

# Dynamische behaaglijkheid en warmtecapaciteit

## PCM, het nieuwe bouwen, deel 1

Europa wil in 2020 energieneutraal bouwen! Maar hoe gaan we dat doen? Blijven we vasthouden aan traditionele bouw- en installatietechnieken, voornamelijk gebaseerd op stationaire normen en centennium oude warmtepompen, of slaan we een revolutionaire nieuwe weg in? Dit is het eerste artikel uit een serie van drie over PCM, het nieuwe bouwen.

Ir. H. (Harry) Schmitz, OC Autarkis bv

Deze serie artikelen gaat in op de volgende drie fundamentele vragen over het nieuwe bouwen met PCM:

1. Blijven we leefzones regelen op een constante stationaire setpoint binnentemperatuur?
2. Gaan we verder met het beter isoleren van de gebouwschil zonder aandacht voor de warmtecapaciteit?
3. Blijven we water als belangrijkste energiedrager beschouwen?

Eenvoudige dynamische berekeningen, gebaseerd op [1], verduidelijken niet alleen kwalitatief maar ook kwantitatief het nieuwe bouwen. Dit eerste artikel behandelt dynamische behaaglijkheid en warmtecapaciteit; het tweede artikel sinusresponsies, energiedragers en autarkische leefzones en het derde artikel het nieuwe ontwerpen, dimensioneren en bouwen.

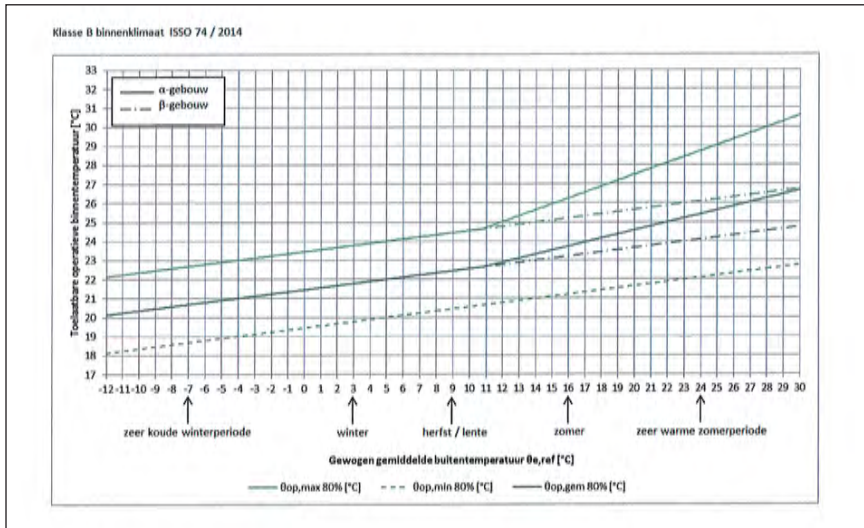
Energie-neutraal bouwen wordt hoofdzakelijk geassocieerd met het nog beter isoleren van de gebouwschil en met het nog verder verbeteren van kier- en naadafdichtingen en het nog verder reduceren van het ventilatieverlies. Kortom, energieneutraal bouwen wordt gelijk gesteld aan minimalisatie van de schilverliezen. Verder streeft men werktuigbouwkundig

naar een substitutie van HR-gasketels door elektrische warmtepompen [2,3]. Als daarbij dan ook nog weinig gebouwmassa wordt gebruikt, verworden gebouwen tot massalozes thermosflessen. Met als gevolg een verschuiving van minder verwarmen naar meer koelen maar zonder netto energiebesparingen [4]. Die weg is dan ook niet de weg naar energieneutraal bouwen!

### ■ DYNAMISCHE BEHAAGLIJKHEID

P.O. Fanger publiceerde in 1970 'Thermal comfort, analyses and applications in environmental engineering' [5]. Dit boek beschrijft een stationair thermofysiologisch model. Het is een stationaire berekening van de thermische behaaglijkheid van één gemiddelde mens. De thermische behaaglijkheid wordt beoordeeld aan de hand van een zestal meetbare fysische grootheden. Dit model fungeert nog steeds als grondslag voor onze thermische behaaglijkheid normen en de hierop gebaseerde meet- en regelstrategieën. Voornamelijk regelkringen met een constante stationaire setpoint binnentemperatuur verstelling. Het model van Fanger is de afgelopen jaren, enigszins geruisloos, ingrijpend gecorrigeerd. Een eerste psychologische correctie betrof de introductie van seizoensgebonden dag-gemiddelde adaptieve binnentemperaturen.

