ilman nopeusheilahtelut aiheuttavat hiukkasten dispersiota, jolloin voidaan tutkia satunnaisten nopeusheilahtelujen vaikutusta hiukkasten kulkuratoihin. Sieppausaste määritettiin jakamalla kohdepoiston imukanavaan päätyneiden hiukkasten lukumäärä päästölähteessä vapautettujen hiukkasten lukumäärällä (1000 kpl). Yksityiskohtaiset tulokset on esitetty raportissa VAL B312.

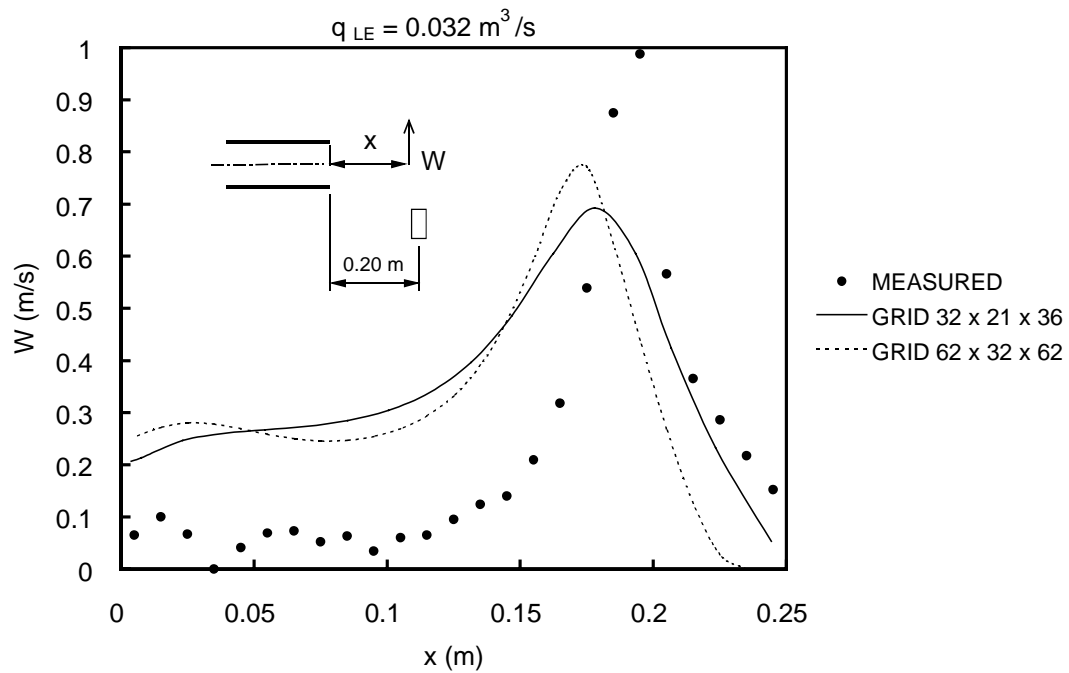


Kuva 18. Laskettu tasatiheyskäyrä poistoilmavirralla $0.032 \text{ m}^3/\text{s}$.

