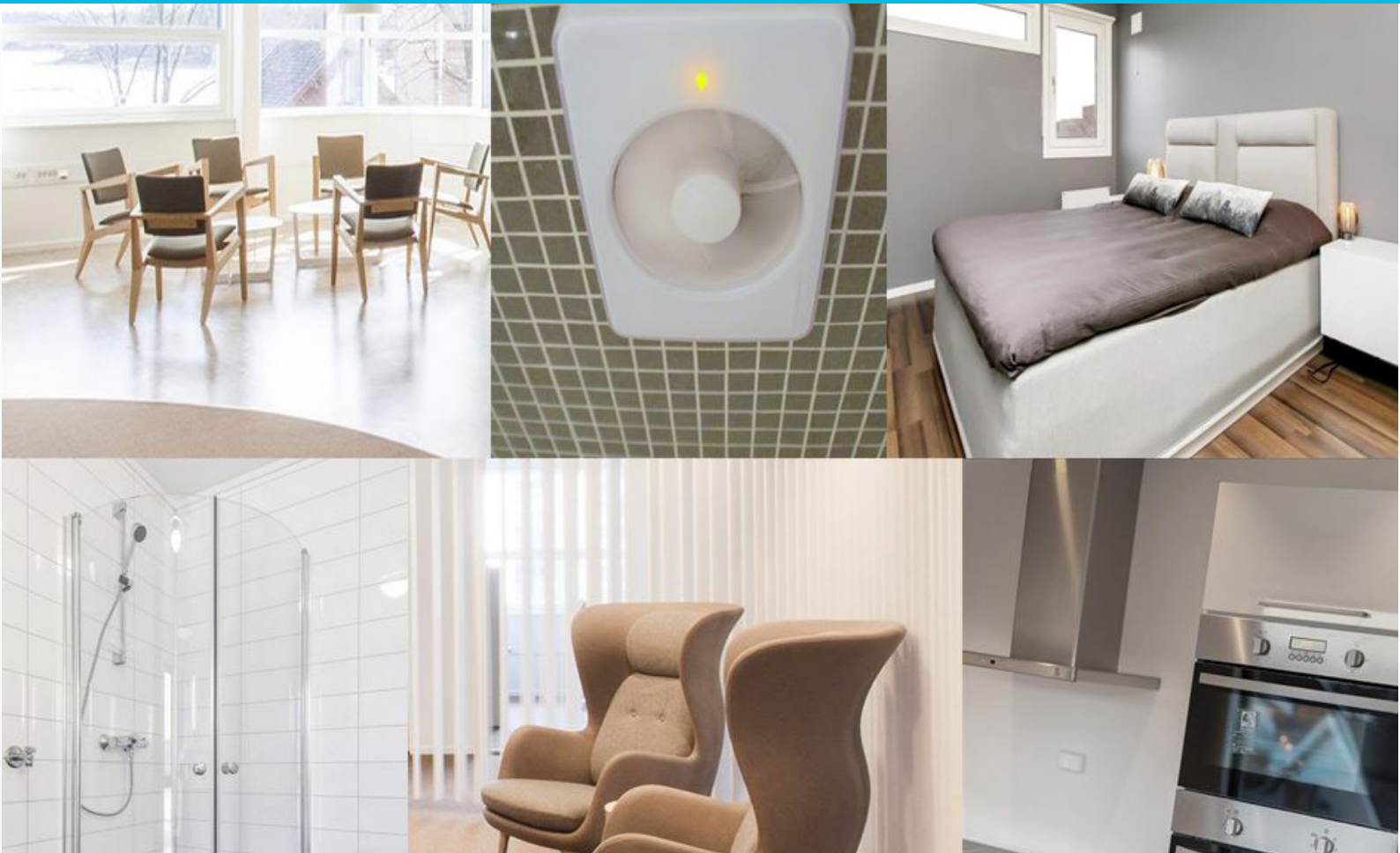


Silje Kathrin Asphaug, Berit Time, Jan Vincent Thue, Stig Geving,
Arild Gustavsen, Hans Martin Mathisen og Sivert Uvsløkk

Kunnskapsstatus

– Fuktbufring i materialer og påvirkning på energibehov



SINTEF Academic Press

Silje Kathrin Aspøhaug, Berit Time, Jan Vincent Thue, Stig Geving, Arild Gustavsen,
Hans Martin Mathisen og Sivert Uvsløkk

Kunnskapsstatus – Fuktbufring i materialer og påvirkning på energibehov



ZEB Project report 22 – 2015

ZEB Project report no 22

Silje Kathrin Asphaug (tidligere Korsnes)²⁾, Berit Time²⁾, Jan Vincent Thue¹⁾, Stig Geving¹⁾,
Arild Gustavsen¹⁾, Hans Martin Mathisen¹⁾ og Sivert Uvsløkk²⁾

Kunnskapsstatus – Fuktbufring i materialer og påvirkning på energibehov

Keywords:

Inneklima, fuktbufring, latent varme, sorpsjonsvarme, energisparing, hygroskopiske materialer

ISSN 1893-157X (online)

ISSN 1893-1561

ISBN 978-82-536-1448-9 (pdf)

Illustration on front page:

SINTEF Byggforsk/SINTEF Building and Infrastructure

© **Copyright SINTEF Academic Press and Norwegian University of Science and Technology 2015**

The material in this publication is covered by the provisions of the Norwegian Copyright Act. Without any special agreement with SINTEF Academic Press and Norwegian University of Science and Technology, any copying and making available of the material is only allowed to the extent that this is permitted by law or allowed through an agreement with Kopinor, the Reproduction Rights Organisation for Norway. Any use contrary to legislation or an agreement may lead to a liability for damages and confiscation, and may be punished by fines or imprisonment.

Norwegian University of Science and Technology ¹⁾

N-7491 Trondheim

Tel: +47 22 73 59 50 00

www.ntnu.no

www.zeb.no

SINTEF Building and Infrastructure Trondheim ²⁾

Høgskoleringen 7 b, POBox 4760 Sluppen, N-7465 Trondheim

Tel: +47 22 73 59 30 00

www.sintef.no/byggforsk

www.zeb.no

SINTEF Academic Press

c/o SINTEF Building and Infrastructure Oslo

Forskningsveien 3 B, POBox 124 Blindern, N-0314 Oslo

Tel: +47 22 96 55 55, Fax: +47 22 69 94 38 and 22 96 55 08

www.sintef.no/byggforsk

www.sintefbok.no

Kreditering

Denne rapporten har blitt skrevet i *Research Centre on Zero Emission Buildings (ZEB)*. Forfatterne takker for støtten fra Norges forskningsråd, BNL (Byggenæringens landsforening), Brødrene Dahl, ByBo, DiBK – Norwegian Building Authority, Caverion Norge AS, DuPont, Enova SF, Entra, Forsvarsbygg, Sør-Trøndelag Fylkeskommune, Glava, Husbanken, SAPA, Isola, Multiconsult, NorDan, Norsk Teknologi, Protan, Skanska, Snøhetta, Statsbygg, og Weber.

Sammendrag

Det blir hevdet at det kan være et stort potensial for energisparing i bygninger ved å utnytte sorpsjonsvarme i innvendig eksponerte treoverflater. Fuktbufring er en velkjent effekt og dokumentert i en rekke studier langt tilbake i tid. Energisparing ved å utnytte sorpsjonsvarme er derimot et lite dokumentert tema. I denne rapporten er nyere vitenskapelig litteratur (vitenskapelige tidsskriftsartikler) som omhandler fuktbufring og energisparing, samt noen nyere norske masteroppgaver og konferansepublikasjoner, gjennomgått og referert.

Kunnskapsgjennomgangen viser at det er stor interesse knyttet til fuktbufring og potensiell praktisk utnyttelse av denne effekten for demping av svingninger i luftfuktighet, men at energisparing ved å utnytte effekter av sorpsjonsvarme er lite dokumentert.

