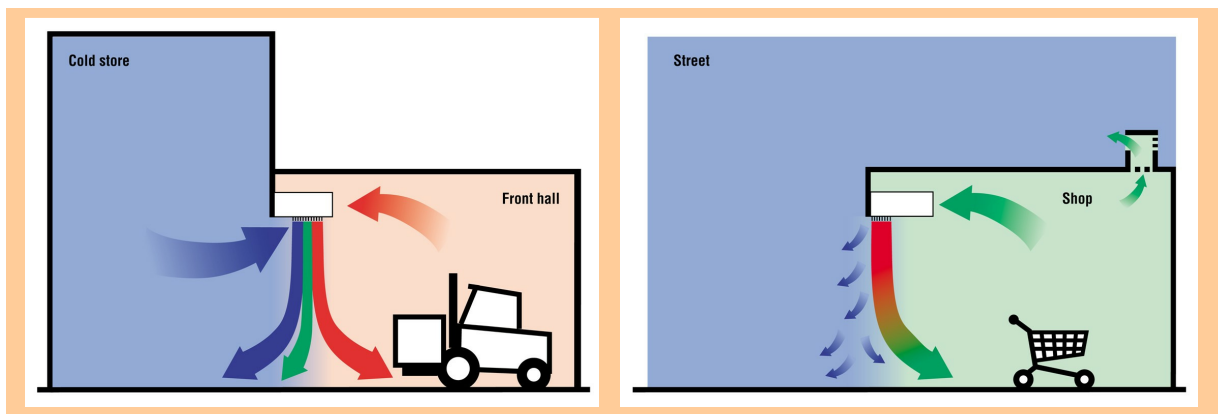


Tietokonesimulaatit ilmaverho tuotteiden kehittämiseksi

Comfort- ilmaverhot ja kylmävaraston ilmaverhot



Ir. B.E. Cremers

Julkaistu TVVL - Magazinessa, Elokuu 2000

Tietokonesimulaatiot ilmaverhotuotteiden kehittämisen tueksi

Laaja-alainen, käytännön testien, tietokonesimulaatioiden ja laskelmien kautta tapahtuva tutkimustyö edeltää Biddlen ilmaverhotuotteiden kehitystä. Käytännön testit ovat välttämättömiä tarkasteltaessa kuinka riippuvainen ilmaverhon toiminta on sen ilmannopeudesta ja ympäristöolosuhteista. Kaksi asiaa on kuitenkin esteenä käytännön kokeissa. Ensinnäkin; ulkolämpötila vaihtelee vuoden aikana. Ilmaverhon ihanteellisen toiminnan löytäminen vaihtelevissa olosuhteissa vaatii lukemattomia kokeita vuoden aikana. Toisaalta ilmaverhon toimivuutta kuvataan mm. ulko- oven kautta tapahtuvan energiahukan määrällä. Käytännössä tätä energian menetystä on vaikea mitata, sillä se vaatii monia lämpötila- ja nopeusmittauksia ovensuussa.

Tietokone simulaatiot ovat arvokas lisä käytännön kokeille. Suunnittelija voi simulaatioiden avulla saada aikaan ilmaverhon ihanteellisen toiminnan laajasti vaihtelevien olosuhteiden vallitessa. Eri parametreja kuten ilmaverhon ympäristö-olosuhteet sekä heittokuvio voidaan asettaa tarkasti. Tämän lisäksi ovensuun energiahävikki on mahdollista laskea tarkasti, jolloin ilmaverhon toiminta voidaan ilmaista hyötysuhteena.

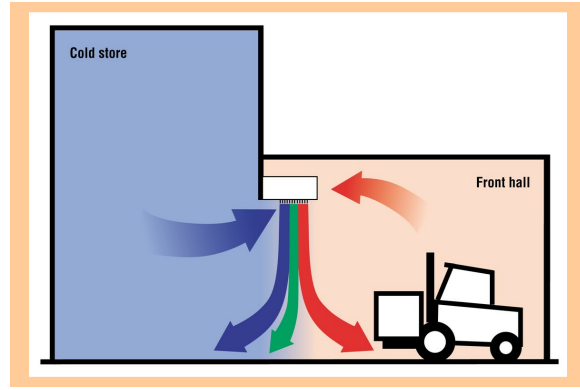
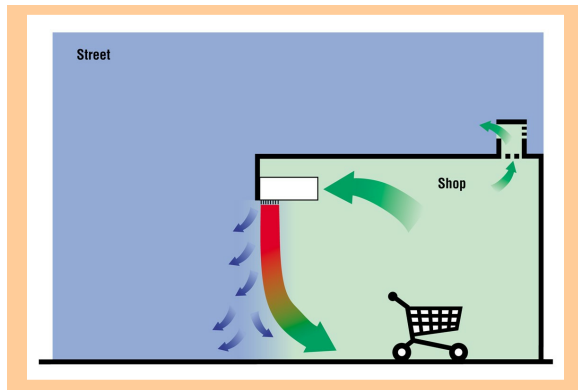
TEKNINEN PERIAATE