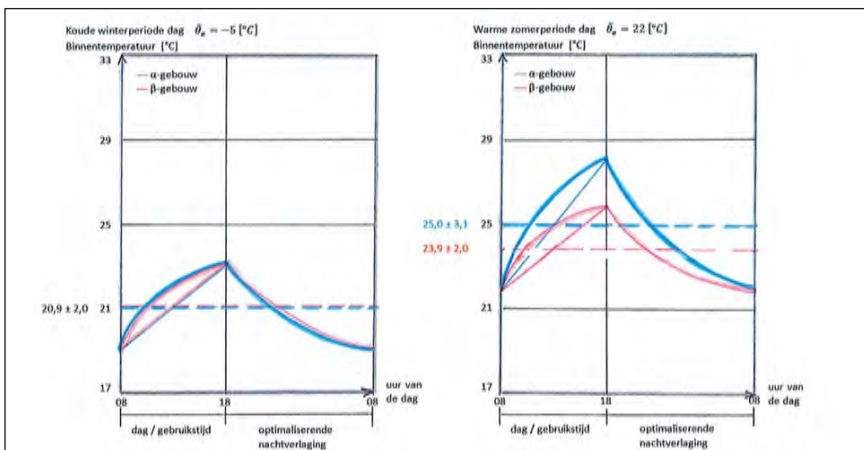
Ondanks het feit dat mensen circa 90% van de tijd doorbrengen in kunstmatige leefzones, thuis op het werk en in de auto, kleedt men zich, uit psychologische overwegingen, 's winters nu eenmaal warmer dan 's zomers. Om zich bij hetzelfde metabolisme, 's zomers net zo behaaglijk te voelen als 's winters moeten de zomerse comforttemperaturen hoger zijn dan de winterse. Een tweede psychologische correctie vormde het onderscheid in alfa- en beta-gebouwen. Alfa-gebouwen hebben te openen ramen en de gebruiker heeft meer mogelijkheden om het binnenklimaat te beïnvloeden en om zijn of haar kleding gedrag aan te passen aan de thermische sensatie. Dienovereenkomstig kunnen in alfa-gebouwen de zomerse binnentemperaturen hoger zijn dan in beta-gebouwen, die deze beïnvloeding mogelijkheden ontberen [6,7]. Een derde fysiologische correctie komt waarschijnlijk voort uit een evolutionair ontwikkeld bioritme van de menselijke kerntemperatuur die 's nacht en 's morgens 1,0 a 1,5 Kelvin lager is dan overdag en 's avonds. De nieuwe ISSO publicatie 74 – 2014 [7] vermeldt dan ook nadrukkelijk dat 'het overdag oplopen van de binnenluchttemperatuur (min of meer parallel aan de buitenluchttemperatuur) als minder hinderlijk en 'natuurlijker' wordt ervaren dan het overdag teruglopen (en zelfs het gelijk blijven overdag)'. Al doende is het oorspronkelijke stationaire



-Figuur 1- Seizoensgebonden daggemiddelde adaptieve binnentemperaturen volgens ISSO publicatie 74 [7]

Omschrijving	Acceptatie	Gebouw	Dagelijkse temperatuur amplitudo	
			Winter [K]	Zomer [K]
A- klimaat	90%	α	$\hat{\theta}_i = \pm 1$	$\hat{\theta}_i = \pm 2$
		β	$\hat{\theta}_i = \pm 1$	$\hat{\theta}_i = \pm 1$
B- klimaat	80%	α	$\hat{\theta}_i = \pm 2$	$\hat{\theta}_i = \pm 3$
		β	$\hat{\theta}_i = \pm 2$	$\hat{\theta}_i = \pm 2$

-Tabel 1- A en B binnenklimaat kwaliteiten volgens ISSO publicatie 74 [7]