Noen av de gjennomgåtte studiene har ved simuleringer sett på energispareeffekter ved bruk av hygroskopiske overflater og fuktstyrt ventilasjon i rom med høy og varierende luftfuktighet. Den potensielt sparte energien for disse beregningene skyldes at en kan redusere ventilasjonen for deler av døgnet, siden fuktbufring kan bidra til å holde luftfuktigheten nede. De fleste studiene understreker imidlertid faren for dårlig inn klima knyttet til denne ventilasjonsstrategien (fordi det sjelden er fukt som avgjør nødvendig ventilasjon i normale bygg).

Det er gjort noen mer begrensede numeriske studier som tar for seg «ekstremtilfeller» med svært høy fukttilførsel i forhold til ventilasjonen, for eksempel dårlig ventilerte soverom eller badrom. Heller ikke i slike tilfeller konkluderes det med energispareeffekter.

De gjennomgåtte arbeidene påpeker usikkerheten knyttet til fuktbelastninger, det vil si hvor store de er, når de oppstår og hvor lenge de varer. Det er usikkerhet knyttet til reelt luftskifte som følge av for eksempel lufting med vinduer. Videre er det usikkerhet knyttet til hvor stor påvirkning interiør, møbler o.l. har på fuktbufringseffekten. Arbeidene påpeker dessuten utfordringer knyttet til de komplekse koblede fukt- og varmeprosessene som er vanskelige å simulere numerisk og som er vanskelig å undersøke eksperimentelt med tilstrekkelig målesikkerhet. Verdier for materialeegenskaper som inngår i simuleringer, blir derfor gjerne også usikre. Temaet spenner over flere fagfelt med mange angrepsvinkler. Her er det krevende metodiske utfordringer både numerisk og eksperimentelt.

Gjennomgangen av kunnskapsstatus på området underbygger ikke at det er belegg for å hevde at effekten av fuktbufring og sorpsjonsvarme med bruk av eksponerte treoverflater eller andre hygroskopiske overflatematerialer gir opphav til energisparing på et slikt nivå at det bør tas inn i energiregnskapet for bygg.

Innhold

1. INNLEDNING	6
2. TEORIGRUNNLAG	7
2.1 LATENT VARME.....	7
2.2 FORDAMPNINGS- OG KONDENSASJONSVARME.....	7
2.3 SORPSJONSVARME	7
2.4 FUKTBUFRING	7
2.5 HYGROTERMISK MASSE	7
2.6 MATERIALEGENSKAPER	8
3. INNEKLIMA OG VENTILASJON	10
3.1 HVORFOR VENTILERER VI?	10
3.2 LUFTFUKTIGHET I INNELUFTA	10
3.3 SAMMENHENG MELLOM OPPLEVD LUFTKVALITET OG LUFTAS TEMPERATUR OG RF	11
4. KUNNSKAPSSTATUS	12
4.1 STUDIER SOM OMHANDLER FUKTBUFRING OG ENERGISPARING	12
4.2 ANDRE STUDIER SOM OMHANDLER FUKTBUFRING.....	13
4.3 NYERE NORSKE STUDIER SOM OMHANDLER FUKTBUFRING OG ENERGISPARING.	14
5. DISKUSJON	15
6. KONKLUSJON	17
7. REFERANSER	18

1. Innledning

Absorpsjon og desorpsjon av fukt i materialer i kontakt med innelufta i bygninger kan utnyttes som en passiv måte å dempe/utjevne svingninger i inneluftas relative luftfuktighet (RF) som følge av variasjon i fuktbelastningen i rommet. Dette kaller vi fuktbufring.

Fuktbufring har igjen blitt et aktuelt tema fordi det fra enkelte hold hevdes at bufring av fukt gir opphav til energisparing. Det har blant annet blitt hevdet i flere medieoppslag at det er et stort potensial for energisparing ved bruk av eksponerte treoverflater i baderom, se for eksempel Byggmesteren (2015).

Energisparingen går ut på å utnytte sorpsjonsvarme¹. Sorpsjonsvarme i forbindelse med fuktbufring kan forenklet forklares som den energi som opptas av en hygroskopisk overflate når vanddamp absorberes på overflaten.

Fuktbufring i overflater, interiør, tekstiler og kledninger kan dempe/utjevne svingninger i inneluftas RF. Dette er en velkjent effekt og dokumentert i en rekke studier langt tilbake i tid, blant annet Christensen (1965), Chomcharn og Skaar (1983), Avramedis et al. (1987) og Time (1998). Energisparing ved å utnytte sorpsjonsvarme er derimot et lite dokumentert tema. I et energiregnskap er det viktig å få med både positive og negative konsekvenser av ulike fysiske prosesser. Det er viktig å få fram sammenhenger over tid, skille mellom ulike effekter og bidrag, samt fordeler og ulemper før man kan si noe om de faktiske energibesparelsene.

I denne rapporten er nyere vitenskapelig litteratur (vitenskapelige tidsskriftsartikler) som omhandler fuktbufring og energisparing, samt noen nyere norske masteroppgaver og konferansepublikasjoner, gjennomgått og referert.

¹ Sorpsjonsvarme, latent varme, fordampnings- og kondensasjonsvarmen er nærmere forklart i kapittel 3.

2. Teorigrunnlag

2.1 Latent varme

Latent varme er den varmemengden (energien) et system tar opp eller avgir for å gjennomgå en faseovergang uten å endre temperatur. Størrelsen er spesifikk for et stoff eller en blanding av stoff og er vanligvis uttrykt i enheter av energi per masse (kJ/kg) eller per mol (J/mol). Størrelsen kan også variere med temperatur og trykk. Generelt varierer størrelsen avhengig av type faseendring som skal oppnås. Eksempler på ulike faseendringer er energi til fordamping (væske til damp), energi til krystallisering (flytende til fast) eller energi til sublimering (fast til damp). For å reversere prosessen avgis/opptas samme mengde energi. Det er altså et nullregnskap.

2.2 Fordampnings- og kondensasjonsvarme

Latent varme ved overgang fra væske til damp kalles fordampningsvarme. Latent varme ved overgang fra damp til væske kalles kondensasjonsvarme. Eksempelvis er fordampnings-/kondensasjonsvarmen for vann ved normalt atmosfæretrykk 2501 kJ/kg ved 0 °C og 2257 ved 100 °C.

2.3 Sorpsjonsvarme

Når vanddamp adsorberes på en materialoverflate (for eksempel i en pore), oppstår en faseendring og energi frigis. Denne energien kalles sorpsjonsvarme. Tilsvarende vil samme mengde energi kreves ved tørking/desorpsjon.

Mengde avgitt varme øker med styrken på bindingskreftene. Vannmolekylene bindes lagvis over poreoverflaten, med svakere krefter utover i lagene. Materialtype vil være avgjørende for hvor store adsorpsjonskreftene kan bli. Vanligvis setter vi sorpsjonsvarmen lik med fordampnings-/kondensasjonsvarmen, se NS-EN ISO 9346:2007.

2.4 Fuktbufring

Med begrepet fuktbufring menes et hygroskopisk materiales evne til å ta opp og avgi fuktighet (vanddamp fra lufta) som funksjon av variasjon av luftas fuktinnhold med tiden. Begrepet brukes i situasjoner hvor det er ønskelig å beskrive forskjellige materialers evne til å dempe svingninger i RF i innelufta i et rom. I praksis vil både innvendige overflater, interiør, tekstiler og kledninger bidra til fuktbufring i et rom. Fuktbufring er en velkjent effekt og dokumentert i en rekke studier tilbake i tid, se blant annet Chomcharn og Skaar (1983), Avramedis et al. (1987) og Time (1998).

2.5 Hygrotermisk masse

Når vi snakker om «hygrotermisk masse», tenker vi på den sammensatte virkningen av varmekapasitet (termisk masse) og fuktkapasitet (hygroskopisk masse). Et materiales varmekapasitet er egenskapen som angir hvor stor endring i varmeinnhold som følger av en temperaturendring i materialet. Tilsvarende angir fuktkapasiteten materialets endring i likevektsfuktinnhold ved endring av relativ fuktighet. Generelt er begge disse egenskapene avhengige av temperaturnivå og fuktinnhold. Fuktkapasitetens variasjon med relativ fuktighet bestemmes ut fra materialets sorpsjonskurve.

