

Fazoŝanĝaj materialoj en la mantelo de ĉambroj

Fabien VAN MOOK

kontribuo al Jarkolekto 2010 de TAKE; versio de 2010-7-29

1 Enkonduko

Ne agrablas loĝi aŭ labori en ĉambro, kie la temperaturo tro grandas. Verŝajne ĉiuj iam jam spertis tion, ekzemple en la somero aŭ eĉ en la printempo aŭ aŭtuno, restadante en ligna domo, domo kun grandaj fenestroj aŭ tre bone varmizolita domo. Tro grandajn enajn temperaturojn oni ofte evitas per ŝirmado kontraŭ sunenradiado, per multa ventolado kaj/aŭ per klimatizado. Krome ekzistas alia metodo por moderigi la enan temperaturon: la troa varmo en ĉambro estas sorbata de ties mantelo (tekto, planko, vandoj kaj plafono), ĉar ĝi estas dika kaj enhavas materialo(j)n kun granda varmokapacito. Sed, oni ankaŭ povas por la mantelo elekti specifan materialon, kiu fandiĝas ĉirkaŭ la supra komforta temperaturo (22 °C aŭ pli). Ja multaj materialoj sorbas multe pli da varmenergio dum fandiĝo ol restante en aŭ solida aŭ likva fazo. Materialon, kiun oni eluzas pro ties privarmaj proprecoj dum fazoŝanĝo, oni nomas ĝenerale «fazoŝanĝa materialo». En ĉi tiu artikolo mi traktas la aplikon de fazoŝanĝaj materialoj en la mantelo de ĉambroj. La teoria kadro, kelkaj uzataj materialoj kaj la esplorprojekto, en kiu mi laboras, estas skizataj. La apliko, pri kiu mi ĉi tie parolas, estas sufiĉe nova, kvankam la ideo estas malnova. Nur ekde la lastaj jaroj fabrikantoj sukcesas grandskale produkti la materialojn kun la dezirataj proprecoj.

2 Temperaturo kaj varmo en ĉambroj

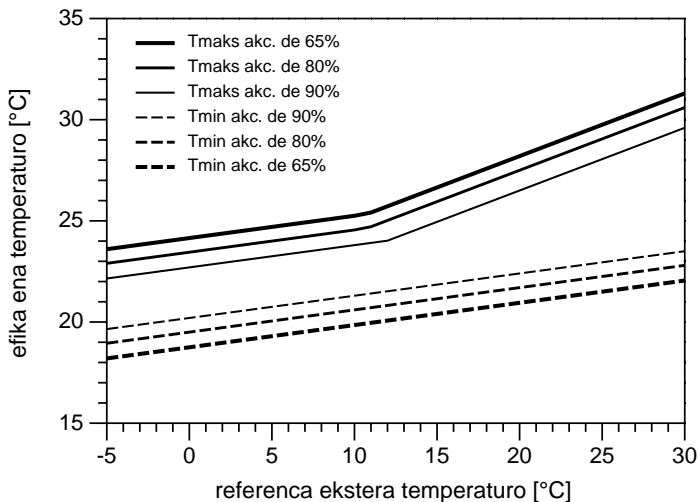
Komforto pri varmo dependas de pluraj parametroj. Temperaturo de la aero estas nur unu. Homo, kiu havas certajn vestaĵojn kaj kiu faras certan laboron, povas senti sin malagraba ankaŭ pro tro granda aera rapido, troa aŭ maltroa aera humideco, tro grandaj aŭ tro malgrandaj temperaturoj de aliaj objektoj (varm-radiado), kaj pro la psika stato. La valoroj de la diversaj parametroj, kiuj kaŭzas komforton, havas kompleksan rilaton. Tial ekzistas pluraj teorioj kaj sekve pluraj rekomendoj por la varmece komforto de homoj. Ili estas pli aŭ malpli ekzaktaj, foje tempaj ŝanĝoj estas konsiderataj. Tre ĝenerale kaj simple oni konsideras, ke homo en loĝejo, oficejo aŭ lernejo sentas sin komforta ĉe jenaj cirkonstancoj (komparu ekzemple kun Klemm k.a. 2007 je paĝo 95):

- aera temperaturo estas inter 20 kaj 22 °C;
- surfacaj temperaturoj superas aŭ malsuperas kun maksimume 3 gradoj la aeran temperaturon;
- aera rapido estas maksimume 0,15 aŭ 0,20 m/s;
- relativa aera humideco estas inter 40 kaj 60%.

Se la ekstera temperaturo estas pli granda ol ekzemple 22 gradoj, ĉu oni tamen rajtas allasi pli grandan temperaturon en ĉambroj? La nederlanda studinstituto de instalistoj, ISSO, publikigis rekomendon pri la akcepteblaj enaj temperaturoj depende de referenca ekstera temperaturo (ISSO 2004; Van der Linden k.a. 2006). La referenca ekstera temperaturo $T_{e;ref}$ estas kalkulata de la averaĝoj de la maksimuma kaj minimuma eksteraj temperaturoj de la konsiderata tago kaj de la tri antaŭaj tagoj laŭ:

$$T_{e;ref} = \frac{1 \cdot T_{hodiaŭ} + 0,8 \cdot T_{hodiaŭ-1} + 0,4 \cdot T_{hodiaŭ-2} + 0,2 \cdot T_{hodiaŭ-3}}{2,4}.$$

Parto de la rekomendo estas bildigata en la figuro 1. Oni distingas tri komfortajn zonojn, depende de la frakcio de homoj, kiuj probable sentas sin komfortaj, nome 65, 80 aŭ 90%. Por la rekomendo ISSO konsultis la plej novajn sciencajn esplorojn (i.a. far Brager kaj De Dear) kaj adaptis al la nederlanda situacio. Laŭ la esploraj rezultoj oni konsideras, ke homoj akceptas aldone pli grandajn enajn temperaturojn, se ili individue povas influi la komforton, ekzemple per pli malpezaj vestaĵoj dum varma vetero, per malfermo de fenestroj kaj eventuale per propra klimatizila termostato. Oni vidas tiun kroman akcepton en la figuro 1 per la pli krutaj linioj ĉe $T_{e;ref} > 10$ °C. La figuro 1 validas nur en oficejoj, kie tiaj individuaj influoj teĥnike eblas kaj socie akcepteblas. Krome, per la novaj esploroj estas pli bone sciite, ke pro fiziologiaj kaj psikologiaj procezoj homoj al kutimiĝas al periodo de pli grandaj aŭ pli malgrandaj eksteraj temperaturoj. Tial la rekomendo konsideras eksterajn temperaturojn de tri pasintaj tagoj. La rekomendo



Figuro 1: Akcepteblaj maksimumaj kaj minimumaj enaj temperaturoj laŭ ISSO 2004, por oficejoj en Nederlando, en kiuj homoj mem povas malfermi fenestron, adapti vestaĵojn kaj influi eventualan klimatizon.

de ISSO kompreneble validas por la nederlanda klimato; por aliaj klimato, socia situacio kaj ĉambra funkcio oni povus fari proprajn rekordaĵojn.

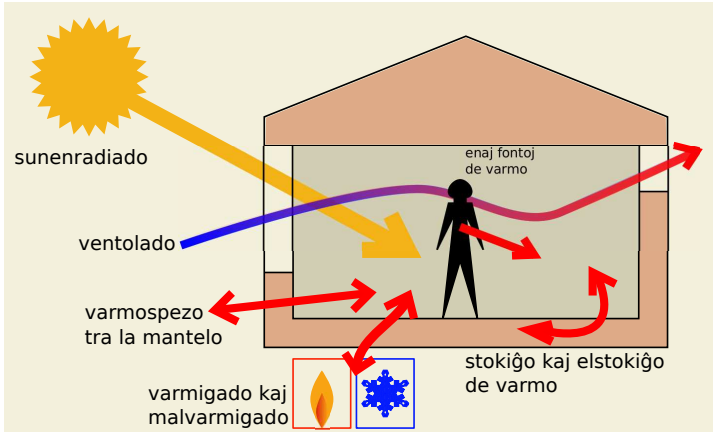
La temperaturo en ĉambro rezultas de diversaj transiĝoj de varmo. Laŭ la leĝo de konserviĝo de energio ĉiuj transiĝoj estas kune en bilanco. Ĉi tiun bilancon mi esprimas per jena ekvacio, en kiu ĉiu termo estas varmospezo en J/s, t.e. kvanto de varmo transiĝanta dum unu tempunuo Δt :

$$\Sigma \Phi_{en} - \Sigma \Phi_{el} = \frac{\Delta Q_{ak}}{\Delta t}.$$

$\Sigma \Phi_{en}$ estas la sumo de ĉiuj varmospezoj direktataj en la ĉambro. $\Sigma \Phi_{el}$ estas la sumo de ĉiuj varmospezoj direktataj el la ĉambro. Kaj ΔQ_{ak} estas la kvanto de varmo sorbita (akumulita) de la mantelo de la ĉambro inter la konsiderata tempopunkto kaj la tempopunkto Δt sekundojn pli frua. Negativa ΔQ_{ak} signifas, ke la mantelo malsorbis varmon.

