



Smart ventilasjon med lave utslipp gir sunne og komfortable bygg

Laurent Georges¹, Håvard Bergsdal², Luis Caetano², Maria Justo Alonso² og Hans Martin Mathisen¹

FME ZEN: (1) NTNU og (2) SINTEF Community



I dette dokumentet gir vi anbefalinger om tiltak for storskala realisering av smart ventilasjon med lavt klimafotavtrykk. Vi gjør rede for hvordan CO₂-utslipp fra materialbruk i ventilasjonsanlegg kan reduseres, og hvordan digital omstilling kan effektivisere energibruk og sikre høy innendørs luftkvalitet. For å lykkes med dette trenger vi fremtidsrettet utvikling i ventilasjonsbransjen og endringer i regelverket.

En ny æra for ventilasjon!

Den norske byggeforskriften har gjennom flere tiår gradvis skjerpet kravene til ventilasjon og innendørs luftkvalitet (IAQ). Flere drivere påvirker imidlertid dagens ventilasjonsteknologi og praksis. Forskningscenteret for nullutslippsområder (ZEN) har satt fokus på to hovedaspekter:

- **Utslipp fra materialer:** Når vi tar hele levetiden til bygningen i betraktning, ser vi at CO₂-utslippene fra byggematerialer ikke er ubetydelige sammenlignet med utslipp knyttet til bygningsdrift. I løpet av de siste tiårene er dette også påvist gjennom forskning. Nylig er denne konklusjonen utvidet til også å dekke tekniske installasjoner i bygninger, inkludert ventilasjon. Derfor bør ventilasjonsdesign og praksis tilpasses for å minimere materialrelaterte utslipp, samtidig som høy innendørs luftkvalitet og energieffektivitet opprettholdes.
- **Smart ventilasjon:** Ventilasjonssystemer påvirkes av den digitale omstillingen. Sensorteknologien har utviklet seg og gir muligheter for å måle flere luftforurensninger, kalt luftkvalitetsparametere. I tillegg blir datamengden fra sensorer i bygninger større og mer tilgjengelig. Kombinert med statistisk dataanalyse, maskinlæring (ML) eller kunstig intelligens (KI), muliggjør det mer



energibesparende styring av ventilasjonssystemer, bedre diagnostisering av feil og avvik og kvalitetssikring av inn klimaet.



Vi mener at materialutslipp bør inkluderes i ventilasjonsdesign. Nye og trådløse sensorteknologier og kunstig intelligens vil påvirke måten vi overvåker, kvalitetssikrer og styrer ventilasjonssystemer, for å oppnå bedre innendørs luftkvalitet, lavere energibruk, økt brukertilfredshet og produktivitet.

I denne Policy Briefen kommer vi med **anbefalinger** for storskala realisering av smart ventilasjon med lavt klimafotavtrykk.



Anbefalinger

1) Anbefalinger til politikere, reguleringsmyndighet, standardiseringsorganer og virkemiddelapparat

Materialutslipp er viktig

Forskning viser tydelig at klimagassutslipp fra materialer i tekniske installasjoner, inkludert ventilasjon, representerer en betydelig del av livsløpsutslipp fra bygninger.

- **Ventilasjonsdesign for å redusere materialutslipp må aldri bli brukt på bekostning av hovedfunksjonen til ventilasjonen**, dvs. helse, energi-effektivitet og komfort. Først og fremst må materialutslipp ikke brukes som argument for ikke å ventilere bygninger på en tilfredsstillende måte (f.eks. ved å fjerne viktige komponenter).
- **Byggeforskrift og sertifiseringsordninger bør bidra til å bane vei for markedsdrevet innovasjon for å redusere materialutslipp**

På kort sikt kan dette gjøres ved å utvide gjeldende krav i byggeforskriften til å **evaluere** materialrelaterte utslipp fra ventilasjonsanlegg. I første omgang kan dette gjøres for de komponentene som bidrar mest til disse utslippene (dvs. kanalnett og luftbehandlingsaggregat), og deretter gradvis inkludere andre komponenter. Dette kravet vil:

- Øke behovet for konsistente databaser for livsløpsinventar (LCI) og mengden av miljødeklarasjoner (EPD).
- Stimulere programvareutviklere til å ta inn livsløpsanalyser (LCA) i dagens verktøy for ventilasjonsdesign (f.eks. BIM til LCA).
- Fremme utvikling av ventilasjonsprodukter med lave innebygde utslipp.
- Gjøre det mulig for entreprenørene å begrunne den ekstra tiden som er nødvendig for å evaluere materialutslipp ettersom bransjen er i begynnelsen av læringskurven. Bedre verktøy og mer erfaring vil redusere denne evalueringstiden.