Utvekslingen av varme og fukt (vanddamp) mellom et (tykt) hygroskopisk materiale med plan overflate og omgivende luft kan relativt enkelt beskrives matematisk og simuleres numerisk. Simulering av reelle, sammensatte konstruksjoner utsatt for realistiske variasjoner i luftas temperatur og fuktinnhold er imidlertid komplisert, og vil normalt kreve en rekke forenklinger. Numerisk simulering av fukttransport i

bygningdeler er behandlet blant annet i NS-EN ISO 15026:2007. De fysiske størrelsene som inngår ved beskrivelse av fukttransport i bygningssammenheng, er definert i NS-EN ISO 9346:2007.

I et gitt rom er det et samspill mellom temperatur og fuktinnhold i romlufta og i materialoverflatene (bygningdelerne, møbler, inventar, tekstiler osv.) som romlufta er i kontakt med. Hvis forholdene i romlufta er konstante, innstiller det seg en likevekt mellom lufta og materialene, og hygrottermisk masse er da uten betydning. Hvis temperatur og/eller fuktinnhold i romlufta varierer med tiden, vil det skje en utveksling av energi og/eller fukt mellom romluft og materialene. Stiger lufttemperaturen, vil noe varme strømme inn i overflatene, og når lufttemperaturen igjen synker, vil varme fra overflatene avgis tilbake til rommet (termisk bufring). Tilsvarende vil endringer i luftas fuktinnhold gi en utveksling av fukt i form av en vanndampstrøm inn i eller ut fra materialene (fuktbufring). Disse buffereffektene vil bidra til at virkningen på luftas tilstand av endringer i varme- og fukttilførsel i rommet dempes.

2.6 Materialelegenskaper

For et materiale som utsettes for varierende lufttemperatur, vil varmestrømmen gjennom materialoverflaten avhenge både av materialets varmeledningsevne og av materialets varmekapasitet. Høy varmeledningsevne gir god varmeinntrenging, mens høy varmekapasitet demper varmeinntrengingen i materialet. Et materiale med høy ledningsevne og lav kapasitet kan derfor gi tilnærmet samme buffervirkning som et materiale med lav ledningsevne og høy kapasitet.

Variere fuktinnholdet i lufta, vil vi på tilsvarende måte få en fukttransport i form av vanndampdiffusjon gjennom materialoverflaten. Her vil materialets vanndamppermeabilitet og fuktkapasitet avgjøre hvor stor fukttransporten blir. Høy permeabilitet gir god fuktinntrenging, mens høy fuktkapasitet vil dempe fuktinntrengingen. Begge disse materialelegenskapene varierer med fuktinnholdet. For numerisk simulering beskrives ofte permeabilitet og fuktkapasitet ved analytiske funksjoner, se for eksempel Janssen og Roels (2009).

Dynamisk varmeinntrenging og dynamisk vanndampsorpsjon er altså analoge prosesser. For begge gjelder at konvektiv varme-/masseovergangsmotstand i overflaten virker begrensende på transporten. Disse overgangsmotstandene er avhengige av lufthastigheten ved overflaten. De grunnleggende materialelegenskapene varmeledningsevne/vanndamppermeabilitet og varme-/fuktkapasitet må fastlegges ved målinger. For beskrivelse av dynamiske transportforløp benyttes også de avledede materialparameterne diffusivitet og effusivitet, se for eksempel Rode og Grau (2008). Diffusivitet angir hvor raskt drivpotensialet (temperatur/vanndamptrykk) forplanter seg i materialet, mens effusivitet gir et mål på transportert mengde varme/fukt ved en endring på overflaten. Eksempler på slike materialverdier for forskjellige bygningmaterialer finnes for eksempel i Rode og Grau (2008), tabell 1, og Janssen og Roels (2009).

I Rode og Grau (2008), tabell 1, og Janssen og Roels (2009) finnes også eksempler på forskjellige materialparametere for å karakterisere relativ fuktbufringsevne for forskjellige bygningmaterialer og innredningskomponenter. Eksempler på slike er «effektiv fuktinntrengingsdybde» og «fuktbufferverdi» (MBV = moisture buffer value).

Ettersom den aktuelle fuktbufringen er avhengig av tidsforløpet/perioden for variasjonen i fukt-påkjenningen, tar de fleste slike parametere utgangspunkt i døgnperiodiske fuktvariasjoner. En kortvarig puls i fuktbelastningen, for eksempel fra en dusjsituasjon som varer 15–20 minutter, vil medføre en vesentlig mindre fuktbufring enn en fuktbelastning med periodetid lik et døgn. Man regner at fuktutvekslingen i praksis er proporsjonal med kvadratroten av periodetiden.

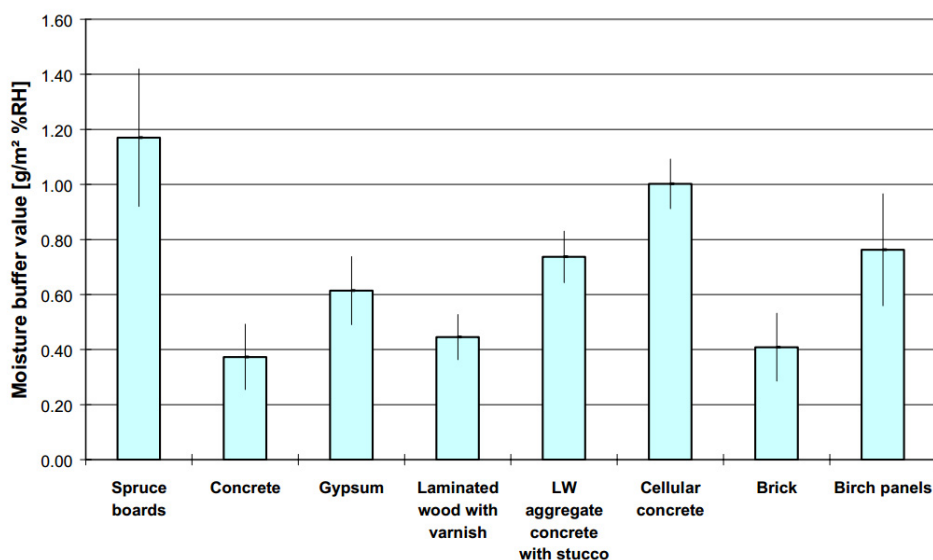
I tabell 1, som er hentet fra Rode og Grau (2008), ser vi at de fleste hygroskopiske materialer har tilnærmet samme fuktbufferegenskaper. Ulike typer overflatebehandlinger påvirker selvfølgelig fuktutvekslingen i større eller mindre grad. Størrelsen b_m (fukteffusiviteten) lengst til høyre i tabellen gir uttrykk for et materiales evne til å utvise fuktbufring. «Moisture Buffer Value» (MBV), forklart nedenfor, kan også utledes fra denne verdien. Fuktinntrengingsdybden, d_p , for de ulike materialene i tabellen er i størrelsesorden 5–10 mm.

Tabell 1

Fukttransport og bufferegenskaper for et utvalg materialer (Rode og Grau, 2008). Størrelsen b_m (fukteffusiviteten) lengst til høyre i tabellen gir uttrykk for et materiales evne til å utvise fuktbufring. Moisture buffer value (MBV) kan også utledes fra denne verdien. Videre angir symbolene i tabellen: ρ er materialets densitet, ξ er fuktkapasitet, δ_p er vandamppermeabilitet, D_w er fuktdiffusivitet og $d_{p, 24 \text{ hours}}$ er fuktinntrengingsdybden i løpet av 24 timer.

