



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

ANDRÁSI ALEX GYULA

**FÁZISVÁLTÓ ANYAGOK ALKALMAZÁSA
ÉPÜLETSZERKEZETEK BEN**

PASSZÍV ENERGIAGYŰJTŐ ÁRNYÉKOLÓ SZERKEZET

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

BME ÉPK

2018

KONZULENS:
DR. BECKER GÁBOR
TÁRSKONZULENS:
SZIKRA CSABA

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	- 1 -
1. Bevezetés.....	- 3 -
2. Célkitűzés	- 5 -
3. Passzív szoláris rendszerek.....	- 5 -
3.1. Általánosan.....	- 5 -
3.2. A hőtároló tömeg	- 6 -
3.3. Energiagyűjtő falak.....	- 8 -
3.4. Előnyök és hátrányok.....	- 10 -
4. Fázisváltó anyagok	- 10 -
4.1. A PCM-ek bemutatása	- 10 -
4.2. Felhasználásuk.....	- 12 -
4.3. Anyag típusok	- 12 -
4.4. Fázisváltás és a hőtároló tömeg	- 16 -
4.5. Fázisváltó anyagok épületszerkezetekben	- 17 -
4.5.1. Trombe/tömeg falként való felhasználás	- 17 -
4.5.2. PCM-et alkalmazó szerkezetek	- 18 -
4.5.2.1. Lasselsberger-Knauf – Thermo°Comfort hőmérséklet-szabályzó vakolat.....	- 18 -
4.5.2.2. Rigips – Alba®Balance gipszkarton	- 20 -
4.5.2.3. Glass X AG – Glass X.....	- 20 -
5. Nemzetközi kutatások – épületszerkezetekbe integrált PCM	- 22 -
5.1. PCM árnyékoló szerkezet - összehasonlító elemzés és mérés (Portugália).....	- 24 -
5.2. Belső oldali PCM árnyékoló (Németország)	- 26 -
5.3. Függönybe integrált PCM	- 27 -
6. Árnyékoló szerkezetbe integrált PCM – konstrukciós javaslat	- 27 -
6.1. Az újabb konstrukció célja	- 27 -
6.2. PCM árnyékoló.....	- 28 -
6.3. Szerkezeti kialakítás.....	- 30 -
6.4. A teljes szerkezet	- 32 -
6.5. Működés a fűtési időszakban.....	- 32 -
6.6. Működés a hűtési időszakban.....	- 34 -
6.7. Átmeneti időszakok	- 35 -
7. Összehasonlítás: Belső oldali PCM árnyékoló – Külső oldali normál árnyékoló	- 36 -

8. Számítás.....	- 37 -
8.1. A számítások célja	- 37 -
8.2. A PCM mennyisége	- 37 -
8.3. Számítás a fűtési időszakra	- 38 -
8.4. Számítás a hűtési időszakra	- 42 -
8.5. Optimális küszöbhőmérséklet	- 44 -
9. Tervezett és javasolt további kutatási feladatok.....	- 44 -
10. Összegzés	- 45 -
11. Köszönetnyilvánítás.....	- 47 -
12. Irodalomjegyzék	- 48 -

1. Bevezetés

Napjaink legfontosabb kérdései a fenntarthatóság és az energiatakarékosság. Földünk erőforrásainak eddigi féktelen kihasználása súlyos problémákhoz vezetett. A források végeességét felismerve kérdéssé vált az általános életszínvonal fenntarthatósága, új megoldásokra van szükségünk, ha élhető körülményeket szeretnénk biztosítani a jövő nemzedék számára. A legtöbb környezetszennyező tevékenységnek és a természeti kincsek kizsákmányolásának oka a korlátozás nélküli túlfogyasztás. A mértéktelen fogyasztói igények kielégítése érdekében az energia és erőforrás felhasználás fenntarthatatlan méreteket öltött. Erre a problémára a megoldás a fogyasztói magatartás megváltoztatásában, illetve élettereink, eszközeink energetikai korszerűsítésében rejlik.

Az energiapazarlás a fejlett és fejlődő világ szinte minden területén tetten érhető, ennek csökkentése a legfontosabb feladatunk. Az egyik legnagyobb felhasználó ágazat, az épületüzemeltetés energiaigényét csökkentve nagy jelentőségű változásokat érhetünk el. Az épületállomány energetikai korszerűsítésének fontossága magától értetődő. A lakóépületek üzemeltetésére fordítjuk a felhasznált energia jelentős részét, így az üzemeltetési költségek csökkentése nem csak globális érdek, hanem a lakástulajdonosok közvetlen anyagi érdeke is. Tehát a fogyasztók ingatlanaik energetikai felújításával hozzájárulhatnak a globális folyamatok kedvező irányba fordításához, miközben saját érdekeiket is szolgálják.

A jelenlegi energetikai ismereteink alapján kialakított, a közel nulla energiafelhasználású épületek létesítését megcélzó, hatékony energetikai rendszerkészlet olyan megoldásokat tartalmaz, melyek az építészeti koncepcióval szoros összefüggésben állnak. Ez a rendszerelvű tervezés, mely azt jelenti, hogy az épületek tervezése során alapvető rendező elvként kell figyelembe venni az energetikai szempontokat is. Összehangolt építészeti, gépészeti és épületvillamossági programot kell felállítani. Csak az ilyen tervezés eredményezhet energiafelhasználás szempontjából kiemelkedően magas hatékonyságú épületeket.

Ha az energetikai hatékonyság kérdését csak veszteség oldalról, vagy csak nyereség oldalról közelítjük, könnyen csapdába eshetünk, néhány megoldás esetében az abszolút energiafelhasználás nagyobb lesz, mint a megtakarított energia. Az épületek energetikai kérdéseivel foglalkozó tudományos és műszaki szakágak egységes véleménye, hogy csak a rendszerelvű, holisztikus szemléletű tervezés vezet igazán eredményes épületek konstruálásához. Ennek során maximális

termikus nyereséget és minimális veszteséget szeretnénk elérni az épületen, és mindezt úgy, hogy az egyensúly minél kevesebb energia befektetésével alakulhasson ki.

Az új építésű épületeknél kötelességünk a fent említett módon tervezni, a meglévő hatalmas épületállomány felújítása esetében azonban ez nem, vagy csak korlátozottan lehetséges. A jövő épületei tehát lehetnek akár nulla energiaigényűek, de a meglévő épületek korszerűsítése, energiaigényük csökkentése a legsürgősebben megoldandó feladat. Ezeket az épületeket modern energetikai rendszerekkel kell ellátnunk.

Természetesen a már régóta rendelkezésre álló technológiák segítségével a felújítás, az energetikai állapot rendezésének kategóriájában nagy gyakorlattal rendelkezik az építőipar. Ezek főként az energetikai veszteségek csökkentésére irányuló módszerek (pl.: homlokzati hőszigetelő rendszerek, nyílászárók korszerűsítése stb.), illetve a nyereségek felhasználására főként aktív, épületgépészeti eszközök segítségével (szolár kollektorok, napelemek stb.). Az eddigi tapasztalatok alapján passzív energiagyűjtő szerkezeteket nem nagyon alkalmaznak épületek energetikai korszerűsítésének alkalmával, feltehetően az ilyen szerkezetek konstrukciós problémái miatt. Tehát a felújítások során sokszor kiesik egy alkotó, amely nagyban hozzájárulhatna a kedvezőbb energiamérleg kialakulásához.

Ezzel párhuzamosan az eddigi gyakorlat igen éles határvonalat húz a túlzott veszteségek kezelése, és a túlzott nyereségek kezelése között. Külön technológiák alakultak ki a fűtési és hűtési időszakokban a megfelelő komfortfokozat elérésére. A modern felfogás szerint a megfelelő építészeti koncepciót és a modern technológiákat ötvözve a két problémás időszak integráltan kezelhető. Az integrált működést jól példázzák a hagyományos, történelmi építési módok nehéz szerkezetei. Az ilyen szerkezetek energetikai viselkedésének megértésével és továbbfejlesztésével újabb hatékony, modern rendszereket alkothatunk.

A passzív szoláris energiagyűjtő szerkezetek lehetőséget kínálnak az integrált működés megteremtésére. Ezek kiváló hatékonyságúak is lehetnek, a korszerűsítési eljárások során mégsem elterjedt az alkalmazásuk.

2. Célkitűzés

A modern energetikai koncepciók az újonnan létesülő épület egészére kínálnak integrált megoldást a veszteségek és a nyereségek kiegyensúlyozására, mindezt aktív és passzív rendszerek összehangolt alkalmazásával. Az épületek energetikai korszerűsítése során azonban az adottságok és a szűkös lehetőségek miatt igen nehézkes a teljes rendszerkészlet felhasználása. Főként a passzív energiagyűjtő szerkezetekre igaz ez, hiszen azok létesítése nem csak az épület koncepcióját, hanem annak szerkezetét is befolyásolhatja, bekerülési költségük meghaladja az általános feltételeket.

A fázisváltó anyagok kedvező tulajdonságait kihasználva az említett akadályok elhárulhatnak, és passzív energiagyűjtő szerkezetek gazdagíthatják az energetikai korszerűsítési koncepciókat, hozzájárulhatnak az energiafelhasználás csökkentéséhez. Az ilyen anyagok lehetőséget teremtenek eddig nem alkalmazott, könnyű, könnyen elérhető passzív szoláris rendszerek kialakítására.

A dolgozat tárgya a fázisváltó anyagok épületszerkezeti felhasználásának bemutatása, és a szoláris energiagyűjtő szerkezetekben való alkalmazási lehetőségek feltárása. Javaslatot kívánunk tenni egy ilyen anyagot alkalmazó kis léptékű, mobil, egyszerűen kezelhető szoláris energiagyűjtő szerkezet kialakítására. Mindezt annak érdekében, hogy épületeinket energiafelhasználásuk csökkentése tervezésekor könnyen elérhető, hatékony rendszerrel láthassuk el.

3. Passzív szoláris rendszerek

3.1. Általánosan

A szoláris épületszerkezeti rendszerek olyan szerkezeti megoldások, melyek a Nap épületet érő sugarainak energiatartalmát hasznosítják az épületen belüli termikus komfort megteremtése, vagy elősegítése céljából. Ezek ma általában kiegészítő rendszerként használatosak, de kedvező esetben az épület teljes termikus energiaigényét képesek ellátni. A szoláris rendszerek közül passzív rendszernek nevezünk azokat, melyekben a napsugárzásból érkező energia elnyelése, tárolása és leadása is az épület elemein keresztül megy végbe. Ebben az esetben a folyamatok spontán zajlanak le, szabályozásuk nem, vagy csak kis mértékben lehetséges. Ez azonban a rendszerek sajátosságaiból fakadóan nem jelent nagy hátrányt az alkalmazásuk során. A passzív elnevezés onnan ered, hogy a termikus folyamatok lezajlásának elősegítéséhez nincs szükség külső energia

bevezetésre. Ezek a rendszerek ma alkalmazott formájukban főként a szoláris nyereség maximalizálását célozzák. Már alacsony sugárzási nyereségek esetén is képesek csökkenteni az épület fűtési energiafogyasztását, rásegítő hatásuk kisebb külső-belső hőmérséklet különbségeknél is számottevő. Ezzel szemben az aktív rendszerekből csak akkor nyerhető fűtőteljesítmény, ha hőtároló közegük hőmérséklete elér egy bizonyos küszöbértéket.^[1]

3.2. A hőtároló tömeg

A legősibb szoláris rendszerként említhetők a hagyományos építés nagy fajlagos tömeggel rendelkező nehéz szerkezetei. Az ilyen épületszerkezetek integráltan szolgálták tartószerkezeti, térelhatároló, akusztikai és energetikai célokat. Ezek a tulajdonságok az alkalmazott anyagok tömegének és szilárdságának köszönhetőek. Ezek a szerkezetek szoláris rendszerként főként a nyári időszakban értelmezhetők, hiszen kiemelkedő hő-csillapítási jelentőségük a beérkező sugárzási energia elnyelésében gyökerezik. Ha például vastag és tömör vert vályogra vagy téglafalra gondolunk, ismeretes, hogy ezek milyen kedvezően viselkedtek nyáron, illetve a korabeli komfortkövetelményeknek megfelelően télen. Az ilyen szerkezetekből készült épületekben a fűtést a téli időszakban elegendő volt a nappali időszakban működtetni, a szerkezet felmelegítésével az később órákon át adta le a benne akkumulálódott hőt. Ez a késleltető hatás a passzív szerkezetek jellemzője. A nyári időszakban, a nappali órákban a belső hőmérséklet kellemesen hűvös, az esti órákban kellemesen temperált tudott maradni. Mindez a nagy tömegnek és a szilikát anyagokra jellemző hővezetési tulajdonságoknak köszönhető.