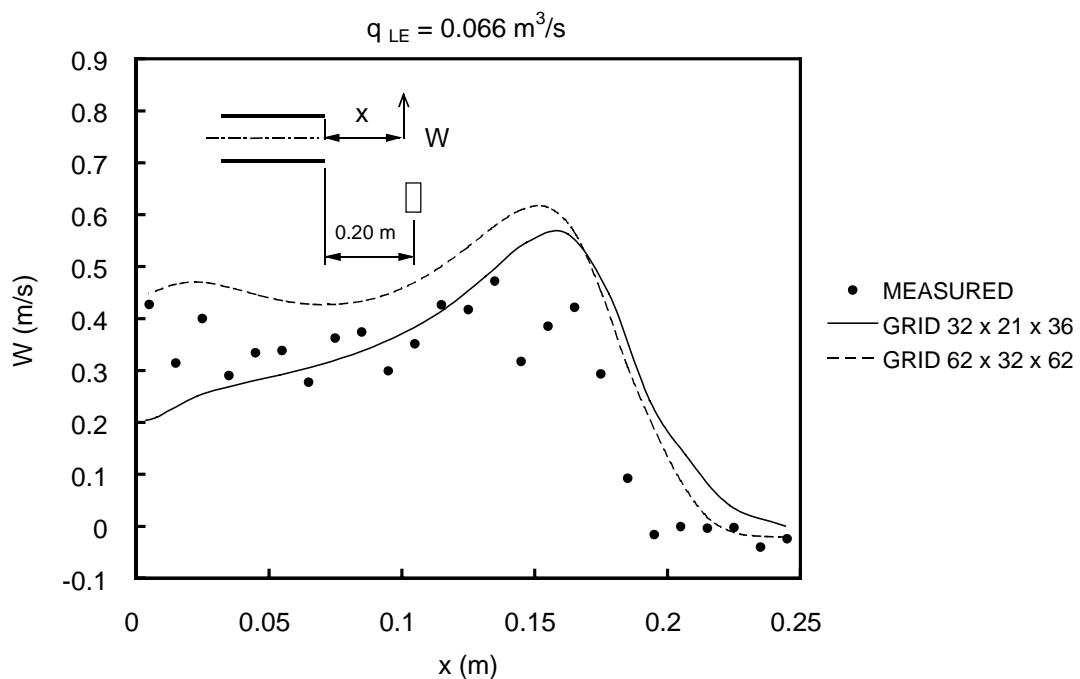


Kuva 19. Laskettu tasatiheyskäyrä poistoilmavirralla $0.10 \text{ m}^3/\text{s}$.

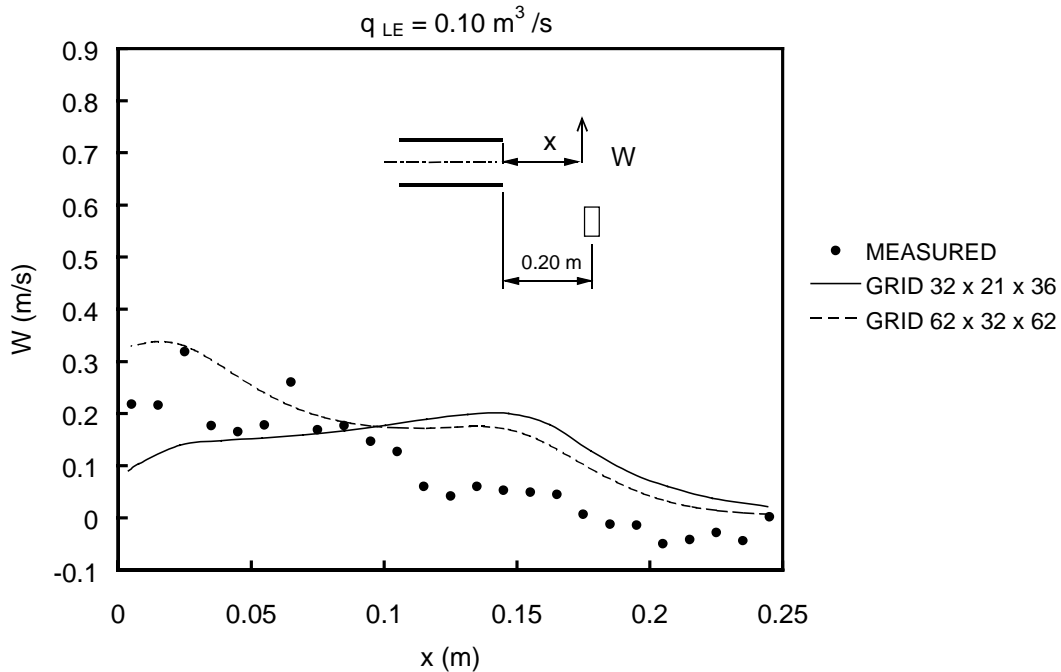
Kuvissa 18 ja 19 on esitetty laskettu pluumin käyttäytyminen kahdella eri poistoilmavirran arvolla. Pienemmällä ilmavirralla pluumi taipuu hiukan kohdepoiston suuntaan mutta jatkaa nousuaan ja kulkeutuu kohdepoiston ohi. Suuremmalla ilmavirralla imu on riittävän voimakas sieppaamaan koko pluumin.



