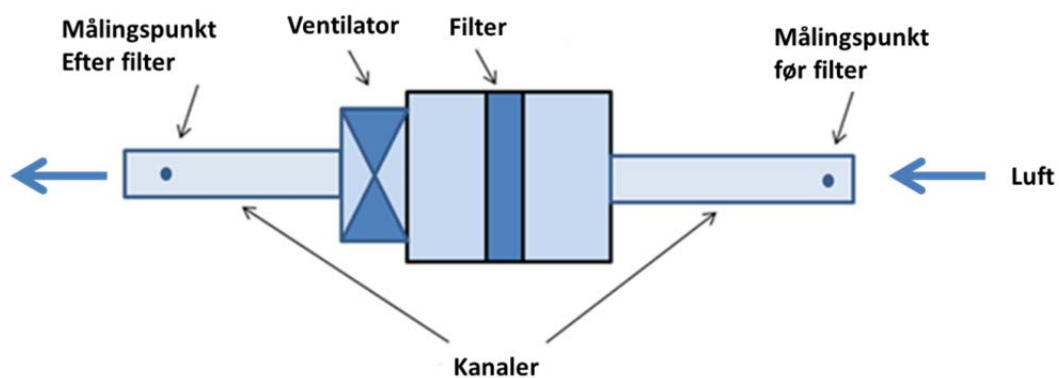


# Luftrensningsteknologier til energieffektiv ventilation og god luftkvalitet indendørs

Alireza Afshari  
Niels Christian Bergsøe,  
Siamak Rahimi Ardkapan



Titel Luftrensningsteknologier til energieffektiv og god luftkvalitet indendørs  
Serietitel SBI 2013: XX  
Udgave 1. udgave  
Udgivelsesår 2013  
Forfattere Alireza Afshari, Niels Christian Bergsøe, Siamak Rahimi Ardkapan  
Sprog Dansk  
Sidetal 31  
Litteratur-  
henvisninger Side 25  
Emneord Filter, luftrensere, ventilation, ultrafine partikler

ISBN

Tegninger Siamak Rahimi Ardkapan  
Fotos Siamak Rahimi Ardkapan  
Omslag Figur: Siamak Rahimi Ardkapan

Udgiver Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet,  
A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV  
E-post [sbi@sbi.aau.dk](mailto:sbi@sbi.aau.dk)  
[www.sbi.dk](http://www.sbi.dk)

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

# Indhold

Forord .....	4
Baggrund for projektet.....	5
Reduktion af energiforbruget til ventilation .....	6
Formål .....	7
Rapportens disposition .....	7
Internationale artikler:.....	7
Luftrensere .....	8
De undersøgte luftrensere .....	8
Ikke-termisk plasma (NTP).....	8
Koronaudladninger (CDI) .....	9
Luftrensningssystem CleanAir (PAP).....	9
Flimmerfilter(3D) .....	9
Elektrostatisk fiberfilter(EFF):.....	10
Resultater .....	11
Partikeludskilningsgrad.....	11
Undersøgelse af luftrensernes partikeludskilningsgrad.....	11
Undersøgelse af luftrensernes effektivitet i et testrum .....	13
Undersøgelse af luftrensernes effektivitet i et kontorrum .....	15
Simuleringer .....	18
Resultater.....	18
Diskussion .....	21
Eksperimentelle undersøgelser på luftrensningsteknologier .....	21
Simuleringer.....	23
Placeringen af luftrensere .....	23
Konklusioner.....	24
Litteratur .....	25
Appendiks.....	28
Resumé af artikel I:.....	28
Resumé af artikel II.....	29
Resumé af artikel III.....	30
Resumé af artikel IV .....	31

# Forord

Denne rapport beskriver arbejdet udført i og resultaterne af forskningsprojektet PSO 341-010 *Nye muligheder i ventilationstekniske systemer skaber energieffektiv luftkvalitet indendørs* og udgør slutrapportering for dette projekt.

Projektet er gennemført i et samarbejde mellem følgende partnere: Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) Aalborg Universitet København, Elfi Elektrofilter AB, Sverige, Vokes Air, Sverige samt BKF-Klima A/S, Danmark. Projektet har været under ledelse af Statens Byggeforskningsinstitut ved professor Ali-reza Afshari.

Projektet blev finansieret af Dansk Energi, PSO-F&U- program, Effektiv energianvendelse under journal nr. 464-08, projekt nr. 341-010. Projektet blev sat i gang i marts 2009 og er afsluttet i oktober 2013. Projektet resulterede til en ph.d.-afhandling med titlen *Removal of ultrafine particles from indoor environment - Experimental and computational studies of possibilities, limitations and applications*.

I nærværende rapport fremlægges projektets baggrund, hovedresultater og konklusioner.

Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet København  
Energi og miljø  
December 2013

Søren Aggerholm  
*Forskningschef*

# Baggrund for projektet

I Danmark såvel som i den øvrige vestlige verden er der stigende behov for at forbedre indeklimaet til gavn for befolkningernes sundhed og komfort og samtidig reducere energiforbruget til opretholdelse af den opnåede indeklimakvalitet.

Mennesker i den vestlige verden tilbringer typisk 85-90 % af livet indendørs – i boliger, institutioner, på arbejdspladser og i offentlige bygninger (Schweizer et al., 2007). Indeklimaet har derfor en overordentlig stor betydning for menneskers generelle sundhed og oplevelsen af komfort. Omkring 40 % af Danmarks samlede energiforbrug går til at tilvejebringe tilfredsstillende indeklima, og tilsvarende gælder i det øvrige Europa (Energistyrelsen, Energistatistik 2006). I bestræbelserne på at reducere udledningen af CO<sub>2</sub> er det derfor vigtigt at reducere energiforbruget til opvarmning, køling mv.

Det er i den forbindelse relevant at fremhæve, at den forskning, der for tiden pågår internationalt om indendørsmiljøets betydning for sundheden, indbefatter søgning efter årsagen til den voldsomme stigning i antallet af personer, der udvikler astma og allergi. Meget tyder på, at en mulig årsag er miljøpåvirkninger i indeklimaet. Samtidig viser forskning, at dårlig indeluftkvalitet kan forværre situationen for de personer, som i forvejen lider af astma eller allergi.

I forlængelse heraf er der grund til at fremhæve den politiske og forskningsmæssige indsats for at udvikle ventilations- og byggemetoder, så særligt følsomme personer eller grupper ikke udelukkes fra at benytte konkrete bygninger. Typisk er opmærksomheden rettet mod den fysiske adgang til bygningerne for bevægelseshæmmede personer, men der er en kraftig udvikling i gang for også at se på andre forhold, som kan begrænse adgangen til eller nytten af byggeriet, herunder luftkvaliteten.

Fokus på indeklimaet er de seneste ti år udvidet fra at have fokus på det termiske indeklima, dvs. temperatur, træk, relativ fugtighed mv., til også at have fokus på luftens indhold af partikler og kemikalier. Partikler og kemikalier kan stamme fra for eksempel trafik, og forureningerne kan overføres fra udemiljøet til indemiljøet. Endvidere kan forureninger blive frigivet fra byggematerialer og forbrugerprodukter, eller de kan blive genereret i indemiljøet som følge af aktiviteter i rummene. Som eksempler på det sidste kan nævnes partikler dannet i rummet som følge af madlavning, afbrænding af stearinlys eller slid på materialer samt afgivelse af kemikalier fra printere og kopimaskiner (Afshari, 2003).

Forskningsresultater fra de senere år har vist, at forhøjede ventilationsrater resulterer i en bedre luftkvalitet og lavere luftforurening i indeklimaet. Seppänen et al. (1999) indikerer, at man ved at sænke indholdet af CO<sub>2</sub> til under 880 ppm, hvilket vil sige, at ventilationsraten øges, kan forbedre brugernes tilfredshed og reducere symptomer. I laboratorieforsøg, hvor forsøgspersoner udførte kontorlignende opgaver, blev ydeevnen for tekstskrivning forbedret med omkring 1 % for hver gang tilførslen af udeluft blev fordoblet i området mellem 3 og 30 l/s, person (Wargocki et al., 2000). Et andet studie har derimod vist et fald i ydeevne på 7,8 % ved at øge ventilationsraten fra 2,5 til 25 l/s pr. person. Forskerne bag undersøgelsen mener, at dette skyldes urene filtre i ventilationssystemet (Wargocki et al., 2004). Foreløbige

forskningsresultater viser, at også skolebørns indlæring forbedres af god luftkvalitet (Wyon, 2010).

Mange forskere taler derfor for, at luftkvaliteten skal forbedres af hensyn til menneskers såvel sundhed som ydeevne, og ofte fremføres der krav om øget ventilation, dvs. tilførsel af udeluft (Seppänen et al., 2006).