Az anyagok jellemzője a fajhő, mely azt mutatja meg, hogy mennyi energia szükséges 1 kilogramm anyag hőmérsékletének 1 Kelvinnel történő megváltoztatásához. Ha állandó hőmérsékletű, homogén szerkezetet veszünk alapul, akkor annak hőtároló képessége a tömegének és az azt alkotó anyag fajhőjének a szorzataként határozható meg. Az épületszerkezetek hőtároló képessége a rétegfelépítéstől és a szerkezet ellentétes oldalain fellépő hőmérséklet különbségtől is függ.^[2]

Ha például egy homogén falszerkezetet képzeletben elemi vastagságú rétegekre bontunk, akkor a hőtárolás szemléletesen leírható. A fal magasabb hőmérsékletű oldalán a hő az alacsonyabb hőmérsékletű oldal irányába kezd áramlani. Ekkor azonban az elemi vastagságú részeket, mint külön-külön kis ellenállásokat le kell győznie. Ez azt jelenti, hogy minden elemi réteg elnyeli a

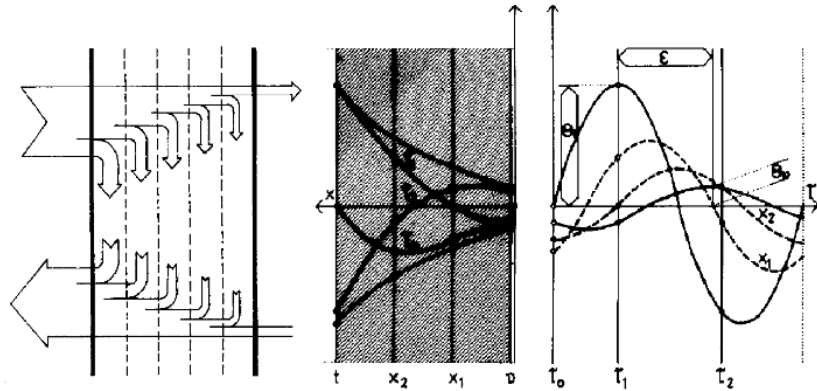
betáplált hő egy részét, tehát a hő mennyisége a szerkezet belseje felé haladva egyre csökken, a hatás egyre gyengül. Ha a folyamat időben állandósult, akkor a szerkezet két oldalán idővel kialakul az egyensúly. Ha azonban a folyamat nem állandósult, a hő egy kisebb részének átjutása után a támadott oldal hőmérséklete lecsökken, azaz a hőáram megfordul. Ekkor az elemi vastagságú rétegek ellenállásán újra át kell jutnia a bizonyos vastagságig eljutott hőmennyiségnek. Mindez időben igen el tud húzódní a tömeg és a fajhő függvényében. Ennek a folyamatnak a napi periodikus változása esetén a szerkezetnek csak egy bizonyos vastagságú rétege tud részt venni a hőtárolásban. A hőtároló képesség növelése az anyag fajhőjének és tömegének növelésével érhető el. Minél nagyobbak ezek, annál több energia képes akkumulálódni a szerkezetben, és annál nagyobb késleltető hatást érhetünk el. [2]

Minden épületben jelen van a szerkezetek tömegének hőtároló képessége. Ennek mértéke a szerkezet anyagi minőségének és mennyiségének függvénye. Ha szeretnénk kihasználni, ügyelnünk kell arra, hogy minél kevésbe szigeteljük el a belső tér nehéz szerkezeteit a belső léghőmérséklettől. Adott szerkezetre nézve a fajlagos hőtároló tömeg megállapításakor a következő értékek közül a legkisebbel számolhatunk:

- a legnagyobb figyelembe vehető vastagság, mely a belső felülettől mérve 10 cm,
- vagy a belső felület és az első hőszigetelő réteg,
- vagy a belső felület és az épületszerkezet középvonalának távolsága.

Az állandó tartózkodásra szolgáló épületek esetében előnyös a hőtároló tömeg lassú reakciója a hőmérsékletváltozásokra, ideiglenes használat esetén azonban a felfűtés időtartamát és energiaigényét növeli a nagy tömegű szerkezet.

A nagy tömegű külső határoló szerkezetek jellemzője a csillapító hatás. Ez szintén a tömeg és a fajhő függvénye. Lényege, hogy a változó külső hőmérséklet egy középérték körül bizonyos amplitúdóval kileng. Ennek hatására a belső oldalon is tapasztalható a napi periódus során egy bizonyos kilengés a belső oldali középértéktől, de ennek amplitúdója sokkal kisebb lesz, mint a külső kilengésé, hiszen a nagy tömeg miatt a külső hőmennyiségnek csak kis része jut át a szerkezeten. A külső oldalon mért és a belső oldalon mért amplitúdók hányadosát nevezzük csillapítási tényezőnek. [2]



1. ábra: Homogén falszerkezet hőtároló viselkedésének ábrázolása^[3]

A passzív szoláris rendszerek alapvető eleme a nehéz szilikát szerkezet, amelyben a gyűjtött energia akumulálható. A legegyszerűbb ilyen szerkezetek az úgynevezett tömegfalak, amelyek a belső térben célzottan nehéz anyagokból létesített falak, ezek a direkt sugárzási nyereségek elnyelését szolgálják.

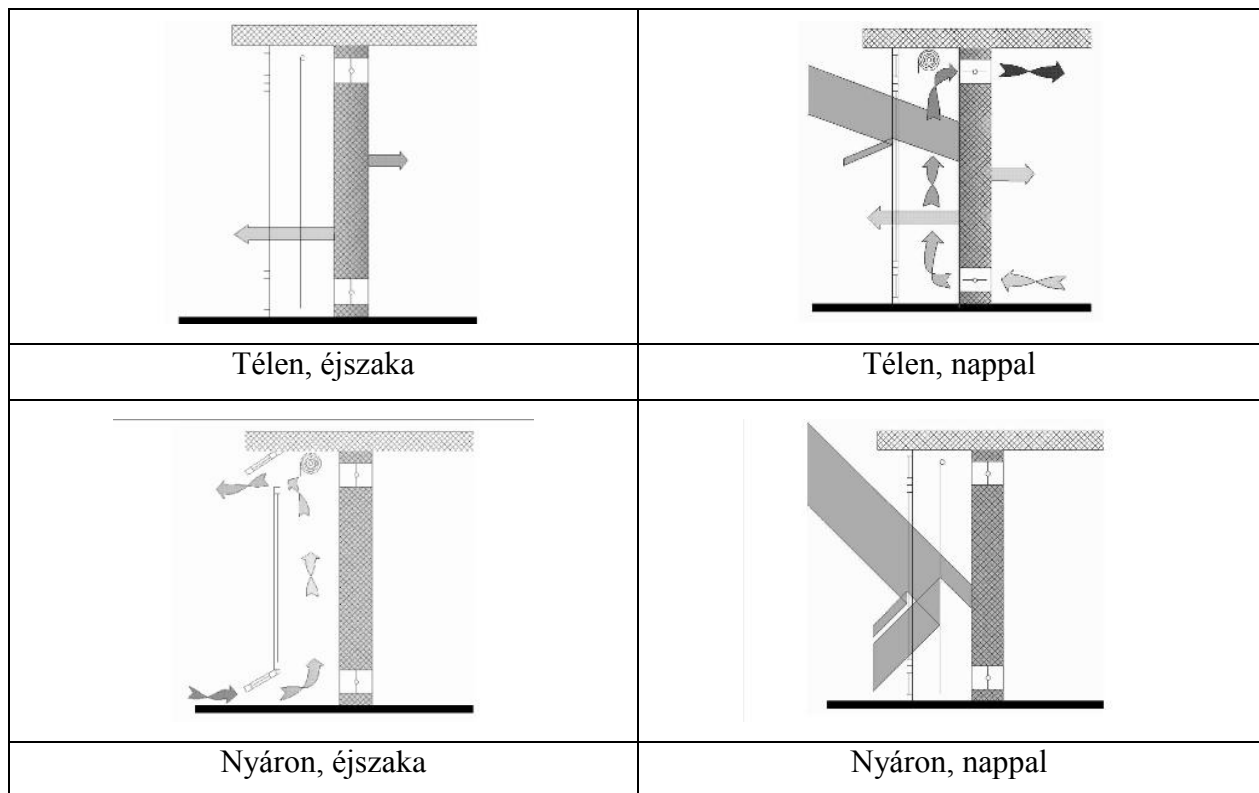
3.3. Energiagyűjtő falak

Olyan passzív, indirekt rendszerek, melyek célja a sugárzási nyereségek maximalizálása, a nyert hő tárolása, majd annak megfelelően késleltetett leadása. Ennek érdekében használják ki az ilyen rendszerek az üvegházhatás jelenségét, illetve a nagy tömeggel rendelkező anyagok hőtároló kapacitását. A nehéz, általában szilikát szerkezetek elé helyezett üvegréteg a beeső napsugárzás legnagyobb részét áttereszti hőtároló tömeg irányába. Az opaque szerkezet a sugárzás nagy részét elnyeli, de bizonyos hányadát visszaveri az üveg felé. Az üveg átbecsátási tényezője a hosszú hullámokon alacsonyabb, mint az egész spektrumon. Az üvegen átjutó teljes sugárzás felmelegíti az üveg mögötti tér elemeit, így a sugárzás jelentős része hosszú hullámokká (hővé) alakul, erre viszont az üveg átbecsátó képessége kisebb, emiatt megreked az üveg mögött a meleg, a hosszú hullámú sugárzás. Az üvegházhatás a Nap sugarait csapdába ejtve fokozza a hőtároló tömegré jutó nyereséget, mely abban akumulálódik. A nyereséget később a lehűlő közeg hatására a szerkezet leadja a belső tér irányába, így a szerkezet hozzájárul az épület veszteségeinek ellensúlyozásához. Az energiagyűjtő falak különböző konstrukcióit alkalmazzák, azonban minden típus esetében

fontos az árnyékolás biztosítása az esetleges nyári túlmelegedés, illetve a téli kisugárzás elkerülése, korlátozása érdekében. [1]

Fokozható a rendszer hatékonysága annak átszellőztetésével, szabályozó lamellák beépítésével. Ekkor a légrétegben felmelegedő levegőt a belső térbe vezetve, direkt nyereséget is elkönyvelhetünk a nappali órákban amellet, hogy a hőtároló tömeg energiát halmoz fel az esti, éjszakai órákra. Ebben az esetben Trombe-falról beszélünk. Az állítható, nyitható és zárható lamellák lehetővé teszik a szabályozást. Mivel a szerkezet passzív működésű, ez csak részleges kontrollálhatóságot jelent, de mindenképpen fokozza a hatékonyságot.

Az energiagyűjtő falak főként nyereségorientáltak, azaz a fűtési időszakban hasznosak. Megfelelő átszellőztető rendszer esetén azonban a nyári időszakban is előnyösek lehetnek, hiszen a tömeg késleltető hatása kihasználható a túlzott nyereséggel szemben is. Mindössze a befelé irányuló szellőztetés lezárását és az üvegszerkezet nyithatóságát, kiszellőztethetőségét kell lehetővé tenni. Külső oldali árnyékoló segítségével az üvegszerkezetre jutó nyereség túlnyomó része távol tartható, a túlzott felmelegedés elkerülhető.



2. ábra: A Trombe-fal használata, működése [4]

3.4. Előnyök és hátrányok

Az említett passzív szoláris rendszerek tervezésekor alapvető kritérium, hogy azok nem okozhatnak nyári időszakban túlmelegedést, és alkalmazásuk nem vezethet az épület veszteségeinek növekedéséhez. Az árnyékolásukat segédszerkezettel megoldva a túlmelegedés elkerülhető, azonban a rétegfelépítésből fakadó nem ideális hőátbocsátási tényező már sokkal nehezebben kezelhető. A teljes épület energetikai mérlegének felállításával lehet kiszámítani a passzív rendszerek hatékony mennyiségét. Az épület adottságaitól függ az a mennyiségi korlát, amely esetén még több nyereséget termel a szoláris rendszer, mint amennyit a hőátbocsátás során veszít.

