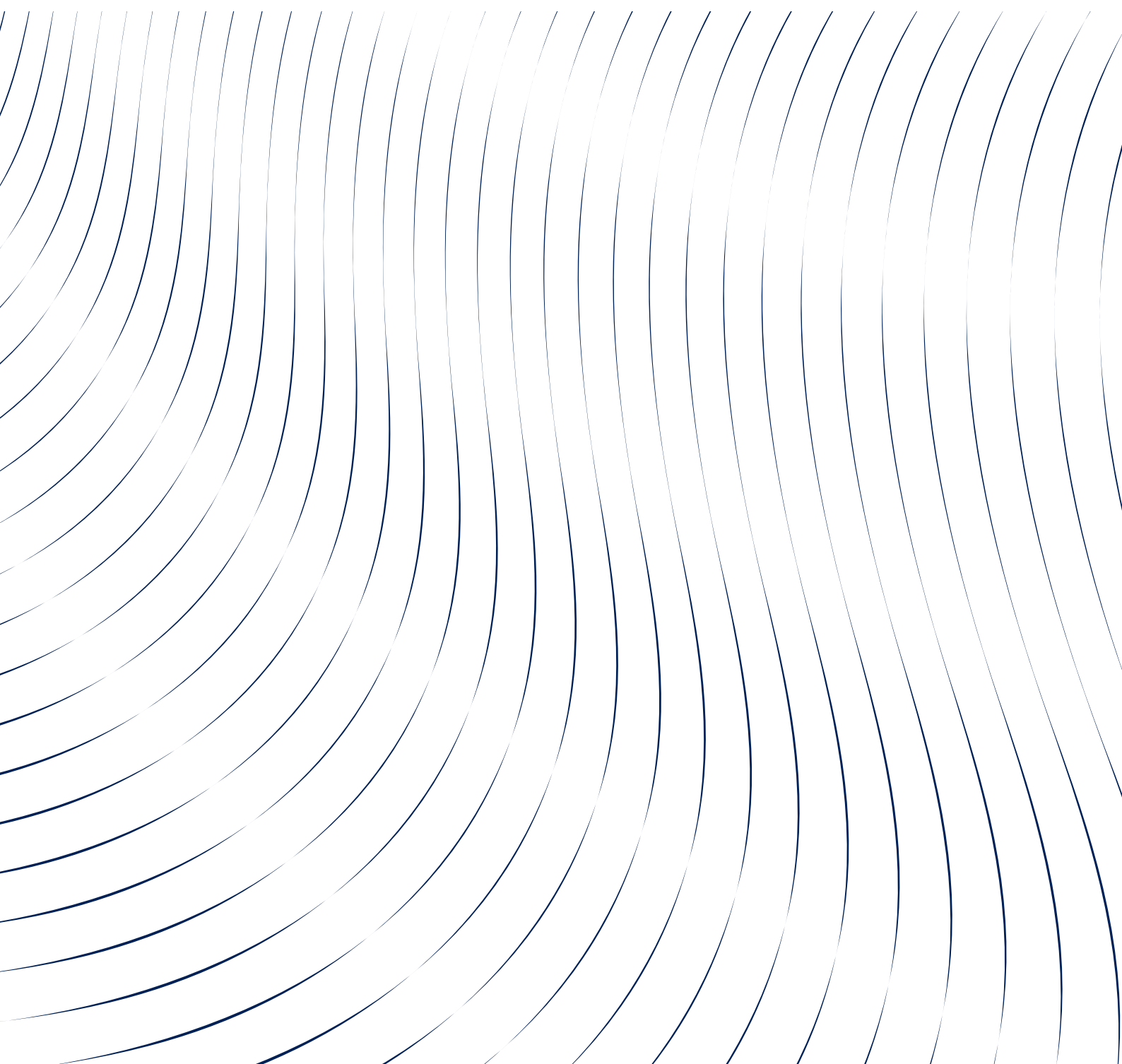




STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT  
AALBORG UNIVERSITET KØBENHAVN

# ENERGIBESPARELSESPOTENTIALE VED KOMBINERET LUFTKØLING OG LUFTRENSNING I KONTORER

SBI 2014:06





# Energibesparelspotentiale ved kombineret luftkøling og luftrensning i kontorer

Alireza Afshari  
Niels Christian Bergsøe  
Siamak Rahimi Ardkapan

Titel	Energibesparelspotentiale ved kombineret luftkøling og -rensning i kontorer
Serietitel	SBi 2014:06
Udgave	1. udgave
Udgivelsesår	2014
Forfattere	Alireza Afshari, Niels Christian Bergsøe, Siamak Rahimi Ardkapan
Sprog	Dansk
Sidetæl	27
Litteratur-henvisninger	Side 22
Emneord	Filter, luftrensere, ventilation, ultrafine partikler, kølebafler
ISBN	978-87-563-1600-2
Omslag	Figur: Siamak Rahimi Ardkapan
Udgiver	Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet København A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV E-post sbi@sbi.aau.dk www.sbi.dk

Der gøres opmærksom på, at denne publikation er omfattet af ophavsretsloven.

# Indhold

Forord .....	4
Baggrund for projektet.....	5
Formål .....	6
Rapportens disposition .....	6
Internationale artikler:.....	6
Kombineret luftkøling og -rensning.....	7
Den undersøgte kølebaffel .....	7
Kombineret luftkøling og –rensning .....	8
Det undersøgte filter .....	8
Elektrostatisk fiberfilter (EFF).....	8
Resultater .....	10
Partikeludskilningsgrad .....	10
Partikelfilter.....	10
Kølebaflens effektbehov med og uden luftfilter .....	12
Kølebaffel .....	12
Simuleringer .....	13
Resultater.....	13
Diskussion .....	17
Eksperimentelle undersøgelser på kølebaffel med og uden filter .....	17
Simuleringer.....	18
Placeringen af luftrensere .....	18
Konklusioner.....	19
Referencer.....	20
Appendiks.....	24
Resumé af artikel I:.....	24
Resumé af artikel II.....	25
Resumé af artikel III.....	26
Resumé af artikel IV .....	27

# Forord

Denne rapport beskriver arbejdet udført i og resultaterne af forskningsprojektet *Energibesparelspotentiale ved kombineret luftkøling og -rensning i kontorer* og udgør slutrapportering for dette projekt.

Projektet er gennemført i et samarbejde mellem følgende parter: Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) Aalborg Universitet København, Elfi Elektrofilter AB, Sverige, Vokes Air, Sverige samt Lindab ventilation A/S, Danmark. Projektet har været under ledelse af Statens Byggeforskningsinstitut ved professor Alireza Afshari.

Projektet blev finansieret af PSO-F&U- program og med Dansk Energi Nets journal nr. 464-09, projekt nr. 342-016 '*Energibesparelspotentiale ved kombineret luftkøling og -rensning i kontorer*'. Projektet blev sat i gang i februar 2010 og er afsluttet i oktober 2013. Projektets resultater er beskrevet i fire artikler. Sammenfatninger af de fire artikler findes i appendiks I til IV.

I nærværende rapport fremlægges projektets baggrund, hovedresultater og konklusioner.

Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet København  
Energi og miljø  
Marts 2014

Søren Aggerholm  
*Forskningschef*

# Baggrund for projektet

Ønsket om god luftkvalitet inden døre har medført, at forskerne i mange tilfælde har anset det for nødvendigt at forøge tilførslen af luft, typisk udeluft, i forhold til tidligere. En forudsætning for at den øgede lufttilførsel kan give det ønskede resultat er, at niveauet af sundhedsskadelige stoffer i udeluften er lavt. I modsat fald skal den tilførte udeluft renses effektivt. Der eksisterer effektive rumluftrensere såvel på det europæiske som på det danske marked. Ved at vælge tilstrækkelig stor kapacitet for sådanne luftrensere (tilstrækkeligt antal renserne) i forhold til den aktuelle luftstrøm, kan opnås en reduktion i koncentrationen af indendørs forureninger.