La plej gravajn varmospezojn prezentas la figuro 2. Temas pri la varmospezoj pro suna enradiado, pro ventolado, pro varmigado (hejtado) kaj malvarmigado, pro homoj kaj aparatoj, la varmospezo tra la mantelo de la ĉambro, kaj la varmospezo pro la akumuliĝo de varmo en la mantelo.

Anstataŭ «akumuliĝo» de varmo mi foje parolas pri «stokiĝo» de varmo. Ofte ni povas pli facile imagi la fenomenojn de varmo kaj varmotransiĝoj, se oni konside-



Figuro 2: La temperaturo en ĉambro rezultas de pluraj varmospezoj.

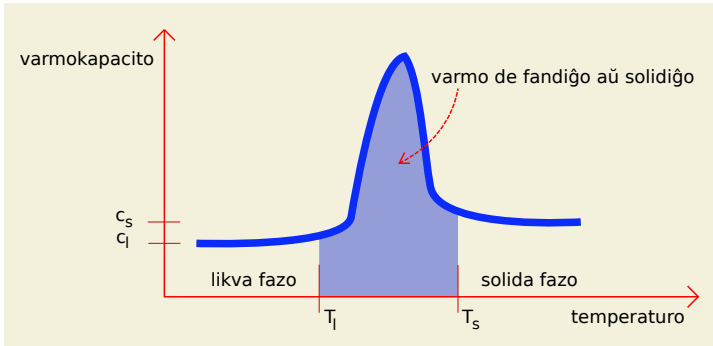
ras varmon kvazaŭ fluidon, kiu fluas de unu provizujo al alia kaj kiu estas stokata en provizujoj. «Akumuliĝo», «malakumuliĝo», «stokiĝo», «elstokiĝo», «sorbiĝo» kaj «malsorbiĝo» estas metaforaj paroj, kiujn mi uzas ĉi tie sendistinge.

La ena temperaturo de ĉambro varias de horo al horo kaj de tago al tago pro la tagaj kaj sezonaj variadoj de la suna enradiado, ekstera temperaturo, ventolado, kvanto kaj aktivado de homoj kaj aparatoj, kaj la povumo de varmigiloj kaj malvarmigiloj. Ĉi tiuj faktoroj estas facile imagataj, sed oni foje forgesas pri la stokiĝo de varmo en la mantelo de ĉambro. Ĝuste tiu stokiĝo de varmo estas la grava fenomeno, pri kiu temas ĉi tiu artikolo. Ĉi-riilate ĉiuj legantoj certe spertis la situaciojn, ke dum periodo de varma vetero la temperaturo en konstruaĵo kun dikaj ŝtonaj aŭ betonaj vandoj restas pli agrabla kaj modera ol en konstruaĵo kun maldikaj lignaj, gipskartonaj aŭ simile malpezaj vandoj. En la sekvontaj paragrafoj mi ilustras la fenomenon kaj montros, kiel fazoŝanĝa materialo utilas ĉe malpezaj konstruaĵoj por moderigo de la ena temperaturo dum varmaj veteroj.

3 Akumuliĝo de varmo en materialo

Se oni transigas certan (malgrandan) kvanton de varmo, ΔQ J, al certa maso (m kg) de iu materialo, la temperaturo de la maso grandiĝas kun ΔT °C. Se krome la fazo de la materialo ne ŝanĝiĝas, oni kutime supozas linearan rilaton inter ΔQ kaj ΔT :

$$\frac{\Delta Q}{\Delta T} = C = m \cdot c,$$



Figuro 3: La varmokapacito de materialo laŭ la temperaturo.

kie C estas la varmokapacito en J/K , kaj c la laŭmasa varmokapacito en $J/(kg \cdot K)$. (Vidu Van Mook 2009 pri la esperantaj terminoj.)

La varmokapacito estas (supoze) konstanta propreco de materialo, kiu validas inter certa intervalo de temperaturoj, ekzemple kiam la materialo restas likva (c_l) aŭ kiam la materialo restas solida (c_s).

Por likvigi solidan materialon pli granda varmo devas esti aldonata ol laŭ la varmokapacito de la likva aŭ solida fazo. En la figuro 3 videblas, ke la varmokapacito multe ŝanĝiĝas inter la temperaturo de (ek)fandiĝo (T_l) kaj la temperaturo de (ek)solidiĝo (T_s). Tio estas kutima fenomeno de multaj materialoj, kvankam specoj de materialoj varias laŭ tio, kiom proksimas la temperaturoj de fandiĝo kaj solidiĝo, kaj kiom grandas la pinto de la kurbo de la varmokapacito.

Se la temperaturo de la maso malgrandiĝas, varmo estas redonata. Ĉe iuj materialoj la varmokapacito sekvas la saman kurbon sed en la inversa direkto. Ĉe aliaj materialoj ekzistas ioma diferenco, kion oni nomas histerezo. Ĉi-okaze la kurbo pri la solidiĝo ofte estas iom ŝovita maldekstren, kompare kun la kurbo de la varmokapacito ĉe la likviĝo.

En la figuro 3 ankaŭ estas montrata la integralo inter la komenca kaj fina temperaturoj de fandiĝo aŭ solidiĝo. Tiu integralo egalas al la (tuta) varmo de fandiĝo aŭ respektive solidiĝo, kiun mi signas per Δh (J/kg). Ekzemple, la varmo de fandiĝo de akvo estas 330 kJ/kg . Glacio kun la volumeno de $100 \times 100 \times 1 \text{ cm}^3$ sorbas ĉirkaŭ $330 \text{ kJ/kg} \times 0,01 \text{ m}^3 \times 1000 \text{ kg/m}^3 = 3,3 \text{ MJ}$ da varmenergio antaŭ ol ĝi tute akviĝas. Tio estas multe da energio! La fandiĝo ne okazas ĉe temperatura intervalo, sed ĉe unu temperatura punkto, nome $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Fazoŝanĝaj materialoj, pri kiuj mi parolos en la venonta paragrafo, havas Δh de ĉirkaŭ 110 kJ/kg kaj fandiĝas ĉe intervalo de ĉirkaŭ $5 \text{ }^\circ\text{C}$ inter $20\text{--}30 \text{ }^\circ\text{C}$. Per la volumeno de $100 \times 100 \times 1 \text{ cm}^3$ da tia materialo oni povas do stoki proksimume $1,7 \text{ MJ}$ da

Tabelo 1: Denso ρ , varmokondukteco λ kaj varmokapacito c de kelkaj ordinaraj materialoj ĉe la marnivela aerpremo kaj ĉirkaŭ la temperaturo 20 °C. La lasta kolumno indikas la energion bezonatan por grandigi kun 5 °C la temperaturon de volumeno de $100 \times 100 \times 1 \text{ cm}^3$ da materialo.

materialo	ρ kg/m ³	λ W/(m·K)	c J/(kg·K)	ΔQ ĉe 0,01 m ³ kaj $\Delta T = 5 \text{ K}$ J
akvo	998	0,61	4180	$0,21 \cdot 10^6$
aluminio	2800	200	880	$0,12 \cdot 10^6$
ŝtalo	7800	45	530	$0,21 \cdot 10^6$
betono	2500	2,0	840	$0,11 \cdot 10^6$
cementa puco	1900	0,9	840	$80 \cdot 10^3$
gips(karton)a tabulo	1000	0,30	840	$42 \cdot 10^3$
(ligna) krucplakaĵo	700	0,20	1880	$66 \cdot 10^3$
minerala fibraĵo	50	0,04	840	$2,1 \cdot 10^3$

varmenergio. Ankaŭ tio ĉi estas multa, se oni konsideras ordinarajn konstrumaterialojn; komparu kun la lasta kolumno de la tabelo 1.

4 Fazoŝanĝaj materialoj

Ĝeneralo

Fazoŝanĝa materialo (angle *phase-change material*; *PCM*) estas materialo, kiun oni eluzas pro ties privarmaj proprecoj dum fazoŝanĝiĝo. Kutime oni eluzas nur la ŝanĝiĝon de la solida al likva fazo, kaj inverse, ĉar la fazoŝanĝiĝo inter likvo kaj gaso kaŭzas grandegajn do malpraktikajn volumenajn ŝanĝiĝojn. Nur tiuj materialoj estas interesaj, kiuj havas unue taŭgan temperaturon de fandiĝo kaj due grandan varmon de fandiĝo.

Jam multaj materialoj, ĉu neorganikaj aŭ organikaj, ĉu miksitaj aŭ ne, estas ekzaminataj de esploristoj laŭ la privarmaj proprecoj. Multaj eblaj fazoŝanĝaj materialoj estas nun konataj. Tre ordinara fazoŝanĝa materialo estas akvo. Pri ties apliko pensu ekzemple pri iamaj fridujoj, en kiuj oni metis peco(j)n da glacio. La fandiĝa temperaturo de akvo, je 0 °C, kaj la granda varmo de fandiĝo, 330 kJ/kg, utilas al la pli-malpli konstantigo de la temperaturo en tia fridujo por la konservado de manĝaĵoj.