Kuva 20. Laskettu ja mitattu pystynopeusjakauma poistoilmavirralla $0.032 \text{ m}^3/\text{s}$.



Kuva 21. Laskettu ja mitattu pystynopeusjakauma poistoilmavirralla $0.066 \text{ m}^3/\text{s}$.

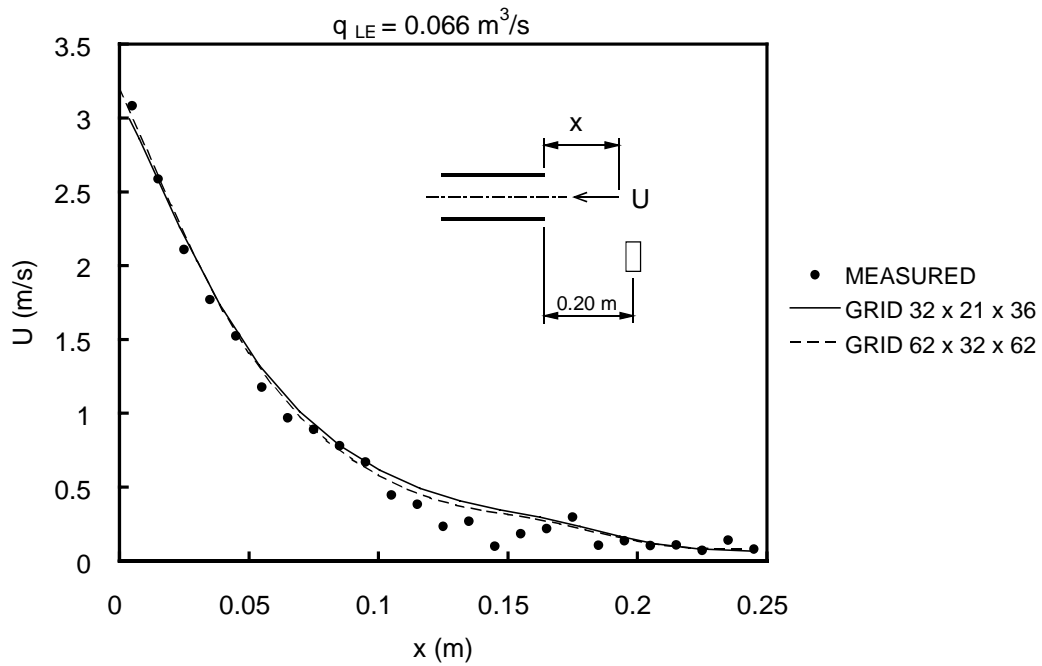


Kuva 22. Laskettu ja mitattu pystynopeusjakauma poistoilmavirralla $0.10 \text{ m}^3/\text{s}$.