Liiketilojen ilmaverhot

Avoimet ovet ovat asiakasta kutsuvia ja saattavat lisätä myyntiä. Valitettavasti avoimista ovista tulee myös valituksia vedosta sisällä olevilta ihmisiltä, ja lämpöhukasta kiinteistön omistajalta. Comfort- ilmaverho voi olla näiden ongelmien ratkaisu. Ilmaverhon tekninen periaate perustuu luonnolliseen konvektioon ja ilmanvaihdon fysiikan lakeihin. Liiketilojen ja kauppojen tilanteessa oletamme, että sisäilma on lämpimämpää kuin ulkoilma. Jos ovi on auki, lämmin ilma

karkaa oven yläosan kautta, kun taas kylmä ilma tulee sisään oven alaosasta. Tätä virtaustapaa (jonka ilman tiheyserot aiheuttavat) sanotaan "luonnolliseksi konvektioksi". Luonnollinen konvektio tarkoittaa ilman vaihtoa eli että ovesta sisään- ja ulospäin tuleva ilman virtaus ovat yhtä suuria. Aukot ikkunoissa ja ovissa aiheuttavat kaupassa luonnollisen konvektion. Ilma tulee sisään paikoista, joissa vastus on matalimmillaan, siis avoimesta ovesta. Toinen asia on kaupan sisälämmityksestä ja mistä tahansa mekaanisesta ilmanvaihdosta johtuva lämpimän ilman kohoaminen (savupiippu-ilmiö), jotka molemmat aiheuttavat lievän alipaineen kaupan lattia-tasolla. Näitä molempia virtaustapoja sanotan ilmanvaihdoksi. Lopputulos tästä tuuleutuksesta on ilmavirta kaupan ulkopuolelta sisälle.

Kaupan sisällä olevat ihmiset kokevat luonnollisen konvektion ja ilmastoinnin yhteisvaikutuksen kylmänä ilmavirtana, usein yhtä kiusallisena kuin veto. Comfort-ilmaverhojen tarkoituksena on poistaa tämä veto minimoiden luonnollisen konvektion ja samanaikaisesti lämmittää sisään tulevan



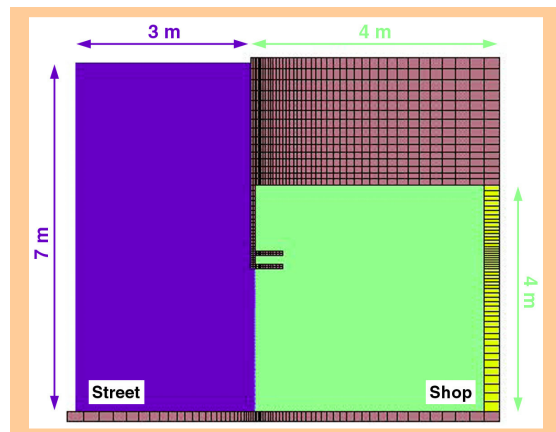
raitisilman tasolle, jolla sitä ei tunneta vetona. Vastoin aikaisempaa käsitystä ilmaverhot eivät pysty estämään ulkoilman sisääntuloa. Kaupassa esiintyy harvoin ylipainetta, mutta siinä tapauksessa tuskin on vetoisuus- ongelmia.

Yksikkö, joka oven yläpuolella imee, ulos virtaavan lämpimän ilman ja puhalttaa sen pystysuoraan alaspäin, vähentää luonnollisen konvektion minimiin. Yksikkö puhalttaa lämmintä ilman jotta sisään tuleva kylmä ulkoilma lämpenisi sisälämpötilan tasolle. Lattiatasolla ilmaverhon ilmasuihku kääntyy kauppaan siten, että yksikön lämmitystehosta hyödynnetään mahdollisimman paljon, säästäten täten tilan lämmityskustannuksia. (katso kuva 1a).