Material	ρ (kg/m ³)	ξ (kg/kg)	δ_p [kg/(m s Pa)]	D_w (m ² /s)	$d_{p, 24 \text{ hours}}$ m	b_m [kg/(m ² Pa s ^{0.5})]
Brick	1600	0.0022	13×10^{-12}	100×10^{-10}	0.008	1.3×10^{-7}
Wood (spruce)	400	0.18	1.9×10^{-12}	0.8×10^{-10}	0.007	2.2×10^{-7}
Concrete	2200	0.036	1.2×10^{-12}	0.6×10^{-10}	0.006	2.1×10^{-7}
Aerated concrete	600	0.036	28×10^{-12}	40×10^{-10}	0.046	4.7×10^{-7}

«The Moisture Buffer Value» (MBV) (kg/(m²·%RF)) er et mål for mengden fukt tatt opp i eller frigjort fra et materiale når materialet blir utsatt for gjentatte daglige variasjoner i RF (standardisert eksponering er 8 timer med 75 % RF og 16 timer med 33 % RF). I et større internasjonalt prosjekt, som Rode og Grau (2008) bygger på og hvor blant annet SINTEF og NTNU deltok, ble karakterisering av materialers fuktbufring studert og en testprotokoll for eksperimentell fastsettelse av MBV ble definert (Rode et al., 2005a). Figur 1 viser gjennomsnittlig MBV for ulike materialer fra målinger utført ved 3 ulike laboratorier.



Figur 1.

Moisture Buffer Value (MBV_{practical}) som gjennomsnittlig verdi fra alle målingene. 3 laboratorier, 3 prøver, 3 stabile sykluser og både fukting og tørking. De vertikale tynne linjene viser et standard avvik (Rode et al., 2005a).

3. Inneklima og ventilasjon

3.1 Hvorfor ventilerer vi?

Minimumskrav til ventilasjonsluftmengder i boliger og kontorbygg er knyttet til behovet for og krav om en viss luftkvalitet. Luftkvaliteten er bestemt av innholdet av ulike forurensninger. I praksis er kriteriene for ventilasjonsluftmengdene bestemt ut fra eksperimenter hvor forsøkspersonene selv var forurensningskilden og hvor personene selv bedømte luftkvaliteten. I tillegg kommer en luftmengde for å håndtere emisjoner fra materialer og stoffer i rommet. Kravene i Byggteknisk forskrift (TEK10) har ikke noen direkte kobling til luftfuktighet.

I boliger anbefales det at RF holdes i området 20–70 % om sommeren, og i området 20-40 % om vinteren. Øvre grense for luftfuktighet velges ut fra risiko for mikrobiologisk vekst (husstøvmidd og muggsopp) og fare for kondens med påfølgende bygningskader. Ekstremt lav luftfuktighet (mindre enn 20 %) bør unngås av hensyn til problemer med blant annet uttørking av huden (Byggforskeren 421.510).

Fuktstyring av ventilasjonen brukes i svømmehaller for å hindre for høy RH. En del prosesser, for eksempel trykkerier, krever god kontroll av RF. I boliger med mekanisk avtrekk fra bad («vifte i veggen») er fuktstyring ofte brukt for å starte/stoppe vifta.

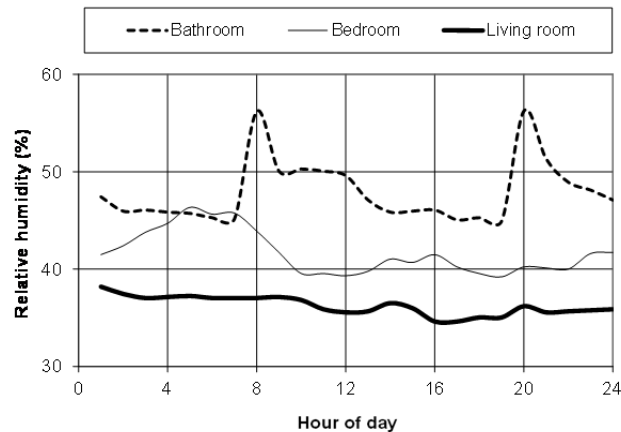
3.2 Luftfuktighet i innelufta

For at fuktbufring skal ha noen betydning er det en forutsetning at RF i innelufta har en døgnvariasjon. Dersom denne døgnvariasjonen er liten, er også fuktbufringseffekten og den potensielle energisparingene liten.

RF i innelufta påvirkes av en rekke faktorer. Viktige kilder som øker RF i innelufta, er: mennesker og dyr som puster, dusjing, matlaging, tøyvask- og tørking, rengjøring, vanning av planter og annen bruk av vann.

RF i innelufta påvirkes også av RF i utelufta via ventilasjon/infiltrasjon. Vanndampinnholdet, v (g/m^3), i utelufta er høyest om sommeren eller ved høye lufttemperaturer. Da kan RF i innelufta også bli høy. Om vinteren, med lave utetemperaturer, inneholder utelufta lite vanndamp. Da kan RF i innelufta også bli svært lav, særlig der innetemperaturen er høy eller ved jevn ventilasjon med godt luftskifte. RF i utelufta kan også ha store variasjoner over et døgn. Utetemperatursvingningen over døgnet kan gi stor variasjon i RF selv om absolutt vanndampinnhold i utelufta er konstant. Normalt vil RF i utelufta være høyest sent på natta. I regnvær eller tåke vil man ha bortimot 100 % RF ute.

Resultater fra en undersøkelse av fuktproduksjon i 117 boliger i Trondheim er dokumentert i Geving og Holme (2011). Temperatur og relativ fuktighet (RF) ble målt ved 15-minutters intervaller i løpet av en periode på 1 uke i oppvarmingssesongen. Målingene ble gjort i soverom, stue, bad og utendørs. Det innvendige fukttilskuddet, som er forskjellen mellom vanndampinnholdet innendørs og utendørs, ble beregnet. Resultatene viste at variasjon i RF generelt fulgte forventet daglig variasjon av fuktproduksjon som følge av bruken av huset og rommene. Gjennomsnittlig variasjon i RF over døgnet i fyrings-sesongen (forskjellen mellom maksimum og minimum timesverdi over døgnet) ble funnet til å være 7 % RF for oppholdsrom (stue), 9 % RF for soverom og 16 % RF for bad. Disse variasjonene inkluderer da også fuktbufringseffekten i vanlige norske boliger. Et eksempel på typisk RF-variasjon over døgnet er vist i figur 2. Vi ser for eksempel fra figur 1 at variasjonen i RF i stua er liten, slik at det neppe er noen energispareeffekt av fuktbufring der.



Figur 2

Typisk variasjon i RF over døgnet i en bolig i fyringssesongen. Timegjennomsnitt målt en enkelt dag for ett spesifikt hus. Utetemperaturen var $-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Geving og Holme, 2012).

Foretrukket luftkvalitet og termisk komfort er undersøkt i Kurnitski et al. (2007) og Kalamees et al. (2009) ved simuleringer og målinger av en rekke eneboliger i Tampere og Helsinki-området. Eneboliger med hygroskopiske innvendige overflater, for eksempel ubehandlet tre eller betong, ble sammenliknet med eneboliger uten. Målingene viste mindre variasjoner i RF i innelufta enn det simuleringene og tidligere simuleringer i ulike studier viser. Variasjonene mellom de målte inneklimateparameterne var mye høyere mellom de enkelte eneboligene enn mellom de hygroskopiske og ikke-hygroskopiske tilfellene. Målingene viste at ventilasjonsanlegget hadde en større effekt på inneklimateet enn hygroskopiske materialer i innvendige overflater. Hvis ventilasjonen er høy, vil innelufta påvirkes mest av utelufta, og hvis ventilasjonen er lav, er det fuktbelastningen som er avgjørende. Forfatterne peker også på at den hygroskopiske massen til møbler, interiør, tekstiler og bøker sannsynligvis spiller en viktig rolle når det gjelder fukt i innelufta, i likhet med virkelig ventilasjon som inkluderer lufting med vinduer. Det påpekes i studiene at beregningsprogrammer bør tilpasses for å kunne inkludere dette.

3.3 Sammenheng mellom opplevd luftkvalitet og luftas temperatur og RF

Med hensyn til opplevd luftkvalitet vil tørr og/eller kjølig luft oppfattes som friskere enn luft som er varmere og/eller fuktigere (Fang et al., 2004).

