LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE
MEDDELELSE NR. 14

En mannequin til bestemmelse af indendørsklimaets termiske virkninger på mennesket

af Vagn Korsgaard og Th. Lund Madsen

SÆRTRYK af VVS NR. 9, 1967

SKANDINAVISK BOGTRYK

En mannequin til bestemmelse af indendørsklimaets termiske virkninger på mennesket

Af V. Korsgaard og Th. Lund Madsen
Laboratoriet for varmeisolering,
Danmarks tekniske Højskole

Laboratoriet for Varmeisolering ved Danmarks tekniske Højskole er i gang med at konstruere en måledukke til anvendelse ved undersøgelser over indendørsklimaet. Da indendørsklimaets betydning for trivsel og velvære i de senere år har været genstand for almen interesse især i forbindelse med de nye byggemåder, store vinduer og præfabrikerede elementer, har redaktionen ment, det ville have interesse for VVS's læsere allerede på nuværende tidspunkt at stifte bekendtskab med de tanker og overvejelser, der ligger til grund for måledukkens konstruktion og har derfor bedt laboratoriet skrive en artikel herom. I artiklen fremhæves, at en forudsætning for at finde frem til de enkelte klimakomponenters indflydelse på velvære er, at de kan måles på en i forhold til mennesket relevant måde. Specielt fremhæves, at en forudsætning for at finde de mere sekundære komponenters betydning er, at man har nøje kendskab til og er i stand til at måle den termiske komponents betydning. Sædvanligvis benyttes som mål for et rums termiske tilstand en eller anden temperaturangivelse, der ofte er af meget summarisk karakter og ikke kan betegnes som relevant i forhold til menneskets termiske velvære. Forfatterne foreslår, at der i stedet benyttes sammenhørende værdier af »hudtemperatur« og varmestrøm for de forskellige dele af en legemstor dukke. Der gives et detailleret forslag til en sådan dukke, en termisk mannequin, og det fremhæves, at de moderne elektroniske måle- og beregningshjælpemidler i form af dataloggere og datamater har muliggjort, at de meget omfattende målinger, der er nødvendige for at løse den foreliggende opgave, bliver overkommelig.

Begrebet indendørsklimaet omfatter en række fysiske forhold, som erfaringsmæsigt har vist sig at have betydning for velvære indendørs. De vigtigste er de forhold, som vi direkte er i stand til at opfatte med vore sanser, dvs. temperatur, lyd, lugt, lys og farver. Andre forhold som luftens fugtighed, støvindhold og ionindhold m. fl. spiller muligvis også en rolle. En vigtig forudsætning for at kunne påvise, hvilken indflydelse de forskellige klimakomponenter har, er at man råder over målemetoder, som tillader en nøjagtig bestemmelse af de enkelte klimakomponenters indflydelse på velværet. Herigennem kan det muligvis også afgøres, i hvilken grad psykiske forhold spiller ind.

I det efterfølgende vil kun den termiske del af indendørsklimaet blive behandlet, da det er denne del, der har den afgørende indflydelse på vort termiske velvære.

Termisk velvære

Graden af termisk velvære udtrykkes sædvanligvis ved en beskrivende skala. En ofte anvendt skala har følgende trin:

meget ubehagelig kold
ubehagelig kold
ikke ubehagelig kold
neutral
ikke ubehagelig varm
ubehagelig varm
meget ubehagelig varm

velvære- eller komfortzone

Ved undersøgelser i klimakamre med et stort antal forsøgspersoner er det påvist, at inden for de klimazoner, der normalt forekommer i boliger, kontorer m. v., er det især hudens middeltemperatur, som bestemmer, hvilken grad af velvære man føler. For sunde, voksne mennesker med lettere aktivitet (f. eks. maskinskrivning) vil middelhudtemperaturen i det neutrale område ligge mellem 33,0 og 34,5° C. Kroppens hudtemperatur vil være ca. 35° C og fingre og tæers ca. 30° C.