Kylmävaraston ilmaverho

Avoimet ovet kylmävarastossa tehostavat logistiikkaa ja turvallisuutta. Paljolti samoin kuin kaupan tapauksessa. Ilmanvaihto tapahtuu ilman tiheyden eroista johtuvana luonnollisena konvektiona. Kylmä ilma virtaa ulos kylmävarastosta oven alaosasta, kun taas lämmin ilma eteishallista tulee kylmävarastoon oven yläosasta. Lisäksi eteishallin lämpimän, kostean ilman ja kylmävaraston kylmän, kuivan ilman kohtaaminen aiheuttaa veden tiivistymistä ja höyryntymistä. Sumu rajoittaa näkyvyyttä ovella, sisään tuleva kosteus laskeutuu kylmävaraston seinille ja kattoon (jäätyminen) tai haihdutuslaitteisiin, jotka täytyy tämän takia sulattaa säännöllisesti.

Kuva 2: Laskentaruudukkoa käytetään Comfort ilmaverhon simulointiin



Toisin kuin kaupan tilanteessa, kylmävarastossa ei yleensä ole paine-eroa varaston lämpöeristyksestä johtuen. Tässä sovelluksessa luonnollinen konvektio on sen tähden minimoitu kahdella yhtä suurella nopeudella alaspäin suuntautuvalla ilmavirralla, toinen kylmävarastosta ja toinen eteishallista päin. Tämä minimoi lämmönvaihdon kahden hyvin erilaisen ilmatyyppin välillä.

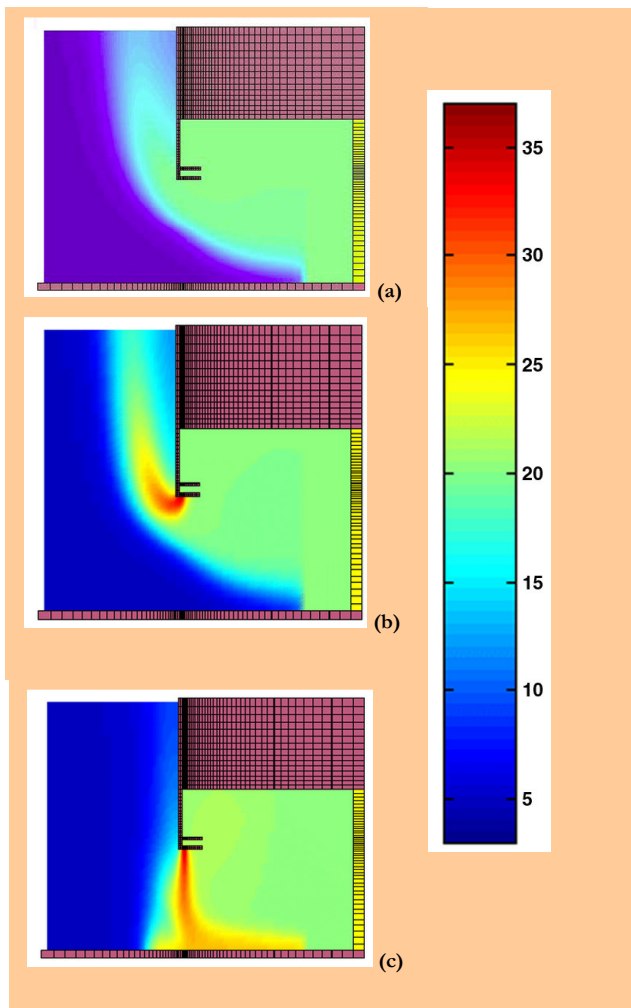
Höyryn muodostuminen estetään lämmittämällä osa kylmävarastosta imetystä kylmästä ilmasta ja vapauttamalla se keskimmäisenä ilmavirtana samalla nopeudella kuin kaksi muuta ilmavirtausta. Koska keskimäinen ilmavirta on verraten kuiva, se muodostaa puskurin eteishallista tulevaa, hyvin kosteata ilmavirtaa vastaan, välttämällä täten kondensaation (katso kuva1b).

Tämän patentoidun tekniikan yksityiskohtainen kuvaus esitettiin aikaisemmassa TVVL:n julkaisussa [1].

COMFORT- ILMAVERHO LIIKETILOISSA

Simulaatiomalli

Comfort- ilmaverho-simulaatioita tehtiin käyttämällä kolmiulotteista CFD-ohjelmaa (Computational Fluid Dynamics). Tämä tietokoneohjelma, jonka avulla käyttäjä pystyy laskemaan ilmavirtaukset, kehitettiin Groningenin yliopistossa. Jotkut laskenta-moduulit, kuten lämmönvaihto- ja ilmavirtaukset, on kehitetty nimenomaan ilmaverhojen simulointia varten. Tämä mittatilaustyönä tehty sovellus on edullinen kaupallisiin CFD- ohjelmiin verrattuna.