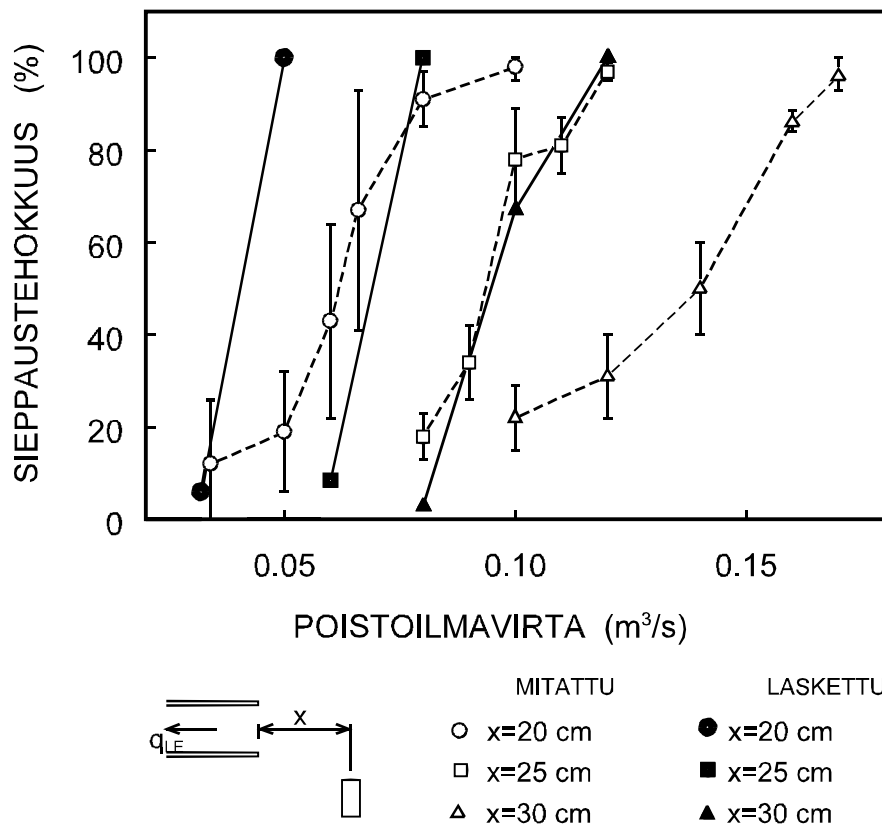
Esimerkki mitatuista ja lasketuista pystynopeuksista imaukon keskiakselilla eri poistoilmavirroilla on esitetty kuvissa 20 - 22. Ilmavirrat vastaavat mitattuja sieppaustehokkuuksia 10, 64, ja 98 %. Kuvista havaitaan selvästi ilmavirran kasvattamisen vaikutus pluumin käyttäytymiseen. Pienimmällä ilmavirran arvolla pluumin nopeus on suuri verrattuna imun synnyttämään nopeuskenttään ja pluumi näyttäisi karkaavan imun ohi, minkä myös merkkiainemittaukset vahvistivat. Suuremmilla imunopeuksilla pluumi taipuu kohti imuaukkoa.

Laskennan avulla kyettiin ennakoimaan keskimääräiset pystynopeuskomponentit melko hyvin. Pienimmällä imuilmavirralla pystynopeus kuitenkin aliarvioitiin jonkin verran (kuva 20). Tämä johtuu siitä, että laskentaverkon tiheydestä riippumaton tulosta ei saavutettu käytettävissä olevalla konekapasiteetilla.

Vaakasuntainen nopeusjakauma kyettiin ennakoimaan melko hyvin. Esimerkki mitatuista ja lasketuista nopeuksista on kuvassa 23. Vaakanopeuden ennakoinnissa ei käytetyillä laskentaverkon tiheyksillä ollut merkittävää vaikutusta. Suurimmat erot olivat lämmönlähteen yläpuolella, missä mitattujen nopeuksien hajonta oli myös suuri.



Kuva 23. Laskettu ja mitattu vaakanopeus imuaukon keskiakselilla poistoilmavirralla $0.066 \text{ m}^3/\text{s}$.



Kuva 24. Lasketut ja mitatut sieppaustehokkuudet poistoilmavirrasta riippuen.

Lasketut ja mitatut sieppaustehokkuudet on esitetty kuvassa 24. Mittausten keskihajonta on esitetty pystysuorilla viivoilla. Sieppaustehokkuus riippuu sekä poistoilmavirrasta sekä epäpuhtauslähteen ja imuaukon välisestä etäisyydestä. Tulokset ovat samansuuntaisia, mutta laskennallisesti saadut sieppaustehokkuudet olivat selvästi korkeammat kuin mitatut. Laskenta antoi poistoilmavirtoja, jotka olivat 40 - 50 % alhaisempia kuin tehokkaaseen poistoon olisi vaadittu. Erot voivat johtua turbulენტisten nopeusheilahtelujen ja siten epäpuhtauksien dispersion aliarvioinnista sekä siitä, että laskennassa ei saavutettu laskentaverkon tiheydestä riippumatonta ratkaisua. Myös koehuoneessa esiintyneet häiriövirtaukset ovat osaltaan voineet vaikuttaa tulosten välisiin eroihin.