Øget ventilation i form af tilførsel af udeluft og brug af luftrensere, som kan føre til en reel forbedring af luftkvaliteten indendørs, kræver energi. Samtidig er der på såvel europæisk som dansk plan fokus på at reducere energiforbruget til at opretholde et tilfredsstillende indeklima. Krav om reduktion af energiforbruget virker imod de ovenfor nævnte forslag om øget tilførsel af udeluft, og der er derfor behov for at udvikle nye og mere energieffektive metoder til at opretholde en god luftkvalitet, sådan at sundheden iagttages samtidig med, at energiforbruget reduceres.

Der er meget forskning og udvikling, der forsøger at skabe nye løsninger. Her skal fremhæves en mere energioekonomisk metode til at opnå god luftkvalitet inden døre, som går ud på at videreudvikle og bruge et nyt teknisk system (en unit) som kan fjerne luftforureningerne.

Et kølebaffelsystem er et luftkonditioneringsystem, der anvendes til kølning og ventilation i lokaler. I dette projekt er videreudviklet et luftkonditioneringsystem, som udnytter den cirkulation, der skabes i rumluften af kølebaffelsystemet, med det formål at rense luften for at opnå bedre luftkvalitet og samtidig få et mere energioekonomisk system. Det nye system renser den cirkulerende luft, der suges gennem kølepaneler, uden at anvende ventilator. Dette indebærer, at det nye system kan føre til lavere energiforbrug og et forbedret indeklima.

# Formål

Formålet med dette projekt er at videreudvikle et luftkonditioneringsystem, som er baseret på køling i kombination med luftrensning. Systemet renser den cirkulerende luft, der suges gennem kølepaneler uden at anvende ventilator. Systemet monteres i loftet i kontorlokaler.

## Rapportens disposition

Den foreliggende rapport er baseret på nedenstående videnskabelige artikler (I til IV), som er udarbejdet i forbindelse med gennemførelsen af et ph.d.-projekt ved Statens Byggeforskningsinstitut ved Aalborg Universitet København afdelingen for Energi og miljø. I nærværende rapport gives en sammenfatning af undersøgelsernes omfang, resultater, diskussion af resultaterne og konklusioner. Resuméer af artiklerne findes i appendiks I til IV.

### Internationale artikler:

**I.** Combining active chilled beams and air cleaning technologies to improve indoor climate in offices: Testing a low pressure mechanical filter in a laboratory environment.

Siamak Rahimi Ardkapan, Alireza Afshari, Niels C. Bergsøe, Amalie Gunner, Jasmine Afshari has been published on Taylor & Francis Online. It is available at: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10789669.2013.838440>. HVAC&R Research, Volume 19, Issue 8, 2013

**II.** Filtration efficiency of an electrostatic fibrous filter: Studying filtration dependency on UFP exposure and composition.

Siamak Rahimi Ardkapan, Matthew S. Johnson, Sadegh Yazdi, Alireza Afshari, Niels C. Bergsøe.  
Submitted to Aerosol Science, July 2013

**III.** Studying passive UFP dispersion in a room with a heat source.

Siamak Rahimi Ardkapan, Peter V. Nielsen, Alireza Afshari.  
Building and Environment, Volume 71, January 2014, Pages 1–6

**IV.** Field Evaluation of Long-Term Performance of an Electrostatic Fibrous Filter in combination with an Ionizer

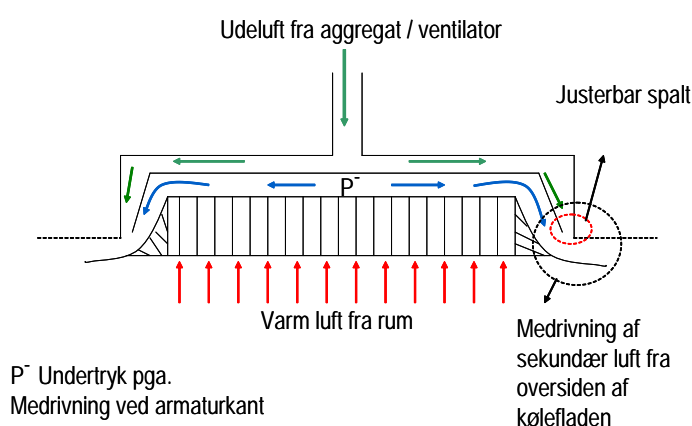
Alireza Afshari, Niels C. Bergsøe Siamak Rahimi Ardkapan  
En igangværende undersøgelse.



# Kombineret luftkøling og -rensning

Mekanisk køling er nødvendig i mange nyere kontorbygninger på grund af problemer med overophedning. Rensning af luften i kontorer har til formål at reducere luftens indhold af partikler og gasser og dermed forbedre luftkvaliteten. Selvom teknologierne har været individuelt studeret, er der kun få studier, der beskæftiger sig med kombinationen af de to.

## Den undersøgte kølebaffel



$P^-$  Undertryk pga.  
Medrivning ved armaturkant

Medrivning af sekundær luft fra oversiden af kølefladen

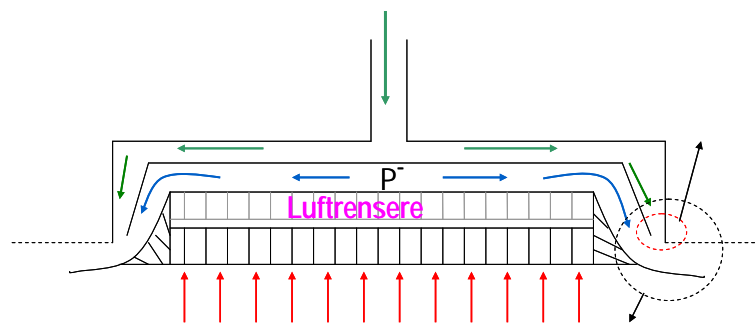
Figur 1. Tværsnitt af kølebaffel.

Udeluften går på sædvanlig vis gennem et aggregat drevet af en ventilator. I armaturet bliver udeluften "injiceret" gennem en spalte tæt ved armaturets kant, således at der medrives luft fra oversiden af kølefladen. Derved opstår der et undertryk over kølefladen, som trækker rumluften op gennem kølefladen. Den sekundære luftstrøm op gennem kølefladen er typisk 3-4 gange større end den 'primære' udeluftstrøm, se figur 1.

De fleste kølebafler i dag er såkaldte aktive kølebafler, hvor spaltebredden ved armaturets kant kan styres, så der i et stort dynamikområde opretholdes en høj sekundær luftstrøm gennem kølefladen, selv om udeluftmængden reduceres. Dette giver gode muligheder for at styre udelufttilførsel og køleeffekt uafhængigt af hinanden.

Det karakteristiske ved ved en kølebaffel og den sekundære luftstrøm er, at der kan opnås en væsentlig større køleeffekt - uden at det giver træk - end ved blot at køle indblæsningsluften. Med hensyn til træk er det især hastigheden på luftstrålen ind i rummet og undertemperaturen i luftstrålen (i forhold til rumlufttemperaturen), som er afgørende, mens det for køleeffekten er volumenstrømmen og undertemperaturen i luftstrålen, som er afgørende. Med en kølebaffel kan der ved samme undertemperatur og lufthastighed typisk opnås 3-4 gange større volumenstrøm - og dermed køleeffekt i rummet.

## Kombineret luftkøling og -rensning



Figur 2. Tværsnit af kombineret luftkøling og -rensning.

Figur 2 viser, at foruden køling kan den varme luftstrøm fra rummet i kombination med et luftfilter anvendes til rensning af partikler og gasser i rumluften.