Lyhyesti, ohjelma laskee ja simuloi ilman virtauksen, jos tietyt raja- arvot on asetettu. Tähän on päästy jakamalla ilmavirtaus-kenttä lukuisiin pieniin elementteihin ja päättelämällä, kuinka elementit muuttuvat jos viereiset kentät muuttuvat. Vakaa (konvergoitunut) ratkaisu löytyy pienen laskenta-ajan kuluttua, kun raja-arvot on annettu. Laskenta-ruudukon jokaisen elementin laskettu lämpötila ja nopeus antaa kuvan virtauskentästä.

Kuva 2 näytetään raja- ja alkuolosuhteista Comfort- ilmaverhojen simuloinnissa, joka on poikkileikkaus kolmiulotteisesta laskentaruudukosta. Koska ilmaverho on paikallinen, ovensuun lähellä oleva ilmiö, ei virtausta ole välttämätöntä laskea koko kaupassa. Ensisijaiset laskelmat osoittivat, että sisätila, jonka mitat ovat 4 x 3 x 4 m, erillään ulkotilasta, jonka mitat ovat 3 x 3 x 7 m, riittää. Ilma voi virrata vapaasti ulkotilaan ja ulkotilasta, kun taas kaupassa seinät rajoittavat virtausta. Ilmaverho on saatu aikaan asentamalla yksikkö juuri ovensuun taakse ja yläpuolelle. Tätä yksikköä voidaan käyttää imemään ilmaa sisätilan puolelta ja puhaltamaan se alaspäin.

Simulaation alussa oven oletetaan olevan suljettu ja sisätila on lämpimämpi kuin ulkotila. Lattiaa, kattoa ja seiniä lukuun ottamatta, värit osoittavat ilman lämpötilan paikallisesti. Tässä artikkelissa pidetään selvänä hypoteettista 20°C:n asteen sisälämpötilaa ja 5°C:n asteen ulkolämpötilaa. Sisälämpötila pidetään yllä kaupan takaosasta määräämällä tietty lämpötila ja aika. Samalla tavalla ulkolämpötila on pidetty tietyllä tasolla. Ovi on 1.5 m leveä ja 2.5 m korkea. Ilmastointi ovella on lasketettu 800 m³/h. Tämä arvo perustuu ilmanvaihtotasoon 2 ja oletukseen, että rakennus tämän kaupan ympärillä on 400 m³ suuruinen.

Kuva 3: Vakaa tilanne simulaatiossa ilman ilmaverhoa (a), liian heikolla ilmaverholla (b) ja hyvin toimivalla ilmaverholla (c)

Simulaation tulokset

Tasainen ilmavirtaus on riippuvainen ilmaverhon voimakkuudesta. Kuvassa 3 on kolme erilaista tilannetta, joista kerrotaan alla.

Kuvassa 3 a näkyy, että ilman ilmaverhoa lämpö karkaa kaupasta ja kylmä ilmavirta syntyy lattiatasolle. Lämpöhukka ilman ilmaverhoa voidaan laskea myöhemmin.

Kuvassa 3 b näkyy tilanne, jossa ilmaverho on liian heikko tavoittamaan lattiataason. Kylmä ilma voi vielä tulla ulkoa keskeytyksettä, joten mitään ei ole tehty veto- ongelman poistamiseksi. Ilmaverhon tuottama lämpö karkaa kokonaan ulkotilaan. Tätä sanotaan ilmaverhon taipumiseksi ulospäin.

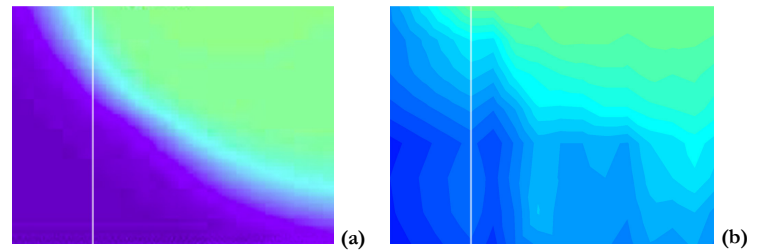
Kuvassa 3 c on oikein toimiva ilmaverho. Ilmavirta saavuttaa lattiataason, lämmittää ulkoa tulevan raittiin ilman ja poistaa veto- ongelman myymälän sisällä. Ilmaverho varmistaa hyvän ilmaston erottumisen sisä- ja ulkotilan välillä.

Liian vahvat ilmaverhot saattavat vaikuttaa epäedullisesti. Ilmaverhon osuminen lattiaan ja myöhemmin kova pyörteisyys saa ilmaverhon lämmön karkaamaan ulos. Lämpöhukka on haittapuoli, kuten voimakas ilmavirtakin ihmisten ohittaessa ilmaverhon.