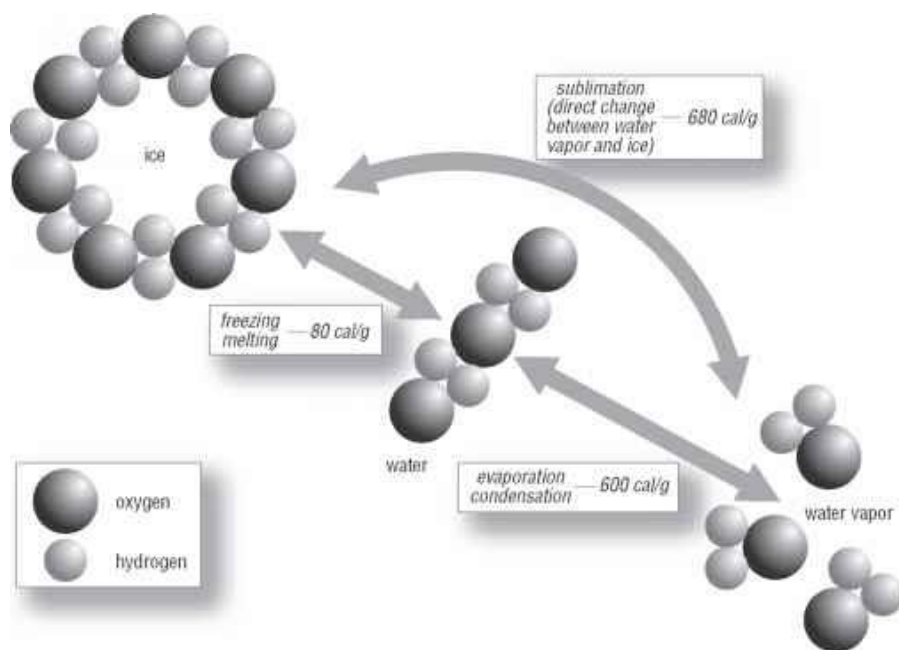
Az ilyen rendszerek kiemelt energetikai hatékonysága, ökológiai értékei és gazdasági teljesítménye figyelemre méltók. Széleskörű alkalmazásuk akadálya az, hogy szerkezetük és működésük miatt az épület alapvető koncepciójának meghatározó elemei. Tehát egy épületbe passzív szoláris rendszert utólag telepíteni nem, vagy csak aránytalanul nagy beruházás és átalakítás árán lehet.

4. Fázisváltó anyagok

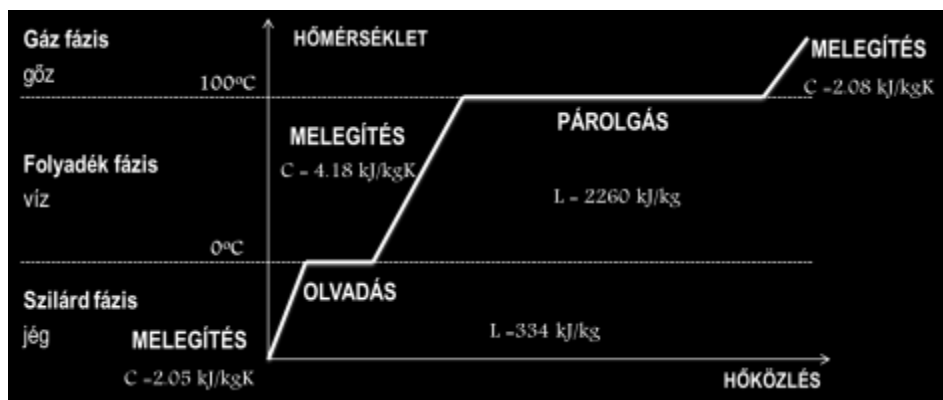
4.1. A PCM-ek bemutatása

Minden ismert anyag jellemző fizikai tulajdonságaként meghatározhatók azok a küszöbhőmérsékletek, amelyek az adott anyag halmazállapot-változásaihoz tartoznak, ezek az olvadási és párolgási hőmérsékletek. Értékeik könnyen meghatározhatók olyan diagramok segítségével, melyek a közölt hő mennyiségének függvényében ábrázolják az anyag pillanatnyi hőmérsékletét. Ezek a diagramok rámutatnak az adott fázisú anyag hőmérséklete és belső energiaállapota közötti majdnem lineáris kapcsolatra. A függvényben azonban olyan, a hőmérséklet konstans értékét mutató szakaszok is jelentkeznek, amelyek nem lineáris viselkedést tükröznek. Ekkor a közölt hő hatására a hőmérséklet nem emelkedik. A konstans szakaszokra az a magyarázat, hogy az ekkor betáplált, vagy elvont energia az anyag részecskéi között fennálló kapcsolat megváltoztatására, kötések felbontására vagy létesítésére fordítódik. Tehát a függvényben jelentkező platók a halmazállapot-változásokhoz tartozó hőmérsékleti értékeken alakulnak ki. A függvény konstans tartományai jelentős mennyiségű nem érzékelhető energia

jelenlétét mutatják meg a fázis megváltozása során. Ezt az energia mennyiséget látens hőnek nevezzük. [5] [6]



3. ábra: A víz molekuláris kapcsolatrendszerének megváltozása a halmazállapottól függően [7]



4. ábra: A víz hőmérséklet-hőközlés diagramja [6]

Fázisváltó anyagoknak nevezzük az anyagok egy olyan csoportját, melyek esetében a fázis, azaz a halmazállapot váltáshoz tartozó hőmérsékletek speciálisan, az igények szerint beállíthatók. Ez a megfelelő vegyi összetételnek köszönhető. Elterjedt megnevezése ennek a csoportnak az angol Phase Change Material kifejezésből származó PCM mozaikszó. Alkalmazásuk lényege a

fázisváltáshoz tartozó látens hő kihasználásának lehetősége. E tulajdonságuk miatt az energiatárolásban jelentős szerepük lehet a fázisváltó anyagoknak.

Ha a cél az energia tárolása, de az hőmérsékletváltozás mellett is történhet, akkor célszerű a nagy fajhőjű anyagok lineáris viselkedésének kihasználása. Például a víz folyékony állapotban 100 °C hőmérsékletváltozás mellett 420 kJ/kg energia tárolására is képes, ami egy fázison belül óriási teljesítmény. Ha azonban a hőmérséklet ilyen nagyarányú növekedése nem engedhető meg, vagy nem lehetséges, a leghatékonyabban a PCM-ek látens hőjét használhatjuk az energia tárolására. Például 40 °C és 60 °C között a víz 83,5 kJ/kg, míg a fázisváltó anyagként működő paraffin egyik típusa 48°C-os halmazállapot-változása során 234 kJ/kg energiát képes elnyelni. ^{[5][6][9]}

4.2. Felhasználásuk

A látens hő kihasználása kis anyagmennyiség mellett is viszonylag nagy hatékonyságú energiatárolást tesz lehetővé. A PCM-ek emiatt a mindennapi használatban számtalan helyen előfordulnak. Kutatásuk az 1940-1950-es években vált komolyabbá. Az Egyesült Államokban, az '50-es években kezdett a NASA olyan passzív hővédő ruházatok kifejlesztésébe, amelyek már fázisváltó anyagot tartalmaztak. A későbbiekben az általános használatban is megjelentek ezek az anyagok hűtő akkuk, hővédő- és sportruházatok, gyógyászati kellékek, mechanikai berendezések hűtőrendszereinek stb. alkotóelemeként. A lehetséges alkalmazási területek száma szinte határtalan, hiszen a kedvező izoterm teljesítmény mindenhol fontos, ahol valamilyen hőcserefolyamat zajlik és azt befolyásolni is szeretnénk. Épületszerkezeti felhasználásukat elsőként a magyar származású fizikus hölgy, Telkes Mária már 1945-ben megkísérelte. Elvei, ötletei máig kutatások témájául szolgálnak. ^{[8][11][13]}

4.3. Anyag típusok

A fázisváltó anyagok közös jellemzője, hogy könnyen elérhetővé teszik a bennük tárolt nagy mennyiségű látens hőenergiát. Lehetnek szerves és szervetlen vegyületek. PCM előállítható növényi olajokból, állati zsírokból, paraffinokból, sóhidrátokból, gázhidrátokból, cukoralkoholokból vagy sókból. Magasabb kívánt olvadáshő esetén fémeket is használnak. Minden fázisváltó anyagfajta rendelkezik előnyökkel és hátrányokkal egyaránt, a különböző

anyagtipusokat az adott szituáció követelményrendszerének megfelelően alkalmazzák. Néhány szobahőmérséklet közeli olvadási hőmérsékletű PCM tulajdonságait az alábbi táblázat mutatja be.

PCMs	Type	Melting Temperature (°C)	Heat of fusion (kJ / kg)	Specific Heat (kJ / kg · K)	Thermal Conductivity (W / m · K)
Paraffin C ₁₅ -C ₁₈	Organic	20-22	152	----	----
Paraffin C ₁₃ -C ₂₄	Organic	22-24	189	2.1	0.21
Paraffin C ₁₈	Organic	28	244	2.16	0.15
Butyl stearate	Organic	19	140	----	----
1-Dodecanol	Organic	26	200	----	----
n-Octadecane	Organic	28	200	----	----
Vinyl stearate	Organic	27-29	122	----	----
Dimethyl sabacate	Organic	21	120-135	----	----
Polyglycol E600	Organic	22	127.2	----	0.1897 (l)
45/55 capric + lauric acid eutectic	Organic	21	143	----	----
Propyl palmitate	Organic	19	186	----	----
Octadecyl					
3-mercaptopropylate	Organic	21	143	----	----
<i>KF</i> · 4H ₂ O	Hydrate salts	18.5	231	1.84 (s) 2.39 (l)	----
<i>Mn(NO₃)</i> · 6H ₂ O	Hydrate salts	25.8	125.9	----	----
<i>CaCl₂</i> · 6H ₂ O	Hydrate salts	29.7	171	1.45 (s)	----
<i>CaCl₂</i> · 6H ₂ O + <i>Nucleat</i> + <i>MgCl₂</i> · 6H ₂ O(2:1)	Inorganic eutectics	25	127	----	----
48% <i>CaCl₂</i> + 4.3% <i>NaCl</i> 0.4% <i>KCl</i> + 47.3% <i>H₂O</i>	Inorganic eutectics	26.8	188	----	----

1. táblázat: Néhány konkrét PCM típus termodinamikai jellemzői [9]

Property or Characteristic	Paraffin Wax	Non-Paraffin Organics	Hydrated Salts	Metallics
Heat of Fusion	High	High	High	Med.
Thermal Conductivity	Very Low	Low	High	Very High
Melt Temperature (°C)	-20 - 100+	5 - 120+	0 - 100+	150 - 800+
Latent Heat (kJ/kg)	200 - 280	90 - 250	60 - 300	25 - 100
Corrosive	Non-Corrosive	Mildly Corrosive	Corrosive	Varies
Economics	\$\$	\$\$\$ to \$\$\$\$	\$	\$\$ to \$\$\$
Thermal Cycling	Stable	Elevated Temperature Can Cause Decomposition	Unstable over Repeated Cycles	Stable
Weight	Medium	Medium	Light	Heavy

2. táblázat: Különböző fázisváltó anyagcsoportok általános tulajdonságai ^[10]

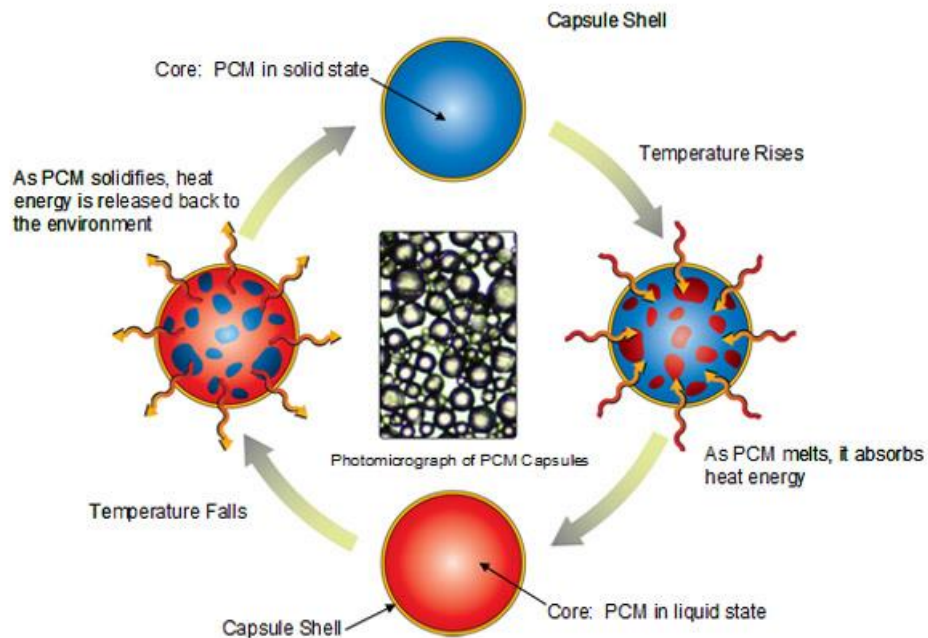
Ezeknek az anyagoknak a maximális teljesítménye csak abban az esetben érhető el, ha a felhasználási és beépítési mód azt lehetővé teszi. Az anyag a folyadék és szilárd halmazállapotai közötti átmenet során átlagosan 10%-kal megváltoztatja a térfogatát. Az eddigi tapasztalatok alapján a térfogatváltozás, illetve a folyékony állapot miatt mindenképpen szükség van valamilyen segédanyagra, ami magába foglalja a fázisváltó anyagot. Ez biztosítja a PCM használhatóságát és kezelhetőségét.