## Reduktion af energiforbruget til ventilation

På såvel europæisk som dansk plan er der fokus på at reducere energiforbruget. EPBD-direktivet (Energy Performance of Buildings Directive), der er implementeret i dansk byggelovgivning, at resultere i 25 % reduktion af energiforbruget i nybyggeri i forhold til energiforbruget for en bygning bygget efter reglerne fra før 2006.

Efterhånden som bestræbelserne resulterer i mere isolering og bedre tætning af bygningerne, får energiforbruget til ventilation relativt større betydning. De fremtidige stramninger i energibestemmelserne vil derfor kræve, at luftkvaliteten kan opretholdes med væsentligt lavere energiforbrug end i dag.

Energiforbruget til ventilation går dels til behandling af luften (opvarmning, køling, affugtning, filtrering, rensning osv.) dels til transport af luften fra indtag via behandling til forbrugsstedet og fra forbrugsstedet via varmegenvindere til afkast.

Krav om reduktion af energiforbruget er tilsyneladende i modstrid med de ovenfor nævnte krav om øget tilførsel af udeluft, og der er derfor behov for at udvikle nye og mere energieffektive metoder til at opretholde en god luftkvalitet, så sundheden kan fremmes samtidig med, at energiforbruget reduceres.

Der er tre overordnede strategier til at forbedre indeluftkvaliteten:

- A. Reducere forureninger i indeluften gennem eliminering af forureningskilder og begrænsning af kildestyrker.
- B. Nedbringe koncentrationen af øvrige forureninger ved hjælp af fortynding med udeluft – ventilation.
- C. Cirkulere indeluften gennem et luftrensende anlæg.

Traditionelle strategier til reduktion af energiforbruget til ventilation er:

- A. Genvinding af varme og kulde (varmevekslere, varmepumper)
- B. Reduktion af luftskiftet, så der er mindre udeluft, der skal behandles
- C. Anvendelse af decentrale anlæg

Megen forskning og udvikling søger at skabe bro mellem god luftkvalitet og lavt energiforbrug til ventilation. Her skal fremhæves behovsstyring af ventilationen, så ventilationsluften tilføres når og hvor, der er behov. I den forbindelse udvikles bl.a. nye sensorer og styringer, som kan styre ventilationen.

En særlig gren af behovsstyret ventilation er individuel, personlig ventilation, hvor luften tilføres effektivt og målrettet til den enkelte persons øjeblikkelige behov. Dette betyder bl.a., at luften tilføres nær ved personen, sådan at ventilationsluften ikke bliver blandet med 'brugt' luft inden indånding (Nielsen et al., 2007).

# Formål

Det primære fokus i dansk indeklimaforskning de seneste ti år har været at finde kilderne til indeklimaforurening og mindske deres effekt. Der har været mindre fokus på at udnytte tekniske systemer til at mindske problemerne og dermed opnå et indeklima, som ikke bare er acceptabelt, men i mange tilfælde bedre end udeluften (på det pågældende sted).

Dette projekt handler om luftrensningsteknologier, som er nye i ventilations-sammenhæng. Undersøgelsen afdækker muligheder, anvendelsesområder og begrænsninger for anvendelse af transportable luftrensere i praksis.

## Rapportens disposition

Den foreliggende rapport er baseret på nedenstående videnskabelige artikler (I til IV), som er publiceret internationalt i forbindelse med gennemførelsen af ph.d.-projektet. I rapporten gives en sammenfatning af undersøgelsesernes omfang, resultater, diskussion af resultaterne og konklusioner. Resumeer af artiklerne findes i appendiks.

### Internationale artikler:

**I.** Evaluation of air cleaning technologies existing in the Danish market: Experiments in a duct and in a test room. Siamak Rahimi Ardkapan, Alireza Afshari, Niels C. Bergsøe, Peter V. Nielsen

Published online in Indoor and Built Environment, August 2013

<http://ibe.sagepub.com/content/early/2013/08/27/1420326X13501097>

**II.** Comparing the Performance of a New Electrical Aerosol Detector with other Counters. Siamak Rahimi Ardkapan, Alireza Afshari, Niels C. Bergsøe. In the Proceedings of Indoor Air conference, 2011.

**III.** Performance and effectiveness of portable air cleaners in an office room: An experimental study. Siamak Rahimi Ardkapan, Alireza Afshari, Niels C. Bergsøe.

Submitted to Indoor and Built Environment, August 2013.

**IV.** Simulation of particle distribution in a room with air cleaner. Siamak Rahimi Ardkapan, Alireza Afshari, Peter V. Nielsen, Ahsan Iqbal, Niels C. Bergsøe.

In the proceedings of Healthy Building conference, 2012.

# Luftrensere

Når det gælder partikler i indeluften, er luftkvaliteten afhængig af, hvor ren den tilførte ventilationsluft er, ventilationsforhold, kildestyrken og hvor effektivt ventilationsluften bruges til at fjerne partikler. Luftkvaliteten kan desuden forbedres ved hjælp af en luftrenser, som recirkulerer rumluften gennem en enhed, hvor luften behandles i en luftrensningsproces.

Når man renser indeluften i en bygning ved hjælp af en luftrenser, som befinder sig i rummet, er det ikke alene den luft, som tilføres udefra, som bliver rensset, men også den luft, som allerede findes i rummet. Udeluften kan indeholde partikler fx fra trafik, mens indeluften kan blive tilført partikler fra aktiviteter i rummet. For med konventionel ventilation at opnå samme luftkvalitet, som kan opnås ved hjælp af luftrensning, kræves både en øgning af udelufttilførslen og en effektiv rensning af den tilførte luft. Dette medfører et øget energibehov til opvarmning af ventilationsluften og til drift af ventilatorer.

## De undersøgte luftrensere

Det danske marked for transportable luftrensere blev afsøgt, og fem teknologier blev udvalgt til at indgå i undersøgelserne:

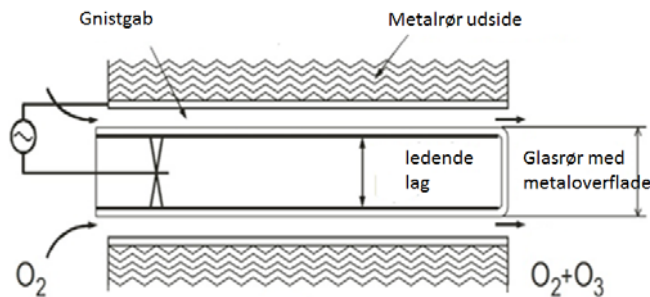
- Ikke-termisk plasma system (NTP: Non Thermal Plasma),
- Koronaudladninger system (CDI: Corona Discharge Ionizer )
- Luftrensningssystem CleanAir (PAP: Portable Air Purifier),
- Elektrostatisk fiberfilter (EFF: Electrostatic Fibrous Filter)
- Tredimensionelt filter.(Three Dimensional Filter)

### Ikke-termisk plasma (NTP)

En del forskere regner plasma som den fjerde tilstandsform for atomer. Den første tilstandsform er fast form, den anden er flydende form, den tredje er gasform og den fjerde er plasma. Plasma opstår, når en gas tilføres meget høj varme. Varmen får elektronerne til at bevæge sig hurtig rundt om atomets kerne, og på et tidspunkt bliver elektroner og kerne helt adskilt fra hinanden. Dette resulterer i en samling af ioner og elektroner, som ikke længe er bundet sammen. Tilstanden kaldes for plasmaform eller ioniseret gas. Et plasma kan siges at være en gas af opladede partikler, ioner og elektroner. På grund af de frie elektroner er plasma elektrisk ledende. Plasma kan opdeles i termisk plasma og ikke-termisk plasma (NTP). Termisk plasma har elektroner og gassky ved samme temperatur. I NTP er der ingen termisk ligevægt mellem elektronerne og gasskyen. Visse NTP-systemer har potentiale til at kunne fjerne partikler på grund af elektrostatiske virkninger.

Figur 1 viser skematisk ikke-termisk plasmateknologi. Apparatet er opbygget af et glasrør med en metaloverflade på indersiden. Glasrøret er anbragt i en metalcylinder. Metallerne (inderside af glasrør og metalcylinder) påtrykkes en spænding, og når spændingen er tilstrækkelig høj, sker reaktionen, hvor glasset fungerer som det isolerende lag.

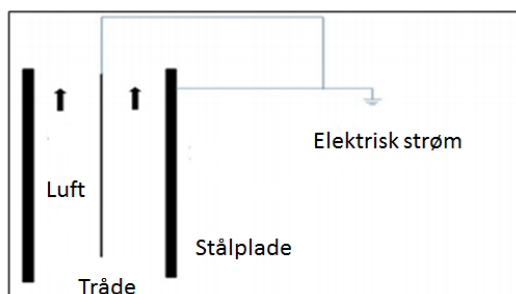




Figur 1. Skematisk visning af ikke-termisk plasmateknologi til luftrensning (Pekarek, 2003).