På lengre sikt vil det samles inn nok resultater til at det kan settes **referanseverdier for totale klimagassutslipp** for de ulike typene av ventilasjonsanlegg. Totale utslipp kombinerer materialutslipp og utslipp fra energi i driftsfasen. Disse referanseverdiene kan brukes som ytelsesgrenser for byggeforskrift.



- **Utvikle et tydelig regelverk og rammeverk for evaluering av totale utslipp.** Resultatene fra livsløpsanalyser (LCA) er avhengig av scenariene som vurderes, som eksempelvis:
 - Ventilasjonsdesignet bør optimaliseres for å minimere de totale livsløpsutslippene. For å vurdere den relative betydningen av utslippene fra materialer og drift kreves det enighet om en realistisk CO₂-faktor for utslipp fra elektrisitet.
 - Realistiske og standardiserte levetider for ventilasjonskomponenter bør defineres siden de har sterk påvirkning på utskiftingsscenarier og resulterende livsløpsutslipp.

Reell ytelse kan måles

Byggteknisk forskrift setter i noen sammenhenger minste ytelseskrav for å kunne oppfylle funksjonskrav. Forskning og praksis viser at alternative ytelseskrav kan føre til bedre funksjonskrav. Ny sensorteknologi og tilgang på mer måledata samt bedre dimensjoneringsverktøy kan sikre at funksjonskrav oppnås i virkeligheten.

- **Andre parametere for luftkvaliteten:** Byggeforskriften bør gi fleksibilitet til å bruke måling av andre parametere for innendørs luftkvalitet for å sikre god luftkvalitet i stedet for å kun fokusere på luftmengder (via CO₂). Parallelt bør det stilles krav til de forskjellige luftforurensninger som skal måles for ulike typer bygninger, plassering av sensorer og nøyaktigheten som kreves for slike målinger. For eksempel kan det kreves at retningslinjer for innendørs luftkvalitet gitt av Verdens helseorganisasjon (WHO) oppfylles i minst 80 % av rommene i bygningen.
- **Grenseverdier for luftkvalitetsparametere:** WHO's grenseverdier er utviklet for spesifikke forhold. De bør omformuleres til verdier egnet for realistisk bygningsdrift og ventilasjonsstyring.
- **Regelverk må ha fokus på reell ytelse:** Krav til feltmålinger kan settes for å forhindre mulige avvik mellom reell drift og nominell ytelse målt i standardiserte laborietester (eller produkter optimalisert for kun å oppfylle gjeldende krav i byggeforskrift). For eksempel kan elektrisitetsforbruket til vifter (med spesifikk vifteeffekt, SFP, som en indikator) og varmegjenvinners virkningsgrad måles og sammenlignes med design og regulatoriske grenseverdier. I tillegg bør luftkvaliteten måles direkte og ikke bare vurderes ut fra luftmengder. Sensorer som brukes til å måle luftkvalitet, bør ha dokumenterte krav til målenøyaktighet og presisjon, samt gjennomgå regelmessig kalibrering.



2) Anbefalinger til alle beslutningstakere

Vi må se det store bildet – ventilasjonssystemer optimaliseres som en del av en helhet.

Regulatoriske og tekniske beslutninger om ventilasjon bør settes i rett perspektiv. Selv om det er viktig, handler det ikke bare om lave investeringskostnader for eiendomsutviklere og eiere.