Inden for komfortzonen er der endvidere balance mellem produceret varme (stofskiftet) og afgivet varme ved en næsten konstant indre kropstempe-

ratur på 37° C. Uden for komfortzonen vil organismen forsøge at opretholde varmebalancen ved en kropstemperatur mellem 32 og 42° C, da dette er livsvigtigt. Ved små afvigelser fra komfortzonen opnås varmebalance ved at ændre blodtilstrømningen til huden (vasodilatation eller vasokonstriktion), ved større afvigelser ved kulderystelser eller svedafsondring.

Varmebalance

Ethvert fysisk legeme vil gennem sin overflade stå i varmeudveksling med omgivelserne. Er legemet massivt, vil varmetransporten fra det indre frem til overfladen ske ved ledning. Fra overfladen og ud til omgivelserne vil varmetransporten kunne foregå på fire i fysisk henseende forskellige måder:

1. Stråling
2. Konvektion
3. Fordampning
4. Ledning

Menneskelegemet kan i denne forbindelse betragtes som massivt, og da termoreceptorerne befinder sig under hudoverfladen, vil de principielt ikke kunne »føle«, hvorledes varmeafgivelsen fra hudoverfladen fordeler sig på nævnte transportmåder.

Et legemes geometriske overflade har ikke nogen tykkelse og derfor ikke nogen varmekapacitet. Følgelig må al den varme, som fra legemets indre når frem til overfladen fortsætte uforandret i størrelse ud gennem overfladen, men under samtidig opdeling i nævnte transportmåde.

For varmebalancen kan opstilles følgende udtryk:

$$Q_{met} = Q_s + Q_k + Q_f + Q_l$$

hvor Q_{met} angiver den ved stofskiftet producerede varme (metabolisme)

Q_s angiver varmeafgivelse ved stråling

Q_k angiver varmeafgivelse ved konvektion

Q_f angiver varmeafgivelse ved fordampning

Q_l angiver varmeafgivelse ved ledning

Forsøg har vist, at i komforttilstanden ved mindre aktivitet til Q_f have en konstant værdi uafhængig af omgivelsernes termiske tilstand. Q_f indbefatter den med udåndingsluften afgivne frie og bundne varme. Herefter kan varmebalancen skrives:

$$Q_{fri} = Q_{met} - Q_f = Q_s + Q_k + Q_l$$

Termisk mannequin

Termisk velvære vil som omtalt være betinget af, at varmebalancen er opfyldt ved en middeltemperatur af huden på 33–34,5° C. Det er derfor nærliggende som mål for omgivelsernes termiske tilstand i relation til termisk velvære at benytte den fri varmeafgivelse fra en legemsstor dukke (en sådan dukke vil i det følgende blive benævnt termisk mannequin, forkortet til TM), hvis »hudtemperatur« i middel holdes inden for dette område. Termiske mannequiner har tidligere været benyttet til dette formål, men har aldrig fundet almindelig anvendelse inden for varme- og ventilationsteknikken. Her i landet har det i årene 1938–45 arbejdende Boligopvarmningsudvalg benyttet en af Otto Juel Jørgensen udviklet termisk mannequin, kaldet Jernhenrik. I forbindelse med de bemandede rumprojekter og militære forskningsprogrammer er der i flere lande i de senere år konstrueret TM'er til specielle formål. Årsagen til, at TM'er ikke er blevet anvendt i større udstrækning til undersøgelser over det termiske indendørsklima, er sikkert, at de er kostbare og komplicerede at fremstille, og at bearbejdning af de mange måledata er tidsrøvende. Med den betydning for velværet og arbejdsydelsen, man i dag tillægger indendørsklimaet, turde det første være af underordnet betydning, og det sidste klares hurtigt og sikkert af datamater. Vi mener derfor, tiden er moden til at udvikle en prototype af en moderniseret »Jernhenrik«, som, hvis den indfrier forventningerne, måske kan formere sig og være med til at klarlægge årsagerne til den udbredte opfattelse, at indendørsklimaet i moderne byggeri er dårligt, og være med til, såfremt denne opfattelse er rigtig, at forbedre klimaet.