A PCM-ekben lezajló folyamat sikere az anyagon belüli, és az azt körülvevő anyag hővezetési tényezőjének függvénye is. Ha alacsonyabb hővezetési tényezővel rendelkezne a befoglaló anyag, az elszigetelné a PCM-et a közegtől. Törekedni kell olyan anyagok alkalmazására, melyek hővezetési tényezője a lehető legnagyobb. A maximális hatásfok a fázisváltás akadálytalan lezajlása esetén érhető el. Feltételezhető egy olyan ideális állapot, amikor a fázisváltó anyag teljes alkalmazott mennyiségében a lehető leghamarabb reagál a közegének hőmérsékletére, és nem adódnak részlegesen megdermedt vagy megolvadt részmennyiségek. Ennek feltétele az optimális felület-térfogat arány. Ha a befoglaló geometria nem megfelelő, a fázisváltó anyag halmazállapot-változása nem kongruens módon megy végbe, azaz a részleges megolvadás vagy megdermedés során az egyes komponensek térben és időben is elkülönülhetnek. Ez ronthatja a hatásfokot. ^[5]

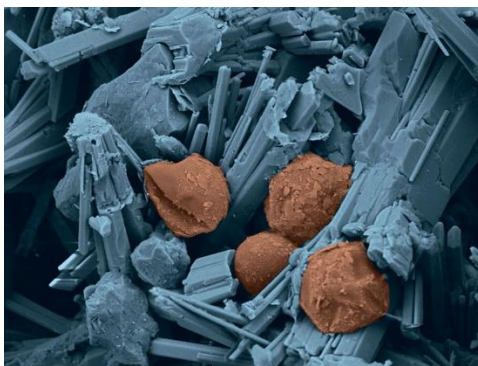
Makro technológiákkal alkalmazva a fázisváltó anyagokat, azok tárolóinak kialakításakor olyan geometriát kell használni, amely a lehető legnagyobb felülettel rendelkezik a térfogatához képest, a befoglaló anyag pedig célszerűen rugalmas, és kiváló hővezetési tulajdonságokkal rendelkezik.

A felület-térfogat arány nagymértékű növelése már nanotechnológiai feladat. A megfelelő vegyipari folyamatok során a PCM úgy alakítható, hogy azt 5 nanométeres polymer kapszulákba zárják. Az így létrejött száraz, por jellegű, burkokba zárt PCM a legkedvezőbb alkalmazási feltételeket kínálja. Elsősorban stabil, a fázisálapottól függetlenül alkalmazható. A polymer burok rugalmas, így zavartalan lesz a térfogatváltozás, és elég vékony ahhoz, hogy a hőcsere folyamatokat ne akadályozza. A mikrokapszulákban lévő anyagmennyiség olyan kicsi, hogy az anyag biztosan kongruens marad. [5]

Jelenleg több vegyipari vállalat is foglalkozik a mikrokapszulázott PCM gyártásával az Egyesült Államokban, Angliában és Németországban is. A technológia létező, de a gyártás igen költséges, a PCM viszont ebben a formában használható a legszélesebb körben.



5. ábra: A mikrokapszulázott PCM működési modellje [11]



6. ábra: Szilikát anyagba ágyazott Micronal[®] PCM elektronmikroszkópos felvétele ^[12]

Hazai kutatók élen járnak a költséghatékony mikrokapszulázás kutatásában, a PCM felhasználási területeinek bővítésében. A Pannon Egyetem MIK Műszaki Kémiai Kutatóintézet ígéretes kutatásokat végez Veszprémben, ami igazán biztató a fázisváltó anyagok szélesebb körben való alkalmazása szempontjából.

4.4. Fázisváltás és a hőtároló tömeg

A PCM-ek által kihasználható a látens hő elnyelődésében és felszabadulásában rejlő hőtároló hatás. Ez olyan mennyiségű energia tárolását eredményezheti, mely összehasonlítható a korábban tárgyalt hőtároló tömeg hatékonyságával. A nagy tömegű energiatároló szerkezetek esetében az anyag részecskéinek belső energiaállapot-változása azok kapcsolati rendszerét nem változtatja meg. A speciálisan ebből a célból kifejlesztett PCM-ek esetében azonban az energiaállapot változás a részecskék közötti kapcsolatot módosítja. A két fizikai jelenség a hőmérséklet- elnyelt energia függvény más-más szakaszán helyezkedik el, azok hatásmechanizmusa eltérő. Ennek ellenére az eredmény hasonló, így mindkét jelenség segítségével képesek lehetünk a szerkezetekben hőenergiát akkumulálni. Míg a nagy tömegű szerkezetek esetében a hőtároló kapacitás nagyobb részben az anyag fajlagos mennyiségén múlik, a fázisváltó rendszereknél az anyagi minőség a döntő. Ebből adódóan, ha összehasonlítjuk ismert nehéz szerkezetek és valamilyen átlagos teljesítményű fázisváltó anyag azonos hőkapacitású hatékony anyagmennyiségét, az meglepően jelentős különbséget mutat. Adott vastagságú tömör betonfal fajlagos hőtároló teljesítménye akár töredék olyan vastag PCM réteggel helyettesíthető. Ez ígéretes épületszerkezeti alkalmazási lehetőségekre ad lehetőséget.

4.5. Fázisváltó anyagok épületszerkezetekben

Korát megelőző módon Telkes Mária volt az első fizikus, aki a fázisváltó anyagok alkalmazhatóságát épületszerkezeti szempontból kezdte vizsgálni. Glauber sótt alkalmazó passzív rendszere 4 éves fennállása során 2 téli időszakban működött figyelemreméltó sikerrel. Sajnos a rendszert meghibásodását követően eltávolították a kísérleti épületből. Mindenesetre az akkori körülményekhez és technológiai felkészültséghez képest elért eredményei igen biztatók voltak, elgondolásának továbbfejlesztése mindenképpen ígéretes kutatási terület. ^[8]

Napjainkra a fázisváltó anyagok kutatása egyre gyorsuló tempójú, ennek köszönhetően számos gyártó állt elő olyan termékekkel, épületszerkezeti rendszerekkel, amelyek PCM-et alkalmaznak az épületek termikus hatékonyságának növelése érdekében. Az ilyen anyagok mind a passzív, mind az aktív energiagyűjtő rendszerekben hasznosak, kiválthatják a hőtárolásra eddig használt tömegkonstrukciókat. Sok felhasználási lehetőséget feltártak már a kutatók, egyelőre mégis szűk a fázisváltók alkalmazásának területe. Épületenergetikai szempontból egy komolyabb előrelépés nagy jelentőségű lehetne. A következőkben néhány jól működő rendszert és terméket ismertetünk.

4.5.1. Trombe/tömeg falként való felhasználás

A passzív szoláris rendszerek nagyméretű, helyigényes, nehéz szerkezeteit PCM-re is cserélhetjük, bármilyen tömeghatáson alapuló hőtároló rendszerről is legyen szó. Ha például az energiagyűjtő falakat vesszük, az üvegréteg mögött szilikát szerkezetek helyett elegendő egy a néhány centiméter vastagságú, fázisváltó anyaggal töltött réteget elhelyezni, melyben méretezhető mennyiségű hőenergia képes felhalmozódni. Így a működése a tömegfalakéhoz hasonló lesz, de a szerkezet rétegvastagsága és súlya lényegesen kisebb. A fázisváltó anyagok közül néhány típus folyékony halmazállapotában víztiszta, az üveghez hasonló fényáteresztő képességű. A fázisváltó fal hőtároló rendszerekben az is kihasználható, hogy a vizuális kapcsolatot a külső térrel nem gátolja az adott falszakaszon, tehát a magasabb energiaállapotában a szerkezet átlátszó, a PCM dermedését követően viszont beopálosodik. Ez nagy előnyt jelenthet a szilikát tömegfalak tömörségéhez képest, de természetesen nem áttetsző konstrukciók is léteznek.

Az ilyen szerkezeti megoldások néhány hátrányos tulajdonsággal is rendelkeznek. A szerkezet elemeinek hővezetési tényezője igen magas, a rétegfelépítés hőátbocsátási képessége nagyon kedvezőtlen, a termikus burok egyenletességét rontja. A folyadék állapotban áttetsző típusban a halmazállapot változáskor a szilárdulás az anyag mennyisége miatt nem mindig egyenletes, ezért foltos, zavaros állapot is felléphet.

Fázisváltó anyagot tartalmazó Trombe-falat alkotott az Appalachian State University Solar Decathlon csapata is. Konstrukciójuk során a PCM-et alumínium lamellákba töltötték, így azok mozgatásával biztosítani lehet a fény bejutását a belső térbe.



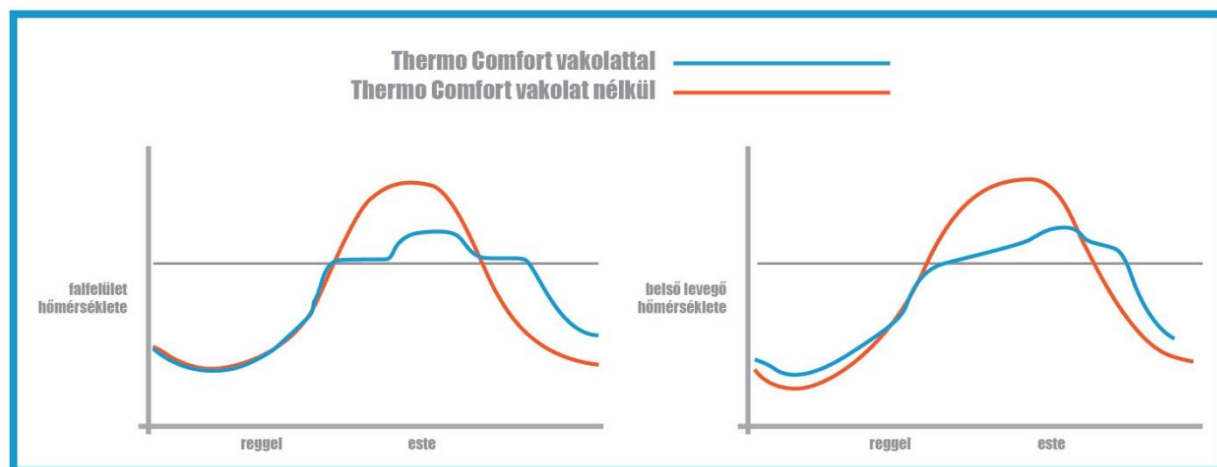
7. ábra: Az Appalachian State University Solar Decathlon csapatának PCM energia gyűjtő fala ^[14]

4.5.2. PCM-et alkalmazó szerkezetek

4.5.2.1. Lasselsberger-Knauf – Thermo°Comfort hőmérséklet-szabályzó vakolat

A hazai fejlesztésű hőmérsékletszabályozó vakolat a BASF által gyártott 21°C, 23°C vagy 26°C olvadáspontú Micronal PCM-et tartalmaz. Abból az állításból fakadóan, hogy a fázisváltás hatékony lezajlásának feltétele az anyag megfelelő felület-térfogat arányú alkalmazása, a fejlesztők felismerték, hogy a lehető legnagyobb felületen és vékony rétegben érdemes a PCM-et az

épületekben elhelyezni. Ennek a feltételnek a teljesítése érdekében talán az egyik legalkalmasabb megoldást fejlesztették ki: a mikrokapszulázott fázisváltó anyagot gipsz kötőanyagú vakolatba keverve, azt a belső térben felhordva a fázisváltás a legnagyobb hatékonysággal képes lebonyolódni. Ennek eredményeként nagy hőmennyiség képes gyorsan elnyelődni, majd felszabadulni a belső térben. A hőtároló hatásnak köszönhetően a levegő hőmérséklete és a felületek hőmérséklete is kiegyenlítettebb a napi ciklus során. Ez jelentősen jobb komfort kialakulását eredményezheti, illetve jelentősen csökkentheti, akár meg is szüntetheti a klimatizálás energiaigényét és ezáltal költségeit. A gyártó ajánlása szerint főként a nyári időszakra jellemző túlmelegedés ellen érdemes alkalmazni, mindemellett ha a téli időszakban nagy direkt nyereségeket tudunk elérni, direkt passzív szoláris energiagyűjtő rendszernek is tekinthetjük a vakolatot. A látens hő az átmeneti időszakokban is nagy szerephez jut hőmérséklet-kiegyenlítő hatása révén. A 10-15 mm vastagságban felhordott vakolat alkalmazástechnikailag nem különbözik az átlagos vakolatoktól. Hatékony működése tesztekkel és éles alkalmazással is bizonyított. Általános elterjedésének elsődleges és talán egyetlen akadálya magas bekerülési költsége, a vakolat beruházása körülbelül 10 év alatt térül meg. Csak abban bízhatunk, hogy a magyar fejlesztésű új mikrokapszulázási technológia segítségével a vakolat költséghatékonyá is válhat. ^[15]



8. ábra: A Thermo Comfort vakolat működése ^[15]

4.5.2.2. Rigips – Alba®Balance gipszkarton

A Rigips fejlesztői ugyan azon az úton indulhattak a kutatások során, mint a ThermoComfort vakolat megalkotói. A különbség az épületszerkezeti elem, amibe a Micronal PCM kerül 23°C vagy 26°C olvadásponttal: a gipszkarton száraz, szerelt technológiával kerül beépítésre, a végleges felület festése előtt csak glettelést igényel. A mai körülmények között (munkaerőhiány, a gyors technológiák iránti igény) érdemesebb a fázisváltó anyagot a vakolat helyett a gipszkarton tábla gipsz rétegében elhelyezni. Az Alba Balance gipszkarton táblákba integrált fázisváltó anyag hőtároló képességet tud biztosítani a könnyű, belső térelválasztó szerkezeteknek. Ezzel a gipszkarton szerkezetek egyik ismert hátrányos tulajdonsága jelentős mértékben kompenzálható.