## Det undersøgte filter

### Elektrostatisk fiberfilter (EFF)

Figur 3 viser et elektrostatisk fiberfilter. Et fiberfilter består af et stort antal fibre, hvor diameteren af fibrene spænder fra nanometer til mikrometer. Det er forskellige typer af elektrostatiske fiberfiltre, der bruges til at rense luften i ventilationssystemer. I et elektrostatisk fiberfilter tilbageholdes partikler på grund af mekaniske effekter og elektrostatisk effekt. De mekaniske effekter er (Camfil, 2014; Innovationsnetværk for Miljø, 2013):

*Filtreringseffekt:* Partiklerne opfanges af filterfibrerne når partiklernes diameter er større end hulrummene mellem fibrerne i filtret medier. Dette gælder for partikler større end  $1 \mu\text{m}$ .

*Opfangelseeffekt:* For at kunne opfanges må partiklen med luftstrømmen følge en bane, der kommer tættere end partiklens radius på filterfiberens overflade. Dette gælder for partikler større end  $0.1 \mu\text{m}$  til ca.  $1 \mu\text{m}$ .

*Inertieffekt:* En partikel af en vis størrelse og masse vil besidde så meget inertie, at den ikke kan følge luftstrømmen, og vil i stedet kunne afsættes på overfladen af fibrerne i et filter. Dette gælder for partikler større end  $1 \mu\text{m}$ .

*Diffusionseffekt:* Diffusion er den dominerende opfangningsmekanisme for ultrafine partikler – dvs. partikler med en aerodynamisk diameter, der er mindre end  $1 \mu\text{m}$ .

Pakningstæthed af det undersøgte filter i dette arbejde var  $80 \text{ g/m}^2$ , og størrelsen af fibrene i filtret er mellem  $10$  og  $20 \mu\text{m}$ .



Figur 3 Elektrostatisk fiberfilter.

# Resultater

## Partikeludskilningsgrad

Partikeludskilningsgraden,  $EFF$ , er et mål for et luftfilters evne til at tilbageholde partikler af en bestemt størrelse. Partikeludskilningsgraden bestemmes ved måling af partikelkoncentrationen af denne bestemte partikelstørrelse før og efter filtret og angives i procent.

Udskilningsgraden er defineret ved:

$$EFF = \frac{C_f - C_e}{C_f} (\%) \quad 1$$

Hvor

$EFF$  = Udskilningsgraden i %

$C_f$  = Partikler før filter (UFP/cm<sup>3</sup>)

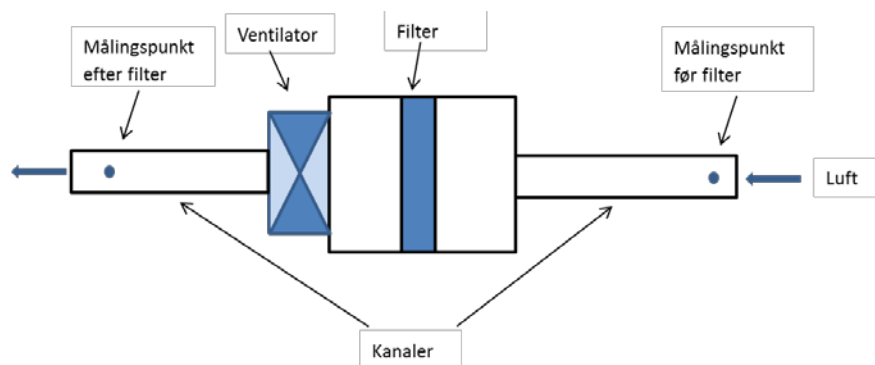
$C_e$  = Partikler efter filter (UFP/cm<sup>3</sup>)

## Partikelfilter

### *Undersøgelse af filtrets udskilningsgrad med hensyn til partikler*

Målingerne udførtes på et elektrostatiske fiberfilter monteret i en laboratorieopstilling, for at evaluere dets udskilningsgrad ved forskellige koncentrationer af ultrafine partikler. Laboratorieopstillingen var koblet til et testrum på 32 m<sup>3</sup>. Der tilføres ren luft med få partikler til testrummet.

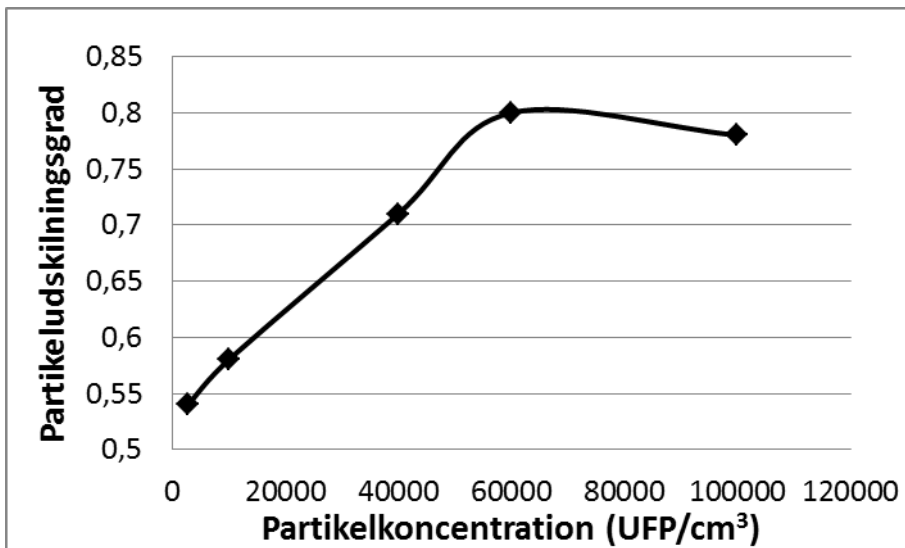
Figur 4 viser opbygningen af laboratorieopstillingen med det elektrostatiske fiberfilter. Der var overtryk i testrummet, og to små ventilatorer blev brugt til at sikre fuldstændig opblanding i rummet. Fuldstændig opblanding gør, at koncentrationen af ultrafine partikler i rummet bliver jævnt fordelt. Ventilationsraten i rummet var 1,7 h<sup>-1</sup>.



Figur 4 Laboratorieopstillingen med det elektrostatiske fiberfilter.

Kilden til generering af ultrafine partikler var et stearinlys, som brændte i en periode på 30 minutter, hvorefter lyset blev taget ud af rummet. Luftstrømmen i opstillingen var 250 m<sup>3</sup>/time. Målinger af partikelkoncentrationer udførtes med to partikeltællere (NanoTracer PNT 1000 fra Philips) placeret henholdsvis før og efter filtret.

Figur 5 viser partikeludskilningsgraden for et elektrostatiske fiberfilter ved forskellige partikelkoncentrationer i testrummet.



Figur 5 Partikeludskilningsgrad som funktion af partikelkoncentration for et elektrostatisk fiberfilter i testrummet.

Figuren viser, at partikeludskilningsgraden er mellem 55 % og 80 %, med en middelværdi af 65 %. Trykfaldet over partikelfiltret er ca. 7 Pa, ved en luftstrøm på 250 m<sup>3</sup>/h. Fænomenet at partikeludskilningsgraden øges med koncentrationsniveauet er et uventet resultat. Tidligere studier har vist at partikeludskilningsgraden er uafhængig af koncentrationsniveauet (Hinds, 1982). Derfor er der brug for yderligere undersøgelser for at kunne beskrive fænomenet.

#### *Sammenhæng mellem partikeludskilningsgrad af et elektrostatisk fiberfilter og koncentrationen af ultrafine partikler*

Yderligere undersøgelser er sat i gang i SBI's laboratorium for at undersøge årsagen til, at udskilningsgraden af et elektrostatisk fiberfilter øger med koncentrationsniveauet af ultrafine partikler.