- **Kvantifiser samfunnsnyttene av ventilasjon.** Gevinsten av god ventilasjon for helse, komfort og produktivitet bør tas med i vurderingen av politikken, inkludert i kostnadsvurderingen. Hvor mye koster lavere produktivitet eller økt fravær på grunn av dårlig ventilasjon og inneklimate? Hvor mye påvirker inneklimate læringsmiljøet i skoler? Investering i ventilasjon bør balanseres riktig med samfunnsnyttene. Det gjelder også eiendomsutviklere når de definerer sine ambisjoner for nye prosjekter. Å sikre bedre komfort og helse har en kostnad, men også en antatt større gevinst.
- **Koordinering på europeisk nivå er viktig.**
 - Norge er et lite marked. Gitt aktørene og størrelsen på ventilasjonsmarkedet, trenger produsenter og programvareutviklere et stort marked for å finansiere utvikling av nye løsninger. Dette krever at løsninger er standardiserte. Europeiske standarder er derfor sentrale og norske standarder bør samsvare med disse. Dette vil for eksempel avklare metodiske aspekter ved LCA når sirkulærøkonomiske prinsipper anvendes (eks. gjenbruk og reparasjon av ventilasjonskomponenter). Dette vil også fremme stabiliteten, holdbarheten og robustheten til lavprissensorer for måling av innendørs luftkvalitet.
 - Den nyeste revisjonen av det europeiske direktivet for energieffektivitet i bygninger (EPBD) [1] stiller krav om måling av luftkvalitet, som medlemslandene skal implementere i sin nasjonale lovgivning. Det er avgjørende at Norge tar en ledende rolle ved å etablere klare og ambisiøse spesifikasjoner som kan bidra til å forbedre nasjonal luftkvalitet. For å evaluere kostnadseffektiviteten vil ett nytt EPBD rammeverk ta inn helsemessige eksternaliteter i beregningen (f.eks. ekstrakostnader på grunn av dårlig luftkvalitet).

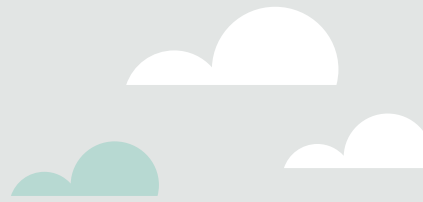
3) Anbefalinger for forsknings- og innovasjonsmiljøer

Vi trenger mer kunnskap og innovasjon

Økt kunnskap, erfaring og teknologisk innovasjon er nødvendig for å nå potensialet for pålitelig og effektiv ventilasjon med lave utslipp:



- **Mer erfaring og flere pilotprosjekterer nødvendig.** Kunnskap om hvordan livsløpsutslipp vil påvirke design av ventilasjonsløsninger er fortsatt begrenset. Flere studier bør gjøres før løsninger generaliseres. Det er fortsatt viktig å utvikle og analysere pilotprosjekter med smarte, lavutslipps ventilasjonssystemer eller ny styring av innendørs luftkvalitet. For eksempel bør det utføres storskala testing av bygninger ventilert med omluft.
- **Teknologiutvikling.** Utvikling av komponenter designet for lave materialutslipp (f.eks. bedre materialer) og forlenget levetid (f.eks. forberedt for reparasjon) er nødvendig. Utvikling av programvare som integrerer LCA i dagens ventilasjonsdesignverktøy (eks. ved bruk av BIM) vil gjøre det lettere å designe lavutslippsløsninger.
- **Bidra til debatt og standardisering.** Standardiserte levetider for ventilasjonskomponenter bør defineres ut fra en vitenskapelig tilnærming. Etablering av grenseverdier for de forskjellige parameterne for innendørs luftkvalitet åpner for bedre inneklimakontroll.
- **Kunnskapsbehov.** Det er nødvendig med mer forskning på (reduerte) friskluftmengder når det gjelder luftfordeling, forurensnings- og helseeffekter.



Vedlegg

Hvordan ble oppsummeringsarbeidet gjort?

I løpet av det siste året av FME ZEN har det vært fokus på oppsummering av resultater, å trekke hovedkonklusjoner og gi anbefalinger for bransjen og andre. Arbeidet med policy brief for ventilasjon har vært en prosess basert på en kritisk og konstruktiv dialog mellom ZEN-forskere, offentlige aktører og industrien, dvs. ZEN-partnere og noen sentrale aktører utenfor ZEN. Basert på forskning og erfaringer har forskerne i FME ZEN satt sammen anbefalingene dere finner i denne policy briefen.