[16]

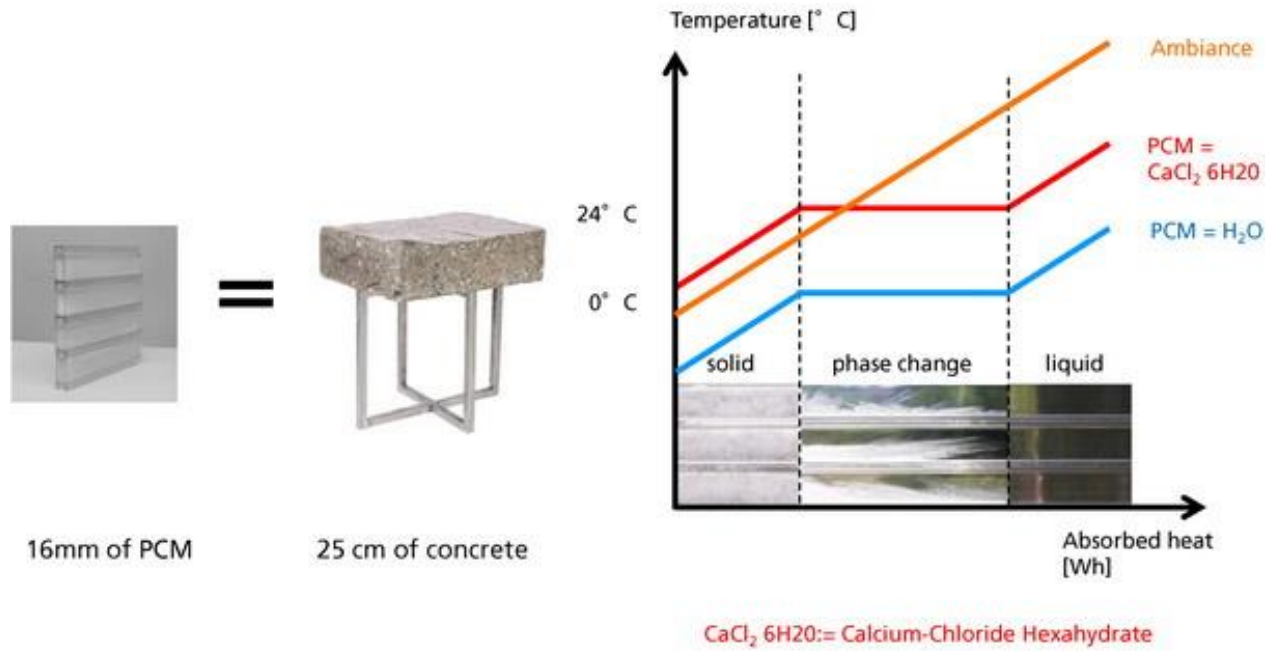
4.5.2.3. Glass X AG – Glass X

Az energiagyűjtő falak elvének új alkalmazása a GlassX kifinomult rendszere. Minden bizonnyal az összetett üvegszerkezet megalkotása során is az integrálható alkalmazás volt a fő célkitűzés. A szerkezet több szoláris rendszer lényegi elemeit foglalja magába, és alkalmazza azt nyílászáró szerkezetekben. Az alapvető elképzelés feltehetően az volt, hogy legyen minden transzparens homlokzati szerkezet egyben passzív energiagyűjtő is, tehát nem külön energiagazdálkodási célból létesített üvegszerkezetekről van szó. Az elképzelés lényege, hogy az épület egyébként is létező, és elengedhetetlen nyílászáró szerkezeteit, mint energetikai szempontból a leggyengébb láncszemeket, az energetikai mérleg pozitív oldalára soroljuk át. Az ígéretes elgondolás a tapasztalatok alapján a valóságban is működőképes.

A GlassX egy svájci fejlesztésű üvegszerkezet, melynek üvegrétegei között a külső oldalon egy prizma rendszer kap helyet, a belső oldalon pedig fázisváltó anyagot tartalmazó panelek sorakoznak. A speciális felületi mintázatú prizmatikus üvegréteg a 40° feletti beesési szögben érkező napsugarakat visszaveri, az az alattiakat beengedi. Így a direkt sugárzási nyereség kialakulását alacsony napállásnál, tehát télen lehetővé teszi, nyáron pedig megakadályozza. A fázisváltó anyaggal töltött belső réteg a hőtárolásért felel, a prizmával kiegészülve nyáron csak a belső tér felesleges hőjét, télen a direkt nyereséget akumulálja. [17]

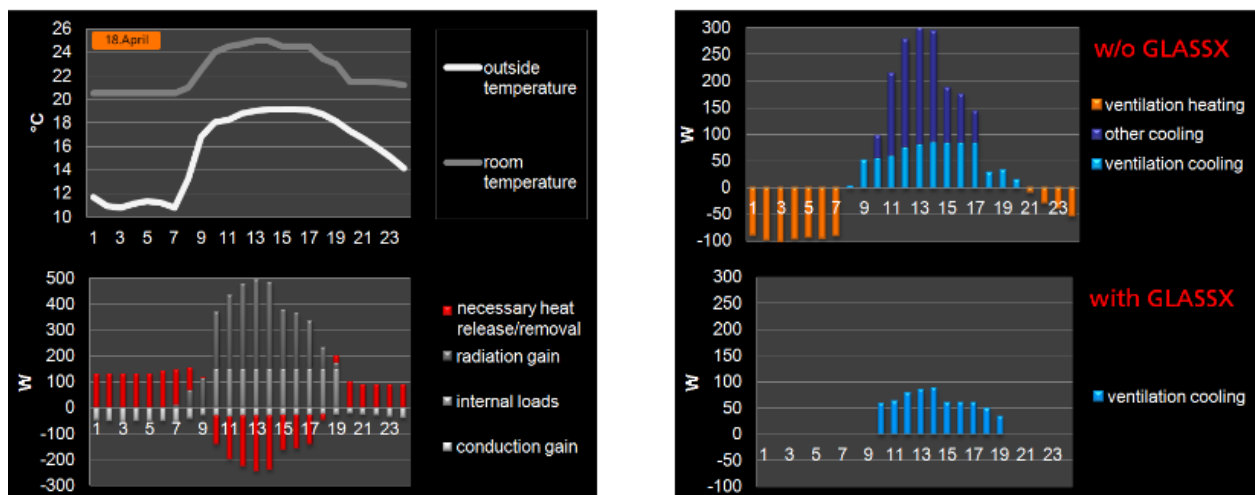
Az itt alkalmazott PCM folyékony halmazállapotában áttetsző, dermedt állapotában kikristályosodik, beopálosodik. Emiatt a vizuális kapcsolat a környezettel a hőmérsékleti állapotok

függvénye. A fázisváltó anyag 16 mm-es paneleket tölt ki, melyeket a két belső üvegréteg közé helyeznek. A szerkezet hőtároló teljesítménye egy körülbelül 25 cm vastag beton fal hőtároló kapacitásával egyezik meg. ^[17]



9. ábra: Homogén falszerkezet hőtároló viselkedésének ábrázolása ^[17]

A szerkezet hátrányos tulajdonsága a vizuális kontroll, a teljes átláthatóság hiánya. A fázisváltás közbeni részlegesen megdermedt állapot vizuális megítélése szubjektív, ekkor a kristályosodás foltokként kezd megjelenni a felületen belül. Ennél nagyobb gond azonban a tömbként elhelyezett PCM panelek nem igazán előnyös felület-térfogat aránya, ami egyben a foltosodás oka. A fázisváltás nem kongruens, azaz a különböző fázisok egyszerre is jelen vannak hosszabb időn keresztül. Ez kissé ronthatja a szerkezet teljesítményét. Ennek ellenére a rendszer kiváló hatékonyságáról tanúskodnak az eddigi beépített termékek mérési eredményei. ^[17]



10. ábra: Cipruson létesített tesztépület déli tájolású függönyfal homlokzatának mérési adatai [17]

5. Nemzetközi kutatások – épületszerkezetekbe integrált PCM

A nemzetközi tudományos közvélemény egyre fontosabbnak tartja a fázisváltó anyagokat. Az utóbbi időben sorra jelennek meg olyan publikációk, amelyek szimulációkat, numerikus modelleket mutatnak be PCM-et alkalmazó rendszerekről.

Telkes Mária kutató munkáját követően a '80-as években jelent meg újra a fázisváltók épületszerkezeti alkalmazásának kutatása, majd másfél évtizeddel később komolyabb fellendülés következett be ezen a kutatási, fejlesztési területen.

Megjelenés helye	Év	Tanulmány címe, tartalma
Solar Energy	1983	Survey on: PCMs classification; low temperature latent heat storage systems; thermal properties and long term stability of different PCMs and corrosion problems
Building and Environment	1988	Theoretical survey on thermal storage systems used in building applications including sensible and latent heat storage
Applied Thermal Engineering	2003	Review of TES with solid-liquid phase-change: materials characterization; theoretical heat transfer techniques; applications including the incorporation of PCMs in buildings
Energy conservation and management	2004	Review of phase-change energy storage: classification and properties of PCMs; encapsulation techniques; different applications including building applications

Energy conservation and management	2004	Survey on TES systems incorporating PCMs for use in building applications in which the PCMs are encapsulated in concrete, gypsum wallboard, ceiling and floor surfaces
International Journal of Green Energy	2005	Review on PCMs and LHTES systems: classification and properties of PCMs; heat exchangers; measurement techniques of thermophysical properties; long term stability and corrosion of PCMs; enhancement of heat transfer
International Energy Journal	2006	Review of the PCMs incorporation in buildings for energy saving: problems associated with the PCM selection; methods used to encapsulate PCMs for heating and cooling applications
Renewable and sustainable energy reviews	2007	Review of various methods of heating and cooling in buildings and latent heat storage applications or passive and active TES active space heating systems, greenhouses and solar cooking
Renewable and sustainable energy reviews	2007	Survey on the assessment of the thermal properties of various PCMs, methods of heat transfer enhancement and design configurations of heat storage facilities to be used in solar passive and
Building and environment	2007	Review on: thermal energy storage by incorporating PCMs in the building envelope; operative principles; PCMs thermophysical properties; incorporation methods; thermal analysis of the use of PCMs in walls, floor, ceiling and windows; heat transfer enhancement
Applied Thermal Engineering	2008	Review of the working principle of PCMs and their applications for smart temperature regulated extiles
Renewable and sustainable energy reviews	2008	Review on: PCMs properties and classification; encapsulation methods; PCMs incorporation in buildings for passive and active space heating and cooling
Renewable and sustainable energy reviews	2008	Survey on: available latent heat TES technologies; materials; encapsulation; heat transfer; several applications including the passive storage in bioclimatic architecture
Renewable and sustainable energy reviews	2008	Review of mathematical/numerical modelling of LHTES systems using PCMs
Chinese Science Bulletin	2009	Survey on: PCMs materials; passive and active LHTES for building's envelope
Renewable and sustainable energy reviews	2009	Review on both experimental and theoretical different performance enhancement techniques for LHTES systems with PCMs; mathematical modelling
Renewable and sustainable energy reviews	2009	Review on thermal energy storage with PCMs and building applications: properties and classification of PCMs; heating and cooling applications; heat transfer and different techniques for solving the Stefan problem
Energy conversion and management	2009	Review on dynamic characteristics and energy performance of active and passive building applications using PCMs: applications of PCMs in buildings for free cooling and for peak load shifting; studies based on simulations, experiments, or both

Renewable and sustainable energy reviews	2010	Survey on LHTES systems with PCMs: materials; PCM containers; heat transfer in PCMs and enhancement techniques; phase-change problem formulation
Renewable and sustainable energy reviews	2010	Review on free cooling of buildings using PCMs
Energy and buildings	2010	Review on the knowledge of PCMs for building applications: classification and properties of PCMs; PCM wallboard; PCM concrete; PCM building insulating materials
Renewable and sustainable energy reviews	2011	Overview of the development of PCMs based microencapsulated technology for buildings: concrete and wall/wallboards applications
Renewable and sustainable energy reviews	2011	Comprehensive review of the integration of PCMs in building's walls: physical and theoretical considerations; thermophysical properties measurements; experimental and numerical studies
Renewable and sustainable energy reviews	2011	Survey on materials used as PCMs in TES in buildings: classification of PCMs; PCMs available; problems and possible solutions on the application of PCMs in buildings.
Renewable and sustainable energy reviews	2011	The authors made a survey on PCMs mathematical modelling and simulations
Energy and buildings	2012	Analyse of different PCM applications presented in highly efficient lightweight houses that have participated in the American Solar Decathlon, an international competition organized by U.S. Department of Energy
Energy and buildings	2012	Review of PCM based cooling technologies for buildings: free cooling applications; encapsulated PCM systems; air-conditioning systems; sorption cooling systems
Renewable and sustainable energy reviews	2012	Overview of the development and application of PCMs for energy savings and latent heat storage and survey on environmental friendly humidity-controlled materials for indoor thermal management and humidity control
Applied Energy	2012	Survey on latent TES in building applications: PCMs; techniques for measuring thermal properties; impregnation methods; building applications and thermal performance analysis; numerical simulation of buildings with PCMs

3. táblázat: A PCM kutatás jelentősebb nemzetközi eredményei ^[18]

5.1. PCM árnyékoló szerkezet - összehasonlító elemzés és mérés (Portugália)

A kutatásban élen jár a Portugáliában található aveiroi és a combriai egyetem. 2003 óta több mint húsz tudományos publikációt jelentettek meg a témában. Ezt megelőzően a PCM épületszerkezeti alkalmazása alig jelent meg a nemzetközi szakirodalomban. A portugál szakemberek másfél évtizedes kutatómunkájuknak köszönhetően mára már megbízható mérési és szimulációs eredményeket mutathatnak fel.