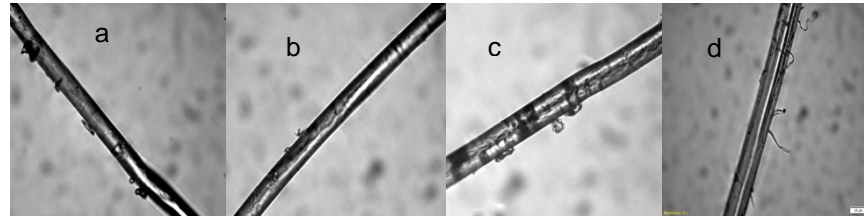
Der kan være flere årsager til ovenstående resultat. En årsag til denne sammenhæng synes at være elektrostatisk ladede ultrafine partikler i testrummet, som kommer i kontakt med det elektrostatiske fiberfilter. For at undersøge ændringen af partikeludskilningsgraden, blev en række eksperimenter udført med saltpartikler. Saltpartiklerne (NaCl), som er fremstillet af uorganisk materiale og opløselige i vand, er gode elektriske ledere, som ikke akkumuleres på en elektrostatisk ladet overflade, dvs. det elektrostatiske fiberfilter.

Tabel 1 viser partikeludskilningsgraden for et elektrostatisk fiberfilter ved forskellige partikelkoncentrationer og forskellige partikelstørrelser af salt i testrummet. Af tabellen fremgår, at partikeludskilningsgraden ikke ændres med ændring i partikelkoncentrationer.

Tabel 1 Partikeludskilningsgrad for et elektrostatisk fiberfilter ved forskellige partikelkoncentrationer og forskellige partikelstørrelser af salt i testrummet.

Undersøg.	Konc. af partikler i testrummet (1/cm <sup>3</sup> )	Partikeludskilningsgrad (%)	Gennemsnitlig diameter (nanometer)
1	72000	41	19,6
2	63000	38	19,5
3	34000	48	19,4

En anden årsag til dette kunne være dannelse af kædelignende dendritter (fremvækst af partikler) på fibrene. For at undersøge dette fænomen blev et optisk mikroskop, Olympus BX51, anvendt til at tage fotografier, som kan vises på en monitor. Figur 6 viser fotos af et filter, som er blevet eksponeret for forskellige partikelkoncentrationer. Af figuren fremgår, at dannelse af kædelignende dendritter på fibrene varierer med partikelkoncentrationen. Dette indebærer at fænomenet afhænger af både elektrostatiske ladede ultrafine partikler og fremvæksten af dendritter.



Figur 6 Foto fra filtrene med varierende eksponering (UFP/ cm<sup>3</sup> x tid) a) <3E+4 b) 1.2E+5 c) 1.5E+6 d) 3E+6.

## Kølebaflens effektbehov med og uden luftfilter

Til at bestemme kølebaflens effektbehov anvendes ligning 2:

$$P_w = q_w \cdot c_{pw} \cdot \Delta t_w \quad 2$$

Hvor

$P_w$  = effekt [W]

$q_w$  = vandstrøm [l/s]

$c_{pw}$  = specifik varmekapacitet [J/(kg K)]

$\Delta t_w$  = temperaturforskel i vandkredsen ind/ud [K]

### Kølebaffel

*Undersøgelse af kølebaflens energibehov med og uden luftrensning*

Kølebaflens energibehov med og uden luftrensning undersøgtes i Lindabs laboratorium i et rum på 51 m<sup>3</sup>.

I scenariet hvor filtret var installeret i kølebaflen var temperaturen i vandkredsen ind/ud 12,3 °C/14,3 °C. I scenariet uden filter i kølebaflen, var temperaturen i vandkredsen ind/ud 12,3 °C/15,3 °C. Vandstrøm var i begge scenarier 0,0377 l/s.

Tabel 2 viser kølebaflens energibehov ved tre forskellige luftstrømme i tilluftskanalen, henholdsvis 15 l/s, 25 l/s og 45 l/s.

Tabel 2. Luftstrøm og trykfald over de undersøgte luftfilter.

Luftstrøm i tilluftskanalen (l/s)	Fjernelse af varme ved køleb. Med filter	Fjernelse af varme ved køleb. Uden filter	Reduktion af effekt (%)
	(W)	(W)	
15	242	390	38
25	310	435	29
45	410	525	22

Resultaterne viser, at en øgning i luftstrømmen i tilluftskanalen medfører en mindskelse af reduktionen af køleeffekten.

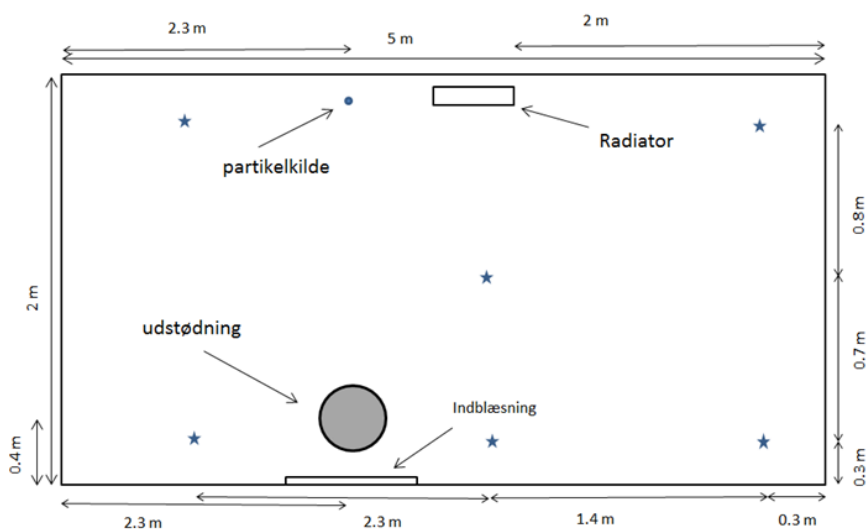
# Simuleringer

Resultaterne af evalueringen af en aktiv kølebaffle kombineret med et filter kan betragtes som grundlag for CFD-simuleringen. Formålet med simuleringen var at studere, hvordan fordeling af koncentrationen af ultrafine partikler i forskellige højder i rummet afhænger af placering af varmekilde og partikelkilde.

Computational Fluid Dynamics (CFD) er et værktøj til simulering og beregning af strømninger. Værktøjet blev i denne undersøgelse anvendt til at simulere luftstrømninger og varmetransmission i testrummet. Resultaterne af CFD-beregningerne og simuleringerne blev sammenholdt med laboratoriemålinger. Formålet var at studere, hvordan fordeling af koncentrationen af ultrafine partikler i forskellige højder i rummet afhænger af placering af varmekilden. Det anvendte CFD-software var STAR-CCM+ fra CD-Adapco. Der er gennemført en række CFD-beregninger med forskellige turbulensmodeller,  $k-\epsilon$  og  $k-\omega$ .<sup>1</sup>

## Resultater

Figur 7 viser en plantegning af rummet med placering af henholdsvis varmekilde, kilde til generering af partikler (stearinlys) og rummets tilluft og fraluft. Varmekilden var placeret i to forskellige højder, henholdsvis 0,1 m og 0,5 m over gulvet.



Figur 7 Skitse af testrummet med placering af varmekilde, kilde til generering af partikler (stearinlys), prøvetagningssteder (stjerner) og rummets tilluft og fraluft.

<sup>1</sup>CFD simuleringen med RANS- (Reynolds-averaged Navier-Stokes) ligninger kan enten basere sig på en  $k-\epsilon$  turbulens model eller på en  $k-\omega$  turbulensmodel.