Med hensyn til termisk komfort (temperaturkomfort) viser forsøk og erfaringer at menneskets subjektive oppfatning av luftfuktigheten i et lokale sjelden stemmer med objektive målinger. Undersøkelser basert på termisk komfort ved moderate romluftstemperaturer indikerer at RF kan svinge i området 20 til 70 % uten at det har noen direkte betydning for komfortfølelsen. Fuktighetsvariasjoner mellom 20 og 60 % svarer til om lag $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ forskjell i lufttemperatur, mens en variasjon fra 0 til 100 % svarer til en senkning på om lag $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Fanger, 1972). Ved lave og høye temperaturer (temperaturer utenom hva som er vanlig i en bolig) er RF av større betydning. Forsøk utført av Professor Birgitta Berglund ved Stockholm Universitet (NTNU-SINTEF, 2007) viser at det ikke er noen signifikant sammenheng mellom målt RF og RF subjektivt bedømt av forsøkspersoner.

4. Kunnskapsstatus

I dette kapitlet går vi gjennom og refererer nyere vitenskapelig litteratur (vitenskapelige tidsskriftsartikler) som omhandler fuktbufring og energisparing. Noen nyere norske masteroppgaver og konferansepublikasjoner er også gjennomgått og referert.

4.1 Studier som omhandler fuktbufring og energisparing

Osanyintola og Simonson (2006) har benyttet resultater fra Simonsen, Salonvaara og Ojanen (2001) (beskrevet nærmere i kapittel 5.2) for å undersøke potensiell energisparing ved å benytte hygroskopiske materialer. Resultatene viser at potensiell direkte energisparing (sparing som følger av redusert oppvarmings- og kjølebehov) er lav for oppvarming, men markant for kjøling. Overflater av hygroskopiske materialer og et svært godt kontrollert HVAC-system (som ikke er vanlig å benytte i boliger i Norge) er nødvendig for å realisere disse besparelsene. Potensialet for indirekte energisparing (sparing som følger av redusert ventilasjon, lavere innetemperatur om vinteren eller høyere innetemperatur om sommeren) er i størrelsesorden 5 % for oppvarming og fra 5–20 % for kjøling. Osanyintola og Simonson (2006) understreker at disse verdiene er anslått på grunnlag av resultater fra en numerisk studie utført av Simonson, Salonvaara og Ojanen (2001) og noen få, hovedsakelig numeriske, studier rapportert i litteraturen, og det bemerkes at resultatene må brukes med forsiktighet.

Rode og Grau (2008) har vist et forenklet praktisk eksempel ved bruk av Moisture Buffer Value (MBV) (Rode et al. 2005a) for et tilfelle med hygroskopiske overflater og sammenliknet med et tilfelle uten. MBV er utledet utfra en endring i RF fra 33 % til 75 % med 8 timers varighet. Eksemplet viste at man med hygroskopiske overflater kan redusere variasjoner i RF i innelufta i et rom fra 40 til 10 %. Videre har forfatterne gjennomført beregninger i simuleringsprogrammet *BSim*² for å undersøke effekten av fuktbufring i en enkel bygning under realistiske klimabetingelser. Det ble påvist en effekt av fuktbufring, men av en begrenset størrelsesorden. Programmet er også brukt for å forutsi mulig påvirkning på energibruken og opplevd luftkvalitet ved bruk av fuktbufring. Det er også vist at fuktbufring kan ha en begrenset positiv effekt på energibehovet når det er brukt i kombinasjon med fuktstyrt ventilasjon. Rode og Grau (2008) understreker at eventuell energisparing skyldes at ventilasjonen kan reduseres og at bruk av fuktstyrt ventilasjon for å spare energi kan føre til for høye konsentrasjoner av CO₂. Noen effekt av fuktbufring på opplevd luftkvalitet kunne ikke påvises. Studien understreker at varme- og fukttransporten som oppstår i en bygning, er svært kompleks, og at beregninger for videre studier bør gjøres med betydelig mer avanserte numeriske hygrotermiske modeller for bygninger.

I Wolozyn et al. (2009) er det gjort en studie av effekten av fuktbufring i kombinasjon med RF-styrt ventilasjon ved simulering med fire ulike simuleringsverktøy. Simuleringene er basert på målinger av fukttilskudd i en enetasjes testbygning med to rom (referanserom og testrom) lokalisert ved Holzkirchen i Tyskland. Simuleringene viste at man ved å bruke RF-styrt ventilasjon (endret luftskifte lineært fra 10 m³/h (25 % RF) til 40 m³/h (60 % RF), luftskiftet tilsvarer 0,6 h⁻¹/et fukttilskudd tilsvarende et hushold på 3 personer ble lagt til grunn) kunne redusere ventilasjonsmengden med 30–40 % i kalde perioder og 2 % i mildere perioder. I studien understrekes det at ulempen med denne type behovsstyrt ventilasjon er at innholdet av andre forurensinger i innelufta (som CO₂) kan bli for høye. Vanligvis styres ventilasjonsmengde etter CO₂ eller temperatur, ikke RF. Simuleringene viste at det med RF-styrt ventilasjon er mulig å redusere svingningene mellom høyeste og laveste RF-nivå i innelufta og oppnå energisparing.

² Statens byggeforskningsinstitutt, Universitetet i Aalborg: «Integrert beregningsprogram til analyse av bygningers energi og inneklimateforhold». Programmet har også en validert modell for transient fukttransport og absorpsjon i bygningskroppen. (<http://www.sbi.dk/indeklima/simulering>)

Energisparingen var direkte relatert til reduksjon i ventilasjon når bygningen ikke var i bruk. Resultatene fra de fire beregningsverktøyene var sammenliknbare og viste at de kunne framstille ytelsene.

4.2 Andre studier som omhandler fuktbufring

Flere arbeider har undersøkt ulike aspekter ved fuktbufring uten at dette er relatert til energispare-effekter.

Simonsen, Salonvaara og Ojanen (2001) har gjort beregninger av et soverom (døgnperiodisk) i et leilighetsbygg i simuleringsprogrammet Latenite (Karagiozis, 1993). Modellen er validert med felt- og laboratorieforsøk. En hovedkonklusjon i dette arbeidet er at framtidig arbeid bør fokusere på luft-fuktighetens innvirkning på opplevd luftkvalitet.

Li, Fazio og Rao (2012) har studert fuktbufring for trepanel ved måling av ulike scenarier (ulik RF-amplitude og ulik varighet av sprang i RF med verdiene foreslått for MBV som utgangspunkt) for en fullskala toetasjes testhytte i et stort klimakammer. Sammenlikning av ulike testscenarier viser at materialets fuktopptak varierer og påvirkes av ulike faktorer som ventilasjon, fuktbelastning og temperaturer mer enn den opprinnelige luftfuktigheten. Studien peker blant annet på en del svakheter ved de kompliserte varme-, luft og fuktsimuleringsprogrammene som beregner effekten av fuktbufring i rom.

Yang et al. (2012) har utført målinger i en fullskala testhytte for å undersøke fuktbufringspotensialet for overflatematerialene gips og tre. I tillegg er ulik respons ved fuktbufring for gips og tre utforsket ved ulike fuktscenarier (ulik RF-amplitude og ulik varighet av sprang i RF). Resultatene viser at ved økt ventilasjon, reduseres RF i innelufta og fuktbufringseffekten reduseres også. Reduksjonen påvirkes mest av økningen i ventilasjon hvis ventilasjonen er lav i utgangspunktet. Videre vil høyere fuktbelastning (RF-amplitude) gi høyere fuktbufringseffekt.

I dette arbeidet er det også utført målinger ved ulike testscenarier der man undersøker innvirkningen fra møbler på bufferpotensialet. Ved møblering av testrommet avtar variasjoner i RF med opp til 12 % og potensialet for fuktbufring er opp til 55 % større som følger av den kombinerte buffereffekten til overflatematerialer og møbler. Bufferpotensialet til overflatematerialene reduseres når rommet er møblert. Det skyldes at møbler gir mye mer åpent areal for fuktbufring og har høyere fuktbufferkapasitet sammenliknet med innvendige overflatematerialer.