Oppsummeringsarbeidet har vært delt inn i tre trinn våren 2024. Først ble det arrangert et seminar hvor resultater fra forskningen ble formidlet til, og diskutert med deltakerne. Neste trinn var utsendelse av et spørreskjema til seminardeltakerne hvor de kunne gi tilbakemeldinger og synspunkter på temaene. Det tredje trinnet innebar en avsluttende workshop for å diskutere temaene ytterligere basert på innspill fra spørreskjemaet, og for å foreslå tiltak for å fremme videre bruk og implementering av ny teknologi og praksis innen ventilasjon.

Hvorfor må vi ventilere?

Folk tilbringer mer enn 90 % av tiden innendørs og puster inneluft. En voksen person puster normalt 6 til 8 liter luft per minutt. Forurensningene slippes ut innendørs av brukerne (i form av åndedrett og kroppslukt), brukeraktiviteter (f.eks. printere, matlaging), eller fra bygningselementer som ikke er relatert til tilstedeværelsen (som møbler). Innendørs forurensning kan også komme fra kilder utendørs, selv om partikler (PM) i uteluften kan filtreres før den tas inn i bygget.

Ventilasjonens rolle er å fjerne og/eller fortynne forurensninger i romluften. Romluft erstattes med uteluft (antatt uforurenset) eller filtrert resirkulert luft. God inneluftkvalitet har en positiv innvirkning på helse, brukerkomfort og velvære samt produktivitet. Ventilasjon kan også brukes til å modifisere den relative fuktigheten og innetemperaturen. I tillegg har COVID-19-pandemien tydeliggjort at effektiv ventilasjon kan bidra til å begrense infeksjon fra luftbårne patogener.



Materialutslipp fra ventilasjonsanlegg

Evaluering av materialutslippene fra ventilasjonssystemer

Mens materialutslipp fra bygningskroppen har blitt grundig studert de siste årene, har tekniske installasjoner som ventilasjonssystemer blitt utelatt eller inkludert med kun svært forenklede estimater [2]. Dette på grunn av en generell mangel på data av god kvalitet. Ny forskning i ZEN og hos tilknyttede partnere [3] viser at ventilasjonssystemer kan representere en betydelig del av de totale materialutslippene i moderne bygninger, med kanalsystemer og luftbehandlingsaggregater som de største bidragsyterne. En årsak er den lange levetiden til bygninger som krever utskifting av mange ventilasjonskomponenter.



Tekniske installasjoner kan representere opptil 20-40% av klimagassbelastningen fra materialer fra nye bygninger. Ventilasjonssystemet er ett av de to største bidragene. Kanaler og luftbehandlingsaggregater er de største bidragsyterne til ventilasjonssystemet.

Tre hovedutfordringer bremser en systematisk evaluering av materialutslipp fra ventilasjonssystemer:

1. Det er vanskelig å forutsi de materialrelaterte klimagassutslippene over bygningens levetid. Utslipp knyttet til utskifting av ventilasjonskomponenter er viktig. Imidlertid er det mangel på vitenskapsbaserte eller standardiserte **levetider** for individuelle komponenter. Videre kan endret bruk av bygget nødvendiggjøre utskifting av komponenter før de når sin tekniske levetid. Til slutt bør levetiden til nøkkelkomponenter forlenges ved å bruke godt planlagte strategier for vedlikehold og sluttbehandling (dvs. mulig gjenbruk og eventuelt avfallsbehandling) for å redusere livsløpsutslipp.
2. Å redusere miljøbelastningen fra ventilasjonssystemer vil kreve oppmerksomhet og tiltak fra tidlig planlegging til levetidens slutt. Det er for tiden **manglende data tilgjengelig** [4] om fotavtrykkene til ulike komponenttyper, dimensjoner og tekniske variasjoner. Imidlertid er EPD-er en god kilde for standardisert miljøinformasjon, og mengden EPD-er for ventilasjonskomponenter øker raskt. Dette forventes å forbedre seg betydelig i årene som kommer som følge av både markeds- og myndighetskrav.
3. Minimering av påvirkningene fra ventilasjonssystemer krever verktøy som kan analysere og visualisere effekten av valg i systemlayout på en enkel måte (fra tidlig evaluering av systemløsninger til optimalisering under detaljprosjektering). Det mangler **verktøy som integrerer** miljøinformasjon og ventilasjonsdesign. Bygg- og ventilasjonsdesign utføres i verktøy som BIM mens miljøvurdering utføres i andre verktøy. Informasjonsflyten mellom disse verktøyene er ikke automatisert og krever mye tid og ressurser.