Ĉe la apliko en la mantelo de ĉambroj precipe du specoj de fazoŝanĝaj materialoj estas uzataj. Tiuj estas parafinoj kaj salaj hidratoj. Interesaj materialoj estas

tiuj kun fandiĝa temperaturo inter 20 kaj 30 °C. Mi plue limigas la gamon al fazoŝanĝaj materialoj, kiuj nun estas industrie produktataj, do nun aĉeteblaj kaj aplikeblaj en konstruprojektoj. Informojn mi ĉerpas de Mehling kaj Cabeza 2008.

Parafinoj

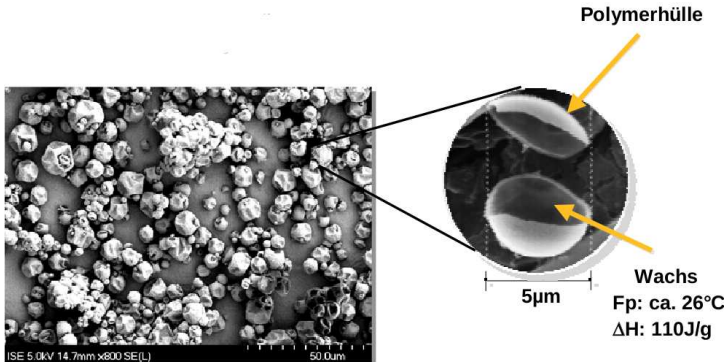
Parafinoj konsistas el alkanoj (C_nH_{2n+2}) kaj havas temperaturojn de fandiĝo inter 5 kaj 130 °C, depende de la longeco de la karbona ĉeno. Ekzemple $C_{17}H_{36}$ fandiĝas ĉe 19 °C kaj $C_{18}H_{38}$ ĉe 28 °C. Miksaĵo de diversaj alkanoj ne havas unupunktan fandiĝan temperaturon sed temperaturan intervalon de fandiĝo. La varmo de fandiĝo ĉirkaŭas 200 kJ/kg. La ciklo de fazoŝanĝoj de solido al likvo kaj inverse estas ripetataj senprobleme: la materialo en ambaŭ fazoj restas stabila kaj la komponantoj ne apartiĝas. Alia avantaĝo de parafinoj estas la propeco apenaŭ aŭ ne reakcii kun konstrumaterialoj. Malavantaĝoj estas ties facila ekbruliĝo kaj relative malgranda varmokondukteco.

Salaj hidratoj

Salaj hidratoj konsistas el salo (paro de pozitiva kaj negativa jonoj) kaj tre certa nombro de akvomolekuloj. (Tro da akvo rezultus al solvaĵo, kiu ne estas hidrato.) Kiel solido sala hidrato formas kristalon, en kiu la komponantoj kuniĝas per jonaj kaj hidrogenaj ligoj. Kiel likvo la jonoj kaj akvomolekuloj povas libere moviĝi unu preter la aliaj. Risko de sala hidrato estas do, ke la komponantoj apartiĝas post likviĝo kaj sekve la resolidiĝo ne plu okazos plene. Ĉi tiu risko trenas la malavantaĝon de malbona ripetado de fazoŝanĝaj cikloj. Alia malavantaĝo de salaj hidratoj estas, ke multaj reakcias pli aŭ malpli kun konstruaj materialoj. Avantaĝoj estas iliaj nebrulo kaj relative granda varmokondukteco. Temperaturoj de fandiĝo de salaj hidratoj varias inter 5 kaj 130 °C. Ekzemple $KF \cdot 3H_2O$ fandiĝas ĉe 18,5 °C kaj je 231 kJ/kg; $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ ĉe 29 °C kaj je 170 kJ/kg. Kutime oni miksas diversajn salajn hidratojn, akirante la deziratan temperaturan intervalon de fandiĝo.

Aplikaj formoj

Krom la ĝusta elekto de fazoŝanĝaj materialoj, gravas la ĝusta formo, en kiu la materialo estas aplikata aŭ «pakata». Ekzistas multaj formoj. La plej gravaj pakoj estas: enfermo en grandaj ujoj, enfermo en tre malgrandaj ujoj, injekto de la fazoŝanĝa materialo en alian materialon, kaj fikso en la matrikso de alia materialo (kompozito). Plej simple estas verŝi la fazoŝanĝan materialon (en likva fazo) en fermitan platan skatolon aŭ sakon. Fabrikanto ofertas ekzemple plastajn

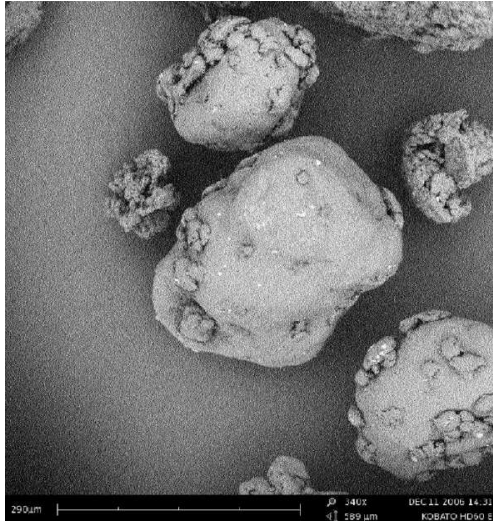


Figuro 4: Bildo de de Micronal^(R) per elektronika mikroskopo (Schmidt 2007). La mikrokapsuloj konsistas el polimera ŝelo («Polymerhülle»); ene troviĝas parafino («Wachs»), kiel fazoŝanĝa materialo. Ilia diametro varias proksimume inter 2 kaj 50 μm . Depende de la ekzakta konsisto kaj miksiĝo de parafinoj la fandiĝa temperaturo estas ĉirkaŭ 21, 23 aŭ 28 $^{\circ}\text{C}$, kaj Δh estas ĉirkaŭ 135 kJ/kg.

skatolojn ($610 \times 610 \times 17 \text{ mm}^3$) kun sala hidrato; la skatolojn oni povas meti en penda plafono anstataŭ aŭ sur la plafonaj paneloj. En tia apliko liko estas risiko, ĉar sala hidrato agresas okulojn kaj haŭton. Alia problemo povas esti, ke la varmo de la ĉambra spaco ne atingas la tutan amason de la fazoŝanĝa materialo, ekzemple pro malbona varmotransiĝo tra la skatola ŝelo. Krome eblas, ke la komponantoj de sala hidrato apartiĝas dum la likviĝo kaj konsekvence ĝi poste ne plu tute resolidiĝos.

Ekde la 1980-aj jaroj oni provadas enkorpigi fazoŝanĝajn materialojn en konstrumaterialoj kiel ligno, gipskartona tabulo kaj puco. En ilin oni injektis parafinon komence, sed la parafino, en la likva fazo, facile likis kaj forlasis la injektitan konstrumaterialon. Je la finiĝo de la 1990-aj jaroj ĥemiaj fabrikantoj eltrovis la procezon, per kiu ili povas produkti «mikrokapsulojn» kun parafino ene (figuro 4). Tiaj mikrokapsuloj estas globformaj kun diametroj de 2 ĝis 50 μm kaj havas plene fermitan polimeran ŝelon. Mikrokapsulojn oni povas miksi kune kun la aliaj ingredientoj de gipskartona tabulo aŭ puco. Konsekvence, per tiaj konstrumaterialoj kun mikrokapsuloj oni povas stoki multe pli da varmo ĉe la temperaturo de fandiĝo de la fazoŝanĝa materialo, ol sen mikrokapsuloj. Rilate al varmokapacito ili do iel same funkcias kiel dikaj ŝtonaj aŭ betonaj vandoj, aŭ eĉ pli bone.

Nur antaŭ kelkaj jaroj estas inventata la procezo, per kiu oni povas produkti mikrokapsulojn kun sala hidrato ene. La kelkpersona firmao Capzo el Nederlando estas la inventinto, dum grandegaj internaciaj firmaoj kiel DuPont aŭ BASF ne



Figuro 5: Bildo de Thermusol^(R) per elektronika mikroskopo (www.capzo.nl).

La mikrokapsuloj konsistas el polimera ŝelo; ene troviĝas sala hidrato, kiel fazoŝanĝa materialo. Ilia diametro varias proksimume inter 200 kaj 3000 μm .

