

Komplet beregning af bygningers varme- og fugttekniske forhold

Carsten Rode, BYG-DTU, car@byg.dtu.dk

Karl Grau, By og Byg, kg@by-og-byg.dk

By og Byg's program, BSim2002, er for nylig blevet udvidet med en model til dynamisk beregning af fugtforhold i indeklimaet og bygningsdele. Samlingen af beregningerne i et værktøj giver bedre muligheder for både at analysere de indendørs fugtforhold og for at vurdere fugttilstanden i bygningers klimaskærm og inventar. En bygningens fugtforhold afhænger meget af de termiske tilstande i bygningen, af hvordan bygningen bliver brugt, samt af dens anlæg for opvarmning, køling og ventilation. Alle disse aspekter dækkes af den integrerede model.

Den nye model finder anvendelse ved undersøgelse af:

- Brugen af byggematerialer og inventar til at moderere udsving i det indendørs fugtniveau
- Vurdering af indendørs luftkvalitet
- Forudsigelse af fugtforhold i bygningskonstruktioner under hensyntagen til de indendørs klimatiske betingelser
- Fugtens indflydelse på den energimæssige ydeevne af udstyr til konditionering af den indendørs luft samt på ventilationsbehovet.

Baggrund

Fugt i indeklimaet er en af de vigtigste faktorer, der påvirker den indendørs luftkvalitet. Mange sundhedsrelaterede problemer i indeklimaet kan relateres til fugtige bygninger (Clausen et al., 1999). Fugtniveauet i en bygning afhænger af faktorer såsom fugtkilder, ventilation og luftbevægelser, oplagring af fugt, opvarmning, isolering, udeklimaet, materialer i bygningsdele og inventar samt af bygningens brugere. Blandt disse kan materialers evne til at ophobe og udjævne ekstreme fugtpåvirkninger være en vigtig faktor.

Adskillige tiltag er tidligere udført for at beregne bygningers fugtforhold. Traditionelt har man betragtet fugtforhold i klimaskærmen ved at vurdere det indendørs dugpunkt i forhold til temperaturen i konstruktioner de steder, hvor fugten kunne have adgang, eller man har opstillet skemaer til beregning af dampdiffusion under stationære forhold - den såkaldte Glaser's metode. Siden er der udviklet mere nøjagtige, dynamiske beregningsmodeller af de samme forhold, der tager hensyn til det tidsmæssige perspektiv ved ophobning af fugt i bygningsmaterialer. *MATCH* modellen (Pedersen, 1990) er et eksempel på sådanne bereg-

ninger, der finder nytte ved vurdering af fugtforholdene for bygningsdele, der påvirkes af kendte inden- og udendørs klimatiske forhold.

Mange beregningsmodeller til termisk bygningssimulering, bl.a. *tsbi5* i *BSim2002* (Wittchen et al., 2002) har kunnet udføre stationære fugtbalancer for indeklimaet ud fra momentane beregninger med udgangspunkt i ventilationsluftens fugtindhold og den indendørs fugtproduktion.

Den nye fugtmodel for en hel bygning kan ses som en kombination af kendte dynamiske fugtberegningsprincipper for sammensatte bygningskonstruktioner med en model for indeklimaets fugtbalance.

Fugtforholdene kan ikke bestemmes uden at kende de termiske forhold. Det er derfor oplagt at den nye model er udviklet som en udvidelse til en eksisterende model for termisk simulering af bygningers indeklima og konstruktioner. De termiske beregninger for en hel bygning er i sig selv ganske omfattende, og skal kunne tage hensyn til mange varierende betingelser for drift af en bygning. Den termiske beregning i en eksisterende model vil i forvejen være valideret, og der vil eksistere en grænseflade, der er velkendt for mange brugere. Det er derfor naturligt, at den nye model er udviklet i By og Byg's program *BSim2002*.