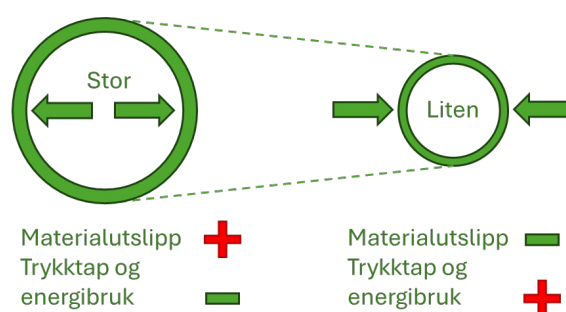


Å tilby produkter og løsninger med lavere miljøpåvirkning vil være et krav fra samfunnet gjennom strengere fremtidige reguleringer, samt være et konkurransefortrinn i et marked som konsekvent beveger seg mot økt vekt på miljøprestasjon. Dette bør innebære forbedringer av eksisterende produkter, men også mulige alternative materialer, levetidsforlengelse gjennom design for reparasjon (eks. med delvis utskifting av delkomponenter), gjenbruk, ettermontering og resirkulering.

Eksempelvis har deltakere innenfor forskningsprosjektet Grønn VVS [5] demonstrert at man kan oppnå en betydelig ombruksgrad. For et spesifikt prosjekt med leietakertilpasning av et kontorlokale ble det oppnådd en ombruksgrad på 54% (vektbasis) gjennom bevaring av materialer, bruk av eksterne ombruksmaterialer og overskuddsmaterialer. Gjennom resirkulert andel i nye materialer nådde man en ombruksgrad på 74%, og også viktige VVS-komponenter som ventilasjonsaggregat ble ombrukt. Dette viser at betydelig grad av gjenbruk er allerede mulig, selv i et relativt umodent marked.

Ventilasjonsdesign for å minimere totale klimagassutslipp

I Norden har de fleste bygninger mekanisk ventilasjon med vifter på grunn av det kalde klimaet. Viftene bruker mye strøm for å flytte luft inn og ut av bygningen og mellom rom. I store deler av året har den tilførte friskluften lavere temperatur enn innendørs. Den tilførte uteluften må varmes opp, noe som også krever mye energi. Moderne ventilasjonsteknologi minimerer denne energibruken i drift og de relaterte utslippene av klimagasser (GHG), men uten å ta hensyn til materialutslipp. Som diskutert, er materialutslippene relativt store. I fremtiden bør ventilasjonssystemet derfor optimaliseres i henhold til livsløpsutslipp, slik at reduksjon av energibruken ikke medfører økte materialutslipp [6].

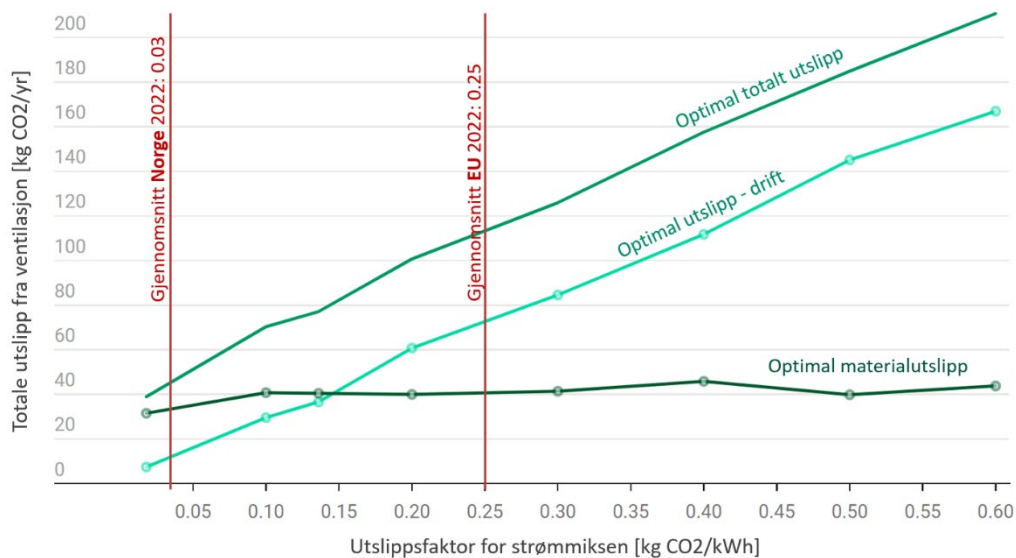


Balansen mellom utslipp fra materialer og i drift i forhold til kanalstørrelse.