Depende de la ekzakta konsisto kaj miksiĝo de salaj hidratoj la fandiĝa temperaturo varias inter 20 kaj 30 °C, ĉe Δh de ĉirkaŭ 110 kJ/kg.

sukcesis. La inventaĵo ja tre utilas, ĉar mikrokapsuloj kun sala hidrato havas kelkajn gravajn atutojn. Mi nomas tri avantaĝojn, kiuj specife rilatas al salaj hidratoj, kaj kiuj diferencigas de mikrokapsuloj kun parafino. Unue, pro la relative malgrandaj distancoj ene de mikrokapsulo la komponantoj (salaj jonoj kaj akvo-molekuloj) pli facile kuniĝas dum resolidiĝo (rekristaliĝo) ol ene de pli grandaj ujoj kiel skatoloj aŭ sakoj. Do la risko de apartiĝo malpli grandas. Due, enfermita en mikrokapsulo sala hidrato ne agresas aliajn materialojn kaj ĝi ne perdas akvon (pro vaporiĝo) nek altiras akvon el la ĉirkaŭaĵo (pro sia eventuala higroskopeco). Trie, sala hidrato ne brulas kaj konstrumaterialo kun ĝi eĉ pli rezistas fajron pro la pli granda varmokapacito. Ĉi tiu lasta avantaĝo estas la gravega diferenco inter sala hidrato kaj parafino.

Apliko en konstruaĵoj

Oni uzas fazoŝanĝajn materialojn jam en multe diversaj aplikaĵoj. Mi mencias nur kelkajn ekzemplojn (pli vaste pritraktas Mehling kaj Cabeza 2008 kaj Sharma k.a. 2009). Aplikaĵoj ekster la konstruista fako estas ekzemple transportado kaj stok-

ado de varoj, kaj vestado kaj protektado de homoj. Tiaj aplikaĵoj tamen iel similas al la konstruitaj aplikaĵoj, ĉar temas pri la konstantigo de la dezirata temperaturo ĉe varoj kaj respektive por homa komforto kaj sano en danĝeraj situacioj. Pli malsimila apliko estas la uzo de fazoŝanĝaj materialoj en komputilaj memoriloj, ĉar tiuj materialoj precipe ne estas elektitaj pro siaj privarmaj proprecoj, sed pro siaj optikaj aŭ elektraj proprecoj dum fazoŝanĝo.

En konstruaĵoj oni povas apliki fazoŝanĝajn materialojn en baze du manieroj: «aktive» kaj «pasive». Aktivaj aplikaĵoj rilatas al instalaĵoj. Ekzemple fazoŝanĝa materialo estas aplikata ene de suna akvohejtilo: per la fazoŝanĝa materialo la varmo de la sunradioj estas stokita por la periodo tuj post la sunsubiro, kaj tiel oni pli longe profitas de la dumtaga suna varmo ol sen fazoŝanĝa materialo. En alia aktiva apliko ventola sistemo estas provizata de plataj skatoloj kun fazoŝanĝa materialo, preter kiuj aero fluas kaj per kiuj la varmo el la aero estas stokata aŭ sorbata. Ĉi tio do temas pri speco de varmointerŝanĝilo. Pasivaj aplikaĵoj rilatas al la mantelo de konstruaĵoj, kaj ĉi-rilate la mantelo ne estas provizata de instalaĵoj (por hejti, malvarmigi k.t.p.). Ĉi-okaze fazoŝanĝaj materialoj estas aplikataj ekzemple en plafonoj, plankoj kaj enaj flankoj de vandoj, por pligrandigi la varmokapaciton de la mantelo. Ĉi tiaj aplikaĵoj estas la fokuso de ĉi tiu artikolo. Pri iom miksaj manieroj, duonaktive-duonpasive, mi povas mencii la aplikon de fazoŝanĝaj materialoj en varmigaj kaj malvarmigaj plankoj aŭ plafonoj, kaj la aplikon en la lamenoj de ĵaluzioj por la tuja kaptado de la sunradia varmo.

Eksperimentoj

Pri preskaŭ ĉiaj aplikaĵoj oni ankoraŭ multe eksperimentadas. Ofte la demandoj estas kiom kaj ĉe kiuj kondiĉoj efikas la aplikaĵo de fazoŝanĝa materialo kompare al situacio sen ĝi, kaj kiujn privarmajn proprecojn havu la fazoŝanĝa materialo. En laboratorio oni facile determinas proprecojn de materialo mem. Tie oni ankaŭ facile trovas fazoŝanĝajn materialojn kun la dezirataj fandiĝaj temperaturo kaj varmo. Sed, ĉe konstruaĵaj aplikaĵoj tre multaj parametroj rolas al sukceso aŭ malpli sukceso. Pensu ekzemple pri la diversaj funkcioj kaj uzoj de konstruaĵoj (oficejo, lernejo aŭ loĝejo) kaj konsekvence la diversaj postuloj por la dezirata ena klimato, pri la eventuala influo de la sunenradiado (depende de grandecoj kaj orientiĝoj de fenestroj), pri ventolado, pri la varmotransiĝo inter la ĉambra aero kaj la mantelo, kiu enhavas fazoŝanĝan materialon, kaj tiel plu.

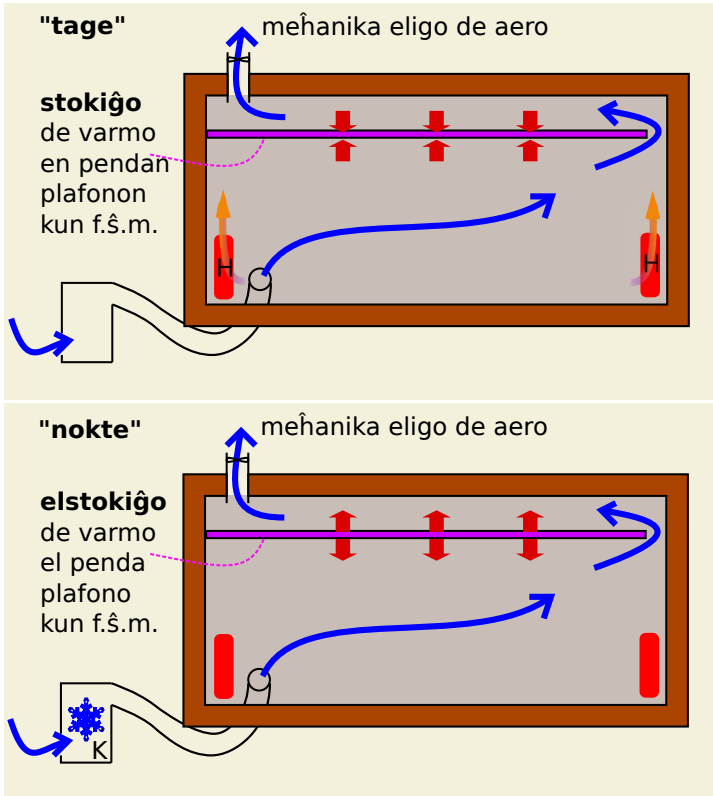
Ĉi-tiun kalendaran jaron mi kunlaboras en esplorprojekto de la Altlernejo de Roterdamo (HRO). Temas do pri pasiva apliko de fazoŝanĝaj materialoj. La taskoj estas unue aranĝi kaj konstrui eksperimentejon, kiu konsistas el du transporteblaj oficejetoj, kaj due eksperimenti pri fazoŝanĝaj materialoj en la pendaj plafonoj de la oficejetoj. Firmao pri portempaj kaj transporteblaj oficejaj unuoj pruntis du al



Figuro 6: Du transporteblaj oficejetoj por la eksperimentoj. Ili ne troviĝas ekstere sed en granda halo.

ni (figuro 6). Oficeja unuo konsistas el unu ĉambro kun la planka areo de ĉirkaŭ $6 \times 3 \text{ m}^2$. La oficejetoj estas kompreneble konstruitaj per malpezaj materialoj: ŝtala framo kaj mantelo el lignaj tabuloj kaj minerala fibraĵo. En unu oficejeto ni aplikos fazoŝanĝan materialon en aŭ sur la paneloj de la penda plafono; en la alia oficejeto ne. Krom ĉi tiu diferenco, ambaŭ oficejetoj devos esti samaj. Nun (en julio 2010) ni estas ankoraŭ finpretigantaj la oficejetojn kaj la mezurajn sistemojn. En ĉiu oficejeto troviĝas du elektraj radiatoroj. Per unu ventolilo aero estas eligata de la oficejeto. La aero, kiu libere eniras tra orifiko, povas esti malvarmigata. Pro limigita buĝeto ni devas uzi plej simplajn rimedojn. Espereble la eksperimentoj komenciĝos en septembro.