-Figuur 2- De dagelijkse bioritmische binnentemperaturen tijdens een arctisch koude en een tropisch warme dag. Toelichting: is het Arctisch koud met een daggemiddelde buitentemperatuur van  $-5^{\circ}\text{C}$ , dan moet uit comfortoverwegingen de operationele binnentemperatuur circa  $21^{\circ}\text{C}$  bedragen. Het wordt als thermisch comfortabel ervaren dat de binnentemperatuur niet geregeld wordt op constant  $21^{\circ}\text{C}$  maar dat 's morgens de binnentemperatuur start met  $18$  à  $19^{\circ}\text{C}$  en dan overdag oploopt naar 's avonds  $22$  à  $23^{\circ}\text{C}$  en dan 's nachts door optimaliserende nachtverlaging weer daalt naar  $18$  à  $19^{\circ}\text{C}$ . Ook 's zomers moet dit het geval zijn bij hogere binnentemperaturen. Bij alfa-gebouwen is het dan ook nog zo dat de gemiddelde binnentemperatuur en de dagelijkse temperatuurstijging hoger kan zijn dan bij beta-gebouwen met behoud van dezelfde thermische behaaglijkheidskwaliteit.

model van Fanger de afgelopen 45 jaar gemodificeerd naar een dynamische beschrijving van de thermische behaaglijkheid van Homo sapiens, de denkende mens. Recent onderzoek aan de universiteit van Maastricht toont verder aan dat vrouwen een warmer binnenklimaat prefereren dan mannen ten gevolge van een gemiddeld lager meta-

bolisme [9]. In de toekomst zullen de comfort normen wellicht ook nog sekse-afhankelijk worden aangepast? Verder moet worden vastgesteld dat de adaptieve binnentemperaturen volgens NEN 15251 [6] niet overeen stemmen met de adaptieve binnentemperaturen volgens ISSO publicatie 74 [7]. Ondanks alle correcties, aanpassingen en wijzigingen blijft het adagium

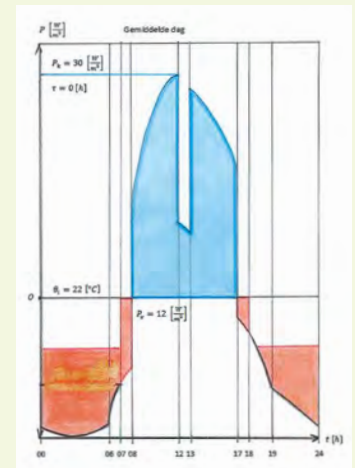
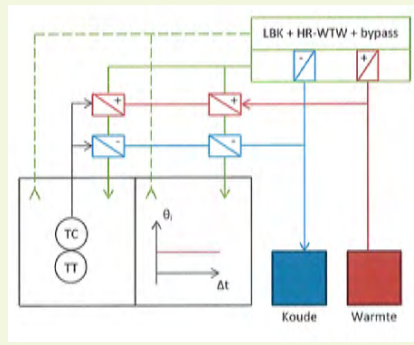
van de thermische behaaglijkheid 'warme voeten en een koel hoofd' onverminderd van toepassing.

De stap van stationaire naar dynamische behaaglijkheid criteria heeft verstrekende gevolgen voor de temperatuurregeling van kunstmatige leefzones in gebouwen, auto's en vliegtuigen. Zo moet, volgens figuur 1, 's zomers de daggemiddelde adaptieve binnentemperatuur hoger zijn dan 's winters en volgens figuur 2 moet het dagelijkse verloop van de binnentemperatuur het bioritme van de mens en overeenkomstig de buitentemperatuur volgen, waarbij de dagelijkse binnentemperatuurstijging niet sneller dan  $2 \text{ [K/h]}$  mag bedragen.

Literatuur [7] maakt niet alleen onderscheid in alfa- en beta-gebouwen maar ook, als functie van het aantal klagers, in de binnenklimaatkwaliteiten A en B, waarvoor de temperatuuramplitudo, volgens tabel 1, de onderscheidende parameter vormt. Verder moet nog worden vermeld dat ter voorkoming van locale tochtklachten een dynamische binnentemperatuurregeling, vanwege de dagelijkse temperatuurstijging, beter is dan een stationaire [10].