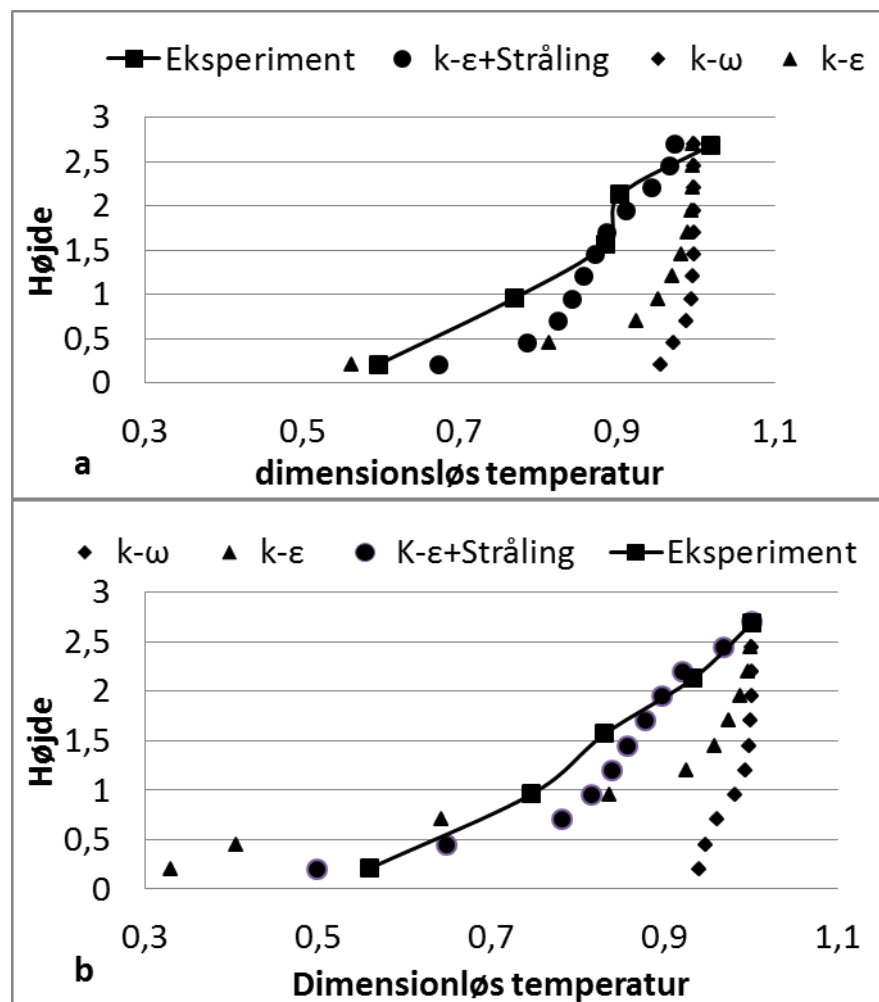
$k-\epsilon$  modellen beskriver turbulensen ved turbulent kinetisk energi,  $k$ , og dissipation (henfald) af turbulent kinetisk energi,  $\epsilon$ .

$k-\omega$  modellen er en model, der beskriver turbulensen ved turbulent kinetisk energi,  $k$ , og en specifik dissipation  $\omega$  med enheden  $\text{tid}^{-1}$ .

CFD simuleringen kan også baseres på Large Eddy Simulation. I denne situation er beregningscellerne så små, at hovedparten af turbulensen løses direkte ved de tidsafhængige bevægelser af længdeskaler, der er større end cellestørrelsen. Små fluktuationer løses stadig med en simpel turbulent model.

Simuleringerne blev sammenlignet med eksperimentelle undersøgelser. De eksperimentelle undersøgelser blev udført i testrummet i SBI's luftkvalitetslaboratorium. Sporgas  $N_2O$  blev anvendt til at måle ventilationsraten i rummet. En multigasmonitor, type 1302 fra Brüel og Kjær, blev anvendt til at måle sporgaskoncentrationen. Målinger af partikelkoncentrationer med størrelse fra 7 nm til 289 nm blev udført med partikeltæller Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS). Kilden til generering af ultrafine partikler var et stearinlys, som brændte indtil koncentrationen af UFP havde nået en stationær tilstand. Partikelkilden var placeret i to højder, henholdsvis 0,2 m og 1,5 m over gulvet i undersøgelsen.

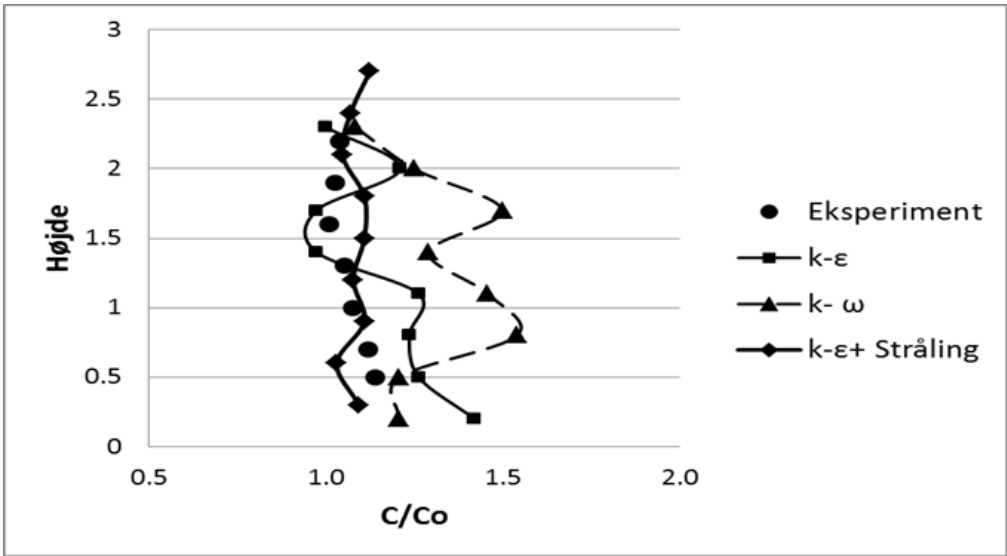
Figur 8 viser målt og beregnet temperaturprofil i en lodret linje i rummet. a) varmekilden placeret 0,1 m over gulvet, b) at varmekilden placeret 0,5 m over gulvet.