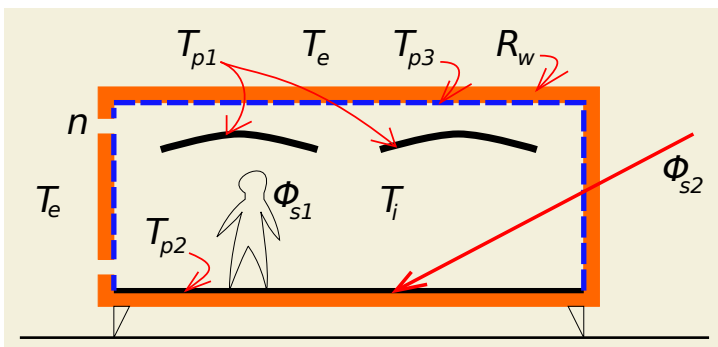
En la eksperimentoj ni mezuros temperaturojn, kaj observos precipe, ĉu la ena temperaturo de la oficejeto kun fazoŝanĝa materialo diferencos de tiu de la alia oficejeto sen la materialo, kaj ĉe kiuj kondiĉoj. La ventolado, la varmigado de la ĉambro, la malvarmigado de la eniĝanta aero kaj la formo kaj konsisto de la penda plafono povos esti variigataj. La du tre gravaj punktoj, kiujn ni devos pristudi, estas, (1) en kiuj manieroj la varmotransiĝo inter la ĉambra aero kaj la fazoŝanĝa materialo efikas, kaj (2) en kiuj manieroj la varmo, kiu dumtage stokiĝas en la fazoŝanĝa materialo, dumnokte estas efike forigata (figuro 7). La ideo estas nokte malvarmigi la ĉambron per kroma, granda ventolado; la kutima



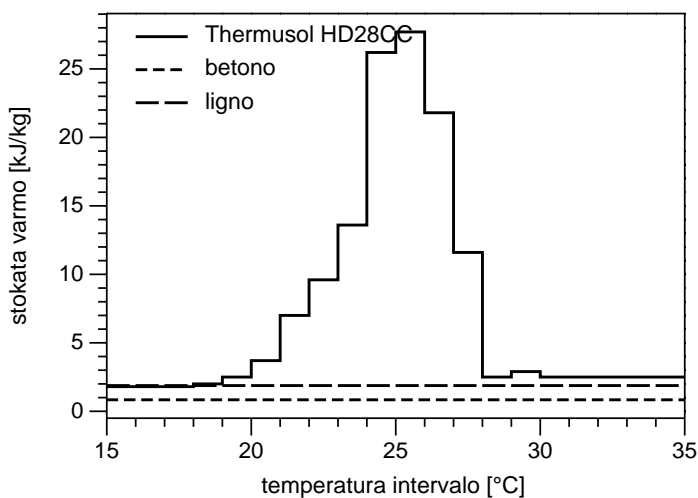
Figuro 7: Principo de la tag-nokta ciklo en ĉambro kun fazoŝanĝa materialo en la penda plafono. H = hejtado per radiatoroj, K = malvarmigado de la eniĝanta aero.

malvarmecoj de la aero dum noktoj plu helpas al la malvarmigo de la ĉambro kaj sekve al la elstokigo de la varmo el la fazoŝanĝa materialo, por ke ĝi dumtage povu plene reŝarĝiĝi pro la taga varmo de la suno, aparatoj kaj homoj.

La celo de la esploro estas formuli kondiĉojn por sukcesa apliko de fazoŝanĝaj materialoj en precipe ekzistantaj oficejoj kaj lernejoj. Tial ni koncentras nin pri formoj kaj konsistoj de pendaj plafonoj kun fazoŝanĝaj materialoj, ĉar ili estas facile aplikataj en ekzistantaj konstruaĵoj, kie somere oni tro suferas pro tro grandaj enaj temperaturoj.



Figuro 8: Skizo de la ĉambro, kiu objektas en la simulaĵoj de la paragrafo 5.



Figuro 9: Varmokapacito de ligna krucplakaĵo, betono kaj fazoŝanĝa materialo Thermusol^(R) HD28CC. La stokata varmo estas indikata en kJ/kg por temperatura ŝanĝiĝo de 1 °C, nome de 17 ĝis 18 °C, de 18 ĝis 19 °C, k.t.p.

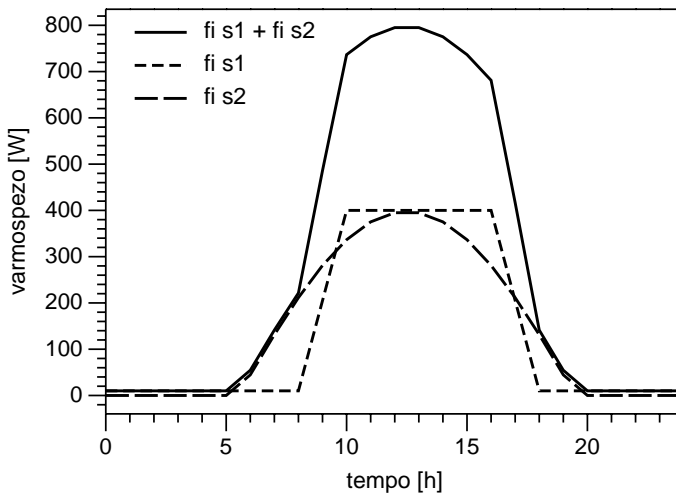
5 Ekzemplaj simulaĵoj

Per ekzemplaj kalkulaj simulaĵoj mi provas ĉi tie ilustrati la efikon de la varmokapacito kaj de fazoŝanĝa materialo en la mantelo de ĉambro al la ena temperaturo. La ĉambro similas al transportebla oficejeto de la eksperimentoj, kiuj okazos en la Altlernejo de Roterdamo. En la kalkuloj ĝi havas dimensiojn de $6 \times 3 \times 3 \text{ m}^3$. En la figuro 8 la ĉambro estas skizata kune kun la plej gravaj fizikaj parametroj

Tabelo 2: Penetra profundo d_p de kelkaj materialoj ĉe cikloj kun la periodo de 1 horo kaj respektive 24 horoj.

$$d_p = \sqrt{\frac{\lambda \cdot t_p}{\rho \cdot c \cdot \pi}}$$

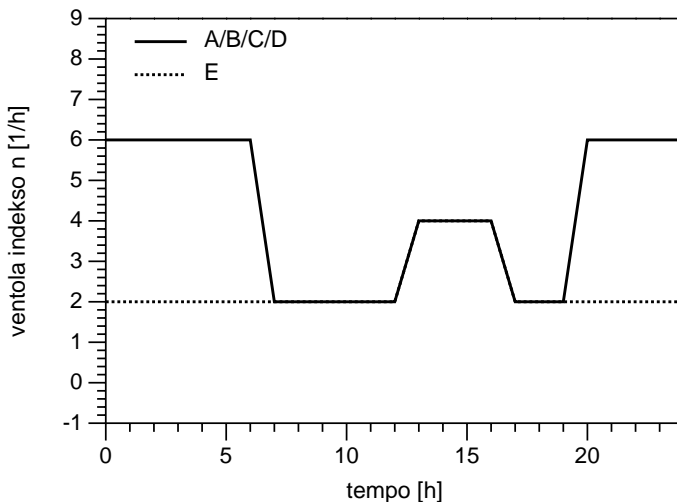
materialo	d_p (ĉe $t_p = 1$ h) m	d_p (ĉe $t_p = 24$ h) m
aluminio	0,30	1.49
ŝtalo	0,11	0,54
betono	0,033	0,16
cementa puco	0,025	0,12
gips(karton)a tabulo	0,020	0,10
(ligna) krucplakaĵo	0,013	0,065
minerala fibraĵo	0,033	0,16



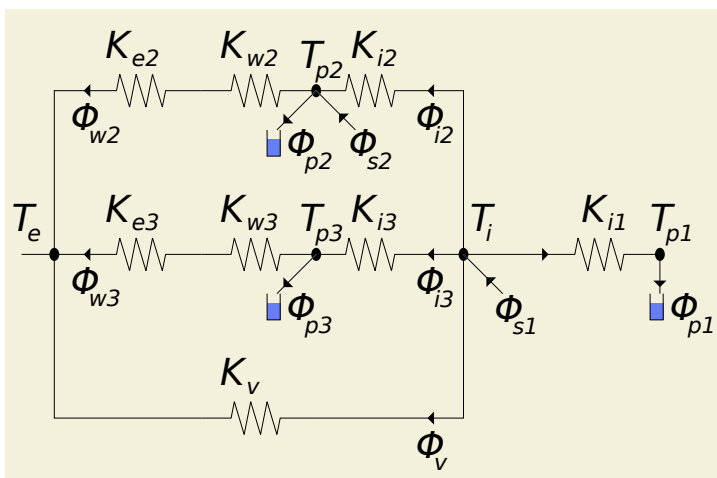
Figuro 10: Tagnokta ciklo de la varmospezoj Φ_{s1} kaj Φ_{s2} .

de la modelo, kiun mi uzas por la kalkuloj. La modelo estas koncize priskribata jene:

- La ĉambro ne tuŝas grundon. Ĉie ĉirkaŭ ĝi estas aero kun la ekstera temperaturo



Figuro 11: Tagnokta ciklo de la ventola indekso por la simulaĵoj A/B/C/D (kun kroma nokta ventolado) kaj respektive E (sen kroma nokta ventolado).



Figuro 12: Skemo de temperaturoj, varmospezoj kaj varmokonduktancoj por la ĉambro de la figuro 8. La «citeloj» reprezentas akumuliĝon de varmo.

T_e . La ekstera temperaturo varias laŭ kosinuso inter 16 °C je la 2a horo nokte kaj 24 °C je la 14a horo tage. Tio ĉi pli-malpli reprezentas someran tagnokton en modera klimato.