Et rums termiske tilstand

Forskellen mellem det termiske klima i ældre og i det moderne byggeri viser sig navnlig i de store skævheder i det termiske felt, som de store glasarealer bevirker både sommer og vinter. De mange belysningsarmaturer vil ofte medføre høje loftstemperaturer. Hertil kommer, at det bliver mere og mere almindeligt at installere ventilationsanlæg med betydelige luftskifter med heraf følgende forøget risiko for træk.

Udprægede skævheder i det termiske felt må antages at have betydning for velværet, selv om middeltemperaturen for legemet som helhed ligger inden for behagelighedsområdet. En termisk mannequin må derfor kunne måle skævheder.

Varmeudvekslingen mellem et overfladeelement og omgivelserne kan udtrykkes ved følgende lovmæssighed:

$$\text{varmestrøm} = \frac{\text{temperaturforskel}}{\text{varmemodstand}}$$

$$\text{eller} \quad q_{fri} = \frac{\vartheta_{hud} - \vartheta_R}{m_R}$$

Heraf fremgår, at et rums termiske tilstand m. h. t. et overfladeelement kan karakteriseres ved den fiktive temperatur, ϑ_R og den fiktive varmemodstand, m_R. De to størrelser må betegnes som fiktive, da de ikke er egentlige fysiske størrelser, som kan måles. I modsætning hertil er såvel ϑ_{hud} som q_{fri} veldefinerede fysiske størrelser, som direkte lader sig måle. Det vil derfor være hensigtsmæssigt at karakterisere et rums termiske tilstand i forhold til et overfladeelement ved at angive sammenhørende værdier af fladeelementets temperatur og varmestrøm, også fordi det er disse to størrelser, der primært har betydning for det termiske velvære.

Af udtrykket fremgår, at har man målt sammenhørende værdier af ϑ_{hud} og q_{fri}, kan man frit vælge enten ϑ_R eller m_R og af udtrykket beregne den anden størrelse. Vælger man f. eks. at sætte ϑ_R lig med lufttemperaturen, vil den fiktive varmemodstand, m_R kunne blive negativ ved høje strålingstemperaturer på de omgivende flader (f. eks. solindfald gennem et vindue).

Hidtil har det været almindeligt at karakterisere et rums termiske tilstand ved blot at angive lufttemperaturen, evt. også de omgivende fladers temperatur. Selv om det principielt er muligt på grundlag af et detailleret

kendskab til lufttemperatur og -hastighed og vægtemperaturer at beregne varmetabet fra eller hudtemperaturen på de forskellige dele af et menneske, er metoden usikker og meget besværlig. Den her foreslåede metode, at angive et rums termiske tilstand i forhold til et overfladeelement ved sammenhørende værdier af fladeelementets temperatur og varmestrøm, må absolut foretrækkes, selv om den bryder med gængs praksis.

Ved at måle i tilstrækkelig mange punkter og retninger kan rummets termiske felt kortlægges. Når det drejer sig om at kortlægge rummets termiske felt i forhold til et menneske, vil et måleapparat med lille geometrisk udstrækning medføre fejl, som det på forhånd er vanskeligt at vurdere. Hovedårsagen hertil er:

a) *Mennesket påvirker ved sin tilstedeværelse klimaet på det sted, hvor det befinder sig.*
Et menneske i hvile afgiver ca. 80 kcal/h til sine omgivelser. Den overtemperatur, som dette resulterer i, bevirker en termisk konvektionsstrøm op omkring personen. Desuden vil en person ofte på grund af sin geometriske udstrækning ændre de naturlige eller tvungne luftbevægelser i sin nærhed. Personens bevægelser vil forstærke dette.

b) *Mennesket har en, i forhold til et normalt opholdsrum, ikke ubetydelig udstrækning.*
Dette indebærer, at skævheder i rummets termiske felt bliver afgørende for, hvorledes kroppens forskellige dele påvirkes af klimaet.