### Koronaudladninger (CDI)

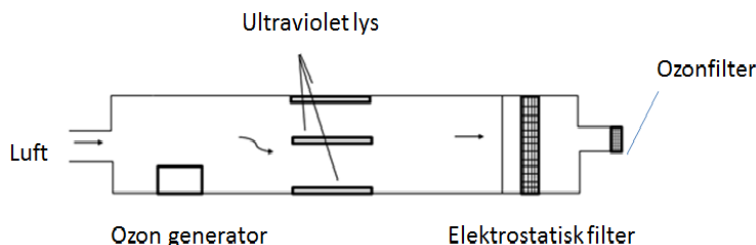
En luftrensning, som er baseret på koronaudladninger, udskiller partikler (støv) ved hjælp af en elektrisk spændingsforskel mellem to parallelle stålplader og metaltråde, som er udsættet mellem pladerne. Påtrykkes en betydelig elektrisk spændingsforskel imellem tråde og plader, opnås en svag elektrisk udledning, en koronaudledning. Herved ioniseres en del af gassens molekyler, og ionerne slår sig ned på støvpartikler, som derved får en elektrisk ladning. Partiklerne tiltrækkes af pladerne, hvor de fastholdes. Med jævne mellemrum vibreres pladerne, så støvet falder ned i filtrets bundsilo.



Figur 2. Skematisk billede af koronaudledning joniser teknologi.

### Luftrensningssystem CleanAir (PAP)

Figur 3 viser luftrensningssystem CleanAir teknologi. Teknikken er baseret på atmosfærens renseproces. Luften passerer igennem syv zoner. I første zone behandles luften med ozon, i anden zone udsættes luften for ultraviolet lys, i tredje zone holdes luften i et tilstrækkeligt tidsrum til at tillade aerosolvækst, i fjerde zone får partiklerne i luften en elektrisk ladning, i femte zone ledes luften igennem en elektrostatiske filter, og i sjette zone strømmer luften over i en katalysator for at nedbryde resterende ozon.



Figur 3. Skematisk visning af luftrensningssystem CleanAir teknologi.

### Flimmerfilter(3D)

En anden type filtertechnik, et såkaldt flimmerfilter, blev udvalgt. Figur 4 viser et flimmerfilter, som kan anbringes i en kanal. I modsætning til konventionelle filtre sker udskillelsen af partikler ikke via aflejring på en fiberdug, men langs særdeles fine polypropylen-fibre, hvis overflade er ladede fibre. Fibrene er selv-opladende gennem friktion mod hinanden på grund af luften, der strømmer forbi. Partikler i luften bindes til fibre. Filtertypen har meget lavt trykfald.



Figur 4. Flimmerfilter

#### Elektrostatisk fiberfilter(EFF):

Figur 5 viser et elektrostatisk opladede fiberfilter. Et fiberfilter er et filter, der består af et stort antal små fibre, hvor størrelsen af fibre spænder fra nanometer til mikrometer. Filtrene og deres karakteristika er blevet undersøgt med hensyn til trykfald over filtret og filtereffektivitet (Japuntich et al, 1994; Kim et al, 2006; Li og Jo, 2010).

Det er forskellige typer af elektrostatisk opladede fiberfiltre, der bruges til at rense luften i ventilationssystemer. I et elektrostatisk opladet fiberfilter fanges partikler på grund af følgende mekanismer: filtreringseffekt, opfangseseffekt, inertieffekt og elektrostatisk effekt. Effekten af forskellige mekanismer afhænger af størrelsen af partiklerne. Pakningstæthed af undersøgte filter i dette arbejde var  $80 \text{ g/m}^2$ , og størrelsen af fibre i filtret er mellem 10 og 20  $\mu\text{m}$ .



Figur 5. Elektrostatisk fiberfilter.

# Resultater

## Partikeludskilningsgrad

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

Til at bestemme filtrenes udskilningsgrad anvendes ligning 1. Udskilningsgraden,  $EFF$ , i procent:

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

Hvor

$EFF$  = Udskilningsgraden i %

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

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

## Undersøgelse af luftrensernes partikeludskilningsgrad

Undersøgelser udførtes på fem forskellige luftrensere for at bestemme luftstrøm og trykfald over luftrensere samt partikeludskilningsgrad. Desuden blev negativ sideeffekt, sådan som generering af ozon, undersøgt. Undersøgelserne er gennemført i en stor laboratoriehale, og målingerne af partikelkoncentrationer udførtes med to partikeltællere (NanoTracer PNT 1000 fra Philips) placeret henholdsvis før og efter luftrensere. Koncentration af ozon er målt simultant før og efter luftrensere. Målingerne er foretaget ved hjælp af to ozonmålere (BMT 930 og 2B Technologies Model 205). Tabel 1 viser trykfaldet over luftrensere ved maksimal volumenstrøm gennem luftrensere.

Tabel 1. Luftstrøm og trykfald over de undersøgte luftrensere.

Luftreenser	Luftstrøm (m <sup>3</sup> /h)	Trykfald (Pa)
NTP	140	17
PAP	43	23
CDI	300	31
3D	180	18
EFF	216	5

Tabel 2 viser resultater af målinger af koncentrationen af ultrafine partikler (UFP) og koncentrationer af ozon før og efter luftrensere i laboratoriehallen. Baggrundskoncentration af UFP var 5000 UFP/cm<sup>3</sup> og baggrundskoncentration af ozon var 9 ppb. Partikeludskilningsgraden er bestemt ud fra baggrundskoncentrationen af UFP i laboratoriehallen.

Tabel 2. Koncentration af ultrafine partikler og ozon før og efter filtrene i luftrensere.

Luftrensere	Ozon (PPB)		UFP (UFP/cm <sup>3</sup> )		Udskilningsgrad (%)
	Før	Efter	Før	Efter	
NTP	9	13	5000	4300	14
CDI	9	12	5000	1100	78
PAP	9	10	5000	1000	80
EFF	9	9	5000	2600	48
3D filter	9	9	5000	2500	50

Partikeludskilningsgraden er desuden bestemt på basis af målinger i et testrum i SBI's luftkvalitetslaboratorium med lav baggrundskoncentration af ultrafine partikler. Rummets volumen er 32 m<sup>3</sup>, og det er opbygget i aluminiumsprofiler og termorudeelementer og med en gulvbelægning af højtrykslaminat. Testrummet ventileres efter fortrængningsprincippet. Indblæsningsaggregatet er opbygget med spjæld, 4 filtersektioner, køle- og affugterflade, varmeplade, VLT-styret ventilator med 2-hastighedsmotor og et modulerende spjæld. Udeluften forbehandles ved filtrering gennem finfilter (F7), kulfilter, finfilter (F7) og et HEPA-filter. Herefter passerer luften køle- og varmeplade, ventilator og dampbefugtersektion.

Luftrensere var under afprøvningerne placeret i rummet. Koncentration af UFP er målt simultant centralt i testrummet og i indblæsningsarmaturet i rummet med henholdsvis NanoTracer type PNT 1000 og CPC TSI model 3007.

Koncentration af ozon er tilsvarende målt simultant i rummet og i indblæsningen. Målingerne er foretaget ved hjælp af to ozonmålere BMT 930 og 2B Technologies Model 205. Kilden til generering af ultrafine partikler var et stearinlys, som brændte i en periode på 30 minutter, hvorefter lyset blev taget ud af rummet. Der var overtryk i rummet i forhold til det omgivende rum, og to små ventilatorer blev brugt til at sikre ensformig koncentration af ultrafine partikler i rummet.

Tabel 3 viser luftrensernes partikeludskilningsgrad for alle fem luftrensere, når partiklerne genereres af et brændende stearinlys i rummet. Partikelkoncentrationen stiger under afbrændingen, og der opnås en ligevægtssituation efter ca. 30 minutter.

Tabel 3. Luftrensernes udskilningsgrad af partikler når kilden af UFP er et brændende stearinlys.

Luftrensere	Udskilningsgrad (%)
NTP	9
CDI	40
PAP	15
EFF	78
3D filter	50

Resultaterne viser forskellige udskilningsgrader af UFP for luftrensere i hallen (tabel 2) i sammenligning med målinger i testrummet (tabel 3). Der er behov for nærmere undersøgelser for at afklare årsagen til forskellen.