Building Simulation 2002

BSim2002 er et beregningsværktøj der er udviklet til analyse af indeklima, energiforbrug og dagslysforhold for en bygning. Programmet integrerer forskellige beregningsmodeller så det er muligt at udføre sammensatte analyser af en bygning. Kernen i systemet er en fælles bygningsdatamodel, der deles af alle beregnings-

modellerne, og en fælles database med termiske og fugttekniske data for typiske bygningsmaterialer, konstruktioner, vinduer og døre.

Fugtmodel for en hel bygning

Den dynamiske fugtmodel for en hel bygning, med dens indeklima og klimaskærm, er udviklet som en udvidelse af *tsbi5*, der er den termiske bygningssimuleringsmodel i *BSim2002*. I *BSim2002* opfattes en bygning som bestående af et antal zoner, der adskilles fra hinanden og fra udeklimaet ved bygningens konstruktioner. En fugtbalance sættes op separat for hver zone. Balanceligningen udtrykker, at fugtighed udveksles ved ventilation og luftskifte med udeklimaet og med tilstødende zoner. Yderligere udveksles fugt mellem luften i en zone og overfladerne af tilstødende konstruktioner, og der frigives fugt som følge af aktiviteter i zonen. Balanceligningen er dynamisk, så den tager hensyn til luftens egen buffervirkning.

Beregningsmodellen gennemfører samtidige instationære beregninger af fugtforholdene i alle konstruktioner i en bygning. I disse beregninger udgør de tilgrænsende zoner eller udeklimaet randbetingelserne for hver af konstruktionerne.

Følgende påvirkninger af indeluftens fugtforhold tages i betragtning:

- Fugttilførsel fra tilstødende konstruktioner
- Tilførsel af fugt fra forskellige kilder og aktiviteter, fx fordampning fra personer, tøjvask og -tørring, badning, madlavning, industrielle processer og befugtning
- Indtrængning af fugtholdig luft fra udeklimaet (ved infiltration og udluftning)
- Tilførsel af fugtig luft fra ventilationssystemer
- Fugtig luft tilført fra andre zoner ved opblanding

Modellen for fugttransport i konstruktionerne betragter dampdiffusion som transportform. Fugttransporten internt i konstruktionerne bestemmes på en instationær måde, idet materialernes sorptionskurver benyttes til at indregne deres fugtbuffervirkning. Lagene i en sammenlagt bygningskonstruktion er inddelt i et passende antal kontrolvolumener. For hvert kontrolvolumen opstilles en balance mellem hvor meget fugt, der tilføres og afgives ved diffusion, og hvor meget fugtindholdet ændres mellem tidskridtene. Sorptionskurven benyttes til at om-

regne fra det ændrede fugtindhold til relativ fugtighed og det dermed forbunde damptryk, der driver diffusionen. For sorptionskurven er det muligt at tage hensyn til den hysteres, der hyppigt ses i sådanne kurver, hvilket vil sige, at materialerne ændrer egenskaber for fugtoptag alt efter om de er ved at tørre ud eller fugte op.

Modellen tager også hensyn til latent varme-transport, så fugt der fortættes i materialerne afgiver sin kondensationsvarme, når materialernes fugtindhold stiger, eller der må tilføres en tilsvarende varmemængde til materialer, der tørrer ud.

Fugtudvekslingen mellem konstruktionernes overflader og de tilstødende zoner styres af det konvektive fugtovergangstal. Dette tal beregnes ud fra det tilsvarende varmeovergangstal og den såkaldte Lewis relation, der sammenknytter de to. I *BSim2002* kan varmeovergangstallet enten være en fast størrelse, der kan vælges for hver overflade, eller modellen kan beregne overgangstallet løbende ud fra algoritmer for naturlig konvektion ved overflader og strålingsudveksling mellem overfladerne i et rum.

Beregningsmodellen benytter en implicit differensmetode, der altid sikrer numerisk stabile beregninger.