## ■ GEEN WARMTECAPACITEIT

Figuur 3 toont een thermisch snelreagerend kantoor met een bijbehorend processtroom en instrumentatie diagram. De vloer is belegd met vloerbedekking. Er zijn geen binnenwanden. 30% van het geveoppervlak bestaat uit ramen. Aangezien beglazing de zwakste schakel voor het transmissie verlies is, is gekozen voor triple glas in koudebrug vrije kunststofkozijnen met goede naad en kierdichtingen. Het betreft verder een goed geïsoleerde sandwich vliesgevel, bestaande uit aerogel isolatiedekens. Het kantoor is voorzien van een traditioneel klimaatplafond dat op een constante binnentemperatuur wordt geregeld met optimaliserende nachtverlaging in de winter. De bouwmasa wordt niet alleen thermisch afgeschermd van de leefzone maar de klassieke stationaire binnentemperatuur regeling zorgt er ook nog eens voor dat geen voelbare warmte accumulatie in de betonnen vloeren mogelijk is. Het kantoor wordt uit overwegingen van energie besparing minimaal geventileerd met toepassing van warmterugwinning en zomerse bypass. Vanwege mogelijke condensvorming op het actieve klimaatplafond kunnen de ramen niet geopend worden. De warmte- en koudeproductie in figuur 3, op de volgende pagina, vindt plaats middels omkeerbare elektrische warmtepompen aangesloten op een langetermijn-warmte/koudeopslag in de bodem. Een zeer gebruikelijk bouw- en installatieconcept voor beta-kanto-

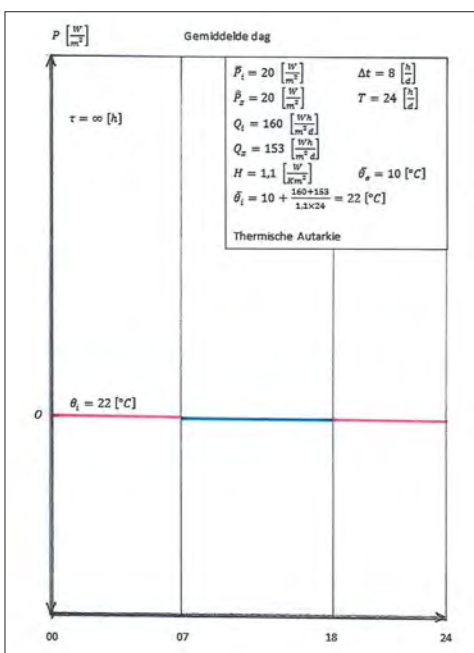


-Figuur 3- Een goed geïsoleerd thermisch snel reagerend beta-kantoor met het bijbehorende processtroom en instrumentatie diagram

ren met een nauwelijks individueel beïnvloedbaar binnenklimaat, waarmee getracht wordt energie neutraal te bouwen. Onder verwijzing naar kader 1, de tijdconstante van een gebouw, die een maat is voor het reactievermogen van een gebouw op thermische verstoringen, is van een dergelijk zeer goed geïsoleerd kantoor niet alleen de warmtecapaciteit gering en de warmteoverdracht van de leefzone naar de massa afgeschermd maar een dagelijkse warmte accumulatie wordt ook nog eens door de stationair geregelde binnentemperatuur onmogelijk gemaakt. In een capaciteitloos en daardoor thermisch snel reagerend gebouw zijn de momentane binnentemperaturen niet alleen gelijk aan de momentane vloer, wand, plafond en meubilair temperaturen maar ook aan de dynamische temperatuurverstoringen. Dit zonder demping en tijdvertraging. Verstoringen op het binnen-