- La aero en la ĉambro estas karakterizata per unu temperaturo, nome T_j .
- En la ĉambro troviĝas penda plafono, por kiu oni povas elekti materialon en maldika tavolo. Ĝi estas indikata per la indekso «p1». La temperaturo en ĝi estas do T_{p1} .
- La mantelo de la ĉambro konsistas el maldika ena tavolo kaj dika ekstera izola tavolo. La maldika tavolo povas esti el ligno, fazoŝanĝa aŭ alia materialo, kaj por ĝi oni povas distingi du areojn por du malsamaj materialoj, ekzemple por la planko (indekso «p2») kaj por la vandoj kaj plafono (indekso «p3»). La ekstera izola tavolo (indekso «w») ĉie estas sama, kaj karakterizata de sia varmorezistanco R_w (kiu egalas al la diko d dividita de la varmokondukteco λ de la izola tavolo). En la simulaĵoj la dika izola tavolo konsistas el 10 cm da minerala fibraĵo.
- La penda plafono kaj la maldikaj tavoloj povas havi varmokapaciton, ĉu laŭ-temperature konstantan (karakterizatan per c) por ligno, betono kaj aliaj konstrumaterialoj, ĉu de temperaturo dependan por fazoŝanĝa materialo (figuro 9).
- Serioza simpligo de la modelo estas, ke la penda plafono (kun la indekso «p1») kaj la maldikaj tavoloj p2 kaj p3 havas unu propran temperaturon (T_{p1} , T_{p2} kaj respektive T_{p3}) kaj neniun varmorezistancon. Tion oni rajtas supozi, nur se tavolo estas sufiĉe maldika, nome pli maldika ol la t.n. penetra profundo (vidu la tabelon 2; Hagentoft 2001).
- En la modelo estas difinata la varmospezo Φ_{s1} , per kiu la enaj varmofontoj povas esti karakterizataj, kiuj liveras sian varmon rekte al la aero (aparatoj kaj homoj). Ankaŭ eblas difini duan varmospezon Φ_{s2} , por la varmo, kiu iras rekte en la plankon (maldika tavolo p2). Per ĝi oni karakterizas ekzemple la sunenradiadon. En la figuro 10 la tagnoktaj cikloj de ambaŭ varmospezoj estas prezentataj por la simulaĵoj: Φ_{s1} proksimume reprezentas la ĉeeston de du personoj kaj du komputiloj, kaj Φ_{s2} reprezentas la sunenradiadon dum somera tago en modera klimato.
- Ventolado okazas meĥanike, do oni povas por ĉiu momento fiksi certan ventolan spezon. En la figuro 8 ĝi estas karakterizata per la ventola indekso n (en h^{-1}), kiu indikas kiomfoje en horo la tuta volumeno de la ĉambro estas interŝanĝata kun ekstera aero. Ventolado de ĉambro kun la volumeno $V \text{ m}^3$ kun ventola indekso de $n \text{ h}^{-1}$ signifas ventolan spezon de $n \times V / 3600 \text{ m}^3/\text{s}$. La figuro 11 montras la ventolan spezon por la simulaĵoj A, B, C kaj D: nokte la ĉambro estas multe ventolata por la forigo de la eventuale dumtage stokita varmo. Iom posttagmeze la ventolado estas pligrandigata de la ĉeestantoj pro la posttagmeza grandigo de la ena temperaturo. Ĉe la simulaĵo E ne okazas kroma nokta ventolado. Komprenible por la sano de eventualaj ĉeestantoj ekzistas ĉiam minimuma ventola spezo; mi elektis $n = 2 \text{ h}^{-1}$ por la simulaĵoj.
- La aero miksiĝas plene ĉie en la spaco de la ĉambro. Ĉi tiu supozo kongruas kun la supozo de unu ena temperaturo. Krome, la penda plafono estas tiel konstruita,

ke la aero super ĝi plene apartenas al la aera amaso en la tuta ĉambro (vidu la figuron 8). Tial mi foje nomas tiun plafonon «libere penda plafono».

- Normigitaj koeficientoj de la surfaca varmotransiĝo estas uzataj (ekzemple el NEN-EN-ISO 6946, Hagentoft 2001 aŭ Klemm k.a. 2007). Per ili oni kombine konsideras varmotransiĝon kaj pro konvektado inter la aero kaj la konsiderata surfaco (de la vando, plafono, planko k.t.p.), kaj pro radiado inter la konsiderata surfaco kaj aliaj surfacoj. Krome, en la modelo nur unu valoro por ĉiu parto de la surfaco estas supozata. En la figuroj 8 kaj 12 la koeficientoj ne estas eksplike menciataj, sed ili aperas en ekvacioj en la anekso.

- La tempa variado de la parametroj estas konsiderataj. Unu simulaĵo konsistas el kalkuloj de la distingitaj varmospezoj kaj temperaturoj por ĉiu sinsekvanta horo el la serio de kvin tagnoktoj. Por ĉiu tempopunto (horo) de la simulaĵo la sistemo de ekvacioj estas solvata per komputilo. La ekvacia sistemo estas reprezentata en la figuro 12 kaj listigata en la anekso. La metodo baze similas al metodoj priskribataj de Clarke (2001), De Wit (2008) kaj Hagentoft (2001) ekzemple. La maniero de la bildigo de temperaturoj, varmospezoj kaj varmokonduktancoj, kvazaŭ elektra cirkvito, estas sufiĉe kutima en la konstrufiziko.

La supra priskribo de la modelo eble ŝajnas ampleksa, sed mi povus ankoraŭ multon rimarki. La modelo enhavas multajn simpligojn. Kelkaj meritis plian ekzamenon, precipe la simpligo de la penda plafono kaj la maldikaj tavoloj al unu nodo (unu temperaturo kaj neglektita varmorezistanco). Aliflanke, pliajn detalojn kaj precizigon ne celas mi, ĉar ekzistas diversaj komputilaj programoj, per kiuj oni povas simuli temperaturojn kaj varmospezojn en konstruaĵoj pli detale kaj pli amplekse (ekzemple ESP-R (Heim 2005) kaj TRNSYS (Koschenz kaj Lehmann 2004)).

La rezultoj de kvin simulaĵoj estas montrataj. Ili varias laŭ la aplikataj materialoj por la libere penda plafono kaj la maldikaj enaj tavoloj. Mi elektas inter ligna kruĉplakaĵo, betono kaj la fazoŝanĝa materialo Thermusol. Krome, en la lasta simulaĵo ne estas difinita kroma nokta ventolado (figuro 11). Jen la nuraj diferencoj inter la kvin simulaĵoj:

simulaĵo	p1	p2	p3
A	nenio	12 mm, kruĉpl.	12 mm, kruĉpl.
B	nenio	15 mm, betono	15 mm, betono
C	5 mm, Thermusol	12 mm, kruĉpl.	12 mm, kruĉpl.
D	5 mm, Thermusol, surfaco duobla	12 mm, kruĉpl.	12 mm, kruĉpl.
E (sen kroma nokta ventolado)	5 mm, Thermusol, surfaco duobla	12 mm, kruĉpl.	12 mm, kruĉpl.

En la figuro 13 la rezulta ena temperaturo en la kvin simulaĵoj estas montrata

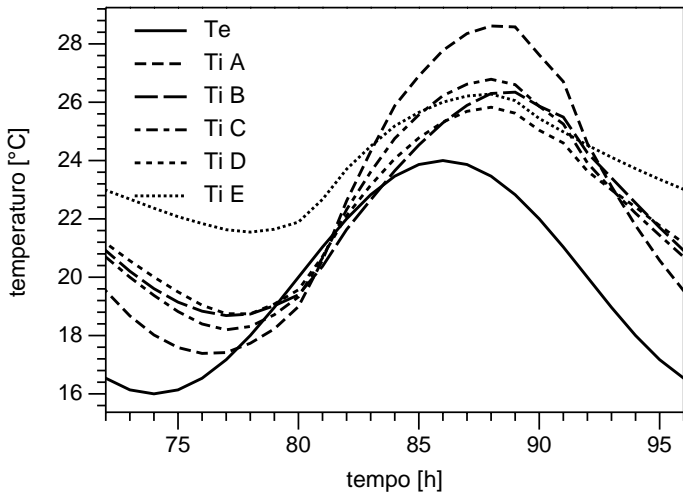
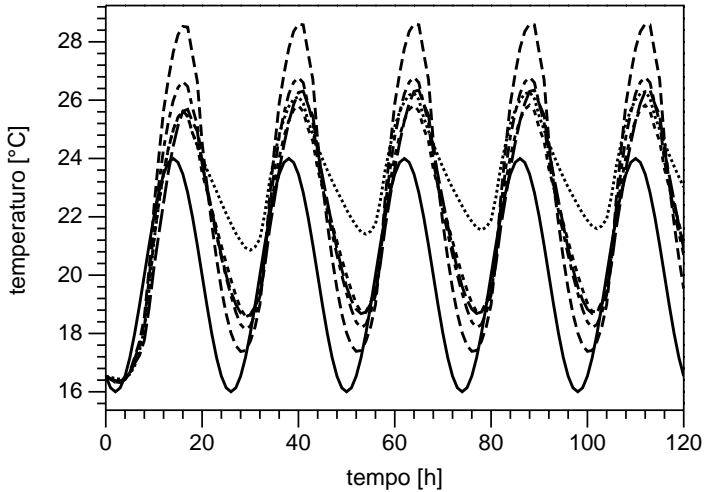
kune kun la ekstera temperaturo, kiu estas kompreneble la nedependa variablo. La enaj temperaturoj de la tria aŭ kvara ĝis la kvina tagnokto ripetiĝas tre simile, sed la enaj temperaturoj de la unua ĝis la dua aŭ tria tagnokto ne. En tiu unua periodo la (arbitre) elektitaj temperaturoj por la starto de simulaĵo (t.e. la momento $t = 0$ h) influas la rezultojn. Ĉi tiun efikon mi nomas la efiko de la komencaj kondiĉoj. Ĉar ĉi tie la komencaj kondiĉoj estas arbitre elektitaj kaj ili ne nepre estas en reciproka bilanco, la unua periodo ne estu konsiderata.