Ved at inddele den termiske mannequins overflade i et passende antal dele og for hver af disse måle sammenhørende værdier af temperatur og varmestrøm, kan der på behørig måde tages hensyn til nævnte forhold. Evt. kan det blive nødvendigt at lade TM'en udføre bevægelser.

TM's opbygning og konstruktion

For at kunne give et tilstrækkeligt differentieret billede af det termiske felt, deles TM'en termisk og reguleringsteknisk i 39 sektioner. Disse sektioner er fordelt på følgende 14 legemsdele, der kan indstilles i forhold til hinanden, se fig. 1 og 2.

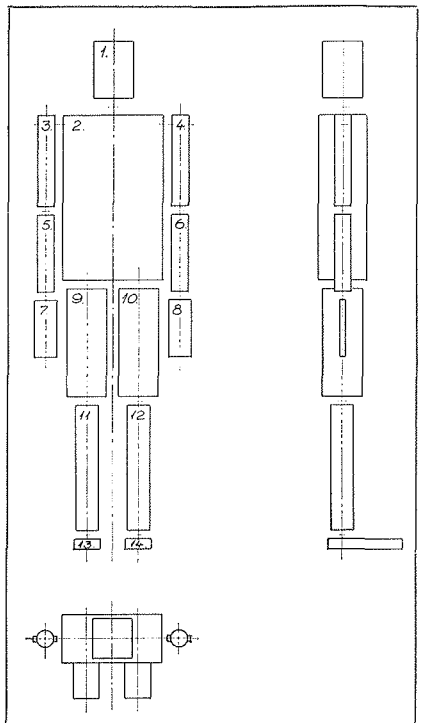

Fig. 1.

1. Hoved		5 sektioner
2. Krop		2 –
3. og 4. Overarme	2 · 3 = 6	–
5.– 6. Underarme	2 · 3 = 6	–
7.– 8. Hænder	2 · 2 = 4	–
9.–10. Lår	2 · 3 = 6	–
11.–12. Lægge	2 · 3 = 6	–
13.–14. Fødder	2 · 2 = 4	–

Hver sektion forsynes med en varmekilde, en termostat samt en overfladetemperaturføler, således at det bliver muligt for hver enkelt sektion at finde sammenhængen mellem tilført effekt og overfladetemperatur.

Måledataene fra alle TM's sektioner kodes direkte ind på et hulbånd, hvorefter en E.D.B. behandling af måleresultaterne er mulig.

Hoveddimensionerne tænkes valgt svarende til et normalt menneske, medens der ses bort fra alle detailler (ansigtsform, fingre og tæer). Alle dele udføres som enten cylindre (overarme, underarme, lår og ben) eller rektangulære kasser (hoved, krop, hænder og fødder). Dette giver fremstillingsmæssigt og måleteknisk en række fordele; en ulempe er det, at TM måske vil kræve skræddersyet tøj, ligesom visse finere nuancer i konvektions- og strålingsvarmeovergangen (fra ansigt og hænder) vil gå tabt. Men man må i denne forbindelse gøre sig klart, at dukken er beregnet til vurdering af klimaets kvalitet og ikke til fysiologiske undersøgelser af menneskers varmeudveksling med omgivelserne.