## Undersøgelse af luftrensernes effektivitet i et testrum

Luftrensernes effektivitet,  $\varepsilon$  bestemmes af ligning 2. Det antages, at der er en fuldstændig opblanding af UFP i luften i rummet.

$$\varepsilon = \frac{CADR/[V(\lambda_{v+d})]}{1 + CADR/[V(\lambda_{v+d})]} \quad (\text{dimensionsløs}) \quad 2$$

Hvor

$CADR$  (Clean Air Delivery Rate) er forskellen i henfaldshastigheder af målt koncentrationer af UFP med og uden luftrensere i et rum multipliceret med rumvolumen

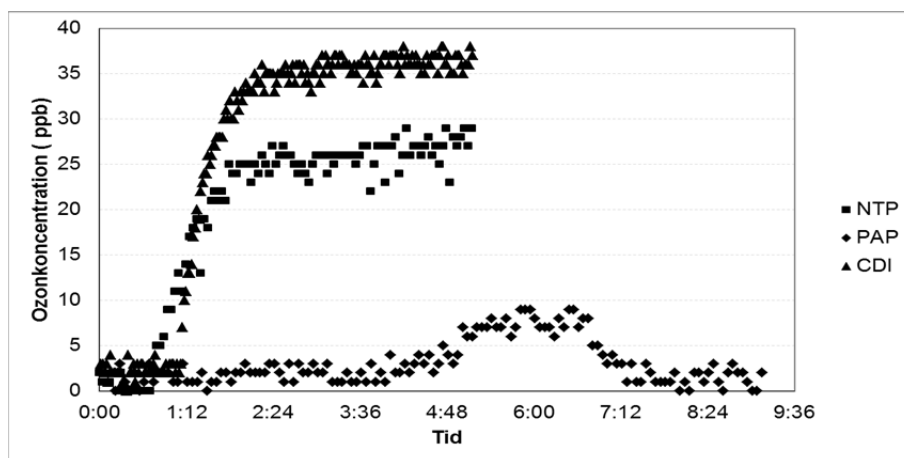
$V$  er rumens volume

$\lambda_v$  er henfaldshastighed af UFP på grund af ventilation.

$\lambda_d$  er henfaldshastighed af UFP på grund af luftrenseren og rummets overflader.

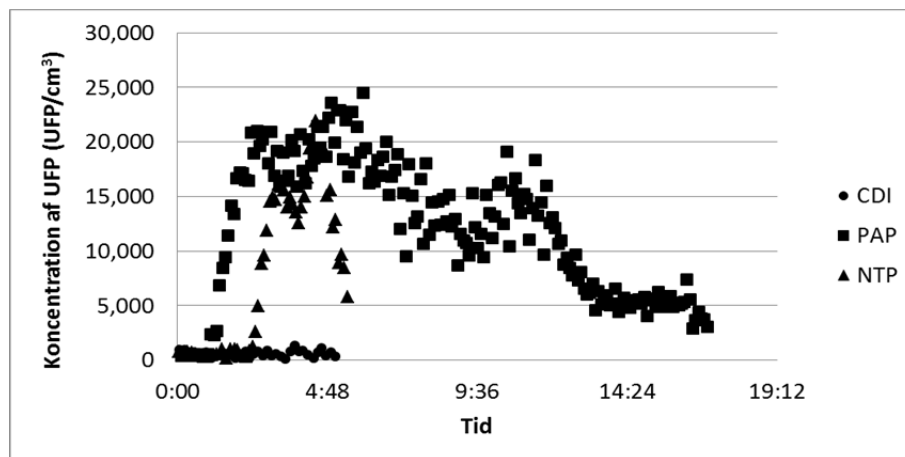
Luftrensernes effektivitet er bestemt baseret på målinger af koncentrationer af UFP i testrummet.

Tre af luftrensere, NTP, PAP og CDI, som på baggrund af de anvendte teknologier forventes at ville generere ozon, undersøgte i testrummet i SBI's luftkvalitetslaboratorium. Luftrensere blev undersøgt én efter én. Figur 6 viser sammenfattende koncentrationen af ozon, når henholdsvis luftrensere NTP, PAP og CDI var i drift i rummet.



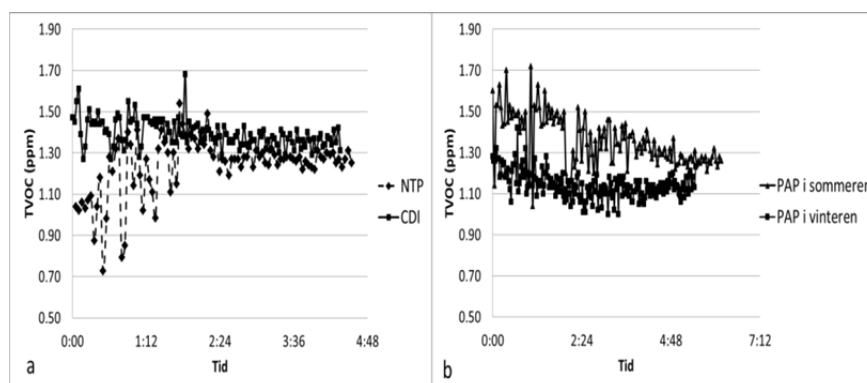
Figur 6. Koncentration af ozon når luftrensere NTP, PAP og CDI var i drift i testrummet.

Figur 7 viser sammenfattende generering af ultrafine partikler, når henholdsvis luftrensere NTP, PAP og CDI var i drift i testrummet. Koncentrationen af UFP nåede maksimum niveauer, hvorefter koncentrationen blev reduceret til baggrundsniveauet.



Figur 7. Koncentration af UFP når luftrensere NTP, PAP og CDI var i drift i testrummet.

Kemisk reaktion mellem ozon og andre forureninger i indeluften kan føre til dannelse af partikler. Det gælder særlig for oksidative processer med ozon og visse terpenere. Derfor målt koncentrationer af TVOC i testrummet. Figur 8 viser koncentrationen af totale flygtige organiske forbindelser (TVOC) i testrummet, når henholdsvis luftrensere NTP, PAP og CDI var i drift. Kilden til TVOC var udeluft, som kommer ind via ventilationen eller/og overfladen indendørs.



Figur 8. Koncentration af TVOC i testrummet når luftrensere NTP, PAP og CDI var i drift.

Det er antages, at udeluftens indhold af terpenere er højere om sommeren end om vinteren. I reaktion med ozon kan dette medføre højere koncentration af UFP indendørs om sommeren. For at klarlægge denne antagelse udførtes undersøgelser i testrummet.

Tabel 4 viser en sammenstilling af maksimum koncentrationer af UFP og ozon i testrummet om vinteren og om sommeren, når henholdsvis luftrensere NTP, PAP and CDI var i drift. De to andre luftrensere med henholdsvis EFF og 3D-filter, som er mekaniske filtere, genererer ikke ozon og UFP.

Tabel 4. Koncentration af UFP og ozon i testrummet om sommeren og vinteren, når luftrensere NTP, PAP og CDI var i drift.

Luftrensere	Sommer		Vinter	
	Ozon (ppb)	UFP (ufp/cm <sup>3</sup> )	Ozon (ppb)	UFP (ufp/cm <sup>3</sup> )
NTP	28	20000	-	-
CDI	35	1100	-	-
PAP	8	23000	8	5000

Tabel 5 viser beregnede Clean Air Delivery Rates (CADR) og effektiviteten ( $\epsilon$ ) for de fem undersøgte luftrensere, jf. ligning 2.

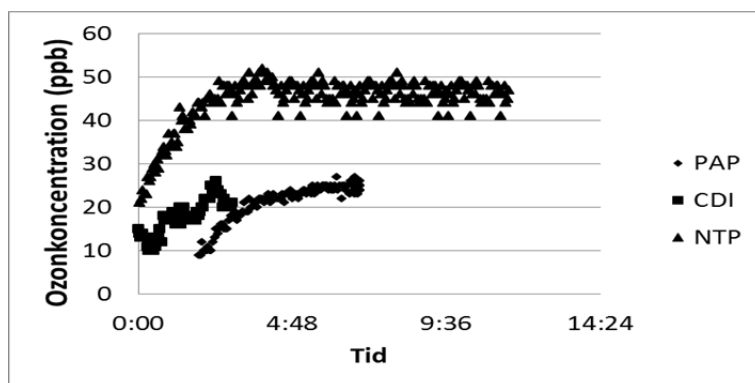
Tabel 5. Luftrensernes effektivitet ved fjernelse af UFP.

Luftrensere	Hendfald. af UFP med luftrensere ( $h^{-1}$ )	Hendfald. af UFP uden luftrensere ( $h^{-1}$ )	CADR ( $m^3/h$ )	Effektivitet ( $\epsilon$ )
NTP	3,5	2,8	21	0,20
CDI	4,4	2,7	50	0,38
PAP	3,4	2,8	18	0,18
EFF	9,2	2,5	201	0,73
3D filter	3,4	1,7	51	0,50

## Undersøgelse af luftrensernes effektivitet i et kontorrum

De fem luftrenere blev desuden analyseret i drift i et kontorrum med et volumen på  $48 m^3$  ( $4,8 m \times 3,3 m \times 3,0 m$ ). Kontoret var umøbleret og lå i en ubenyttet bygning. Emissioner fra rummets overfladematerialer var på grund af materialernes alder ubetydelig. Partikelkoncentrationer og ozon blev målt simultant både indendørs og udendørs. I rummet blev ultrafine partikler genereret ved hjælp af et stearinlys, som brændte i en periode på 30 minutter, hvorefter lyset blev taget ud af rummet.