Se la enaj surfacoj de la ĉambro estas kovritaj nur de ligno (simulaĵo A), la maksimuma ena temperaturo estas preskaŭ $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ posttagmeze. Tia cirkonstanco estas malkomforta por ĉiuj laŭ la rekomendo de ISSO 2004 (komparu kun la figuro 1, kun $T_{e;ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Se la enaj surfacoj konsistas nur el betono (eĉ en —nerealisma— tavolo de nur 15 mm, simulaĵo B), la ena temperaturo estas maksimume $26,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, kaj ĉi tio estus ĵus komforta por ĉiuj laŭ la rekomendo. La grafikaĵo ankaŭ montras, ke la momento de la temperatura maksimumo okazas iom pli malfrue. Pli da varmokapacito en la mantelo ĉiam kaŭzas pli malfruan maksimumon de la ena temperaturo.

La maksimumaj enaj temperaturoj en la simulaĵoj C kaj D, do kun fazoŝanĝa materialo en la penda plafono, estas $26,5$ kaj preskaŭ $25,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. La fazoŝanĝa materialo do ĉi-okaze sufiĉe efikas, eĉ en simila grado kiel ĉe la simulaĵo B, kvankam la totala maso de betono en simulaĵo B multe pli grandas ol la totala maso de fazoŝanĝa materialo. Rimarkindas, ke la duobligo de la maso de fazoŝanĝa materialo (de la simulaĵo C al D), rezultas al la malgrandiĝo de la maksimuma ena temperaturo kun «nur» $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Necesos pli da studo por kompreni, kiel la ena temperaturo dependas de tiu maso kaj de la ceteraj parametroj de la varmobalanco (varmotransiĝo inter aero kaj surfacoj, ventolado, varmofontoj k.t.p.).

En la simulaĵo E ne okazas kroma nokta ventolado, sed krom ĉi tiu diferenco ĝi samas al la simulaĵo D. La ena temperaturo en E varias inter proksimume $21,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ nokte kaj $26,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ tage. La ena temperaturo restas sufiĉe granda, kaj ĝi ĉiam pli grandas en la respektivaj horoj ol ĉe la simulaĵo D. Gravas do la kroma nokta ventolado. Per ĝi la dumtage stokita varmenergio estas forigata. Ju pli malgrandas la temperaturo de la fazoŝanĝa materialo en la mateno, des pli da varmenergio povas esti stokata dum la tago.

Simulante per la sama modelo oni povas studi ankoraŭ multajn pliajn cirkonstancojn. Oni riskas tamen, ke la rezultoj restas spekulaj, se oni ne povas kompari la simulaĵojn kun eksperimentoj kaj kun simulaĵoj per aliaj, eble pli detalaj, modeloj.



Figuro 13: La ekstera temperaturo T_e kaj la rezulta ena temperaturo T_i laŭ la kvin simulaĵoj A ĝis E. La suba grafikaĵo montras nur la kvaran tagnokton.

6 Konkludo

En ĉi tiu artikolo specifa apliko de fazoŝanĝaj materialoj estas priskribita. Temas pri la demando, ĉu fazoŝanĝaj materialoj utilis en la mantelo de ĉambro (aŭ konstruaĵo). Pli ĝenerale, per fazoŝanĝa materialo oni provas moderigi (konstantigi)

temperaturon, ĉar la materialo sorbas kaj malsorbas varmenegion multe pli ĉe la fazoŝanĝoj de likviĝo kaj solidiĝo ol ĉe neŝanĝo de la fazo. La donitaĵoj en la tabelo 1 kaj la figuro 9 pruvas la grandajn diferencojn.

La specifa apliko estas enkadrigita per la problemo de akcepteblaj kaj komfortaj cirkonstancoj por homoj loĝantaj kaj laborantaj en konstruaĵoj, kie precipe somere oni spertas trovarmiĝon. En la paragrafo 2 nova rekomenaĵo pri la varmea komforto, bazita je novaj esploroj, estas menciita.

Mastrumado de la temperaturo en konstruaĵo signifas mastrumadon de varmospezoj (figuro 2). Unu de la varmospezoj, kiuj konsistigas la varmobilancon de ĉambro, estas kaŭzata de la akumulo de varmo en la mantelo. Per la aldono de fazoŝanĝaj materialoj oni provas pligrandigi la varmokapaciton de la mantelo. La fandiĝa temperaturo de fazoŝanĝa temperaturo kongruu kun la temperaturo, ekde kiu oni spertas malkomforton. Tiu ĉi temperaturo estas kutime inter 22 kaj 28 °C dum somero en lando de modera klimato.

Dum la pasintaj 10 ĝis 15 jaroj fabrikantoj sukcesas grandskale liveri materialojn kun ĝuste tiujn temperaturojn de fandiĝo kaj en utila formo. La fazoŝanĝa materialo estas kutime parafino aŭ sala hidrato. La avantaĝa formo estas pudro da mikrokapsuloj. Mikrokapsulo kun la fazoŝanĝa materialo ene havas diametron inter 2 ĝis 3000 μm kaj oni povas ilin miksi kun la ingredientojn de gipskartona tabulo, puco, betono k.t.p. Ankaŭ eblas per ili plenigi platajn skatolojn aŭ sakojn, sen aidonaĵoj. La enkapsuligo de salaj hidratoj estas tre nova inventaĵo. Mikrokapsuloj de sala hidrato des pli utilas en konstruaĵoj, ĉar salaj hidratoj ne brulas, kontraŭe de parafinoj.

Ekzistas multaj diversaj ideoj pri aplikoj de fazoŝanĝaj materialoj en konstruaĵoj. Pri ĉiuj oni ankoraŭ eksperimentas. En unu esplorprojekto mi kunlaboras por la Altlernejo de Roterdamo (HRO). La celo de la esploro estas formuli kondiĉojn por sukcesa apliko de fazoŝanĝaj materialoj en la penda plafono de oficeja ĉambro, kadre de la celo moderigi la enan temperaturon dum varmaj veteroj. Speciale estos pristudate, (1) en kiuj manieroj la varmotransiĝo inter la ĉambra aero kaj la fazoŝanĝa materialo efikas, kaj (2) en kiuj manieroj la varmo, kiu dumtage stokiĝas en la fazoŝanĝa materialo, dumnokte estas efike forigata (figuro 7). Nun (julio 2010) la eksperimentejo estas ankoraŭ preparata. Espereble mi povos prezenti rezultojn en venonta numero de la *Jarkolekto de TAKE*.

En la paragrafo 5 la influo de la varmokapacito de la mantelo de ĉambro estas ilustrita per kalkulaj simulaĵoj. La uzata modelo enhavas multajn seriozajn simpligojn, kiuj certe bezonos pristudojn. Espereble mi povos ĝin kompari kun la eksperimentoj en la HRO. Malgraŭ ĉi ĉio la simulaĵoj montras, dum someraj cirkonstancoj, grandajn enajn temperaturojn, se (la ena, ĉambra flanko de) la mantelo konsistas el «malpeza» materialo (lignaj tabuloj), kaj klare malpli grandajn enajn temperaturojn, se pli peza materialo (kun pli granda varmokapacito)

estas uzata, ekzemple betono. Laŭ la simulaĵoj eĉ eblas, ke tiu lasta tendenco ankaŭ okazas ĉe fazoŝanĝa materialo. Se ĉi tio realus, la avantaĝo estus, ke oni ne bezonas aldoni tiom da maso, kiom ĉe betono: la malpeza konstruaĵo restus relative malpeza. Krome, se per fazoŝanĝa materialo oni sukcesas moderigi la enan temperaturon en someroj sen malhejtado per instalaĵoj, oni sukcesas eviti pluan eluzon de nedaŭraj resursoj de la Tero (petrolo k.s.)!