Kanalnett er den største bidragsyteren til materialutslipp fra ventilasjonssystemet. Vifter krever elektrisitet for å flytte luft gjennom kanalnettet, og de genererer det meste av utslippene i driftsfasen. Det er derfor logisk å først fokusere på optimal utforming av kanalnettet, før andre komponenter. Større kanaler vil redusere utslipp i driftsfasen ved å redusere energibruk som kreves for vifter, men kan på den annen

side øke utslippene på grunn av høyere materialbruk. Et design med optimal kanalstørrelse kan oppnå lavere totale utslipp.

På grunn av dette har FME ZEN utviklet et integrert LCA-designverktøy som optimerer kanalstørrelsene med hensyn til både utslipp i drift og fra materialer. En casestudie i FME ZEN viser at **optimaliserte design kan redusere bygningers totale livsløpsutslipp betydelig**. Hovedkonklusjonen er at det optimale designet er sterkt påvirket av CO₂ faktoren til elektrisitetsmiksen. Jo renere denne elektrisitetsmiksen er, desto viktigere er materialutslippene. Dessverre er denne CO₂ faktoren for elektrisitet kompleks å etablere, og verdien vil til syvende og sist være politisk styrt, og kanskje kontroversiell. Det bør oppnås konsensus om verdien for å kunne optimalisere i henhold til totale utslipp. Som tidligere nevnt er det viktig å integrere dagens ventilasjonsdesignverktøy, som BIM, med LCA-verktøy for å muliggjøre helhetlig design. Dette vil redusere designtiden og minimere feil.

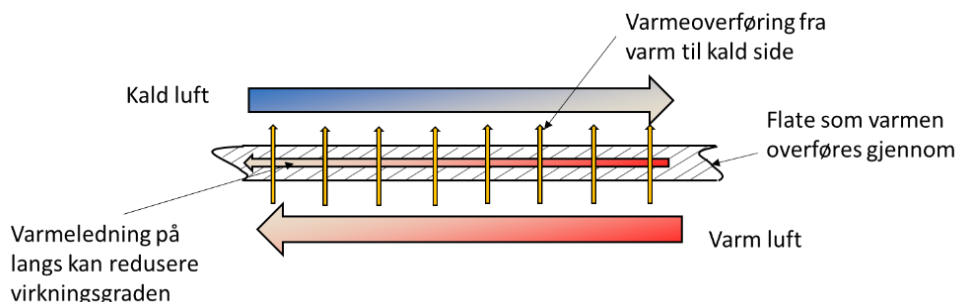


Totale utslipp med optimale kanalstørrelser i forhold til CO₂ faktoren for elektrisitet (med en maksimal størrelse på 500 mm for kanaler).

Ventilasjonsteknologi

Forbedring av varmevekslerteknologien

Nesten alle typer bygninger trenger en eller annen form for ventilasjon, dvs. at brukt luft erstattes med frisk luft. I oppvarmede bygg vil tilluften varmes opp til romtemperatur. Dette krever mye energi. Den brukte luften som forlater bygget, inneholder imidlertid varme som kan overføres til frisk luft ved varmeveksling i en såkalt varmegjenvinner. Varmegjenvinnere finnes i mange ulike versjoner hvor varme strømmer fra den varme siden til den kalde siden. I en moderne, godt isolert (TEK17) enebolig ville det totale energibehovet økt med ca. 50 % uten varmegjenvinner. TEK17 kravet til energieffektivitet innebærer i praksis at varmegjenvinner skal benyttes.



Prinsipp for varmegjenvinning og langsgående varmeledning.

For å oppnå nullutslippsbygg lettere kan det utvikles varmegjenvinner med høyere nominell virkningsgrad, noe som også vil gi høy virkningsgrad under reell drift. Høyere virkningsgrad gjør det også mulig å forenkle luftbehandlingsaggregatene, dvs. ved å fjerne varmebatteriet.