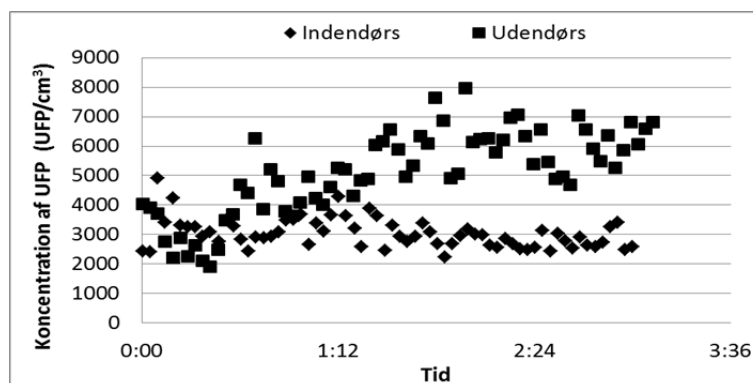
Figur 9 viser koncentrationer af UFP i kontorrummet, når luftrenserne i separate omgange var i drift i rummet. Af resultaterne fremgår, at koncentrationer af ozon øges, når luftrensere, NTP, CDI and PAP var i drift i rummet.



Figur 9. Koncentration af ozon i et ubenyttet kontorrum når luftrensere NTP, CDI og PAP var i drift i rummet.

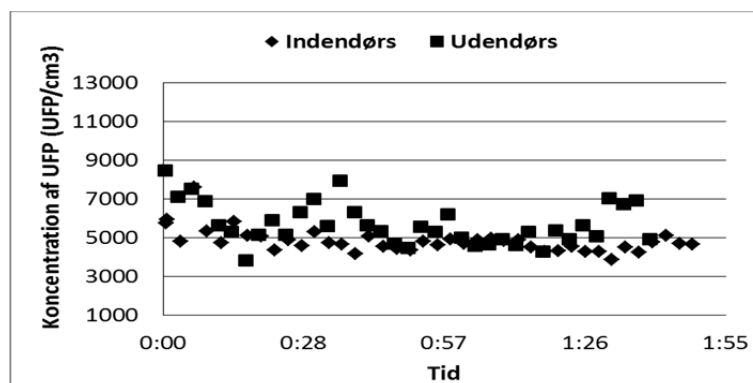
De to andre luftrensere, EFF og 3D, har mekaniske filtre, og det var ikke forventet, at de generere hverken ozon eller UFP i rummet.

Figur 10 viser koncentrationer af UFP i luften i kontorrummet og udendørs, når luftrensere NTP var i drift i rummet. Af resultaterne fremgår, at koncentrationen af UFP udendørs var højere end indendørs.



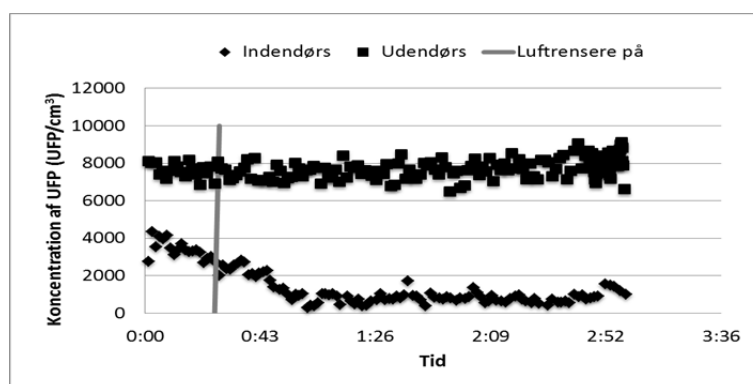
Figur 10. Koncentrationer af UFP i luften i et kontorrum og udendørs når luftrensere NTP var i drift i rummet.

Figur 11 viser koncentrationer af UFP i luften. Rummet har samme niveau som udendørs.



Figur 11. Koncentrationer af UFP i luften i et kontorrum og udendørs når luftrensere PAP var i drift i rummet.

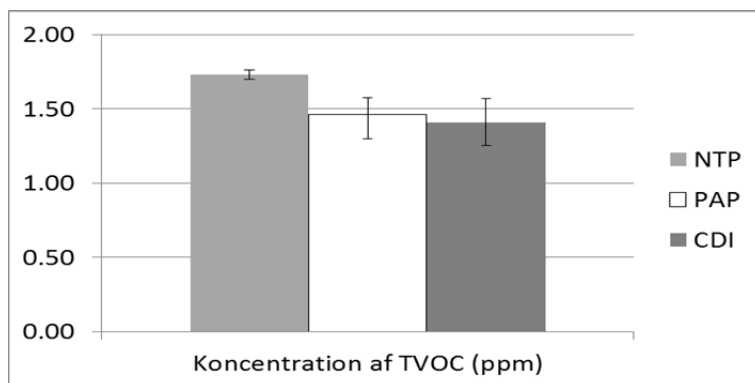
Figur 12 illustrerer koncentrationer af UFP i kontorrummet og udendørs, når luftrensere CDI var i drift i rummet. Af resultaterne fremgår, at koncentrationen af UFP udendørs var højere end indendørs.



Figur 12. Koncentrationer af UFP i luften i et kontorrum og udendørs når luftrensere CDI var i drift i rummet.

Figur 13 illustrerer koncentrationer af TVOC i kontorrummet, når luftrensere NTP, CDI og PAP var i drift. Det er kendt, at ozon sammen med visse flygtige organiske forbindelser kan føre til øgning af UFP (Weschler and Shields, 1999).





Figur 13. Koncentrationer af TVOC i kontorrummet når luftrensere PAP, CDI og PAP var i drift.

Tabel 6 viser beregnede CADR og effektivitet jf. ligning 2, når luftrensere var i drift i et ubenyttet kontorrum.

Tabel 6. Luftrensernes effektivitet ved fjernelse af UFP.

Luftrensere	Henfald. af UFP med luftrensere (h <sup>-1</sup> )	Henfald. af UFP uden luftrensere (h <sup>-1</sup> )	CADR (m <sup>3</sup> /h)	Effektivitet (ε)
NTP	1,1	0,9	13,3	0,2
CDI	3,6	1,2	110,2	0,39
PAP	1,3	0,9	20,0	0,25
EFF	5,2	1,4	180,5	0,42
3D filter	3,7	1,2	117,3	0,4

# Simuleringer

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, hvilken indflydelse placering af luftrensere i rummet har på fjernelsen af ultrafine partikler. 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

Luftrensere kan reducere koncentrationen af ultrafine partikler i rumluften. Det er undersøgt med simuleringer med numeriske beregningsværktøjer til strømninger (CFD) og målinger af, hvordan koncentrationen af ultrafine partikler i rummet afhænger af placering af renser.

Tre forskellige positioner i rummet af luftrenseren blev simuleret, hvor kilder af partikler og luftrensere var i samme højde eller i forskellige højder i rummet. Derudover er effekten af flere luftrensere i drift samt disses placering i forskellige højder over gulv undersøgt.

Simuleringerne blev sammenlignet med eksperimentelle undersøgelser. De eksperimentelle undersøgelser udførtes i testrummet i SBI's Luftkvalitetslaboratorium. Sporgas  $N_2O$  bruges til at måle ventilationsrate i rummet. En multigasmonitor, type 1302 fra Brüel og Kjær blev anvendt til måling af sporgasen. Målinger af partikelkoncentrationer med størrelse fra 7nm til 1000 nm udførtes med partikeltæller Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS). Kilden til generering af ultrafine partikler var et stearinlys, som brændte i en periode på 30 minutter, hvorefter lyset blev taget ud af rummet.

Henfaldshastighed af forskellige målte partikelstørrelser beregnedes og siden sammenlignedes med beregnet henfaldshastighed af målte sporgasser. De eksperimentelle undersøgelser udførtes i testrummet i SBI's Luftkvalitetslaboratorium. Figur 14 viser beregnet henfaldshastigheder af forskellige partikelstørrelser og sporgasser. Beregningerne var baseret på målinger af partikelkoncentrationer og sporgaskoncentrationer i testrummet i SBI's Luftkvalitetslaboratorium.