Aneksa

Ĉi tie la modelo, uzita en la paragrafo 5, estas en pliaj detaloj matematike priskribata. La figuro 12 prezentas la modelon grafike.

La varmobalanco de la nodo por de la aktuala ena temperaturo T_i :

$$0 = \Phi_{s1} - K_{i2} \cdot (T_i - T_{p2}) - K_{i3} \cdot (T_i - T_{p3}) - K_v \cdot (T_i - T_e) - K_{i1} \cdot (T_i - T_{p1}).$$

La varmobalanco de la nodo por de la aktuala temperaturo en la tavolo p1, T_{p1} :

$$0 = K_{i1} \cdot (T_i - T_{p1}) - \Phi_{p1}.$$

La varmobalanco pri la aktuala temperaturo en la tavolo p2, T_{p2} :

$$0 = \Phi_{s2} + K_{i2} \cdot (T_i - T_{p2}) - K_{we2} \cdot (T_{p2} - T_e) - \Phi_{p2}.$$

La varmobalanco pri la aktuala temperaturo en la tavolo p3, T_{p3} :

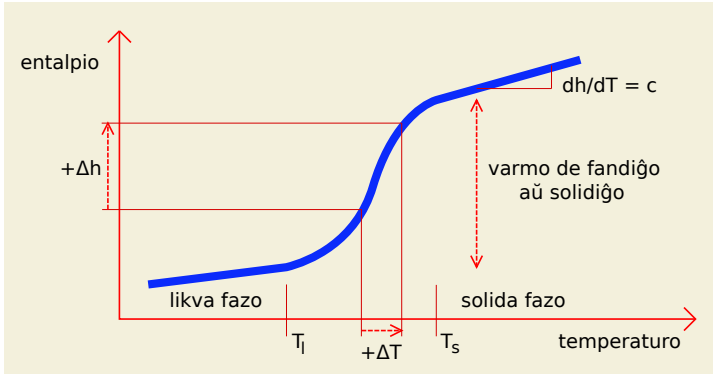
$$0 = K_{i3} \cdot (T_i - T_{p3}) - K_{we3} \cdot (T_{p3} - T_e) - \Phi_{p3}.$$

La sistemo de la supraj kvar ekvacioj estas solvata je ĉiu sinsekva horo de la simulaĵo per la subprogramo «fsolve» de GNU Octave 3.0.5 (www.octave.org). La varmospezo pro la stokiĝo de varmo en tavolo j estas kalkulata per la diferenco de la entalpio inter la aktuala temperaturo T_j de la tavolo kaj la temperaturo de la pasinta momento, $T_{j;t-\Delta t}$, laŭ:

$$\Phi_j = m_j \cdot \frac{\Delta h(T_{j;t-\Delta t}, T_j)}{\Delta t},$$

kie $\Delta h(T_{j;t-\Delta t}, T_j)$ en J/kg estas determinata helpe de interpolado en tia grafikaĵo, kia estas prezentata en la figuro 14, kaj Δt estas la tempintervalo de la simulaĵo (unu horo). Pri la fono de la metodo vidu ekzemple ĉe Koschenz kaj Lehmann (2004) kaj Heim (2005).

La totala maso en la tavolo j egalas al $m_j = \rho_j \cdot d_j \cdot A_j$ kg. Por ĉiu tavolo la diko d_j (en m) kaj la tipo de materialo estas donataj en la paragrafo 5. La proprecoj



Figuro 14: La rilato inter la diferenco de la entalpio Δh kaj la ŝanĝiĝo de la temperaturo ΔT en masunuo de materialo. La diferencalado de la rilato rezultas al la varmokapacito (komparu kun la figuro 3).

de la materialoj estas prezentataj en la tabelo 1 kaj la figuro 9. La denso de Thermusol estas proksimume 1400 kg/m^3 . La areoj A_j estas malsupre donataj. La variado de la varmospezoj Φ_{s1} kaj Φ_{s2} estas prezentata en la figuro 10. La varmokonduktancoj (en W/K):

$$K_{i1} = \frac{A_1}{R_i},$$

$$K_{i2} = \frac{A_2}{R_i},$$

$$K_{i3} = \frac{A_3}{R_i},$$

$$K_{we2} = \frac{1}{\frac{1}{K_{w2}} + \frac{1}{K_{e2}}} = \frac{A_2}{R_w + R_e},$$

$$K_{we3} = \frac{1}{\frac{1}{K_{w3}} + \frac{1}{K_{e3}}} = \frac{A_3}{R_w + R_e},$$

La varmokonduktanco pro ventolado, depende de la ventola indekso n (figuro 11):

$$K_v = \frac{n \cdot V \cdot \rho \cdot c}{3600}.$$

La varmorezistancoj de la varmotransiĝo inter aero kaj surfaco:

$$R_i = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W},$$

$$R_e = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}.$$

La varmorezistanco de la izola tavolo kun la diko d kaj la varmokondukteco λ :

$$R_w = d/\lambda = 0,1/0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}.$$

La ceteraj grandoj:

$$c = 1000 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \text{ (laŭmasa varmokapacito de aero),}$$

$$\rho = 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ (denso de aero),}$$

$$V = 3 \cdot 6 \cdot 3 \text{ m}^3 \text{ (volumeno de la ĉambro),}$$

$$A_1 = 5 \cdot 3 \text{ m}^2 \text{ (areo de libere penda tavolo p1),}$$

$$A_2 = 6 \cdot 3 \text{ m}^2 \text{ (areo de tavolo p2; planko),}$$

$$A_3 = 6 \cdot 3 + 3 \cdot (2 \cdot 6 + 2 \cdot 3) \text{ m}^2 \text{ (areo de tavolo p3; plafono + vandoj),}$$

Literaturo

J.A. Clarke (2001). *Energy simulation in building design - 2nd edition*. Oxford (UK): Butterworth-Heinemann.

M. de Wit (2008). *HAMBASE - Heat air and moisture model for building and systems evaluation*. Eldonaĵo numero 100 de la serio *Bouwstenen*, eldonata de la fakultato pri arĥitekturo kaj konstruado de la TUE. Eindhoven (NL): Eindhoven University Press.

C.-E. Hagentoft (2001). *Introduction to building physics*. Lund (SE): Studentlitteratur.

D. Heim (2005). *Two solution methods of heat transfer with phase change within whole building dynamic simulation*. En: *Proceedings of the ninth international IBPSA conference - Building simulation 2005 - August 15–18, 2005, Montréal, Canada*, p. 379–402.

ISSO (2004). *Thermische behaaglijkheid - eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen*. Publikaĵo numero 74. Rotterdam (NL): ISSO.

P. Klemm k.a. (2007). *Budownictwo ogólne - tom 2 - fizyka budowl*. Varsovio (PL): Arkady.

M. Koschenz kaj B. Lehmann (2004). *Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings*. En: *Energy and buildings*, vol. 36, p. 567–578.

H. Mehling kaj L.F. Cabeza (2008). *Heat and cold storage with PCM - An up to date introduction into basics and applications*. Berlin (DE): Springer.

NEN-EN-ISO 6946:2008. *Componenten en elementen van gebouwen - Warmte-weerstand en warmtedoorgangscoefficiënt - Berekeningsmethode : Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method*. Unulingva: en. Delft (NL): NEN.

M. F. Schmidt (2007). *Temperaturmanagement - in seiner leichtesten Form*. Ludwigshafen: BASF. Prelega projekciaĵo publikigata je www.micronal.de, je versio «02/2007». Dosiero konsultita je julio 2010.

A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen kaj D. Buddhi (2009). *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*. En: *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 13, p. 318–345.

A.C. van der Linden, A.C. Boerstra, A.K. Raue, S.R. Kurvers kaj R.J. De Dear (2006). *Adaptive temperature limits - A new guideline in The Netherlands - A new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate*. En: *Energy and buildings*, vol. 38, p. 8–17.

F. van Mook (2009). *Terminoj pri varmotransiĝo el ISO 7345*. En: *Jarkolekto de TAKE 2009*, p. 51–78. Wintzenheim (FR): TAKE.

Pri la aŭtoro

Fabien van Mook (1971) finstudis en la fako de konstrufiziko en 1996 en la Tehnologia Universitato de Eindhoven (NL). De 1996 ĝis 2003 en la sama universitato li esploris la kvantigon de pluvo sur fasadoj per mezurado kaj komputila simulado. Ekde 2004 li laboras en konsila inĝeniera buroo pri konstrufiziko, kie li precipe traktas ventoladon kaj fajron en garaĝoj en loĝdomoj, venton ĉirkaŭ konstruaĵoj kaj someran trovarmiĝon de loĝejoj. Escepta jaro estas 2010, dum kiu li laboras pri nur unu projekto, nome esplorprojekto pri fazoŝanĝaj materialoj ĉe la Altlernejo de Roterdamo. Fabien esperantistiĝis en 1992. Ekde 1994 li aktivas en TAKE kaj pri konstruista terminologio.