Eksempel på brug i praksis

Eksemplet er en ældre bygning beliggende i Stockholm, der bruges som museumsbutik (se figur 1). Formålet med undersøgelsen var at se, om de særlige krav til indeklimaet i et af butikens rum kunne opfyldes alene ved brug af passiv klimatisering, når der valgte en passende sammensætning af de omgivende vægge og gulvet. Kravet var, at temperaturen skulle holdes mellem 10 og 18°C, og den relative fugtighed skulle ligge mellem 40 og 60%. Rummet skulle udelukkende klimatiseres ved opvarmning, der skulle sikre at temperaturen ikke ville falde under 10°C (dog varmere i sommermånederne).



Figur 1 Magasinbygning for Kungliga Husgerådskammaren.

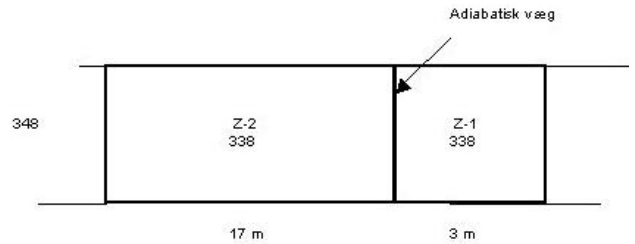
Rummet var placeret på etagen umiddelbart under loftsrummet. Ydervæggene var af 500 mm tykt murværk, og de eksisterende vinduer ville blive muret til. Gulvet bestod af 50 mm bøgeplanker, og loftet var nedefra malet og pudset, hvorefter kom 50 mm bøgeplanker og 200 mm mineraluld.

For at simulere bygningen blev klimaet i loftsrummet beskrevet ved en sinusvariation over året: Maksimum 27°C i juli og minimum 15°C i januar, overlejret med en daglig sinusvariation på 15°C. Loftsrummets fugtighed blev ligeledes beskrevet ved en sinusvariation med et absolut vandindhold på 12 g/kg i juli og 2 g/kg i januar, samt en døgnvariation på 2 g/kg. Temperaturen i naborum og i de underliggende rum antoges at variere mellem 24°C i juli og 19°C i januar med en daglig variation på 2°C, medens fugtigheden i disse rum varierede mellem 11 g/kg i juli og 2 g/kg i januar med en døgnvariation på 1 g/kg.

Ydervæggene blev eksponeret for udeklimaet som beskrevet i en vejrdatabil for Stockholm.

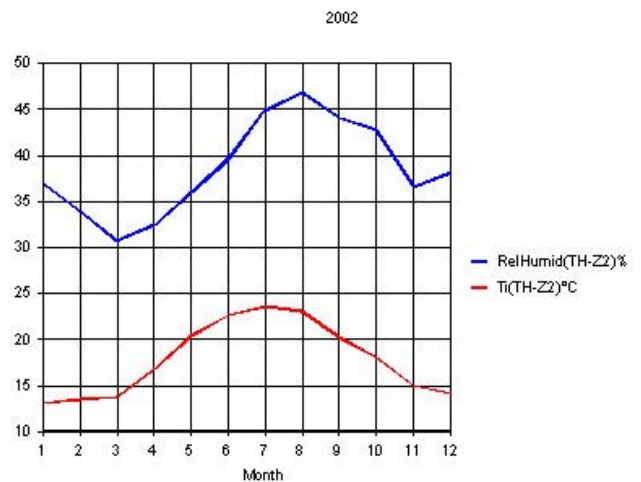
Infiltrationen blev sat til $0,1 \text{ h}^{-1}$ det meste af året, men nedsat til $0,075 \text{ h}^{-1}$ i maj-august.

Det undersøgte rum var zone 2 (Z-2) af rum 338 på etageplanen i figur 2. Rummet var 17 x 10 m. Modellen blev opbygget, så den tog hensyn til lagring af fugt i bygningens konstruktioner, medens der ikke blev taget hensyn til inventaret.