Opbygningen af TM's enkelte dele fremgår i princippet af fig. 2 og 3. Hver sektion udgør en måleteknisk enhed. Den består yderst af en 2 mm aluminiumsplade (eller rørskål), som overfladebehandles (f. eks. med maling), så den får samme strålingstal som huden (C=4,5 kcal/m²h(°k)⁴). I en fræset rille i denne aluminiumsplade indlægges et termoelement til måling af overfladetemperaturen. Under pladen anbringes et lag isoleringsmateriale, f. eks. polystyrenskum i 3 mm's tykkelse. Ved at måle temperaturforskellen mellem dette lags to sider med et passende antal termoele-

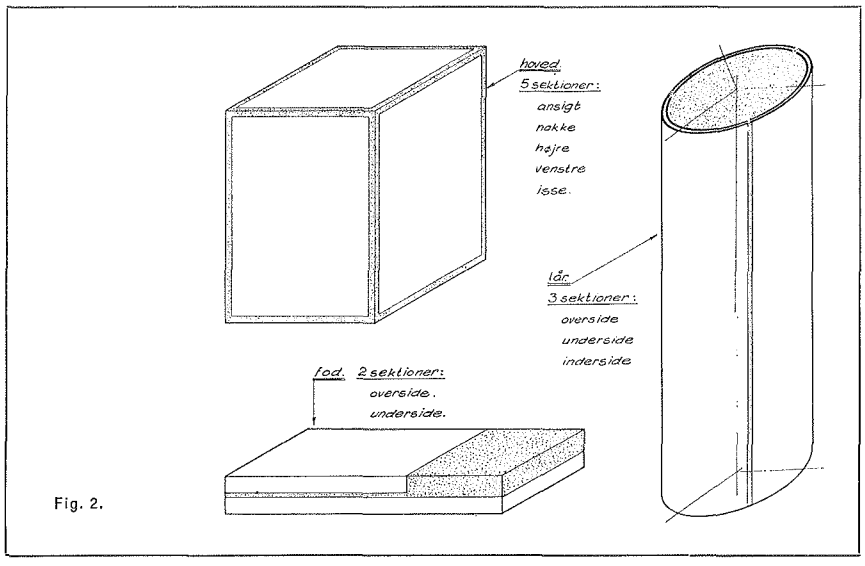

Fig. 2.

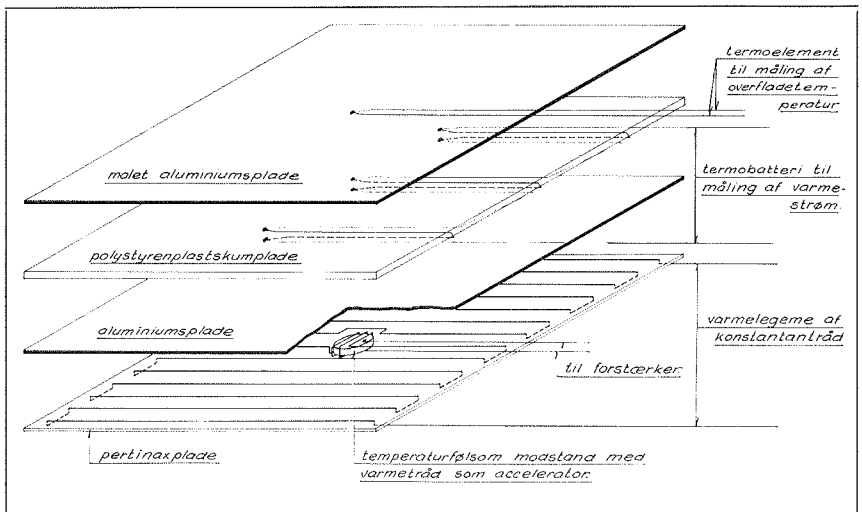

Fig. 3.

menter i serie vil det være muligt at beregne varmetabet fra den pågældende sektion, da varmemodstanden samt arealet af sektionen kendes.

Bagved isoleringen lægges endnu en aluminiumsplade, som skal sikre en god fordeling af den varme, som tilføres gennem en modstandstråd, der løber frem og tilbage indenfor pladen. I en udfræsning i pladen anbringes en temperaturafhængig modstand (NTC). Denne skal ved hjælp af en simpel transistorforstærker styre den effekt, som tilføres varmetråden. Når temperaturen på den inderste aluminiumsplade holdes konstant på f. eks. 37° C, vil overfladetemperaturen på en dukke med et overfladeareal på 1,8 m² ved en varmeafgivelse på 80 kcal/h blive 33° C. Ved et forøget varmetab vil overfladetemperaturen falde tilsvarende.