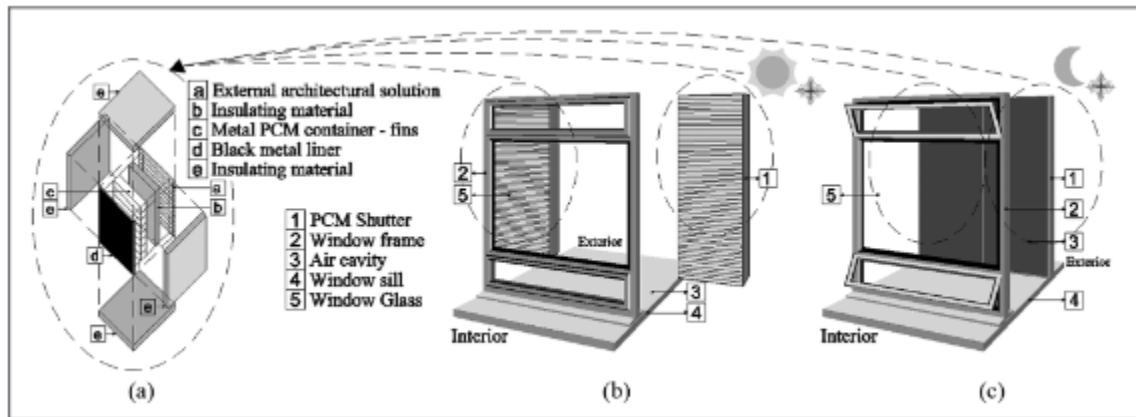
Publikációik között nagy arányban szerepel az árnyékoló szerkezetekbe integrált PCM hatékonyságának vizsgálata. 2014-ben elméleti modell alapján végzett számításokkal igazolták, hogy az árnyékoló szerkezetekben lehetséges a PCM hatékony működése.^[19] Még ugyanebben az évben egy kísérlet keretein belül két egymás melletti, önálló helységekhez tartozó kültéri árnyékolót hasonlítottak össze. Ezek közül az egyiket fázisváltó anyaggal töltötték meg, míg a másik, szokványos szerkezet referenciaként szolgált. Az árnyékolók déli tájolásúak voltak, az energiagyűjtéshez megfelelően abszorbens felülettel ellátva. A mérések a Mediterrán éghajlat téli időszakára voltak ütemezve. A kísérleti időszak alatt a külső levegő hőmérséklete 4,5 °C és 14 °C között ingadozott, a relatív páratartalom pedig 75% és 95% közötti volt. A napi átlagos napsugárzás 25 W/m² és 110 W/m² között változott, a maximális érték 310 W/m² volt.^[20]

A PCM-et alkalmazó kísérleti szerkezettel a belső levegő maximális mért hőmérséklete 37,2°C volt, ami 16,6°C-kal alacsonyabb, mint a referenciatérben levő belső levegő hőmérséklete, ami csúcsideőben az 53,8°C-ot is elérte. A beltéri levegő minimális hőmérséklete mindkét esetben hasonló volt, de a referencia szerkezet mögötti léghőmérséklet gyorsabban csökkent a kiegyenlítő hatás hiányában. PCM árnyékolóval a maximális hőáram a 6,5 W/m² és -3 W/m², a referencia helység belső falfelületén 16 W m⁻² és -8 W m⁻² között változott.^[20]

2015-ben tanulmányukban bemutatták a PCM-et tartalmazó árnyékolóval fedett ablaknyílás kísérleti eredményeit a nyári időszakban. A prototípus egy külső oldali konstrukció fázisváltó anyaggal, ezt referenciaként egy átlagos külső árnyékolóhoz hasonlították. A 2014-es modellhez hasonlóan a két szerkezet egymás mellett, déli homlokzaton helyezkedett el, és azokhoz külön helységek tartoztak.^[21] A kísérlet során a külső levegő hőmérséklete 13°C és 25°C között változott, és a napsugárzás átlagos napi teljesítménye 237 W/m² - 306 W/m² között alakult. A mérési eredmények azt mutatják, hogy a PCM árnyékoló termikus szabályozó kapacitása a beltéri hőmérsékletre nézve körülbelül 18% -22% volt. A maximális és a minimális hőmérsékleti csúcsok 6%-kal, illetve 11%-kal csökkentek. A beltéri hőmérséklet javulása mellett a PCM szerkezet 45 perccel növelte a minimális hőmérsékleti csúcs, és 60 perccel a maximális hőmérsékleti csúcs eléréséhez szükséges időt a referencia szerkezethez képest.^[21]

2016-ban numerikus modellt állítottak fel, melynek számszerű eredményeit valós kísérleti adatokkal támasztották alá. A számolt és a mért eredmények összehasonlításakor kiderült, hogy a modell és a valóság között csak kis eltérés van, így a szerkezet adott szituációra tervezhetővé, méretezhetővé vált.^[22]

Egy ugyanebben az évben megjelent másik tanulmányuk a PCM-et befoglaló geometria hatásáról szól. Ennek alapján a fázisváltás hatékonysága a felület-térfogat arány mellett az üreg alakjának is függvénye. [23]



11. ábra: A portugál kísérleti szerkezet sémája [19]

5.2. Belső oldali PCM árnyékoló (Németország)

A portugál kialakítástól eltérően Németországban, Kasselben belső oldali árnyékoló rendszerbe integrált PCM hatékonyságát vizsgálták. Irodahelyiségek déli és nyugati tájolású, nagy üvegfelülettel rendelkező homlokzatán helyezték el a prototípusokat. A vizsgálati méréseket 2008 tele és 2010 nyara között végezték. A gyártó elsődlegesen a nyári időszak hőcsillapítására ajánlotta rendszert, ennek ellenére jelentős eredményeket mutatott mind a nyári, mind a téli időszakban. Míg a hagyományos, PCM nélküli rendszer a nyári időszakban 40°C-ra is felmelegedett, a PCM-et alkalmazó rendszer belső oldali hőmérséklete a csúcsidejében is 28°C maradt. [18]

Harald Mehling PhD német kutató PCM redőnyszerkezeteket mutatott be egy 2004-ben tartott kutatói workshopon. A konstrukció a vizsgált belső térben a túlmelegedési csúcsot 3 órával is képes volt eltolni, miközben 2°C-kal csökkentette a belső hőmérsékletet a redőny nélküli állapothoz képest. [26]

5.3. Függönybe integrált PCM

A Shanghai Jiao Tong University kutatói egy rugalmasan használható, könnyű rendszerbe rejtettek fázisváltó anyagot. A mikrokapszulázásnak köszönhetően szövetekben is alkalmazható a PCM. Ezt kihasználva a függönybe integrált hőtároló anyag elvi működése alapján végeztek számításokat. Eredményeik alapján a belső levegő nyári túlmelegedése ilyen megoldással akár 30%-kal is csökkenthető. [24]

6. Árnyékoló szerkezetbe integrált PCM – konstrukciós javaslat

6.1. Az újabb konstrukció célja

A bemutatott példák a PCM alkalmazási lehetőségei közül talán a leghatékonyabb épületszerkezeti megoldások. Ezek előnyös tulajdonságait szem előtt tartva, talán egy még hatékonyabban használható rendszer is kialakítható. Az új konstrukciós javaslatot a fenti szerkezeti elemek és a fázisváltó anyagokban rejlő lehetőségek inspirálták.

A fenntarthatóság jegyében, a cél egy olyan szerkezet kialakítása, mely passzív szoláris rendszerként értelmezhető, azonban az eddigieknél szélesebb körben alkalmazható. Fontos alapelv a kétirányú működés lehetővé tétele, tehát az, hogy a szerkezet a fűtési időszakokban rásegítő hatással rendelkezzen, a túlzott szoláris nyereség ellen pedig passzív hűtést biztosítson. Mindezek mellett fontos követelmény a könnyű beépíthetőség és az egyszerű kivitel. Alapvető gondolat, hogy e célok megvalósítására olyan szerkezeteket kellene kifejleszteni, melyek az épületekben jelenleg is megtalálhatóak és más szempontok szerint is szükségesek, tehát az új konstrukció célszerűen egy járatos épületszerkezeti elem továbbgondolása legyen.

Törekednünk kell a high-tech megoldások mellett, és helyett a kisebb előállítási és üzemeltetési ráfordítást igénylő low- tech, tehát a lehető legegyszerűbb rendszerek alkalmazására.

6.2. PCM árnyékoló

A dolgozat témájául szolgáló elképzelés szerint, a GlassX -hez hasonlóan, az építészeti koncepció által adott nyílászáró szerkezeteket kellene az energiagyűjtő falak elméleti rendszere alapján kihasználni, az épület jobb energetikai működésének szolgálatába állítani. Ez a fázisváltó anyagok ismeretének és használatának köszönhetően valósulhat meg, a GlassX- el ellentétben azonban nem az üvegszerkezetekben, hanem a német és portugál előképeket alapján azok kiegészítő, árnyékoló szerkezetében alkalmazva fázisváltó anyagot. Így a rendszer akár minden meglévő nyílászáróra alkalmazhatóvá válna, függetlenül az ablak-, ill. üvegszerkezettől. Az árnyékoló az energiagyűjtő falak működési elvének megfelelően a homlokzati fal belső oldalán kap helyet, hiszen a szerkezet és a belső tér levegője között kialakuló hőcsere folyamatok közvetlen lezajlásából adódhat a legnagyobb hatékonyság. A transzparens nyílászáró szerkezet és a PCM árnyékoló együttese így passzív szoláris rendszert alkot. Ez a tömegfalakhoz hasonlóan működhet, ha egyszerűen az üvegszerkezet mögé helyezünk a tömeget helyettesítő fázisváltó anyagot. Ha képesek vagyunk befolyásolni a hőcsere folyamatok irányát, akkor a szerkezet passzív hűtésre és passzív fűtésre is alkalmassá válik. A fázisváltó anyagok eddigi alkalmazása során a fejlesztések sokszor vagy csak a téli, vagy csak a nyári időszakra koncentrálnak adtak megoldásokat. A Lesselsberger-Knauf által kifejlesztett Thermo°Comfort vakolatot például egyértelműen a nyári időszak túlmelegedése ellen ajánlják alkalmazni, míg az Appalachian State University kutatócsapata a PCM-et fűtési időszakban akarta kihasználni Trombe-falban alkalmazva. A GlassX üvegszerkezete már a kétirányú működést tűzte ki célul. A kétirányú működés tehát lehetséges, de mindenképpen a szerkezet mozgathatóságát, irányíthatóságát követeli meg. ^{[14][15][17][25]}

A PCM kedvező tulajdonságaiból fakadó maximális hatékonyságot az árnyékoló megfelelő szerkezeti kialakításával érhetjük el. Az integrált működés, a PCM-et befoglaló geometria és a használhatósági feltételek elsősorban egy lamellás kialakítású szerkezetet irányába mutatnak, ahol a lamella sor mozgatható.

Ablak és ajtó szerkezeteink nagy része a falnyílásban vagy falközépre, vagy a fal külső síkjára van beépítve. Amennyiben a fal belső síkjára van húzva a tok, általában akkor is adott egy bizonyos mélység a falsík és az ablak üvege között. Az energetikailag leghatékonyabb beépítés érdekében az ablakszerkezetet a hőszigetelés síkjában érdemes elhelyezni. Tehát az ablakszerkezetek és a szóban forgó belső oldali PCM árnyékoló szerkezet között szinte minden esetben számolhatunk

egy számot tevő légréssel. Ha a kapcsolt gerébtokos ablakok analógiájára gondolunk, a történeti szerkezet sikere részben abban rejlett, hogy a külső és belső szárnya közé bezárt levegő puffer zónaként teremtett átmenetet a külső és belső légállapotok között. A belső síkra beépített árnyékolót a fal síkjára megfelelően illesztve, annak zárt helyzetében hasonló hatást érhetünk el.