klimaat, bijvoorbeeld het inschakelen van de verlichting en het aanschakelen van computers, worden, door het ontbreken van benutbare warmtecapaciteit niet meer gedempt en vertraagd maar worden gelijk actief weggekoeld, mede door het geringe warmteverlies, ook in de winter. Vanwege het ontbreken van voldoende warmtecapaciteit vindt, in een dergelijk goed geïsoleerd kantoor alleen maar een verschuiving plaats van minder verwarmen naar meer koelen. Het traditionele klimaatplafond regelt de leefzone overdag op een constante binnentemperatuur en 's nachts op een minimale 'beveiligingstemperatuur'. 's Morgens vindt de optimaliserende opwarming plaats. Het thermisch snel reagerende kantoor wordt overdag gekoeld, de blauwe arcering in figuur 3, en 's nachts verwarmd, de rode arcering. Het overgrote deel van het jaar functioneert de langetermijn-warmte/koudeopslag in de bodem daardoor niet als een seizoensbuffer (van zomer naar winter) maar als een dagelijkse warmte buffer (van dag naar nacht). 's Nachts verwarmen en 's morgens en 's middags koelen. Zoals duidelijk blijkt uit figuur 3 resulteert een minimalisatie van de benutbare warmtecapaciteit in een maximalisatie van het dagelijkse en jaarlijkse energiegebruik voor het klimatiseren van leefzones. Het nog beter isoleren van de gebouwschil van een thermisch snel reagerend kantoor leidt alleen nog maar naar een verdere verschuiving van minder verwarmen naar meer koelen, maar levert geen additionele energie besparingen meer op. Het nog beter isoleren van de gebouwschil zorgt ook nog eens voor een grotere thermische onbalans van de langetermijn-warmte/koudeopslag in de bodem.

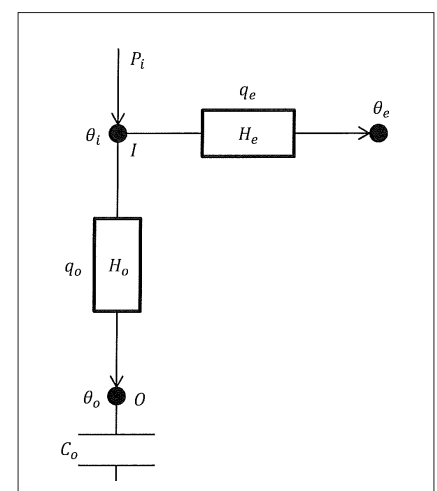
stante van de ruimte wordt dan ook zeer groot met als gevolg een thermisch traag reagerend gebouw. De binnentemperatuur wordt vrijwel gelijk aan de gemiddelde vloer, wand, plafond en meubilair temperaturen en aan de gemiddelde temperatuur verstoringen. Uiteindelijk resulteert weer een stationaire binnentemperatuur. De grote thermische massa regelt de leefzone op een klassieke constante setpoint binnentemperatuur met hetzelfde effect als het traditionele klimaatplafond, nu echter energieloos. Aangezien het kantoor niet meer actief wordt gekoeld met koelwater kunnen de ramen probleemloos geopend worden. Het betreft zo een thermisch traag reagerend alfa-kantoor. Indien de sommatie van transmissie, infiltratie en ventilatie verliezen zo worden gedimensioneerd dat overeenkomstig figuur 3, de blauwe arcering gelijk wordt aan de rode, dat wil zeggen de dagelijkse vrije warmtedissipatie gelijk wordt aan het dagelijkse warmteverlies resulteert thermische autarkie, of te wel een thermisch zelfvoorzienende toestand. Het klimaatplafond, de warmtepompen en langetermijn-warmte/koudeopslag in



-Figuur 4- Het dagelijkse gedrag van thermisch traag reagerende kantoren

### WEL WARMTECAPACITEIT

Laten we nu eens veronderstellen dat er een zeer grote thermisch benutbare warmtecapaciteit in het kantoor aanwezig is. De tijdcon-



-Figuur 5- Elektrische analogie van het dynamische gedrag van een kantoor

De definitie van het getal van Biot voor de thermische massa van een kantoor luidt:

$$Bi = \frac{\alpha_i d_o}{2\lambda_o} \tag{1.1}$$

De formuletekens worden verduidelijkt in de kaders 2 en 3. Indien het getal van Biot kleiner of gelijk is aan één tiende resulteert een lumped sum benadering van de warmte opslag in de thermische massa. Op grond van figuur 5 resulteren de volgende vergelijkingen:

$$\theta_i = \frac{H_e \theta_v + H_o \theta_o}{H_e + H_o} \tag{1.2}$$

En

$$\tau \frac{d\theta_o}{dt} + \theta_o = \theta_v \tag{1.3}$$

Met:

$$\tau = \left(\frac{1}{H_o} + \frac{1}{H_e}\right) C_o = \left(1 + \frac{H_o}{H_e}\right) \tau_o \text{ en } \tau_o = \frac{C_o}{H_o} \text{ en } \theta_v = \theta_e + \frac{P_i}{H_e} \tag{1.4}$$