Som følge av resultatene i studien beskrevet ovenfor, har Ge et al. (2014) utført simuleringer i WUFI Pro for å undersøke hvordan ulike fuktbelastninger og tidligere fuktbelastning påvirker fuktbufringspotensialet til ulike materialer. Også her tok en utgangspunkt i eksponering som for MBV: 8 timer med 75 % RF og 16 timer med 33 % RF er benyttet. Materialer ble deretter kategorisert i grupper basert på fuktkapasitet og vanddamppermeabilitet.

Hamurey (2006) har gjort «in situ»-målinger av tunge trekonstruksjoner (heavy timber structures). På grunn av lav følsomhet på måleapparatene var det vanskelig å tallfeste potensial for fuktlagring i konstruksjonen ved døgnvariasjoner, og laboratorieundersøkelser ble derfor startet for å utvikle nye metoder.

Cerolini et al. (2009) har undersøkt muligheten for å bruke svært absorberende materialer til å dempe variasjoner i RF. Det ble benyttet standardisert eksponering (som for MBV): 8 timer med 75 % RF og 16 timer med 33 % RF. En numerisk modell er benyttet til å undersøke effekten av tykkelse, vanddampmotstand og konvektiv overgangskoeffisient på fuktbufringsegenskapene. Resultatene bekreftet at

cellulose er et egnet materiale for fuktbufring. Studien omhandler ikke inneklimate/komfort og behovet for ventilasjon, og overføringsverdien til reelle bygninger er begrenset.

Osanyintola et al. (2006) har undersøkt og dokumentert hvordan startbetingelsene, grenseverdier og tykkelsen påvirker fuktbufferkapasiteten til kryssfiner av gran når materialet utsettes for gjentatte daglige variasjoner i RF (standardisert eksponering er 8 timer med 75 % RF og 16 timer med 33 % RF som for fastsettelse av MBV).

Labat et al. (2015) har gjort målinger og simuleringer av en trebygning (testbygning) med ulike veggoppbygninger for å studere koblet fukt- og varmetransport under reelle klimaforhold. Arbeidet konkluderer med at det for temperatur er god overensstemmelse mellom målinger og beregninger, men at for fuktnivå er overensstemmelsen dårligere og usikkerheten større. Det foreslås at videre forskning spesielt bør studere koblede varme og fuktprosesser under hurtige temperaturvariasjoner.

Vereecken, Roels og Janssen (2011) har foreslått en «in situ»-metode for å undersøke fuktbufferpotensialet i ulike typer rom for at det skal kunne implementeres i beregningsmodeller.

Janssen og Roels (2009) har utviklet og demonstrert en metode hvor man på en hurtig måte kan bestemme fuktbufferevnen til overflater og objekter ved forskjellige tidsforløp av fuktbelastning. Artikkelen gir også en oversikt over forskjellige parametere som er foreslått for å angi materialers fuktbufferevne.

Zhang, Yoshimo og Hasegawa (2012) har studert fuktbufring i hygroskopiske materialer. Eksperimentelle forsøk i et klimakammer viste at fuktbufringseffekten minket ettersom luftskiftet økte.

4.3 Nyere norske studier som omhandler fuktbufring og energisparing.

I flere senere norske arbeider er temperatursvingninger som følge av sorpsjonsvarme studert eller omtalt med tanke på potensiell energibesparelse.

I masteroppgaven Korsnes (2012) og i Korsnes og Nore (2013) er det utført simuleringer av et baderom med mekanisk avtrekk i programmet WUFI Plus (www.wufi.no). Et baderom med treoverflater i vegg og tak ble sammenliknet med et med ikke-hygroskopiske overflater. Lufttemperatur og RF ble beregnet i to timer etter starten av en dusj og viser en økning i lufttemperatur som følger av sorpsjonsvarme fra treoverflatene. Fuktbelastningen som ble brukt til å simulere dusjingen, er hentet fra Erhorn og Gertis (1986). Beregningene innebærer mange forenklinger og er basert på flere antagelser. Blant annet er varmetilskuddet fra det varme vannet i dusjen og personen i rommet neglisjert. Buffervirkning av eventuelle møbler og inventar som håndklær etc. ble neglisjert i begge rommene. Det konkluderes med at utnyttning av eksponerte treoverflater har et stort potensial for energisparing som følge av at ventilasjon kan reduseres når RF stabiliseres. Videre hevdes det at man kan ha en lavere grunn-temperatur på badet siden lufta vil bli varmet opp av sorpsjonsvarme fra treoverflatene når man dusjer. For å tørke ut den adsorberte fukten fra treoverflatene etter en dusj kreves like mye energi som avgitt ved fuktopptak. Dette vil føre til en lavere temperatur på badet når treoverflatene må tørke. I Korsnes (2012) konkluderes det med at beregningen av baderommet er forenklet, og at det er behov for å bestemme mer nøyaktige varme- og fuktovergangstall for innvendige overflater ved lave lufthastigheter for å kunne gjøre mer nøyaktige beregninger av tilsvarende baderom. Det er ingen resultater i arbeidene som sier noe om størrelsesordenen av potensialet for energisparing.

Konferansepublikasjonen Nore et al. (2014) omhandler foreløpige resultater fra det norske prosjektet WEEE (Wood, Energy, Emissions and Experience). Arbeidet viser resultater fra laboratorieforsøk hvor to treoverflateprøver (en dekket med plast) er utsatt for en økning i RF fra 20 til 90 % i et klimakammer

hvor temperaturen holdes konstant. Termografi er brukt for å måle temperaturforandring på de to prøvene. Publikasjonen viser ikke til resultater for energisparing, men derimot temperaturendringer for overflater.

I masteroppgaven Katavic (2014) var det planlagt målinger av tilført energi i to testbygninger (bygningene er nærmere beskrevet i Nore et al. (2014)) ved NMBU på Ås, hvorav en har innvendige overflater av tre, mens den andre har overflater av plast (polyetylen). Men Katavic (2014) dokumenterer ikke dette, da resultater for tilført energi mangler. Det er gjort en beregning i forsøksperioden som viser noe energisparing, men dette er for en kortvarig ekstremisituasjon som ikke kan anses relevant for vanlige bygg (påført mye fukt og lite ventilasjon). Masteroppgaven viser forøvrig også en målt temperaturstigning på treoverflaten og også en mindre, men markant temperaturstigning for overflaten av plast i forbindelse med en påført endring i rommets luftfuktighet uten at dette er diskutert ytterligere.

I konferansepublikasjonen Winkler, Nore og Antretter (2014) er det utført en parameterstudie i WUFI Plus (se <http://www.wufi.no/>) med korttids- og langtidssimuleringer av et rom. Et tilfelle med malte gipsvegger er sammenliknet med et tilfelle med trematerialer for å undersøke effekter av fuktbufring og tilhørende sorpsjonsvarme. Fuktbelastning (døgnperiodisk fuktbelastning for langtidssimuleringer), ventilasjon (konstant) og uteklimate (ulike byer i Europa) varieres. Resultatene viste at treoverflatene kan dempe variasjoner i RF og på den måten gi et mer stabilt innneklima. Videre hevdes det at energiforbruk som følge av befuktning/avfuktning kan reduseres betydelig (det er regnet med befuktning/avfuktning dersom RF går under 30 % eller over 65 %). Langtidssimuleringene viste liten eller ingen påvirkning på innelufts- og overflatetemperaturer og tilhørende energibehov for oppvarming og kjøling, men resulterte i bedre komfortbetingelser. Kortidssimuleringer indikerer temperaturtopper relatert til økning i fukttilskudd og som derfor knyttes til effekten av sorpsjonsvarme.

Sorpsjonsvarme og fuktbufring er også beskrevet i Berge (2014) og Nordby (2015) som en del av konseptet i prosjektet helTREnkelt. Det teoretiske og vitenskapelige fundamentet for arbeidet og helhetsbetraktningene kommer ikke godt nok fram i disse kildene. Arbeidet er derfor vanskelig etterprøvbart. Arbeidet bygger på flere av de norske kildene vist ovenfor.