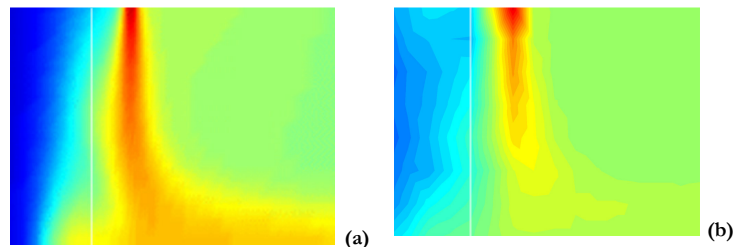
Käytännön kokeiden kanssa vertaaminen

Voidaksemme luottaa ilmaverhon vakaaseen tilanteeseen, jota tietokonesimulaatio osoittaa, laskelmia pitäisi verrata käytännön kokeisiin. Viime vuosien aikana on kehitetty aina vain parempia tapoja kartoittaa ovensuun lämpötiloja käytännön tilanteissa. Tätä tarkoitusta varten ilman lämpötiloja mitataan pystysuuntaisessa tasossa, joka on kohtisuorassa oviaukkoon nähden.

Kuvissa 4 ja 5 on vertailtu tietokonesimulaatioita ja käytännön testejä tilanteissa ilman ilmaverhoja ja vastaavasti hyvin toimivan ilmaverhon kanssa. Mittausalue on 2.50 m korkea ja 2.35 m leveä. Kokeessa ovensuu on kuvattu ohuena valkoisena viivana.



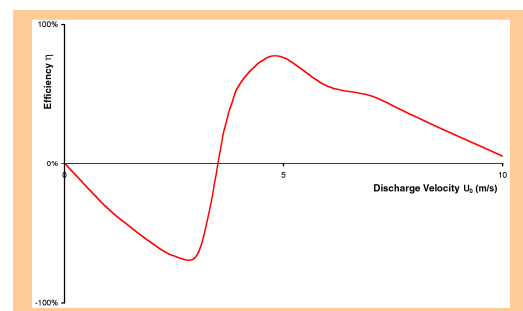
Kuva 4: Vertailu tietokonesimulaation (a) ja käytännön kokeen välillä (b) tilanteessa ilman ilmaverhoa



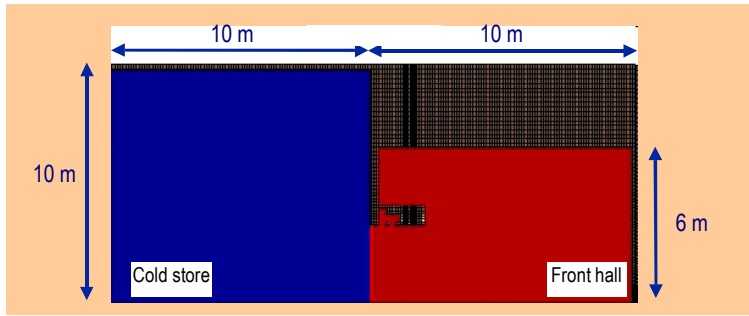
Kuva 5: Vertailu tietokonesimulaation (a) ja käytännön kokeen välillä (b) käytettäessä ilmaverhoa

Ympäristö- ja puhallus-olosuhteet ovat vertailukelpoisia, jolloin on helppo verrata lämpötilakuvia. Samaa värispektriä on myös käytetty kuvaamaan lämpötiloja.

Nämä kuvat näyttävät selvän yhdenmukaisuuden tietokonesimulaatioiden ja käytännön kokeiden välillä.



Kuva 6: Comfort-ilmaverhon teho riippuu ilmaverhon puhallin-nopeudesta



Kuva 7: Laskentakaavio, jota on käytetty kylmävaraston ilmaverhosimulaatioissa

Tilanteessa, jossa käytetään ilmaverhoa, sen muodot ovat samanlaiset, mutta tarkat lämpötilat ovat hieman erilaiset. Tämä johtuu siitä, että ilmanvaihdon voimakkuus käytännön tilanteessa on muuta kuin simulaation 800 m³/h. Käytännön tilanteissa olisi lähes mahdotonta mitata riittävästi ilmanvaihto- ilman määrää ovensuussa.