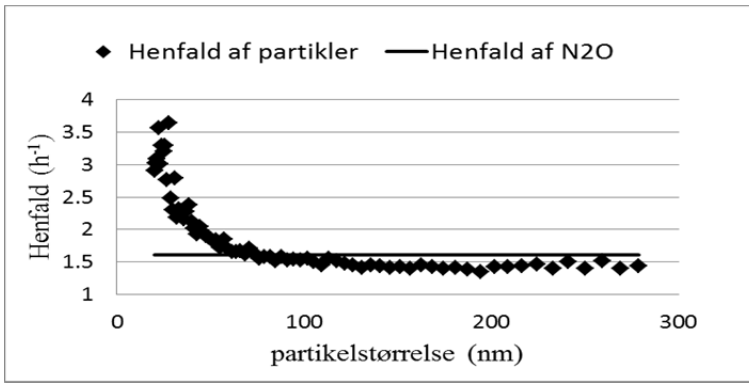
---

<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,  $\epsilon$ .

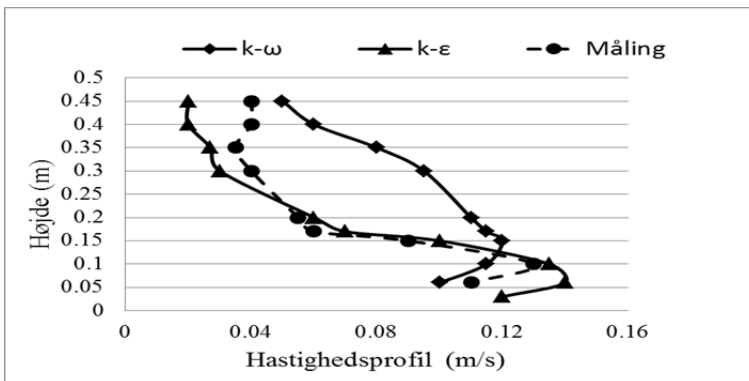
$k-\omega$  modellen er en model, der beskriver turbulensen ved turbulent kinetisk energi,  $k$ , og en specifik dissipation  $\omega$  med enheden  $\text{tid}^{-1}$ .

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 lengdeskaler der er større end cellestørrelsen. Små fluktuationer løses stadig med en simpel turbulent model.



Figur 14. Beregnede henfaldshastigheder baseret på målt partikelkoncentrationer og sporgaskoncentrationer i testrummet.

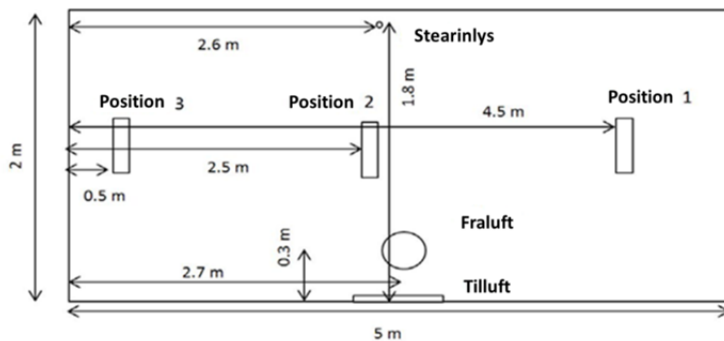
Figur 15 viser CFD-simuleringer af hastighedsprofiler med hjælp af K-epsilon turbulensmodel og K-omega turbulensmodel samt målinger af luftagtigheder i testrummet. Af resultaterne fremgår, at K-epsilon turbulensmodel og målinger af lufthastigheder i rummet ligner hindandens. Y-aksen viser højden fra gulvet foran indløbet i en afstand af 1 meter.



Figur 15. CFD simulering med hjælp af K-epsilon turbulensmodel og K-omega turbulensmodel samt måling af hastighedsprofiler i testrummet

Siden simuleredes placering af luftrensere i tre positioner i rummet med hjælp af K-epsilon turbulensmodel og K-omega turbulensmodel, mens partikelfordelingen i rummet simuleredes ved hjælp af Lagrangianmodellen.

Af Figur 16 fremgår placering af luftrenere i tre positioner; kilder af partikel (stearinlys), rummets tilluft og fraluft.



Figur 16. Placering af luftrensere i tre positioner i et rum.

Forbedring af filtrets tilbageholden af UFP i rummet bestemmes af ligning 3.

$$I = \frac{C_0 - C_i}{C_0} \% \quad i = 1,2,3 \quad 3$$

Hvor

$C_0$  er middelværdikoncentration af UFP partikler, når luftrenseren ikke var placeret i rummet.

$C_i$  er middelværdikoncentration af UFP partikler, når luftrenseren var placeret i rummet.

$I$  er forbedring af filtrets tilbageholden af UFP i rummet i procent (%).

Tabel 7 viser resultaterne af simuleringer af luftrenser placering i testrummet.

Tabel 7. Forbedring af luftrenserens tilbageholden af UFP i trepositioner i testrummet.

Parameter	Placering 1	Placering 2	Placering 3
Afstand til partikelkilde (m)	2,62	1,39	2,65
Forbedring af tilbageholden (%)	26	27	23

# Diskussion

Regeringens Energistrategi 2050 fremhæver, at det offentlige har en særlig forpligtelse til at bidrage til en reduktion af sit energiforbrug (Energistrategi 2050, februar 2011). Øgede krav til energieffektivitet gør det nødvendigt at undersøge mulighederne for at forbedre ventilationssystemer i nye og eksisterende bygninger. Nye løsninger til reduktion af energiforbruget må nødvendigvis fokusere på samtidig optimering af komfort, sundhed, produktivitet og energieffektivitet. Brugernes tilfredshed er i den sammenhæng essentiel, og den påvirkes i høj grad af deres forståelse af de tekniske løsninger og deres mulighed for at tilpasse funktionen til deres aktuelle behov.

For at skabe det rette indeklima bruges ca. 1/3 af energiforbruget af tekniske systemer til ventilation og klimatisering. Et nyere dansk studie påpeger, at elforbruget i ventilationsanlæg er et resultat af systemudformning og valg af komponenter, og undersøgelsen konkluderer, at et anlæg, som er udformet uden hensyntagen til energiforbruget, kan have et specifikt elforbrug, som er en faktor 10 højere, end et energieffektivt design (Mehlsen, K. 1989).

Et ventilationssystem består af flere komponenter, blandt andet filtre. 19 % af det samlede tryktab i ventilationssystemer kan henføres til filtrene. Samtidig er filtrene med til at beskytte ventilationsanlægget og til at sikre et renere indeklima.

I de seneste år har alternative filterteknologier været under udvikling, herunder filtre med lavt tryktab, og der er udviklet teknologier til anvendelse i luftrensere, hvor luften recirkuleres og renses. Blandt disse teknologier kan nævnes fem forskellige filtre, det vil sige

- Ikke-termisk plasma system (NTP: Non Thermal Plasma),
- Koronaudladninger system (CDI: Corona Discharge Ionizer )
- Luftrensningssystem CleanAir (PAP: Portable Air Purifier),
- Elektrostatisk fiberfilter (EFF: Electrostatic Fibrous Filter)
- Tredimensionelt filter.(Three Dimensional Filter)

Formålet med denne undersøgelse er afdækning af muligheder, anvendelsesområder og begrænsninger for anvendelse af recirkulation i kombination med nye luftrensningsteknologier med henblik på forbedring af indeluftkvaliteten. Formålet med undersøgelsen er også at bestemme effektiviteten af transportable luftrensere og at undersøge mulighederne for anvendelse af luftrensere i praksis.

Projektets resultater bør nyttiggøres gennem videreførelse i et projekt i samarbejde med filterfabrikanter, hvor teknikken udvikles yderligere, så den kan anvendes som alternativ for konventionelle filtre i eksisterende ventilationsaggregater. Ud over gode tekniske egenskaber og lave tryktab og dermed et lavt elforbrug til ventilatordrift må også lave livscyklusomkostninger tages i betragtning.

## Ekperimentelle undersøgelser på luftrensningsteknologier

Undersøgelserne af luftrensningsteknologierne CDI, NTP og PAP viser, at koncentrationen af ozon i testrummet steg med henholdsvis 44 %, 33 % og 11 %. Én årsag til øget ozon i testrummet, når NTP og CDI var i drift, er at

Luftrensere med ionizator producerer ozon. Årsagen til at PAP øger koncentrationen af ozon i rummet er, at luftrenseren har en indbygget ozongenerator.

Ved opstilling af en massebalance (Niu et al, 2001, Tung og Niu, 2005) er det muligt at estimere maksimal ozonkoncentration forårsaget af en luftrenser, såfremt kildestyrken, overfladernes sinkeffekt og fjernelse af ozon ved hjælp af ventilation er kendt.

Dette bør observeres, at kemisk reaktion mellem ozon og andre forureninger i indeluften kan føre til dannelse af partikler. Det gælder særlig for oksidative processer med ozon og visse terpenier.