5. Diskusjon

Denne gjennomgangen av nyere arbeider viser blant annet:

Fuktbufring

Det er gjort både målinger og beregninger av påvirkningen fra fuktbufring på innneklima i enkeltrom og noen få omfattende studier fra Finland og Estland som også har studert reelle bygninger. De fleste arbeidene er studier av fuktbufring som fenomen i bygningsmaterialer og bygninger. Materialers fuktopptak varierer og påvirkes av ulike faktorer som ventilasjon, fuktproduksjon og temperaturer. I praksis kan ikke effekten av fuktbufring forutsies med bakgrunn i materialeegenskaper alene, blant annet fordi den vil avhenge av fuktpåkjennings tidsforløp.

Bufferpotensialet til overflatematerialene reduseres når et rom er møblert. Det skyldes at møbler normalt gir mye mer åpent areal for fuktbufring og har høyere fuktbufferkapasitet sammenliknet med innvendige overflatematerialer. Det er usikkerhet knyttet til hvor stor påvirkning interiør og møbler o.l. har på fuktbufringseffekten. Dette er neglisjert i flere studier, andre studier viser at den er betydelig.

I de gjennomgåtte arbeidene påpekes usikkerheten knyttet til fuktbelastninger, det vil si hvor store de er, når de oppstår og hvor lenge de varer. Det er usikkerhet knyttet til reelt luftskifte blant annet som følge av lufting med vinduer.

Fuktbufring og energisparing

Noen av de gjennomgåtte studiene har ved simuleringer sett på energispareeffekter dersom en bruker hygroskopiske overflater og fuktstyrer ventilasjonen. Resultatene fra slike simuleringer varierer med tanke på hvorvidt det er energi å spare. Den potensielt sparte energien for disse beregningene skyldes at en kan redusere ventilasjonen for deler av døgnet. De fleste studiene understreker imidlertid faren for dårlig inneklima ved fuktstyring av ventilasjonen (fordi det for normale bygg sjelden er fukt som avgjør nødvendig ventilasjon, men luftkvalitet og eventuelt temperatur).

Det er svært få grundige studier som har undersøkt effekter av sorpsjonsvarme og energisparing i bygg. De få studiene som er gjort, understreker kompleksiteten i varme- og fuktprosessene og behov for mer forskning rundt dynamikken mellom sorpsjon og desorpsjon.

Det er gjort noen mer begrensede numeriske studier som tar for seg «ekstremtilfeller» med svært høy fukttilførsel i forhold til ventilasjon, som for eksempel dårlig ventilerte soverom eller badrom. Heller ikke her konkluderes det med energispareeffekter. I disse arbeidene har en heller ikke reflektert over materialenes bestandighet (spesielt muggvekst) ved høy fuktbelastning over tid.

Flere arbeider peker på svakheter ved varme-, luft- og fuktsimuleringsprogrammene som benyttes for å beregne effekten av fuktbufring i rom. Ved vurdering av slike beregningsresultater er det viktig å være klar over programmenes begrensninger og de nødvendige forenklinger og antakelser de innebærer.

De gjennomgåtte arbeidene forutsetter at ventilasjonen i en bygning kan fuktstyres. De understreker at dette ofte ikke er tilfellet for normale bygg, men diskuterer det ikke videre (i kontorbygg reguleres normalt ventilasjon i henhold til CO₂). Utnyttelse av fuktbufring i en ventilasjonsstrategi forutsetter regulering med et mekanisk ventilasjonssystem med en avansert reguleringsløsning for befuktning/avfuktning.

Ingen av arbeidene har vurdert hvorvidt overoppvarming kan være en mulig risiko. De fleste aktiviteter som avgir fukt (og fører til at hygroskopiske overflater i rommet avgir adsorpsjonsvarme), produserer også varme (dusjing, matlaging, fysisk aktivitet, samling av flere mennesker i et rom).

6. Konklusjon

Fuktbufring og potensiell praktisk utnyttelse

Denne kunnskaps gjennomgangen viser at det er stor interesse knyttet til temaet fuktbufring og potensiell praktisk utnyttelse. Generelt ser mange av de nyere arbeidene på muligheten for å utnytte hygroskopiske materialer med sikte på å regulere ventilasjonen med hensyn til fukt. Men en generell utfordring, som også de fleste arbeidene påpeker, er at fukt sjelden er styrende for inneklime/luftkvalitet i bygg. Arbeidene påpeker dessuten utfordringer knyttet til de svært komplekse koblede fukt- og varmeprosessene som er vanskelige å etterlikne numerisk og som er vanskelig å undersøke eksperimentelt med tilstrekkelig målenøyaktighet.

Tre og andre hygroskopiske materialer

Mange typer bygningsmaterialer er hygroskopiske og således egnet til fuktbufring. Mange av de gjennomgåtte arbeidene fokuserer spesielt på tre som fuktbufrende materiale. Andre materialer som betong, tegl og gips har imidlertid liknende egenskaper.

Energibalanse

Generelt savner vi arbeider og dokumentasjon av det totale bildet, en total energibalanse under normalt opptredende forhold i reelle bygninger. Ved en simulering av mulig energisparing er det viktig at alle kjente virkninger av varierende luftfuktighet inngår i regnestykket. I den kalde årstiden vil blant annet en økt (innvendig) overflatetemperatur bety økt operativ temperatur, men samtidig en økt temperaturgradient, og økt varmetransport over bygningskroppen. Hvor store temperaturvariasjoner vil vi egentlig få i de hygroskopiske materialene som følge av realistiske variasjoner av fuktbelastningen?

Effekt på energiregnskapet for en bygning

Gjennomgangen av kunnskapsstatus på området underbygger ikke at det er belegg for å hevde at fuktbufring og sorpsjonsvarme gir opphav til energisparing med bruk av eksponerte treoverflater eller andre overflatematerialer på et slikt nivå at det bør tas inn i energiregnskapet for bygg. Selv om det i visse spesielle tilfeller kan være en viss effekt, vil møbler og innredning ha vel så stor betydning som overflatematerialene. De fuktmengdene som under normale bruksbetingelser tas opp og avgis av hygroskopiske romoverflater, tilsier ikke at sorpsjonsvarme er et signifikant bidrag i energiregnskapet. De fysiske prosessene som ligger bak, er dessuten så kompliserte og med så mange variable at en vil introdusere ytterligere usikkerheter ved å prøve å inkludere denne effekten i energiberegninger for et bygg. Fuktbufring har etter vår vurdering kun en praktisk nytte i rom eller bygninger som er dårlig ventilert i forhold til fuktproduksjonen eller hvor det er et vesentlig poeng å holde en svært stabil RF i romlufta.

Forskningsmessig interesse

Sett fra et bygningsfysisk synspunkt er problemstillingene knyttet til interaksjonen mellom inneluft og omsluttende flater svært interessante, og det er mange interessante forskningsspørsmål knyttet til dette temaet. Som denne gjennomgangen viser, er dette et svært komplekst tema som spenner over flere fagfelt med mange angrepsvinkler. Her er det krevende metodiske utfordringer både numerisk og eksperimentelt. Det understrekes også i flere av de internasjonale arbeidene.