Ilmaverhon teho määritellään oven suun energiahukan vähenemisenä (prosentti-muodossa) verrattuna tilanteeseen ilman ilmaverhoa. Jos lämpimän ilman ulosvirtaus on ilmaistu Q_{out} , tehon kaava on:

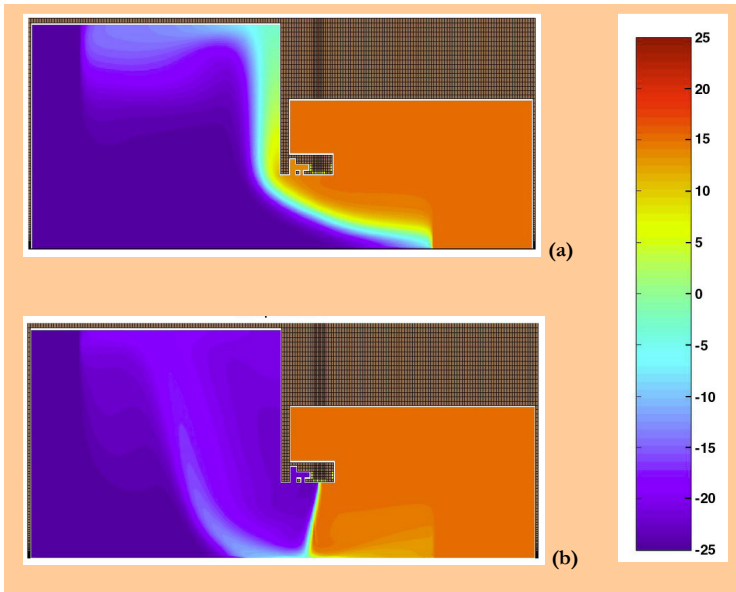
$$\eta = \left(1 - \frac{Q_{out, with air curtain}}{Q_{out, without air curtain}} \right) \times 100\%$$

Purkausnopeudesta riippuva ilmaverhon tehokkuus on laskettu ympäröivien olosuhteiden tietyn yhdistelmän simulaatioista. Tämä näkyy kuvassa 6. Määritelmän mukaisesti ilmaverholla, jolla purkausnopeus on 0 m/s, on 0%:n teho. Liian heikko ilmaverho vain menettää lämpönsä ulos. Lämpöhukka ulos on siis suurempi kuin tilanteessa ilman ilmaverhoa, luoden negatiivisen vaikutuksen. Tietyllä kriittisellä purkausnopeudella ilmaverho on riittävän vahva saavuttaakseen lattian ja välttääkseen ulospäin taipumisen.

Koska lämpö ilmaverhosta on nyt menossa sisään päin, verho säästää huomattavan määrän energiaa ja on erittäin tehokas. Tehon piirroksista näkyy myös, että liian vahva ilmaverho on vähemmän tehokas ilmavirran lattiaan törmäämisen takia.

Tästä syystä on olemassa optimaalinen purkausteho maksimitehokkuuden saavuttamiseksi. Tarkka optimaalisen purkausnopeuden arvo ja maksimaalinen tehokkuus riippuu ympäristön olosuhteista (oven korkeus, lämpötilaero sisällä/ulkona) ja muista puhallusolosuhteista (kuten ilmavirran leveys, lämpötila ja turbolenttisuus).

Biddle on parhaillaan tekemässä laajaa tutkimusta optimaalisen puhallusnopeuden ratkaisemiseksi erilaisissa olosuhteissa.



Kuva 8: Vakaa tilanne simulaatioissa ilman ilmaverhoa (a) ja simulaatioissa ilmaverhon kanssa (b)

Comfort-ilmaverhon tehokkuus

Yksi ilmaverhojen eduista on energian säästö, sillä ne vähentävät mahdollisimman paljon ulos virtaavan ilman aikaansaamaa lämmönhukkaa. Käytännössä tätä lämmönhukkaa on kuitenkin vaikea mitata. Siksi tietokonesimulaatiot tarjoavat erinomaisia vaihtoehtoja arvioida ilmaverhoja energia- näkökulmasta.

KYLMÄVARASTON ILMAVERHO

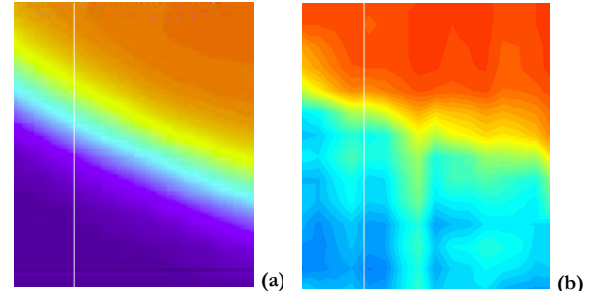
Simulaatiomalli

Kylmävaraston ilmaverhosimulaatioita on tehty käyttämällä samaa kolmiulotteista CFD- ohjelmaa, jota käytettiin Comfort-ilmaverhoilla. Monimutkaisemmat virtauskaavat tekivät pyörremallin (turbulenssi) lisäyksen välttämättömäksi, jotta sen saisi riippuvaiseksi virtauskentästä todellisessa ympäristössä. Käytännön kokemusta käytetään kehitetyn turbulenssimallin varmistukseksi. On myös kehitetty malli veden haihtumisen siirtymiseen kylmävaraston ilmaverhosimulaatiota varten.