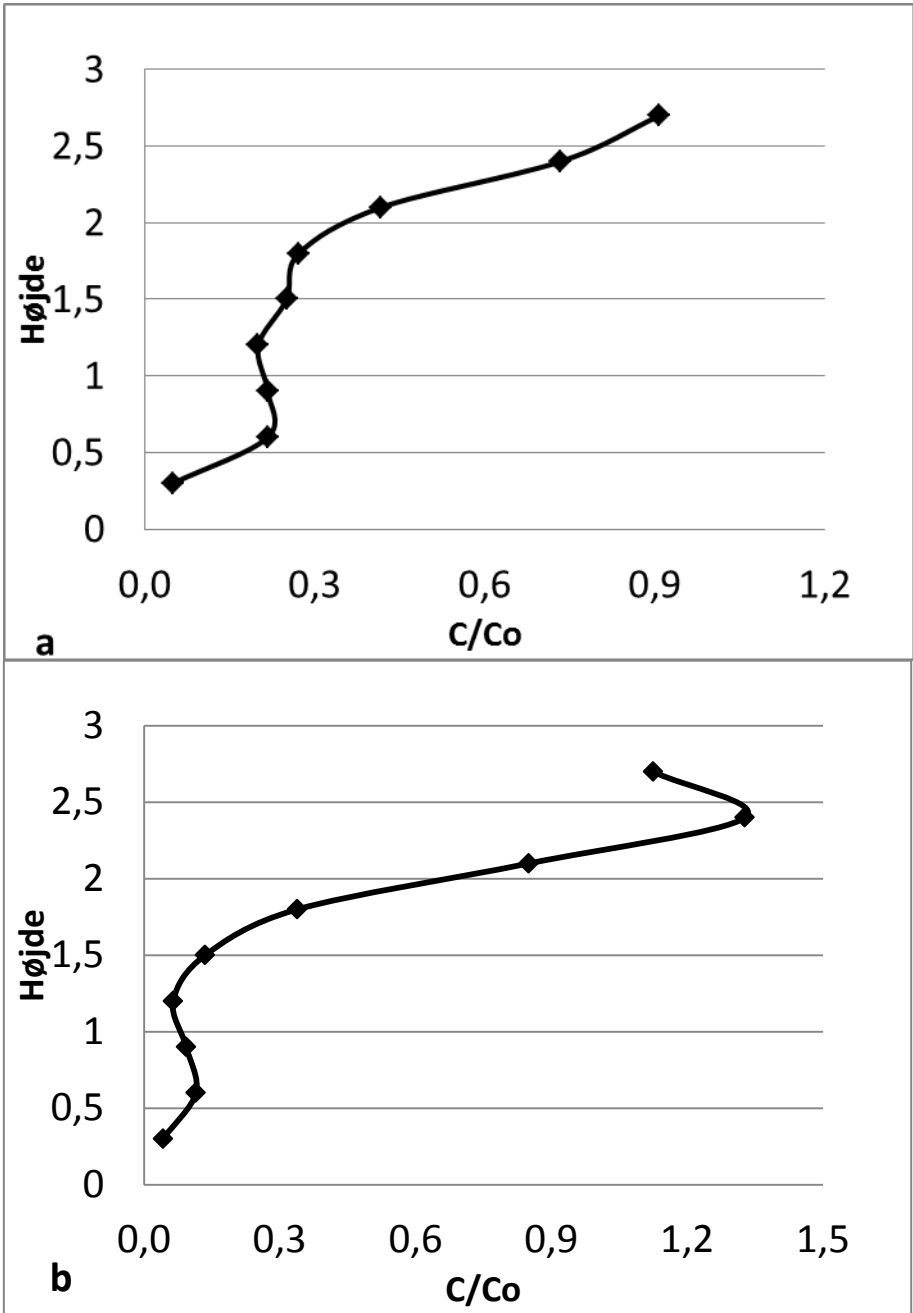
Figur 8 Målt og beregnet temperaturprofil i en lodret linje i rummet. a) varmekilden placeret 0,1 m over gulvet, b) at varmekilden placeret 0,5 m over gulvet.

Figur 9 viser målt og beregnet UFPs koncentrationsprofil i en lodret linje i rummet, når varmekilden var placeret 0,5 m over gulvet og partikelkilder var placeret 0,2 m over gulvet.





Figur 9 Målt og beregnet UFPs koncentrationsprofil i en lodret linje i rummet.



Figur 10 Målt og beregnet UFPs koncentrationsprofil i en lodret linje i rummet.

Figur 10 viser beregnet (med k- $\epsilon$  model) gennemsnitlig UFPs koncentrationsprofil i en lodret linje i rummet, når varmekilden var placeret 0,5 m over gulvet, og partikelkilder var placeret a) 0,2 m over gulvet og b) 1,5 m over gulvet.

# Diskussion

Forskningsresultater fra de senere år har vist, at forhøjede ventilationsrater resulterer i en oplevelse af bedre luftkvalitet og lavere luftforurening i inde-miljøet. Mange forskere taler derfor for, at luftkvaliteten skal forbedres i forhold til tidligere, og ofte fremføres der krav om øget ventilation, dvs. tilførsel af udeluft (Seppänen et al., 2006). Samtidig er der på europæisk såvel som dansk plan fokus på at reducere energiforbruget til at opretholde tilfredstillende indeklima.

Projektet behandler forudsætningerne for at anvende luftrensningsteknik i kontorbygninger.

Et tidligere PSO-projektet med titlen "Luftrensningsteknologier til energieffektiv og god luftkvalitet indendørs" (Afshari et al., 2013) havde til formål at undersøge muligheder, anvendelsesområder og begrænsninger for anvendelse af recirkulation i kombination med nye luftrensningsteknologier med henblik på forbedring af indeluftkvaliteten. Formålet med undersøgelsen var også at bestemme effektiviteten af transportable luftrensere og at undersøge mulighederne for anvendelse af luftrensere i praksis.

Resultaterne fra tidligere PSO-projektet (341-10) viste, at rensningsteknologier, som genererer ozon, øger niveauet af ozon i indeluften, hvorved der er risiko for, at koncentrationen af ultrafine partikler i indeluften øges. Derudover viste undersøgelserne at EFF (Electrostatic Fibrous Filter) har den højeste udskilningsgrad i sammenligning med fire andre luftrensningsteknologier *Ikke-termisk plasma system* (NTP: Non Thermal Plasma), *Koronaudladninger system* (CDI: Corona Discharge Ionizer), *Luftrensningssystem CleanAir* (PAP: Portable Air Purifier) og *Tredimensionelt filter* (Three Dimensional Filter). EFF har lavt tryktab men den har derimod en kortere levetid. Resultaterne fra undersøgelserne kunne derfor med fordel anvendes i det foreliggende projekt.

## Ekperimentelle undersøgelser på kølebaffel med og uden filter

Ifølge undersøgelser af luftrensningsteknologier i testrummet kan konkluderes, at EFF (Electrostatic Fibrous Filter) har den højeste effektivitet. Desuden har EFF et lavt trykfald, ca. 5 Pa ved 60 l/s. Det skal bemærkes, at effektiviteten af EFF falder hurtigere med tiden.

Undersøgelser pågår på SBI med det formål at klarlægge, om effektiviteten og levetiden af EFF kan forbedres ved at kombinere EFF med en Ionizator før filtret, se appendiks 1 artikel IV.

Figur 5 viser partikeludskilningsgraden for EFF ved forskellige partikelkoncentrationer i testrummet. Af figuren fremgår det, at partikeludskilningsgraden stiger, indtil partikelkoncentrationen i testrummet er 60.000 ultrafine partikler/cm<sup>3</sup>, hvor partikeludskilningsgraden opnår et maksimum på 80 %. Årsagen til at partikeludskilningsgraden øges med koncentrationsniveauet er klarlagt.

Yderligere undersøgelser er derfor sat i gang i SBI's laboratorium for at beskrive fænomenet. I disse undersøgelser anvendes to forskellige partikelkil-

der, henholdsvis tændt stearinlys og salt. Saltpartikler er fremstillet af uorganisk materiale og opløselige i vand, og de er gode elektriske ledere, som ikke akkumuleres på en elektrostatisk ladet overflade, fx det elektrostatiske fiberfilter (EEF). Af tabel 1 fremgår, at partikeludskilningsgraden ikke ændres med ændring i partikelkoncentrationer.

Yderligere undersøgelser derfor er sat i gang igen for at vise, om der dannes dendritter på fibrene. Af figur 6 fremgår, at dannelse af kædelignende dendritter på fibrene varierer med partikelkoncentrationen.

## Simuleringer

### Placeringen af luftrensere

Af figur 8 fremgår, at der indtræffer en termisk lagdeling i en vis højde af rummet. Resultaterne tyder på, at når varmekilden er placeret 0,1 m eller 0,5 m over gulvet, kan placeringen af partikelkilden have en indvirkning på den gennemsnitlige partikelkoncentration i rummet. Jo højere over gulvet varmekilden er placeret, desto lavere er koncentrationen af UFP under termisk stratifikation (lagdeling på grund af temperaturen i en given højde) inde i rummet. Yderligere undersøgelser er nødvendige for med sikkerhed at kunne drage denne konklusion.

# Konklusioner

De økonomiske konsekvenser af termisk komfort og indeluftens kvalitet har været undersøgt i mange projekter. Der er kun gennemført få undersøgelser af mulighederne for at forbedre indeluften ved brug af kølebafler i kombination med filter. Dette projekt belyser mulighederne for, ved brug af tekniske installationer med luftrensningsteknik og kølebafler, at tilføre bygningerne behandlet luft af god kvalitet set i forhold til menneskers og aktiviteterens behov.