7. Referanser

- Avramidis, S. og Siau, J.F., 1987. Experiments in nonisothermal diffusion of moisture in wood, Part 3. *Wood Science and Technology*, 21: 329–334.
- Berge, 2014. *Absolutt passiv energidesign. Passivhusnivå ved utnyttelse av hygrotermiske egenskaper i trevirke*. Delrapport til prosjektet helTRENkelt. Lista: Gaia Lista, Asplan Viak, Treteknisk Institutt, Silvinova, 2014.
- Byggforskserien 421.510. *Tilrettelegging for godt innemiljø i boliger*. Oslo: SINTEF Byggforsk, 2000
- Byggmesteren, 2015. *Kan dusje rommet varmt* [<http://byggmesteren.as/2015/02/23/kan-dusje-rommet-varmt/>] Lastet ned 15.05.2015.
- Cerolini, S., D’Orazio, M., Di Perna, C. og Stazi, A., 2009. Moisture buffering capacity of highly absorbing materials. *Energy and Buildings*, 41: 164–168.
- Christensen, G.N., 1965. *The rate of sorption of water vapor by thin materials*. Division of Forest Products, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia.
- Chomcham, A. og Skaar, C., 1983. Dynamic sorption and hygroexpansion of wood wafers exposed to sinusoidally varying humidity. *Wood Science and Technology*, 17: 259–277.
- Erhorn, H. og Gertis, K., 1986. Minimal Thermal Insulation and Minimal Ventilation. *Gesundheit Engineering*, 107.
- Fang, L., Wyon, D.P., Clausen, G. og Fanger, P.O., 2004. Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality, SBS symptoms and performance. *Journal of Indoor Air*, 14: 74–81.
- Fanger, P.O., 1972. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Ge, H., Yang, X.J., Fazio, P. og Rao, J., 2014. Influence of moisture load profiles on moisture buffering potential and moisture residuals of three groups of hygroscopic materials. *Building and Environment*, 81: 162–171.
- Geving, S. og Holme, J., 2011. Mean and diurnal indoor air humidity loads in residential buildings. *Journal of Building Physics*, 35(4): 392–421.
- Hamrey, S., 2006. *The hygrothermal inertia of massive timber constructions*. Doctoral Thesis, KTH Architecture and the Built Environment, Sweden, 2006.
- Janssen, H. og Roels, S., 2009. Qualitative and quantitative assessment of interior moisture buffering by enclosures. *Energy and Buildings*, 41: 382–394.
- Karagiozis, A., 1993. *Overview of the 2-D Hygrothermal Heat-Moisture Transport Model Latenite*. IRC Internal Report. Ottawa: National Research Council of Canada.
- Katavic, I., 2014. *Fuktbufring og latent varme i eksponerte treoverflater*. Masteroppgave, Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU), Ås, Norge.
- Korsnes, S.K., 2012. *Fukt- og varmeutveksling i innvendige overflater*. Masteroppgave, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim, Norge.
- Korsnes, S.K. og Nore, K., 2013. Potential energy savings due to latent heat exchange in indoor exposed wooden surfaces. *2nd Central European Symposium on Building Physics, Viennea, Austria, September 9–11, 2013*.
- Kurnitski, J., Kalamees, T., Palonen, J., Eskola, L. og Seppänen, O., 2007. Potential effects of permeable and hygroscopic lightweight structures on thermal comfort and perceived IAQ in a cold climate. *Journal of Indoor Air*, 17(1): 37–49.

- Kalamees, T., Korpi, M., Vinha, J. og Kurnitski, J., 2009. The effects of ventilation systems an building fabric on the stability of indoor temperature and humidity in Finish detached houses. *Building and Environment*, 44: 1643–1650.
- Labat, M., Wolozyn, M., Garnier, G.og Roux, J.J., 2015. Dynamic coupling between vapour and heat transfer in wall assemblies: Analysis of measurements achieved under real climate. *Building and Environment*, 87:129–141.
- Li, Y., Fazio, P. og Rao, J., 2012. An investigation of moisture buffering performance of wood paneling at room level and its buffering effect on a test room. *Building and Environment*, 47: 205–216.
- Norby, A.S., 2015. Absolutt Passiv Energidesign. *Arkitektur N*, 3: 102–111.
- Nore, K., Englund, F., Aurlien, T. og Nyrud, A., 2014. Wood construction: Energy, emissions and experience. *Proceedings of the10th Nordic Symposium on Building Physics*, Lund, 2014: 900–907.
- NS-EN ISO 7730:2005. *Ergonomi i termisk miljø – Analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD-indeks og lokal termisk komfort*. Oslo: Standard Norge.
- NS-EN ISO 9346:2007. *Bygningers og byggematerialers hygrotermiske egenskaper – Fysiske størrelser for massetransport – Terminologi*. Oslo: Standard Norge.
- NS-EN ISO 15026:2007. *Bygningskomponenters og bygningsdelers hygrotermiske egenskaper – Bedømmelse av fukttransport ved numerisk simulering*. Oslo: Standard Norge.
- NTNU-SINTEF, 2007. *Enøk i bygninger – Effektiv energibruk*. Oslo: Gyldendal.
- Osanyintola, O.F. og Simonson, C.J., 2006. Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact. *Energy and Buildings*, 38(10): 1270–1282.
- Osanyintola, O.F., Talukdar, P. og Simonson, C.J., 2006. Effect of initial conditions, boundary conditions and thickness on the moisture buffering capacity of spruce plywood. *Energy and Buildings*, 38(10): 1283–1292.
- Rode, C., Peuhkuri, R., Mortensen, L.H., Hansen, K.K., Time, B., Gustavsen, A., Ojanen, T., Ahonen, J., Svennberg, K., Harderup, L-E. og Arfvidson, J., 2005a. *Moisture Buffering of Building Materials*. Report R-126. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark.
- Rode, C., Peukuri, R., Hansen, K.K., Time, B., Svennberg, K., Arfvidsson, J. og Ojanen, T., 2005b. Nordtest project on Moisture Buffer Value of materials. *AIVC Conference 'Energy performance regulation', Brussels, September 21–23, 2005*.
- Rode, C. og Grau, K., 2008. Moisture buffering and its consequence in whole building hygrothermal modelling. *Journal of Building Physics*, 31(4): 333–360.
- Simonson, C.J., Salonvaara, M. og Ojanen, T., 2001. *Improving indoor climate and comfort with wooden structures*. VTT Publications 431. VTT Building Technology, Espoo: VTT Building and Transport.
- Time, B., 1998. *Hygroscopic moisture transport in wood*. Doktor ingeniør-avhandling, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim, Norge.
- Vereecken, E., Roels, S. og Janssen, H., 2011. In situ determination of the moisture buffer potential of room enclosures. *Journal of Building Physics*, 34(3): 223–246.
- Winkler, M., Nore, K. og Antretter, F., 2014. Impact of the moisture buffering effect of wooden materials on energy demand and comfort conditions. *Proceedings of the10th Nordic Symposium on Building Physics*, Lund: 483–491.
- Wolozyn, M., Kalamees, T., Abadie, M.O., Steeman, M. og Kalagasidis, A.S., 2009. The effect of combining a relative-humidity-sensitive ventilation system with the moisture-buffering capacity of

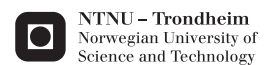
materials on indoor climate and energy efficiency of buildings, *Building and Environment*, 44(3): 515–524.

Yang, X., Fazio, P., Ge, H. og Rao, J., 2012. Evaluation of moisture buffering capacity of interior surface materials and furniture in a full scale experimental investigation. *Building and Environment*, 47(1): 88–196.

Zhang, A., Yoshino, H. og Hasegawa, K., 2012. Assessing the moisture buffering performance of hygroscopic material by using experimental method. *Building and Environment*, 48: 27–34.

The Research Centre on Zero emission Buildings (ZEB)

The main objective of ZEB is to develop competitive products and solutions for existing and new buildings that will lead to market penetration of buildings that have zero emissions of greenhouse gases related to their production, operation and demolition. The Centre will encompass both residential and commercial buildings, as well as public buildings.



Partners

NTNU

www.ntnu.no

SINTEF

www.sintef.no

Skanska

www.skanska.no

Weber

www.weber-norge.no

Isola

www.isola.no

Glava

www.glava.no

Protan

www.protan.no

Hydro Aluminium

www.hydro.com

Caverion Norge

www.caverion.no

ByBo

www.bybo.no

Multiconsult

www.multiconsult.no

Brødrene Dahl

www.dahl.no

Snohetta

www.snoarc.no

Forsvarsbygg

www.forsvarsbygg.no

Statsbygg

www.statsbygg.no

Husbanken

www.husbanken.no

Byggenæringens Landsforening

www.bnl.no

Norsk Teknologi

www.norskteknologi.no

Direktoratet for byggkvalitet

www.dibk.no

DuPont

www.dupont.com

NorDan AS

www.nordan.no

Enova

www.enova.no

VELUX

www.velux.com

Entra

www.entra.no