Árnyékoló szerkezeetről lévén szó, az objektív, energetikai és komfortelméleti szempontok mellett a szubjektív felhasználói funkció is mérvadó. A környezettel, a külső térrel teremtett vizuális kapcsolat mértékének, illetve a belső térbe jutó fény mennyiségének szabályozása a bent tartózkodó személyek pillanatnyi igényei alapján történik. A szerkezetnek tehát könnyedén mozgathatónak kell lennie, a bejutó fény szabályozásának lehetőségét állandóan fenntartva, az ablak nyitását semmilyen módon nem akadályozva. Az általános használatban a szubjektív tényező gyakran felülírhatja az árnyékoló adott pillanatra energetikailag leghatékonyabb beállítást, ennek ellenére igen jó hatásfok is elérhető. A megoldás erre a kérdésre is a fázisváltó anyagokban rejlik, hiszen azokat szinte bárhová elhelyezve lejátszódhat a halmazállapot-váltás, az árnyékoló összecukott állapota sem szünteti meg teljesen a szerkezet energetikai működését.

A belső oldali szerkezet a vele szemben támasztott követelmények teljesítése esetén igen meghatározó elemmé válhat az enteriőrben, az effektív PCM mennyisége, és az azt tartalmazó szerkezet markáns megjelenést eredményez. A szerkezet kialakításakor ügyelni kell arra, hogy összecukott állapotban a lehető legkisebb helyigényű legyen. A belső oldali árnyékoló alkalmazása esztétikai-tervezői szempontból a szerkezet előnyére is válhat, hiszen megfelelően esztétikus megjelenése esetén akár design elemként is helyt állhat. Ennek érdekében a megfelelő anyagok kiválasztásával, a felületek igényes kialakításával, színezésével dekoratív megjelenésű árnyékolót kell konstruálnunk.

Más részről a megfelelő felületi kialakítás a szerkezetet tisztíthatósága szempontjából is fontos. Ez akár lényegesen előnyösebb is lehet a függönyözés, mint árnyékolóként használatos lakástextil, vagy a külső oldali redőnyszerkezetek tisztíthatósági lehetőségeivel. A nagyvárosok külső oldali árnyékolói például gyakori tisztítást igényelnek a városi portól való elkoszolódás miatt, ezekhez azonban kizárólag a homlokzat irányából lehet hozzáférni, azaz rendkívül körülményes, gyakran alpinista szakembert igénylő feladatról van szó. Ezzel szemben a belső oldali szerkezet a belső térből jól hozzáférhető.

A tervezett szerkezet akusztikai szempontból is kedvező lesz, hiszen a hagyományos árnyékoló szerkezetekhez képest nagyobb tömege miatt nagyobb hangszigetelő képességet várhatunk a PCM árnyékolótól.

6.3. Szerkezeti kialakítás

A szerkezet kialakítása során törekednünk kell a lehető legegyszerűbben kivitelezhető, költséghatékony, elegáns, igényes megoldásra.

A rendszer lényegi eleme az árnyékoló szerkezet elemeibe integrálandó megfelelő fázisváltó anyag megtalálása. A legalkalmasabb PCM kiválasztása során a „fázisváltó anyagok” című fejezetben írott elemzéseket kell figyelembe vennünk. Több megoldás is kínálkozik, de gazdaságossági szempontok alapján a paraffin olajok és a sóoldatok a reálisan számba vehető anyagok. Ezeknél a megfelelő halmazállapot-váltási küszöbhőmérséklet könnyen módosítható, beállítható. Ez az árnyékoló szerkezetben körülbelül 23-26 Celsius-foknál lenne ideális. Mindkét anyag viszonylag könnyen elérhető, azonban tulajdonságaik eltérőek. A paraffin gyanták, olajok a fázisváltó célra alkalmazható minőségben drága anyagok. Az ilyen paraffinokat molekuláris összetételük szerint kell frakcionálni, szűrni a kívánt stabil olvadás-fagyás pont eléréséhez. Nagy előnyük viszont a stabilitásuk.

A PCM-ek halmazállapot-változását használjuk ki, ennek nagyon sokszor kell lezajlania, emiatt az anyag szerkezete átalakulhat, és hiszterézis léphet fel. Az előnyös fázisváltó tulajdonságuk csökkenhet, meg is szűnhet, megváltozhat a küszöbhőmérsékletük. A paraffinok esetében ez nem következik be, sóoldatoknál viszont néhány év működés után könnyen előfordulhat. A sóoldatok előállítási költségei alacsonyak, így áruk versenyképesebb. A sóoldatok hátránya még az erősen korrozív hatásuk, ennek ellenálló anyagot alkalmazva azonban ez kompenzálható. Mindkét anyagnak megvannak a maga előnyei, hiszen más-más tulajdonságaik kedvezőbbek, a döntő érv a só-hidrátok mellett a paraffinok könnyű éghetősége. Tűzvédelmi szempontból nem szerencsés magas égési hőmérséklettel rendelkező és gyúlékony anyagot jelentős mennyiségben a nyílászárók közelébe juttatni, hiszen ez a tüzesetek kockázatát jelentősen növeli, a homlokzati tűzterjedést beláthatatlanul felgyorsíthatja. A sóoldatok ezzel szemben még valamilyen mértékű tűzfékező hatást is gyakorolhatnak a nyílászárók előtt, ami kifejezetten előnyös lehet. Ezt egy megfelelő

tűzvizsgálat elvégzéséig nem állíthatjuk tényként, mindössze később alaposabban megvizsgálandó felvetésként. Az elmondottak alapján mindenképpen valamilyen sóoldat a legalkalmasabb PCM az adott feladatra.

Sarkalatos kérdés a PCM alkalmazása során a megfelelő geometriai kialakítás, hiszen a megfelelő hatékonyság akkor érhető el, ha a halmazállapot-váltás során az anyag teljes mennyiségében lezajlódik a folyamat. Ezt a PCM-et tartalmazó geometria térfogat-felület arányának optimalizálásával érhetjük el, tehát kifejezetten filigrán szerkezetet kell létrehozunk a hőcserefolyamatok teljes körű lezajlása érdekében. A már említett lamellás kialakítás talán a legkedvezőbb és legjobban alkalmazható megoldás. A lamellák elvékonyított kialakítása a térfogatukhoz optimalizált legnagyobb felületet eredményezhet, azaz a közeg a lehető legnagyobb felületen érintkezik a fázisváltó anyaggal. Ezáltal a hőátadás a lehető legnagyobb felületen zajlódhat le, ami esélyt ad a teljes anyagmennyiség halmazállapot-váltására, A hőcsere folyamatban nagy szerepet játszik a lamella anyaga is, annak minél nagyobb hővezetési tényezővel kell rendelkeznie, hogy ne képezzen ellenállást a PCM és a belső tér levegője között. Mindamellet merev és finoman megmunkálható anyagra van szükség, melynek felületi kialakítása változatosan, a különböző igényeknek megfelelően alakítható.

A PCM legnagyobb hatékonyságának érdekében az árnyékoló hőcsere folyamatait irányítanunk kell aszerint, hogy a gyűjtött energiátöbbletet az épületbe, vagy a szabadba szeretnénk közvetíteni. Ez abban nyilvánul meg, hogy a szerkezet egyik irányban nagy hatékonysággal vesz fel és ad le hőt, míg a másik irányban ezt nagy hatékonysággal gátoljuk. A szerkezet elemeinek egyik oldala tehát nagy hővezetési tényezővel rendelkezik és abszorbens, míg a másik oldal kis hővezetési tényezőjű és reflektív. Így hőátadás és hőszigetelés szempontjából a szerkezet egyik oldala kommunikál a közeggel, míg másik oldala a lehető legnagyobb mértékben elszigetelt attól. A két oldal felcserélését a mozgatható lamellás kialakítás teszi lehetővé, így válik lehetővé a folyamatok kontrollálhatósága.

Az árnyékoló természetesen nincs minden esetben a nyílászáró előtt, a belső térben tartózkodó személyek igényei alapján a szerkezet összecukott állapotban is lehet, illetve a kontrol megszűnhet. A hőtároló kapacitás azonban a PCM működése miatt ekkor sem szűnik meg, mindössze a hatásfoka gyengül.

A szerkezetnek hőtechnikai szempontból maximális hatékonysággal kell működnie a négy legszélső és legmeghatározóbb klimatikus szituációban. Ezek a téli éjszaka és nappal, illetve a nyári éjszaka és nappal. Az árnyékoló szerkezet lamelláinak dőlésszöge állítható, illetve átforgatással megcserélhető a két oldaluk, így a négy meghatározó energetikai szituáció esetére a lamellasor különböző beállításával képesek vagyunk a hatékonyságot maximalizálni. A definiált állások közötti mozgatható tartomány a köztes időszakok viszonyaira is képes maximális hatékonysággal reagálni, illetve lehetőséget ad a szubjektív igények szerinti beállításra.

6.4. A teljes szerkezet

A szerkezet elvi megfontolások alapján, a fentebb leírt követelményeknek és elképzeléseknek megfelelően alakítható ki a pontos geometria, és választhatóak ki a megfelelő anyagok. A cél egy konkrét termék megalkotása, aminek a pontos megtervezése folyamatban van, ehhez további kísérletek, szimulációk és mérések szükségesek.

6.5. Működés a fűtési időszakban

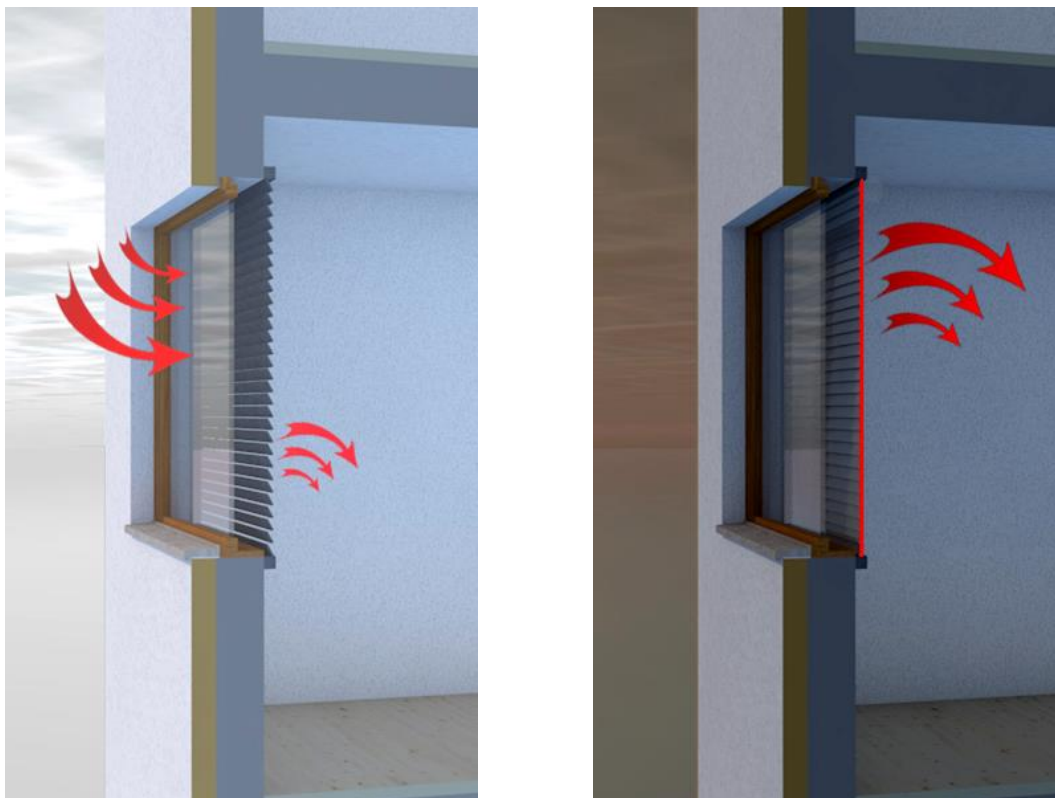
A fűtési időszakban a működés során a szoláris nyereség maximalizálása a cél. A passzív szoláris energiagyűjtő szerkezetek feladata az épületre érkező hőmennyiség lehető legnagyobb arányú kihasználása fűtési céllal. Az ilyen szoláris rendszerek a nyereségeket általában indirekt módon hasznosítják, a direkt nyereségeket termelő üvegszerkezetektől függetlenül. A PCM árnyékoló azonban a nyílászárhoz társított szerkezet, ez azt jelenti, hogy az általa indirekt módon hasznosított energia is a nyílászáró üvegszerkezetén keresztül érkezik a belső térbe.