Når alle ledningsforbindelser fra sammenhørende sektioner er i orden, anbringes sektionerne rigtigt i forhold til hinanden, og mellemrummet imellem dem støbes ud med polyurethanskum. Herved opnås på én gang en stabil opbygning af hver enkelt del og en termisk isolering af delens enkelte sektioner fra hinanden.

Målinger

Inden de egentlige målinger påbegyndes, må TM justeres i den påklædning, som målingen skal foretages med; det er her tanken at foretage målinger med både herre- og damebeklædning, da disse normalt varierer temmelig meget i isoleringsevne. Endelig kunne man tænke sig, at TM på de dele, der normalt er dækket af tøj, blev overtrukket med tyndt stof, som gav den rigtige overflade med hensyn til stråling og konvektion, men uden at isolere nævneværdigt. Herved vil TM's overflade blive mere veldefineret og dens følsomhed større.

Selve justeringen må foregå i et rum med så små temperaturgradienter som muligt. Her anbringes TM i den stilling, hvori den skal anvendes, og effekten til de enkelte sektioner indstilles således, at man får de overfladetemperaturer, som et termisk normalt menneske vil have i komforttilstanden. Det er vigtigt, at der opnås termisk symmetri omkring TM's længdeakse.

Såvel målingen af varmetabet fra som overfladetemperaturen af hver enkelt sektion er reduceret til måling af en millivolt spænding. Der bliver ialt tale om at måle 78 spændinger fra TM. Hertil kommer eventuelt andre supplerende målinger af klimakomponenter i rummet. Måling og registrering af alle dise spændinger kan med fordel foretages på en datalogger, som i standardudførelse er i stand til at registrere op til 100 spændinger på et hulbånd, hvorefter en videre behandling kan foregå på en datamat. Målenøjagtigheden bliver for overfladetemperaturens vedkommende ± 0,1° C og for varmetabets vedkommende ± 0,5 kcal/hm².

Anvendelse

TM kan anvendes overalt, hvor det gælder om at bestemme de termiske påvirkninger, som en person vil komme ud for på det pågældende sted, idet den til enhver tid vil beskrive det termiske og kaloriske felt, som forekommer på det sted, hvor den befinder sig. Hvis det indendørs klima varierer, hvilket ofte vil være tilfældet, som regel først og fremmest med en døgnsvingning, vil en tilstrækkelig hyppigt – f. eks. hver halve time – foretaget scanning (aftastning) af alle målepunkter også give mulighed for at bestemme de termiske påvirkningers variation med tiden.

Ved hver scanning vil der til databehandling afgives 39 overfladetemperaturer og 39 kaloriemængder. Med en måling hver halve time fås altså på et døgn 48 · 78 = 3744 informationer til databehandling. Herud af kan datamaten nu udvælge dem, som har særlig interesse, f. eks. følgende:

a. TM's totale varmeafgivelse beregnet hver halve time,

b. TM's middeloverfladetemperatur beregnet hver halve time.

c. tidspunkterne for og størrelserne af de enkelte sektioners største og mindste temperaturafvigelse fra det normale.

Eksempler på anvendelser

A. Undersøgelser af fænomenet træk og bestemmelse af kriterier herfor. Undersøgelsen gennemføres ved samtidig måling med TM og forsøgspersoner i et forsøgsrum, hvor der kan skabes »kontrolleret træk«.

B. Ved projektering af luftkonditioneringsanlæg til byggeri med store vinduesarealer og belysningsstyrker er det vigtigt at have kendskab til, hvor store varmemængder det er muligt at fjerne fra et rum trækfrit. Enten ved indblæsning af kølet luft eller ved køling af dele af rummets begrænsningsflader, f. eks. loftet, eller ved en kombination af indblæsning og køleloft.