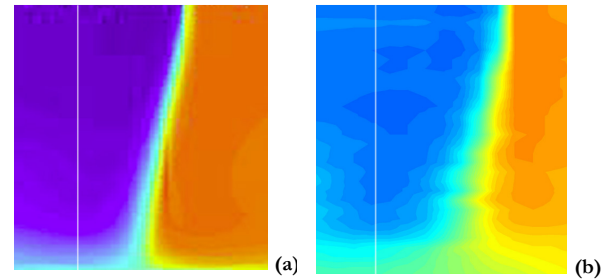
Raja- ja alkuolosuhteista kylmävaraston ilmaverhosimulaatiolle käydään läpi kuvan 7 avulla, joka on poikkileikkaus kolmiulotteisesta laskentaruudukosta. Kylmävarasto, jonka mitat ovat 10 x 9 x 9 m, on erotettu ovella eteishallista, jonka mitat ovat 10 x 9 x 6 m. Laskettavan mallin oletetaan olevan kokonaan suljettu, eli ilmaa ei voi virrata sisään eikä ulos ruudukon kautta.

Kylmävaraston ilmaverho on eteishalliin, juuri oven yläpuolelle asennetun yksikön muodostama. Tätä yksikköä käytetään imemään ilmaa kylmävarastosta ja eteishallista. Kylmävaraston ilma puhalletaan osittain lämmitettynä ja osittain lämmittämättömänä. Eteishallin ilma puhalletaan lämmittämättä. Kolme erilaista ilmavirtaa puhalletaan alaspäin samalla nopeudella.

Simulaation alussa oven oletetaan olevan suljettu. Lukuun ottamatta lattiaa, kattoja ja seiniä, värit näyttävät ilman lämpötilan paikallisesti. Tässä artikkelissa oletetaan, että kylmävaraston lämpötila on -25°C , ja eteishallin $+15^{\circ}\text{C}$. Suhteellisen kosteuden sekä kylmävarastossa että eteishallissa oletetaan olevan 80%. Ovi on 3.00 m leveä ja 3.00 m korkea.



Kuva 9: Vertailu tietokonesimulaation (a) ja käytännön kokeiden välillä (b) tilanteessa ilman ilmaverhoja



Kuva 10: Vertailu tietokone simulaation (a) käytännön kokeiden välillä (b) ilmaverhojen kanssa

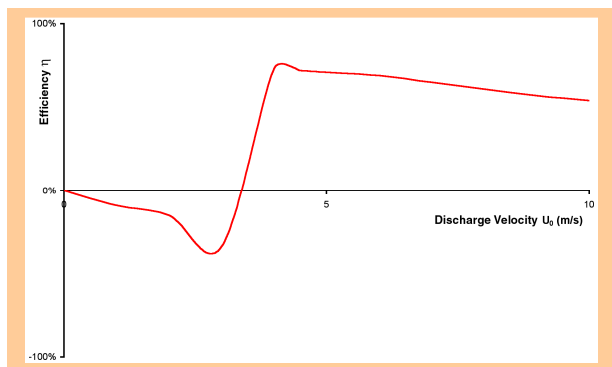
Simulaation tulokset

Kuvassa 8 a lämpe eteishallista virtaa kylmävarastoon ellei ilmaverhoa käytetä. Oven takana lämmin ilma nousee ja virtaa katon kautta kylmävaraston takaosaan. Kylmä ilma virtaa ulos ovesta lattiatasolla. Seurauksena olevaa kylmävaraston lämpenemistä täytyy kompensoida jäähdytyslaitteilla. Sisään tulevalla lämpimällä ilmalla on toinenkin vaikutus. Lämmin ilma on hyvin kostea; Tämä aiheuttaa välittömästi kondensaatiota kylmävarastossa. Ovensuulla muodostuu höyryä ja lopulta kosteus asettuu kattoon ja jäätyy höyrystimiin. Kaiken kaikkiaan mitä ei-toivotuin tilanne.