Et bemærkelsesværdigt resultat i dette projekt er, at luftrensningsteknologierne NTP og PAP øgede koncentrationer af UFPs i testrummet efter, at ozonkoncentrationen er øget. Resultaterne tyder på, at der sker en kemisk reaktion mellem den genererede ozon fra luftrensere og kemiske stoffer, som tilføres rummet via ventilationssystemet eller eksisterende kemiske stoffer på rummets overflader (Edwards et al., 2001; Knudsen et al., 1999, Alshawa et al., 2007; Hubbard et al., 2005; Waring et al., 2008).

Af Figur 7 fremgår, at koncentrationer af UFPs nåede maksimumniveauer, og senere var koncentrationen reduceret til baggrundsniveauer. En mulig årsag til reduktionen af UFP er, at kemiske stoffer på rummets overflader og i luften reduceredes, hvorved der ikke sker reaktioner med ozon og derved reduceres koncentrationen af UFP til baggrundsniveauer.

Tabel 4 viser resultanterne af undersøgelsen for sommer- og vinterforhold, når PAP var i drift i testrummet. Det fremgår af tabellen, at koncentrationen af UFP ikke steg under vinterforhold på samme måde som under sommerforhold på trods af, at ozonkoncentrationen øgedes under både vinter- og sommerforholdene. En mulig årsag kan være, at koncentration af terpenier i luften er lav i vinterperioden i sammenligning med sommerperioden. Træ afgiver i sig selv naturlige terpenier. Derimod blev niveauet af UFP ikke øget, når luftrenseren med CDI-teknologi var i drift i rummet. Årsagen kan være, at CDI selv kan fjerne de genererede partikler.

Derudover udførtes eksperimentelle undersøgelser af luftrensningsteknologier i et kontorrum. Figur 9 illustrerer koncentrationer af UFP i kontorrummet, når luftrensere hver for sig var i drift i kontorrummet. Af resultaterne fremgår, at koncentrationen af ozon øges, når NTP, CDI og PAP er i drift i rummet. Af figurerne 10, 11, 12 fremgår, at koncentrationen af UFP udendørs var højere end indendørs. Dette indebærer, at på trods af at alle tre luftrensere genererede forskellige niveauer af ozon i kontorrummet, øgedes koncentrationen af UFP ikke i rummet. Dette kan bero på, at terpenier i luften i kontorrummet var på et lavt niveau. En mulig årsag kan være, at kemiske stoffer absorberes i materialet, og der ikke sker kemiske reaktioner mellem ozon og terpenier i kontorrummet.

Resultaterne af målinger før og efter luftrensere, dvs. evalueringer af udskilningsgrad og sideeffekter, blev anvendt som grundlag for undersøgelser af luftrensers indvirkning på UFP i rummet, dvs. luftrensers effektivitet.

Tabel 5 og Tabel 6 viser kalkulerede CADR og effektiviteten af fjernelse af UFP for alle fem luftrensere, når luftrensere var i drift hhv. i testrummet og i kontorrummet. Ifølge tabellerne er effektiviteten af EFF det højeste. To andre teknologier, 3D Filter og CDI, har effektivitet af samme størrelsesorden som EFF.

Ifølge undersøgelser på luftrensningsteknologier i både testrummet og kontorrummet kan man konkludere, at EFF har den højeste effektivitet. I modsætning til NTP, CDI og PAP genererer denne teknologi ikke ozon og heller ikke UFP. Desuden har EFF et lavt trykfald, ca. 5 Pa ved 60 l/s. Det skal bemærkes, at effektiviteten af EFF falder hurtigere med tiden i sammenligning med andre luftrensere. Effektiviteten og levetiden af EFF kan forbedres ved at kombinere EFF med en Ionizator før filtret.

## Simuleringer

### Placeringen af luftrensere

Resultaterne af evalueringen af luftrensere med henblik på generering af ozon og dannelsen af partikler kan betragtes som et grundlag for CFD-simuleringen. Målet med simuleringerne var at studere, hvilken indflydelse placeringen af luftrenseren i testrummet har på fjernelsen af UFP.

Som vist i tabel 6 har placeringen kun lille indflydelse på den gennemsnitlige partikelkoncentration.

Figur 14 viser beregnede henfaldshastigheder af forskellige partikelstørrelser og sporgasen  $N_2O$ . Beregningerne er baseret på målinger af partikelkoncentrationer og koncentrationer af sporgasen i testrummet i SBI's luftkvalitetslaboratorium. Af resultaterne fremgår, at partikler med en diameter på mindre end 73 nm havde en højere henfaldshastighed end sporgassen, mens partikler større end 73 nm havde en lavere henfaldshastighed end sporgas. Resultaterne har betydning for, hvordan CFD anvendes, når målet er at estimere spredning af partikler.

# Konklusioner

I Danmark opholder mennesker sig en stor del af tiden indendørs. Her udsættes vi for forureninger i indeluften, hvilket skaber et vigtigt folkesundhedsproblem. Forureninger, herunder gasser og partikler, tilføres indeklimaet udefra. Forureninger kan også blive genereret indendørs ved fx madlavning, tændte stearinlys, emission fra inventar og byggematerialer. Partikler inddeles i grove, fine og ultrafine partikler (UFP) afhængig af størrelsen. Forskning har indikeret, at udsættelse for UFPs (diameter mindre end 100 nanometer (nm)) kan indvirke sundhedsskadeligt på den menneskelige krop.

Almindeligvis peger forskere på, at forøget ventilation er en metode til at nedbringe koncentrationen af partikler i indeluften. Dette fører imidlertid til et øget energibehov til opvarmning af ventilationsluften og drift af ventilatorer. Derfor diskuteres også recirkulation af luft gennem transportable luftrensere.

Fokusområdet for denne undersøgelse er afdækning af muligheder, anvendelsesområder og begrænsninger for at bruge recirkulation i kombination med nye luftrensningsteknologier med henblik på forbedring af indeluftkvaliteten. Formålet med undersøgelsen er at bestemme effektiviteten af transportable luftrensere og at undersøge løsningsmetoder for anvendelse af sådanne luftrensere med det formål at reducere koncentrationen af UFPs i indeklimaet.

Konklusionen er:

- Rensningsteknologier, som genererer ozon, øger niveauet af ozon i indeluften, hvorved koncentrationen af ultrafine partikler kan øges. Partikler genereres ved reaktion mellem ozon og flygtige organiske forbindelser i rummet.
- Fem luftrensningsteknologier er afprøvet under laboratorieforhold og i et ubenyttet kontorrum. Resultatet er, at EFF (Electrostatic Fibrous Filter) har den højeste effektivitet. EFF har lavt tryktab og dermed kortere levetid.
- I forbindelse med CFD-simulering af partikkelkoncentration er det nødvendigt at tage hensyn til partiklernes størrelse. Partikler, som har en diameter mindre end 73 nm, havde et hurtigere henfald end sporgas. Dette betyder, at hvis partikler i forbindelse med CFD-simuleringer betragtes som gas, eller hvis partikler antages at være ens i størrelse, kan resultaterne afvige fra virkeligheden.
- CFD-simuleringerne viste, at luftrenserens placering i et rum med fortrængningsventilation har minimal indflydelse på luftrenserens effektivitet.



# Litteratur

Afshari, A., Matson, U., Ekberg, L.E., 2003. Characterisation of in-door sources of fine and ultrafine particles: A study conducted in a full-scale chamber, *Indoor Air*, Vol. 15, pp 141 – 150.

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.

Alshawa, A., Russell, A.R., Nizkorodov, S.A., 2007. Kinetic analysis of competition between aerosol particle removal and generation by ionization air purifiers. *Environmental science & technology* 41, 2498–504.

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.

CEN CR 1752., 1998. Ventilation of Buildings – Design Criteria for Indoor Environment, European Committee for Standardization, December 1998.

DIRECTIVE 2002/91/EC on the Energy Performance of Buildings  
Energistyrelsen, Energistatistik 2006, <http://www.ens.dk/sw11610.asp>

Edwards, R., Jurvelin, J., Koistinen, K., 2001. VOC source identification from personal and residential indoor, outdoor and workplace microenvironment samples in EXPOLIS-Helsinki, Finland. *Atmospheric Environment* 35 (28), 4829-4841.

Energistyrelsen, Energistatistik 2006

<http://noah.dk/wp-content/uploads/2012/01/E7-Energistatistik-2006.pdf>

Energistrategi 2050, februar 2011. Energistrategi 2050 – fra kul, olie og gas til grøn energi.

[http://www.ens.dk/sites/ens.dk/files/forbrug-besparelser/energipareraadet/moeder-energipareraadet/moeder-energipareraadet-16-marts-2011/Energistrategi2050\\_sammenfatning.pdf](http://www.ens.dk/sites/ens.dk/files/forbrug-besparelser/energipareraadet/moeder-energipareraadet/moeder-energipareraadet-16-marts-2011/Energistrategi2050_sammenfatning.pdf)

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.