- Resultatet er, at EFF (Electrostatic Fibrous Filter) har den højeste udskilningsgrad i sammenligning med fire andre undersøgte luftrensningsteknologier. EFF har lavt tryktab men en kortere levetid.
- Desuden blev det konkluderet, at udskilningsgraden af EFF korrelerer med koncentrationen af ultrafine partikler. Årsagen til dette synes at være dannelse af kædelignende dendritter med elektrostatisk ladede UFPs.
- Efter simuleringer af partikelspredning i et rum blev det konkluderet, at partikelkildens placering i rummet har indvirkning på UFP-koncentrationens profil i rummet. Yderligere undersøgelser er nødvendig for med sikkerhed at drage en sådan konklusion.
- Resultaterne viser, at en øgning i luftstrømmen i tilluftskanalen medfører en øget køleeffekt. Når der anvendes filter i kølebaflen er køleeffekten mindre end når der ikke anvendes filter. Reduktionen i køleeffekten mindskes med øget luftstrøm.

# Referencer

Afshari, A., Bergsøe, N.C., Ardkapan, S.R. 2013. Luftrensningsteknologier til energieffektiv og god luftkvalitet indendørs. Statens Byggeforskningsinstitut/AAU, ISBN 978-87-92739-60-5.

Japuntich, D.A., Stenhouse, J.I.T., Liu, B.Y.H. 1994. Experimental results of solid monodisperse particle clogging of fibrous filters. *Journal of Aerosol Science* 25, 385–393.

Kim, C. S., Bao, L., Okuyama, K., Shimada, M. and Niinuma, H. 2006. Filtration efficiency of a fibrous filter for nanoparticles, *Journal of Nanoparticle Research*, 8, 215-221.

Li, K., Jo, Y.M., 2010. Dust Collection by a Fiber Bundle Electret Filter in an MVAC System. *Aerosol Science and Technology* 44, 578–587.

## Yderligere litteratur:

Afshari, A., Matson, U., Ekberg, L.E., 2005. Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: a study conducted in a full-scale chamber. *Indoor air* 15, 141–50.

Ardkapan, S. R., Afshari, A., Bergsøe, N. B. and Johnson, M. S. 2011. Evaluating the operation of three air cleaners working individually in a clean room. In: proceedings of the 12th international conference on Indoor Air quality and climate, a407\_3.

Ardkapan, S.R., Nielsen, P.V., Afshari, A., Bergsøe, NB. 2012. Simulation of particle distribution in a room with air cleaner. *Healthy buildings 2012: 10th international conference*.

Baturin, V. V. *Fundamentals of industrial Ventilation*.1972.

Baumgartner, H., Löffler, F., Umhauer, H., 1986. Deep-Bed Electret Filters: The Determination of Single Fiber Charge and Collection Efficiency. *IEEE Transactions on Electrical Insulation EI-21*, 477–486.

Baumgartner, H.P., Löffler, F., 1986. The collection performance of electret filters in the particle size range 10 nm-10 µm. *Journal of Aerosol Science* 17, 438–445.

Billings, C., 1966. Effects of particle accumulation in aerosol filtration.

Chuang, H.-C., Jones, T., Bérubé, K., 2012. Combustion particles emitted during church services: implications for human respiratory health. *Environment international* 40, 137–42.

Crowe, C.T. *Multiphase flow handbook*. Taylor & Francis; 2005.

Gore, RA., Crowe CT. *Modulation of turbulence by a dispersed phase*.1991.

Heidt, F. and Werner, H. 1986. Microcomputer-Aided Measurement of Air Change Rates, *Energy Build*, 9, 313-320.

- Heiselberg, P., Sandberg, M. 1990. Convection from a slender cylinder in a ventilated room. Roomvent; Oslo, Norway. .
- Hinds, William C.-, 1999. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles. John Wiley & Sons, 2nd edition.
- Hoek, G. 2012. Respiratory Health Effects of Airborne Particulate Matter: The Role of Particle Size, Composition, and Oxidative Potential-The RAPT-ES Project. Environmental health perspectives 120, 1183–9.
- Krug, H. F. and Wick, P. 2011. Nanotoxicology: An Interdisciplinary Challenge, *Angewandte Chemie-International Edition*, 50, 1260-1278.
- Lehtimäki, M. Säämänen, A. and Taipale, A. 2005. Investigation of Mechanisms and Operating Environments that Impact the Filtration Efficiency of Charged Air Filtration Media, 1189-TRP.
- Li Y, Nielsen PV. Commemorating 20 years of indoor air CFD and ventilation research. *Indoor Air*. 2011 DEC;21(6):442-53.
- Loth, E. Numerical approaches for motion of dispersed particles, droplets and bubbles. *Prog Energy Combust Sci*. 2000;26(3):161-223.
- Loudermilk, K. 2009. Designing Chilled Beams FOR Thermal Comfort, *ASHRAE J*, 51, 58-+.
- MacNee, W. and Donaldson, K. 2003. Mechanism of lung injury caused by PM10 and UFPs with special reference to COPD, *Eur Resp J*, 21, 47S-51S.
- Pope, C. 2000. Review: Epidemiological basis for particulate air pollution health standards, *Aerosol Science and Technology*, 32, 4-14.
- Nazaroff, W. W, Cass G R. Particle deposition from a natural convection flow onto a vertical isothermal flat plate. *Journal of Aerosol Science*. 1987; 18(4): 445–455.
- Nielsen, P.V. Displacement ventilation- theory and design. Aalborg University, ISSN 0902-8002 U9306, 1993.
- Nielsen, P. Computational fluid dynamics and room air movement. *Indoor Air*. 2004 AUG;14:134-43.
- Payatakes, A.C., 1977. Model of transient aerosol particle deposition in fibrous media with dendritic pattern. *AIChE Journal* 23, 192–202.
- Payatakes, A.C., Tien, C., 1976. Particle deposition in fibrous media with dendrite-like pattern: A preliminary model. *Journal of Aerosol Science* 7, 85–100.
- Penttinen, P. Timonen, K., Tiittanen, P., Mirme, A, Ruuskanen, J., Pekkanen, J. 2001. Ultrafine particles in urban air and respiratory health among adult asthmatics. *Eur Resp J*. 2001 MAR;17(3):428-35.
- Pope, C.A., 2002. Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. *JAMA: The Journal of the American Medical Association* 287, 1132–1141.
- Przekop, R., Gradon, L, 2004. Experimental studies of aerosol particles re-suspension in fibrous filters 25, 1557–1562.