Nominell ytelse til en varmegjenvinner bestemmes ved å måle virkningsgraden under standardiserte forhold i et laboratorium. Bygninger opererer imidlertid under skiftende værforhold og med varierende bruk, noe som påvirker reell ytelse. Det er derfor **viktig å designe løsninger som er robuste mot disse skiftende forholdene**. I de fleste nye næringsbygg benyttes behovsstyrt ventilasjon som et tiltak for å redusere energibruken til ventilasjon. Dette betyr at med lav tilstedeværelse vil ventilasjonsmengder reduseres betydelig, noe som reduserer energibruken til oppvarming og viftedrift. Dette fører også til at luften strømmer saktere gjennom varmegjenvinnerne. Man skulle umiddelbart tro at virkningsgraden til veksleren da ville øke, men på grunn av konstruktive forhold ved dagens vekslere skjer det motsatte. De fleste av dagens vekslere er laget av aluminium. Aluminium er en god varmeleder, som er en god egenskap for en varmeveksler. Det har imidlertid den ulempe at varme også ledes i lengderetningen av veksleroverflatene (langsgående varmeledning), noe som får den kalde enden av veksleren til å varme opp og den varme enden til å kjøle seg ned. Dette fører til en betydelig reduksjon i virkningsgrad. Dette gjelder alle typer vekslere.

Ventilasjonsprodusentene er opptatte av å minimere langsgående varmeledning [7]. I FME ZEN har en modell blitt utviklet for optimal utforming av veksleren når det gjelder årsmiddelvirkningsgrad, hvor effektene av behovsstyrt ventilasjon og langsgående varmeledning er inkludert [8, 9]. Å kombinere denne modellen med LCA for det komplette ventilasjonssystemet vil redusere utslippene fra tekniske installasjoner. Det kan også hjelpe produsenter med å utvikle nye lavutslippssystemløsninger for luftbehandlingsaggregater og designere til å lage lavutslippssystemløsninger.

Smart ventilasjon

De siste retningslinjene for luftkvalitet ble publisert av Verdens helseorganisasjon i 2021 [10]. Grensene som er oppgitt her er basert på langtidsstudier av helseeffekter, normalt knyttet til risiko for kreft, luftveis- og hjerte- og karsykdommer, og er derfor



gjennomsnittsverdier over 8, 24 timer eller årlig. De fleste av disse grensene er ekstrapolert fra utendørs luftkvalitet.

Innendørs luftkvalitet kontrolleres vanligvis ved å holde CO₂ under 1000 ppm som standard grenseverdi. Men innendørs luftkvalitet handler om flere parametere enn CO₂, for eksempel partikler (PM), NO₂, SO₂, CO, formaldehyd og radon. CO₂ brukes normalt som en proxy for andre forurensninger som slippes ut av mennesker. CO₂ slippes ut under menneskets utånding i kjent mengde som påvirkes blant annet av fysisk aktivitet, kjønn og vekt. CO₂ sensorer er robuste og rimelige. CO₂-målinger er imidlertid ikke egnet til å identifisere forurensninger som ikke er relatert til tilstedeværelse, som for eksempel avgassing fra interiør. Ny teknologi har ført til utvikling av luftkvalitetssensorer for TVOC, formaldehyd og partikler (PM).

Selv om disse sensorene allerede brukes til å overvåke luftkvalitet, brukes de sjelden til å regulere ventilasjon og luftkvalitet. For å dekke ulike forurensningskilder bør parametere utenom CO₂ også måles og inkluderes i reguleringsstrategier. For å unngå for kompliserte løsninger bør kun de meste essensielle parameterne egges til.

Lavprissensorer gir en rimelig måte å overvåke innendørs luftkvalitet på, noe som er avgjørende for utbredt bruk. De muliggjør innsamling av omfattende data, noe som ikke er gjennomførbart med kostbare tradisjonelle sensorer [11]. Imidlertid er holdbarheten og påliteligheten til disse sensorene under ulike miljøforhold varierende. Studier har vist at noen lavprissensorer kan fungere pålitelig over tid, men deres robusthet kan variere basert på miljøforholdene og forurensningstypene [12]. Kalibrering og oppfølging er avgjørende for å sikre datanøyaktighet [13].