Kuvassa 8 b on hyvin toimiva kylmävaraston ilmaverho. Ilmavirta saavuttaa lattiatason, erottaen ilmaston kylmävaraston ja eteishallin välillä. Sekä lämmön (selvän lämmön) että veden haihtumisen (piilevän lämmön) vaihtelu on siten huomattavasti vähäisempää.

Vertailu käytännön kokeiden avulla

Kuvissa 9 ja 10 on vertailtu tilannetta ilman ilmaverhoa ja hyvin toimivan ilmaverhon kanssa vastaavasti tietokonesimulaatioiden ja käytännön kokeiden avulla.



Kuva 11: Kylmävaraston ilmaverhon tehokkuus riippuen ilmaverhon puhallusnopeudesta

Mittaustaso on 3.00 m korkea ja 2.35 m leveä. Ovensuu käytännön kokeissa on esitetty ohuena valkoisena viivana. Ympäristö- ja puhallusolosuhteet ovat vertailukelpoisia, jolloin on helppo vertailla lämpötilakuvioita. Samaa värispektriä on myös käytetty kuvaamaan lämpötiloja (huomaa: tämä värispektri on erilainen kuin Comfort- ilmaverhoilla!).

Näissä kuvissa näkyy selvä yhdenmukaisuus tietokonesimulaatioiden ja käytännön kokeiden välillä. Tilanteessa, jossa käytetään ilmaverhoa, ilmaverhon muoto on samanlainen.

Kylmävaraston ilmaverhon tehokkuus

Ilmaverhon teho, kuten Comfort-ilmaverhon tapauksessa, määritellään ovensuun kautta tapahtuvan energiahukan vähenemisenä (prosenttimuodossa) verrattuna tilanteeseen ilman ilmaverhoa. Energiahukka on siten näkyvän ja piilevän lämpöhukan (vedenhaihtumis- vaihtelulla) summa. Jos tätä kokonais energiahukkaa merkitään Q_{total} tehon kaava on:

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_{total, with air curtain}}{Q_{total, without air curtain}} \right) \times 100\% .$$

Puhallusnopeudesta riippuva ilmaverhon tehokkuus on laskettu simulaatiosta ympäröivien olosuhteiden tietyllä yhdistelmälle. Tämä näkyy kuvassa 11. Määritelmän mukaan, kun ilmaverhon purkausnopeus on 0 m/s, teho on 0%. Liian heikko ilmaverho ei yllä lattiaan asti, mikä johtaa suurempaan energiahukkaan kuin ilman ilmaverhoa, vaikuttaen negatiivisesti. Tietyllä kriittisellä puhallusnopeudella ilmaverho on riittävän vahva yltämään lattiaan ja säästämään paljon energiaa, toisin sanoen se on erittäin tehokas. Tehokkuuskäyrä osoittaa myös, että liian vahva ilmaverho on tehottomampi ilmavirtojen lattiaan törmäämisen takia.

PÄÄTELMÄT

Biddle BV, yhteistyössä Groningenin yliopiston kanssa, on kehittänyt simulaatiomallin ilmavirran laskemiseksi ilmaston erottamistuotteiden kehittämiseksi. Tietokonesimulaatioissa käytetyt lämpötila-arvot ovensuista ovat hyvin yhdenmukaiset käytännön kokeiden tulosten kanssa.

Tietokonesimulaatiot ovat hyvin hyödyllisiä tukemaan tuotekehittelyä: monia tilanteita voidaan testata lyhyessä ajassa. Se jää kuitenkin todellisuuden yksinkertaistetuksi kuvaukseksi, jolloin on mahdotonta päättää välttämättömiä purkausparametreja annetussa tilanteessa yksinomaan simulaatioiden pohjalta. Tästä syystä simulaatiot täytyy aina varmistaa käytännön kokein. Mutta simulaatioiden ansiosta käytännön kokeet voidaan suorittaa paljon tarkemmin.

Tulevaisuudessa nykyistä simulaatiomallia tullaan käyttämään jatkuvasti. Huomio kiinnitetään muun muassa minimipurkausnopeuden päättämiseen ilmaverhon ulospäin taipumisen välttämiseksi. Simulointia tullaan myös käyttämään optimaalisen ilmaston erotuksen luomiseksi muissakin kuin tässä artikkelissa mainituissa tapauksissa.

KIRJALLISUUTTA

1. Bruins, Drs. K., *'Vrieshuis toegankelijker en veiliger met luchtscherm'* ('Cold store more

accessible and safer by using air curtains^).
TVVL magazine, April 1998

Biddle bv

P.O. Box 15

NL - 9288 ZG Kootstertille

The Netherlands

Tel.: +31 - 512 33 55 55

Fax.: +31 - 512 33 14 24

E-mail: biddle@biddle.nl