- Roache, P. 1994. Perspective - a method for uniform reporting of grid refinement studies. *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme*. 1994 SEP;116(3):405-13.
- Setty, B. S. 2011. Application Issues for Chilled Beam Technologies, *Ashrae: Transactions* 2011, Vol 117, Pt 1, 117, 494-501.
- Siegel, R., and Howell, JR. 1992. *Thermal Radiation Heat Transfer*, Third Edition, Hemisphere Publishing Co; 1992.
- Skistad H., Mundt, E., Nielsen, PV., Hagström, K, Railio, J.2004. Displacement ventilation in non-industrial premises. Second edition ed. Finland: RE-HVA.
- Song, S., Lee, K., Lee, Y., Lee, J., Il Lee, S., Yu, S. and Paek, D. 2011. Acute health effects of urban fine and UFPs on children with atopic dermatitis, *Environ Res*, 111, 394-399.
- Stafford, R.G., Ettinger, H.J., 1972. Filter efficiency as a function of particle size and velocity. *Atmospheric Environment* (1967) 6, 353–362.
- Stokes, D. J, 2003. Recent advances in electron imaging, image interpretation and applications: environmental scanning electron microscopy. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 361(1813), 2771-2787.
- Strak, M., Janssen, N.A.H., Godri, K.J., Gosens, I., Mudway, I.S., Cassee, F.R., Lebrecht, E., Kelly, F.J., Harrison, R.M., Brunekreef, B., Steenhof, M.
- Taipale, A., Enbom, S., Lehtimäki, M. and Saamanen, A. 2009. ISAC: a novel air cleaning technique for controlling indoor air quality - Utilization of the induced air flow in the supply air diffuser. In: *proceedings of Healthy Buildings conference: Paper 461*.
- Tien, C., Wang, C.S., Barot, D.T., 1977. Chainlike formation of particle deposits in fluid-particle separation. *Science* (New York, N.Y.) 196, 983–5.
- Walsh, D.C., Stenhouse, J.I.T., 1997. The effect of particle size, charge, and composition on the loading characteristics of an electrically active fibrous filter material. *Journal of Aerosol Science* 28, 307–321.
- Walsh D.C., Stenhouse J.I.T., Scurrah K.L., Graef ,A., 1996. The effect of solid and liquid aerosol particle loading on fibrous filter material performance. *Journal of Aerosol Science* 27, 2.
- Wang, C. Sen, 2001. Electrostatic forces in fibrous filters—a review. *Powder Technology* 118, 166–170.
- Waring, M. S., Siegel, J.A. and Corsi, R.L. 2008. UFP removal and generation by portable air cleaners, *Atmos Environ*, 42, 5003-5014.
- Zhao, B., Zhang Y, Li X, Yang X, Huang D. Comparison of indoor aerosol particle concentration and deposition in different ventilated rooms by numerical method. *Building and Environment*. 2004; 39(1): 1–8.
- Zheng, F. Thermophoresis of spherical and non-spherical particles: a review of theories and experiments. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2002; 97(1-3): 255–278.



Zhao, B., Chen, C., Tan, Z. 2009. Modeling of ultrafine particle dispersion in indoor environments with an improved drift flux model. *Journal of Aerosol Science*. 2009; 40(1): 29–43.

Zhao, B. Yang, C., Yan, X., Liu, S. 2008. Particle dispersion and deposition in ventilated rooms: Testing and evaluation of different eulerian and lagrangian models. *Build Environ*. 2008 APR;43(4):388-97.

# Appendiks

Resumé af artikel I:

***Combining active chilled beams and air-cleaning technologies to improve the indoor climate in offices: Testing of a low pressure mechanical filter in a laboratory environment***

*Siamak Rahimi Ardkapan, Alireza Afshari, Niels C. Bergsøe, Amalie Gunner & Jasmine Afshari*

*Published on Taylor & Francis Online. It is available at:  
<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10789669.2013.838440>.*

HVAC&R Research, Volume 19, Issue 8, 2013

**Abstract**

This project is part of a long-term research program to study the possibilities of using efficient air-cleaning technologies to improve indoor air quality in buildings. The purpose of this part of the project was to study the energy-saving potential of combining the cooling and cleaning of air in offices. For this purpose, a mechanical filter with low-pressure drop was selected for testing in a laboratory environment. The measurements included tests of the filter in ductwork to study the efficiency of the filter. Moreover, the combined system of the filter and a chilled beam was tested in a room. The efficiency of the mechanical filter to remove ultrafine particles was examined using pure wax candles and salt as sources of emission particles. The measurements in the duct showed that the efficiency of the filter ranged between 54% and 78% and that the pressure loss was less than 5 Pa (0.104 lbf/ft<sup>2</sup>). Furthermore, the measurement results of the combined system showed that adding the filter accelerated the removal rate of the particles by 2 h<sup>-1</sup>. However, the efficiency of the chilled beam in exchanging heat was reduced by 38%.

## Resumé af artikel II

### ***Filtration efficiency of an electrostatic fibrous filter: Studying filtration dependency on UFP exposure and composition.***

*Siamak Rahimi Ardkapan, Matthew S. Johnson, Sadegh Yazdi, Alireza Afshari, Niels C. Bergsøe.*

*Submitted to Aerosol Science, July 2013*

#### **Abstract**

The objective of the present study is to investigate the relationship between ultrafine particle concentrations and removal efficiencies for an electrostatic fibrous filter in a laboratory environment. Electrostatic fibrous filters capture particles efficiently, with a low pressure drop. Therefore they have applications in building ventilation systems. The relationship between particle removal efficiency and particle concentration has not been widely investigated in ventilation systems and indoor environments. In order to achieve the objective of this study, experiments were performed in a controlled laboratory environment using two different particle counters: a Scanning Mobility Particle Sizer and a NanoTracer. Particles were generated at different concentrations by burning a pure wax candle in a test room. The set-up consisted of a test room, a fan a duct and the particle filter. The results show that the efficiency of the electrostatic fibrous filter increased with increasing exposure levels. The filter efficiency varies from 45% to 80% depending on the particle concentrations and particle sizes including ultrafine particles. The results are consistent with a mechanism in which the particles deposit on the fibers and form chain-like agglomerates known as dendrites. The dendrites themselves contribute in capturing the other particles. Increasing exposure will result in increasing the number of the dendrites because of the static charging and consequently increasing the efficiency. Static electrical charging of dendrites will spread out the branches, increasing capture.

## Resumé af artikel III

### ***Studying passive Ultrafine particle dispersion in a room with a heat source.***

*Siamak Rahimi Ardkapan, Peter V. Nielsen, Alireza Afshari.*

*Building and Environment, Volume 71, January 2014, Pages 1–6*

#### **Abstract**

The distribution of particles in a room is of great interest because of the effect of particles on human health. Using computational fluid dynamics, it is possible to study the behaviour of particles in a room. In this study, the commercial software STAR-CCM+ was used to simulate the dispersion of passive particles in a room with displacement ventilation system. In addition, some experiments are performed to verify the accuracy of the simulation results. According to the comparison of the experiment and the simulations in front of supply opening, the  $k-\epsilon$  model seems to give better results than the  $k-\omega$  model. It is shown that, in order to have an accurate result, the simulation of radiation effect is essential. Furthermore, the results of particle simulations show that when the passive particle source is in the height of 1.5 m and the heater is at the height of 0.5 m, the average concentration in the room is the lowest. Depending on the particle source height and heater location, the average particle concentration profile will change. In remote areas, the concentration profile does not show any significant difference between upper zone and lower zone.

## Resumé af artikel IV

### ***Field Evaluation of Long-Term Performance of an Electrostatic Fibrous Filter in combination with an Ionizer***

*Alireza Afshari, Niels C. Bergsøe Siamak Rahimi Ardkapan*

*An ongoing research study at SBi/AAU*

#### **Abstract**

This paper presents a field evaluation of long-Term performance of an electrostatic fibrous filter in combination with an Ionizer. The measurements are conducted in an office building. An electrostatic fibrous filter, together with ionization equipment is tested in a duct work for a period of one year. In addition, the filter without the Ionizer is tested in a duct work during the same period.





Rapporten beskriver videreudvikling af et luftkonditioneringsystem, som er baseret på køling med en aktiv kølebaffel i kombination med et elektrostatiske fiberfilter. Rapporten redegør for en undersøgelse af filtrets udskilningsgrad med hensyn til partikler samt undersøgelse af kølebaflens energibehov med og uden filter. Hovedresultaterne er, at det elektrostatiske fiberfilter har den højeste udskilningsgrad i sammenligning med fire andre undersøgte filtre, samt at en øgning i luftstrømmen i tilluftskanalen medfører en øget køleeffekt. Når der anvendes filter i kølebaflen er køleeffekten mindre, end når der ikke anvendes filter. Reduktionen i køleeffekten mindskes med øget luftstrøm.

1. udgave, 2014

ISBN 978-87-563-1600-2