Kaikenkaikkiaan vaikka nopeusheilahteluja ei laskettukaan kovin hyvin, kyettiin keskimääräiset nopeudet ennakoimaan tyydyttävällä tarkkuudella. Imun ja nostevirtausten vuorovaikutus on monimutkainen virtaustapaus ja sen luotettava ratkaisu vaatii tiheää laskentaverkkoa ja siten suurta konekapasiteettia.

4 Yhteenveto ja jatkotutkimustarpeet

Puhalluksella tehostettu imu lisää kohdepoiston tehollista vaikutusalueetta 2-3 -kertaiseksi pelkkään imuun verrattuna. Tämä on huomattava parannus verrattuna nykyisiin, pelkkään imuun perustuviin ratkaisuihin. Tehostuneen imun ansiosta voidaan hallita aiempia laajempia epäpuhtauslähteitä tehokkaasti ja energiataloudellisesti. Puhallussuihkun indusoimien ilmavirtausten avulla voidaan myös johtaa työvaiheissa tai prosesseissa syntyvät epäpuhtaudet työntekijöistä pois päin, jolloin työntekijöiden altistumista voidaan vähentää. Työssä kehitettyjen laskentamallien avulla voidaan puhalluksella tehostettuja imuratkaisuja mitoitaa tarkasti ja luotettavasti.

Tuloksia tulisi hyödyntää kehittämällä puhalluksella tehostettuja imuratkaisuja erilaisiin käytännön kohteisiin. Erityisesti niitä pitäisi soveltaa epäpuhtauslähteisiin, joita ei kyetä hallitsemaan tavanomaisilla kohdepoistoratkaisuilla.

Työssä on saatu valmiuksia sekä nostevirtauksien että pluumin ja imuvirtausten yhdistelmän laskentaan mistä on hyötyä tehokkaiden kohdeilmanvaihdon suunnittelussa ja mitoituksessa. Laskentatulosten verifiointiksi on hankittu luotettavaa mittausdataa.

Virtauslaskennan tarkkuutta rajoittaa turbulenssin mallintaminen. Kuitenkin käytännön tapauksissa tärkeämpi rajoitus saattaa tulla laskentakapasiteetin riittämättömyydestä sekä luotettavien reunaehtojen määrittämisen ongelmista.

Virtauslaskenta on tulevaisuuden työkalu ja sen mahdollisuudet kasvavat jatkuvasti tietokoneiden laskentakapasiteetin kehittymisen myötä. Laskenta helpottaa optimaalisten ilmanvaihtoratkaisujen löytämistä ja sitä tulisikin käyttää entistä yleisemmin teollisuusilmanvaihdon ongelmien ratkaisuun. Laskelmissa joudutaan kuitenkin tekemään yksinkertaistuksia joiden vaikutusta tulosten tarkkuuteen ei tiedetä. Siksi mallien kehittäminen ja niiden toimivuuden testaus tarvitsee jatkotutkimusta.

5 JULKAISULUETTELO

Sisäiset raportit

Kulmala, I. Calculation of turbulent buoyant plumes with the k- ϵ closure. Report VAL B310, 25 p, Tampere 1998.

Kulmala, I. Numerical simulation of a local exhaust hood for a hot contaminant source. Report VAL B312, 17 p, Tampere 1998.

Kulmala, I. Jet enhanced exhaust hood. Report VAL B317, 37 p, Tampere 1998.

Kulmala, I. Kohdeilmavaihdon tehokkuuden parantaminen puhallussuihkujen avulla. Raportti VAL B330, 24 s., Tampere 1998.

Konferenssiesitelmät

Kulmala, I. Calculation of vertical buoyant plumes, VENT'97 Proc., Ottawa 1997.