Voor een sinus verstoring volgens  $\theta_v = \bar{\theta}_v + \hat{\theta}_v \sin \omega t$  resulteert uit vergelijking (1.3) de respons:

$$\theta_o = \bar{\theta}_v + D \hat{\theta}_v \sin \omega(t - \Delta t) \tag{1.5}$$

Met

$$D = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} \text{ en } \Delta t = \frac{\text{invtan}(\omega\tau)}{\omega} \tag{1.6}$$

**De tijdconstante van het kantoor.**

Indien de limiet  $C \rightarrow 0$  dan  $\tau \rightarrow 0$  en  $D \rightarrow 1$  en  $\delta = 0$  zodat  $\Delta t = 0$  en  $\theta_i = \theta_o = \theta_v$ .  
 Indien echter de limiet  $C \rightarrow \infty$  dan  $\tau \rightarrow \infty$  en  $D \rightarrow 0$  en  $\delta = \frac{\pi}{4}$  zodat  $\Delta t = \frac{\pi}{4\omega}$  en  $\theta_i = \theta_o = \bar{\theta}_v$ .

**De tijdsduur van de verstoring.**

Indien de limiet  $T \rightarrow 0$  dan  $D \rightarrow 0$ .  
 Indien de limiet  $T \rightarrow \infty$  dan  $D \rightarrow 1$ .

**De warmteoverdracht van de thermische massa.**

Indien de limiet  $H_o \rightarrow \infty$  dan  $\frac{1}{H_o} = 0$  zodat  $\tau = \frac{C_o}{H_e}$

-Kader 1- Tijdconstante en periodetijd van verstoringen

de bodem komen dan niet meer in bedrijf. Overeenkomstig figuur 4 koelt, tussen zeven uur 's morgens en zes uur 's avonds, de thermische massa het kantoor en slaat de warmte verliesvrij op voor de nacht. Het kantoor wordt dan door de overdag opgeslagen warmte, in de thermische massa, van zes uur 's avonds tot zeven uur 's morgens verwarmd. Uit dynamische behaaglijkheid overwegingen moet echter ook niet te veel thermische massa aanwezig zijn. Te veel aan massa regelt, zoals in het bovenstaande geconstateerd, de leefzone op een niet behaaglijke constante binnentemperatuur, dat wil zeggen op eenzelfde, niet gewenste stationaire constante binnentemperatuur zoals bij traditionele klimaatplafonds met een constante setpointinstelling.

**CONCLUSIES**

Het stationaire Fangermodel wordt geruisloos dynamisch gehanteerd door het denken in dynamische binnentemperaturen, seizoens- en bioritme afhankelijk. Het alleen minimaliseren

van de schilverliezen, zonder optimalisatie van de warmtecapaciteit leidt tot maximalisatie van het jaarlijkse energiegebruik. Het optimaliseren van de warmtecapaciteit in gebouwen resulteert juist wel in minimalisatie van het jaarlijkse energiegebruik. Leefzones in gebouwen moeten thermisch zwaar zijn en dynamisch geregeld worden zodat maximale energiebesparing hand in hand gaat met optimale thermische behaaglijkheid.

**LITERATUUR**

1. Klimagerechtes Bauen, Grundlagen – Dimensionierung – Beispiele, Bruno Keller, 1997.
2. Bouwbesluit 2014
3. NEN 7120, Energieprestatie van gebouwen – bepalingmethode, laatste wijziging C5,juli – 2014
4. World set to use more energy for cooling than heating, John Henley, The Guardian 26 – oktober – 2015

5. Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering, P.O. Fanger, 1970
6. NEN – EN 15251, Binnenmilieu gerelateerde input parameters voor ontwerp en beoordeling van de energieprestatie van gebouwen voor de kwaliteit van de binnenlucht, thermisch comfort, de verlichting en akoestiek, juli – 2007
7. ISSO publicatie 74, Thermische behaaglijkheid, december – 2014
8. Binnenklimaat doet denken aan Oost – Afrika, Harry Schmitz, Business in office, februari – 2008
9. Vrouwen kleumen wat af op kantoor, W. Gerritsen, Dagblad de Limburger 4 – augustus – 2015
10. NEN – EN – ISO 7730, Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2005