«American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers» (ASHRAE) anbefaler reguleringsstrategier som bruker CO₂ og andre indikatorer for å kontrollere forurensninger som ikke er knyttet til tilstedeværelse.

Ekstra parametere for innendørs luftkvalitet, utenom de tradisjonelle CO₂ og temperatur målingene, kan forbedre luftkvaliteten betydelig og redusere energibruken gjennom mer effektive og responsive ventilasjonssystemer. Å legge til nye parametere bør gjøres med omtanke da unødvendig kompleksitet med mange parametere kan føre til økte driftsfeil, dataunøyaktigheter og høyere vedlikeholds krav. Når de fleste forurensninger kan måles og kontrolleres kan ytterlige energibesparende løsninger som resirkulering av avtrekksluft vurderes. Resirkulering kan beskytte mot forurensninger fra utendørsluft og øke det relative fuktighetsnivået [14].



Referanser

- [1] *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast)*, 2024.
- [2] M. K. Wiik *et al.*, "ZEN report 24 klimagasskrav til materialbruk i bygninger: Utvikling av grunnlag for å sette absolutte krav til klimagassutslipp fra materialbruk i norske bygninger," 2020.
- [3] J. R. Winsvold, A. R. Liaøy, C. Steneng, H. Bergsdal, and A. J. Petresen, "Klimagasbelastning for VVS-installasjoner," in "ZEN Report," 2023, vol. 52.
- [4] H. Bergsdal, J. Tønnesen, A. Borg, and C. Solli, "Life cycle inventory library for embodied emissions in ventilation components," *Building and Environment*, vol. 262, p. 111854, 2024/08/15/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111854>.
- [5] A. R. Liaøy. "Grønn VVS – Skal halvere utslippene fra VVS-anlegg." <https://www.multiconsult.no/gronn-vvs-skal-halvere-utslippene-fra-vvs-anlegg/> (accessed September, 2024).
- [6] H. Amini Toosi, M. Lavagna, F. Leonforte, C. Del Pero, and N. Aste, "Life Cycle Sustainability Assessment in Building Energy Retrofitting; A Review," *Sustainable Cities and Society*, vol. 60, p. 102248, 2020/09/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102248>.
- [7] G. Mathisen and K. Skogstad. "Største nyhet på ti år – teknologisprang i ventilasjon." Nemitek. <https://www.nemitek.no/flexit-ntnu-sintef/storste-nyhet-pa-ti-ar-teknologisprang-i-ventilasjon/399785> (accessed 23 oktober, 2024).
- [8] P. Liu, M. Justo Alonso, and H. M. Mathisen, "Global sensitivity analysis and optimal design of heat recovery ventilation for zero emission buildings," *Applied Energy*, vol. 329, p. 120237, 2023/01/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120237>.
- [9] P. Liu, M. Justo Alonso, and H. M. Mathisen, "Heat recovery ventilation design limitations due to LHC for different ventilation strategies in ZEB," *Building and Environment*, vol. 224, p. 109542, 2022/10/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109542>.
- [10] *WHO global air quality guidelines*, W. H. O. (WHO), 2021.
- [11] H. Chojer, P. T. B. S. Branco, F. G. Martins, M. C. M. Alvim-Ferraz, and S. I. V. Sousa, "Development of low-cost indoor air quality monitoring devices: Recent advancements," *Science of The Total Environment*, vol. 727, p. 138385, 2020/07/20/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138385>.
- [12] I. Demanega, I. Mujan, B. C. Singer, A. S. Anđelković, F. Babich, and D. Licina, "Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions," *Building and Environment*, vol. 187, p. 107415, 2021/01/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>.
- [13] M. Justo Alonso *et al.*, "Evaluation of low-cost formaldehyde sensors calibration," *Building and Environment*, vol. 222, p. 109380, 2022/08/15/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109380>.
- [14] M. Justo Alonso, W. S. Dols, and H. M. Mathisen, "Using Co-simulation between EnergyPlus and CONTAM to evaluate recirculation-based, demand-controlled ventilation strategies in an office building," *Building and Environment*, vol. 211, p. 108737, 2022/03/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108737>.