Hubbard, H.F., Coleman, B.K., Sarwar, G., Corsi, R.L., 2005. Effects of an ozone-generating air purifier on indoor secondary particles in three residential dwellings. *Indoor air* 15, 432–44.

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

Knudsen, H.N., Kjaer, U.D., Nielsen, P.A., Wolkoff, P., 1999. Sensory and chemical characterization of VOC emissions from building products: impact of concentration and air velocity. *Atmospheric Environment* 33, 1217–1230.

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.

Mehlsen, K., 1989. *VVS*, Årg. 25, nr. 6 S. 8, 10.

Nielsen, P.V., Jiang, H., and Polak, M., 2007. Bed with Integrated Personalized Ventilation for Minimizing Cross Infection. *Roomvent 2007a*, 10th International Conference on Air Distribution in Rooms, Helsinki 2007.

Niu, J., 2001. Ozone emission rate testing and ranking method using environmental chamber. *Atmospheric Environment* 35, 2143–2151.

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.

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.

Nielsen, P.V., Bartholomaeussen, N.M., Jakubowska, E., Jiang, H., Jonsson, O.T., Krawiecka, K., Mierzejewski, A., Thomas, S.J., Trampczynska, K., Polak, M., and Soennichsen, M., Chair with Integrated Personalized Ventilation for Minimizing Cross Infection. *Roomvent 2007b*, 10th International Conference on Air Distribution in Rooms, Helsinki 2007.

Pekárek, S., 2003. Non-Thermal Plasma Ozone Generation. *Acta Polytech* 43(6), 47-51.

Przekop, R. G., 2004. Experimental studies of aerosol particles resuspension in fibrous filters 25, 1557–1562.

Schweizer, C., R.D. Edwards, L. Bayer-Oglesby, W.J. Gauderman, V. Ilacqua, M.J. Jantunen, H.K. Lai, M. Nieuwenhuijsen and N. Künzli, 2007: Indoor time–microenvironment–activity patterns in seven regions of Europe. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 17, 170–181. doi:10.1038/sj.jes.7500490; published online 17 May 2006.

Seppänen, O. A., Fisk, W. J. and Mendell, M. J., 1999. Association of ventilation rates and CO<sub>2</sub>- concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings (*Indoor Air*, vol. 9, December, pp. 226-252).

Seppänen, O. A., Fisk, W. J., Lei, G. H. and Heinonen, J., 2006 Ventilation and work performance (*Proceedings of EPIC 06*, vol. 3.

- Shimer, D., Phillips, T. J. and Jenkins, P. L., 2005. Indoor air pollution in California - Report to the California Legislature. (California Environmental Protection Agency - Air Resources Board.), 27 pages. California, USA.
- Stafford, R.G., Ettinger, H.J., 1972. Filter efficiency as a function of particle size and velocity. *Atmospheric Environment* (1967) 6, 353–362.
- 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., Hoek, G., 2012. Respiratory Health Effects of Airborne Particulate Matter: The Role of Particle Size, Composition, and Oxidative Potential-The RAPTES Project. *Environmental health perspectives* 120, 1183–9.
- 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.
- Tung, T., Niu, J., 2005. Determination of ozone emission from a domestic air cleaner and decay parameters using environmental chamber tests. *Indoor and Built Environment*, 14(1), 29-37.
- 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. S., 2001. Electrostatic forces in fibrous filters—a review. *Powder Technology* 118, 166–170.
- Wargocki, P., Wyon, D. P. and Sundell, J., 2000. The effect of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome (SBS): Symptoms and productivity (*Indoor Air*, vol. 10, pp. 222-236).
- Wargocki, P., Wyon, D. P. and Fanger, P. O., 2004. The performance and subjective responses of call-center operators with new and used supply air filters at two outdoor air supply rates (*Indoor Air*, vol. 14, nr. 8, pp. 7-16).
- Waring, M.S., Siegel, J. A., Corsi, R.L., 2008. Ultrafine particle removal and generation by portable air cleaners. *Atmospheric Environment* 42, 5003–5014.
- Weschler, C.J., Shields, H.C., 1999. Indoor ozone / terpene reactions as a source of indoor particles 33, 2301–2312.
- Wyon, D.P., Wargocki, P., Toftum, J., Clausen, G., 2010. Classroom ventilation must be improved for better health and learning. / In: *The REHVA European HVAC Journal*, Vol. 47, No. 4, 2010, p. 35-39.

# Appendiks

Resumé af artikel I:

***Evaluation of air cleaning technologies existing in the Danish market: Experiments in a duct and in a test room.***

*Siamak Rahimi Ardkapan, Alireza Afshari, Niels C. Bergsøe, Peter V. Nielsen*

*Published online in Indoor and Built Environment, August 2013*

<http://ibe.sagepub.com/content/early/2013/08/27/1420326X13501097>

Accepted for publ. in Indoor and Built Environment, July 2013.

## **Abstract**

Five portable air cleaning technologies including one new technology were evaluated to find their effectiveness in removing ultrafine particles. Measurements were carried out both in a duct and in a test room. The results showed that the technologies that use/create ozone to clean air can increase the ozone level significantly in the room. Moreover, they can cause generation of ultrafine particles and consequently increase ultrafine particle concentration in the room. The study suggests using a mechanical filter with low pressure drop as a recommended air cleaning technology in order to remove ultrafine particles efficiently from the indoor environment.

## Resumé af artikel II

### ***Comparing the Performance of a New Electrical Aerosol Detector with other Counters.***

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

*In the Proceedings of Indoor Air conference, 2011*

#### **Abstract**

UFPs are known to be harmful to the human respiratory system. Therefore, measuring the concentration of UFPs is common in research areas related to human health. Different technologies exist for measuring the number and size of particles. In the present study, a new electrical aerosol detector was compared with two other particle measuring technologies, scanning mobility particle sizer and condensation particle counter. An electrical aerosol detector charges particles and later counts them according to their electrical movement. The particle counters were tested in a clean room with clean supply air. The results showed that the three counters follow a similar pattern at a low level of particle concentrations. An exponential relationship was found between the electrical aerosol detector and the scanning mobility particle sizer for high concentrations of particles. The condensation particle counter showed a lower particle concentration i.e. around 100,000 particles per  $\text{cm}^3$  at high concentrations.

## Resumé af artikel III

### ***Performance and effectiveness of portable air cleaners in an office room: An experimental study.***

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

*Submitted to Indoor and Built Environment, August 2013*

#### **Abstract**

Many people work in an office environment nowadays. Air pollutants, including particles and gases, are generated by human, different devices used in the offices and also they come indoors through the air supplied from outdoor. It has been established that the air pollutants have reverse health effects on human body. Air cleaning devices are commonly marketed as being beneficial to remove air pollutants and consequently improving indoor air quality. This study aims to evaluate the performance and the particle removal effectiveness of five air cleaning technologies including three ozone initiating technologies and two filters in an office room located in an empty building. The performances of the three air cleaning technologies were tested in order to determine the generation of ozone and particle in the office room. The particle removal effectiveness of the technologies was also determined in order to clarify their ability in removing ultrafine particles in the office room. The tested five air cleaning technologies are Non Thermal plasma, Corona Discharge Ionizer, Portable Air Purifier, Electrostatic Fibrous Filter and Three Dimensional Fibrous Filter. The interior surfaces of the office room emit low level of volatile organic compounds, since the office room is not renovated for about two decades. The concentration of ultrafine particles, ozone, TVOCs, temperature and relative humidity were measured continuously and simultaneously in indoor air and outdoor air. The results show that the particle removal effectiveness of the technologies was between 0.2-0.45 for the office room. The three technologies using/generating ozone can significantly increase the ozone level in the office room. However, no increase of the ultrafine particle concentration is detected.

## Resumé af artikel IV

### ***Simulation of particle distribution in a room with air cleaner.***

*Siamak Rahimi Ardkapan, Alireza Afshari, Peter V. Nielsen, Ahsan Iqbal, Niels C. Bergsøe.*

*In the proceedings of Healthy Building conference, 2012*

#### **Abstract**

Ventilation is one of the ways that humans can keep the indoor air quality at the proper level. Portable air cleaners have been developed to improve indoor air quality while reducing the energy consumption of the ventilation system. The aim of this study is to find the correct turbulence model and particle phase model for simulating an air cleaner in a room. In addition, the aim is to study the impact of location of an air cleaner in a room. The dynamics of the particle inside a room was simulated by computational fluid dynamics software. Furthermore, the air change rate was measured by both tracer gas and particles with different sizes. The proper turbulence model was selected after comparing the results with the behaviour of the gas in the test room. The simulations showed the effect that the location of an air cleaner had on the particle level. The results showed that the location of the air cleaner in relation to inlet, outlet and particle source had a significant effect on the effectiveness of the air cleaner.