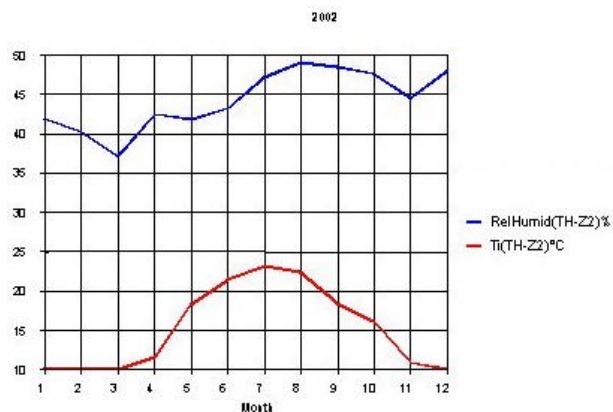
Figur 2 Etageplan af bygningen, der viser den zone (Z-2 af rum 338), der skulle konditioneres passivt indenfor grænserne T: 10-18 °C og RF: 40-60 %.

Den første simulering med modellen gav de resultater, der vises i figur 3. Det var klart, at forholdene i rummet ikke levede op til kravene, idet den relative fugtighed kom under 40% i ca. 5000 af årets timer.



Figur 3 Resultater fra den første beregning af den relative fugtighed og temperatur i rummet i magasinbygningen.

Det besluttedes så at undersøge effekten af at tilføre 200 mm isolering af mineraluld på undersiden af rummets gulvplanker. Dette havde den virkning, at rummet blev tilført mindre varme, så det blev koldere og den relative fugtighed blev højere. Resultatet ses i figur 4.



Figur 4 Fornyet beregning af den relative fugtighed og temperatur i rummet i magasinbygningen efter at rummets gulv var isoleret med 200 mm mineraluld.

Efter den nye beregning var der stadig 2000 timer om året, hvor den relative fugtighed kom under 40%, og der var derfor stadig behov for yderligere forbedringer, hvis den passive klimatisering skulle være tilstrækkelig. Projektningen er fortsat siden, men formålet her i artiklen har primært været at illustrere et eksempel på, hvordan den nye beregningsmodel kan give nye muligheder for at undersøge de kombinerede varme- og fugttechniske forhold i bygninger.

Konklusion og sammenfatning

Den eksisterende termiske beregningsmodel i *BSim2002* er blevet udvidet med en instationær beregningsmodel for fugtoptag og -transport i bygningsmaterialer. Med den nye beregningsmodel er det muligt at gennemføre virkelig-

hedsnære forudsigelser af de indendørs fugtvariationer. På samme tid beregnes fugtforholdene i alle bygningens indvendige og udvendige konstruktioner, idet der tages hensyn til materialernes fugtbufferevne. Siden fugtforholdene i konstruktionerne afhænger meget af det indeklima, de udsættes for, og da bygningskonstruktionerne også er med til at påvirke den indendørs fugtighed, forventes det, at de nye beregningsmuligheder væsentligt vil forbedre beregningsgrundlaget for fugt i bygninger.

Referencer

Clausen, G., C. Rode, C.-G. Bornehag, and J. Sundell. *Dampness in Buildings and Health. Interdisciplinary Research at the International Centre for Indoor Environment and Energy. Proc., 5th Symposium on Buildings Physics in the Nordic Countries, 1999.*

Pedersen, C. R. *Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions*. Ph.D. Thesis. Report 214. Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, 1990.

Wittchen, K.B.; K. Johnsen; and K. Grau. *BSim - User's Guide*. Danish Building and Urban Research. (<http://www.bsim.dk>), 2002.

Anerkendelse

Birch & Krogboe A/S, Rådgivende Ingeniører, takkes for venligst at have afprøvet den nye beregningsmodel og stillet deres beregnings eksempel til rådighed for artiklen.