A direkt nyereségek az épület szerkezeteinek hőtároló képességétől függően hasznosulnak. Ez átlagos szerkezetek esetén 50%, 400kg/m² szerkezeti tömegű épületek esetén akár 75%, tehát hiába érkezik nagy mennyiségű szoláris energia a belső térbe, annak egy része a hőtároló kapacitás hiányában nem tekinthető hasznosult hőnek. A PCM árnyékoló a fázisváltás révén ezt kapacitást egészíti ki. Így a direkt hasznosulás arányát elvileg akár 90-100%-ig is képes növelni.

A fűtési időszak nappali óráiban a nyílászáró üvegszerkezetén keresztül érkező napsugárzás nagy részét az árnyékoló nyitott pozícióba állított lamelláin keresztül a belső térbe engedni. Így azok

direkt nyereséget képezhetnek. A sugárzás többi része elnyelődik az opaqe energia gyűjtő szerkezet, azaz az árnyékoló abszorbens felületén. Az innen visszaverődő hősugárzásnak csak kis hányadát engedi ki az üvegházhatás miatt az üveg felület, a nagyobb részét újra visszaveri az elnyelő szerkezet irányába. Ezzel a beeső sugarak nagy része a belső térben reked. Az árnyékolóba integrált PCM feladata felolvadva a nyereség nem hasznosuló részét tárolni.

Az esti, éjszakai órákban a lamellák összezárásával elhatároljuk az enteriőr energiával telt felületeit az üvegfelülettől. Ezzel megakadályozhatjuk az intenzív, a nyitott égbolt felé irányuló kisugárzást. Mindezt úgy, hogy a lamellák szigetelt és reflektív oldala az üveg felé nézzen, abszorbens hővezető felülete pedig a belső tér irányába. Ekkor a fázisváltó anyag újra „megfagyva” leadja az általa tárolt látens hőt, amivel a belső léghőmérsékletet növeli, mindeközben záró felületével mérsékli a nyílászáró szerkezeten keletkező veszteségeket is. Ebben van szigetelő jellegű szerepe az üvegfelület és az árnyékoló síkja közé zárt nyugvó levegőnek is. Tehát az árnyékolónkkal miközben fűtő, rásegítő hatást érünk el a tárolt energia befelé juttatásával, ezzel egyidejűleg csökkentjük is vele a belső tér veszteségeit. Fontos a hatékonyság szempontjából, hogy ebben a szituációban, a PCM fagyása során minél kevesebb hőt adjon le az üvegszerkezet felé, ezt szigetelő oldal megfelelő kialakításával érjük el.

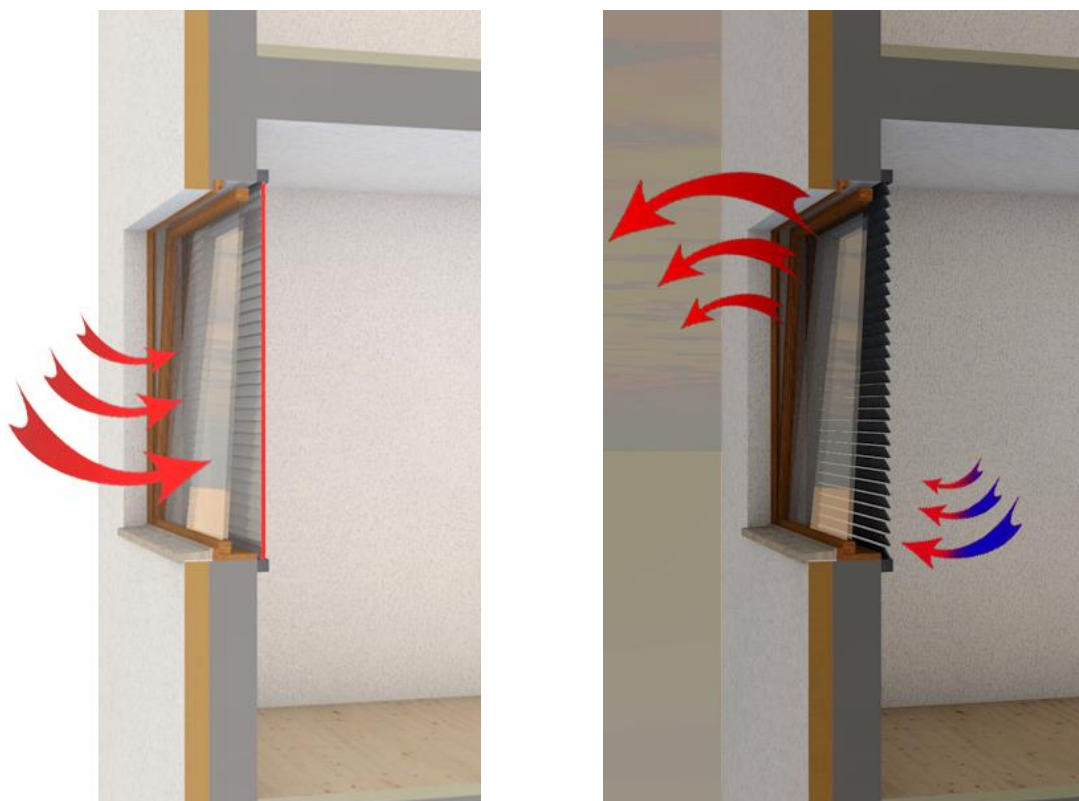


12. ábra: A szerkezet működése a fűtési időszakban nappal és éjjel

6.6. Működés a hűtési időszakban

A nyári működés során a lamellarendszer fordítva van pozícionálva, mint a téli időszakban, hiszen a hőcsere folyamatokban az ellenkező irányú mozgást szeretnénk elérni. A nappali órákban az árnyékoló szerkezet zárt állásban van. Ha igény a fény beeresztése, a zárt lamellák közötti rések megnyitásával azt kielégítheti a használó. A zárt rendszer ezúttal olyan pozícióban áll, hogy a reflektív oldal a kifelé néz, a beérkező sugárzás nagyobb része a reflektív felületről visszaverődik. A reflexió azonban nem lehet teljes, ha a sugárzási nyereség már az üvegszerkezeten belül van. A belső térben rekedő többletet ekkor a fázisváltó anyag nyeli el. Ha a szerkezetben lévő PCM teljesítménye elég nagy, akkor képes a belső tér levegőjéből is hőt elvonni az olvadása során. Tehát a túlzott nyereségek mérséklésén túl bizonyos hűtő hatást is elérhetünk. Ha az ablakszerkezet mindeközben résszellőzésre van nyitva, azzal fokozhatjuk az árnyékolás, és ezáltal a rendszer teljesítményét.

A begyűjtött energiát a szerkezet az esti, éjszakai órákban adja le. Ekkor a (pl. bukóra) nyitott ablak szintén elősegíti a szerkezet működését, különösen, ha az árnyékoló mögött nagy felületű átszellőzést lehet biztosítani. A lamellák gátló oldala ilyenkor a belső tér felé néz, a jó hővezető oldal pedig az üveg irányába. hogy a szerkezetben tárolt hő minél nagyobb arányban a külső térbe távozhasson. Az esti órákban lehűlt külső levegő hatására a fázisváltó anyag újra megdermed, miközben megszabadul a felesleges hőmennyiségtől. Az átszellőztetés mozgó levegője hatására a konvekció intenzívebb lesz. A lamellákat kissé megnyitva a belső levegő is a külső tér irányába kezd áramlani, ami szintén segíthet a fázisváltó anyag visszadermedésében. A hő távozását az éjjeli kisugárzás jelensége is gyorsíthatja. A PCM újra szilárdulásának következtében képes lesz a következő napon újra felvenni a felesleges hőmennyiséget.



13. ábra: A szerkezet működése a hűtési időszakban nappal és éjjel

Beállítások a maximális hatékonyság eléréséhez	Tél			Nyár		
	Nyílászáró pozíciója	Lamellák pozíciója	Gátló oldal irányultsága	Nyílászáró pozíciója	Lamellák pozíciója	Gátló oldal irányultsága
Nappal	zárt	nyitott	befelé	nyitott	zárt	kifelé
Éjjel	zárt	zárt	kifelé	nyitott	nyitott	befelé

4. táblázat: A szerkezet működése a hűtési időszakban nappal és éjjel

6.7. Átmeneti időszakok

A szerkezet hatása az átmeneti időszakokra nézve a legjelentősebb, tudatos használatával a nagyobb hőmérséklet ingadozások hatékonyan kiegyenlíthetőek. A lamellarendszert az időjárási körülményeknek megfelelően beállítva hozzájárulhatunk a szinte állandó belső téri léghőmérséklet biztosításához. Az őszi és tavaszi időszakok beltéri komfortjának megteremtését a rendszer hosszú ideig képes lehet önállóan biztosítani, külső energia befektetése nélkül. A

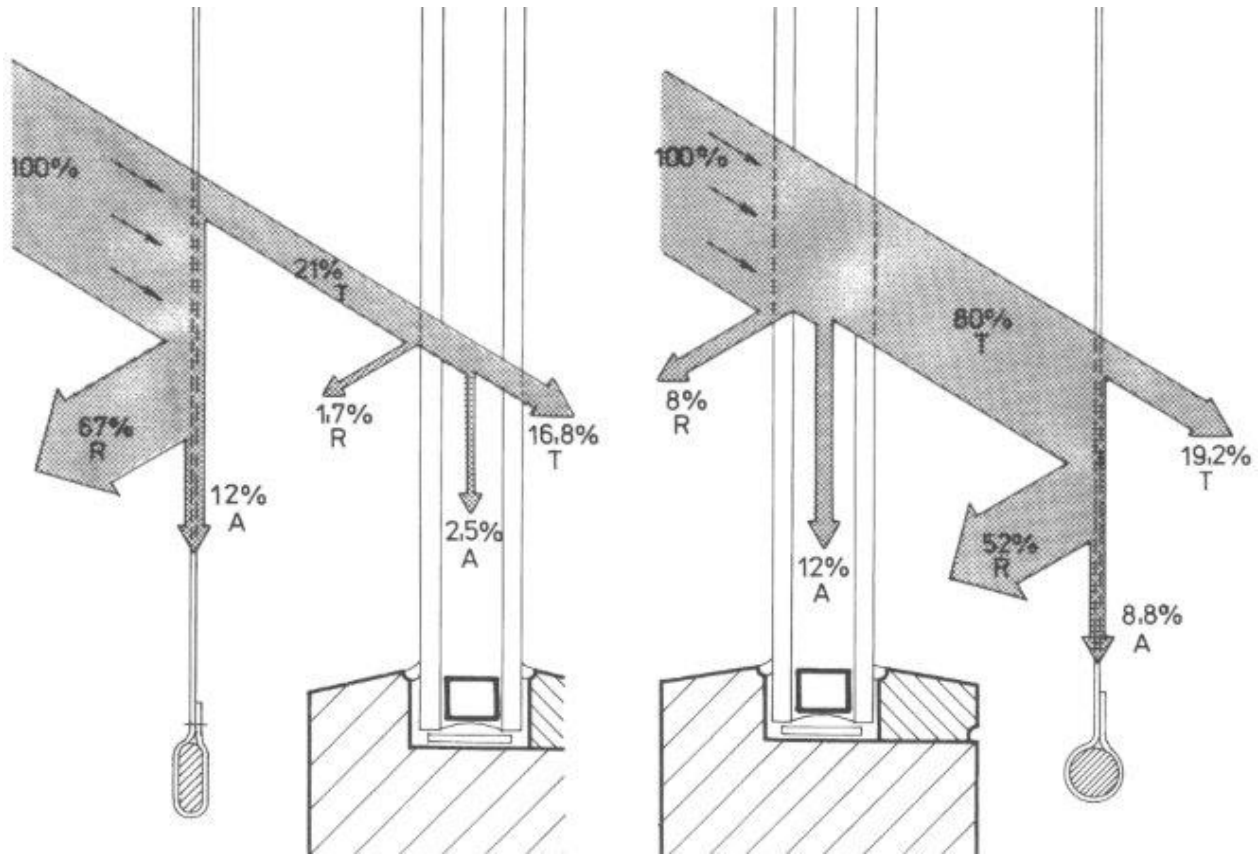
mérséklő, késleltető hatás a fűtési és hűtési időszakok határait jelentős mértékben eltolhatja, csökkentve az energiefelhasználást, ezzel mérsékelve az épület fenntartási költségeit és ökológiai lábnyomát.

7. Összehasonlítás: Belső oldali PCM árnyékoló – Külső oldali normál árnyékoló

Az árnyékolástechnikában közismert, hogy a nyári túlmelegedés akkor kerülhető el igazán hatékonyan, ha a túlzott nyereséget szállító napsugarakat nem engedjük át az üvegszerkezeten, az árnyékolót a külső síkon helyezzük el, a külső oldali, homlokzati árnyékoló a legjobb teljesítményű. Gyakran nincs mód erre, belső oldali árnyékolásra kényszerülünk, amivel azonban nem mindig lehet kielégítő módon védekezni a túlmelegedés ellen. A PCM árnyékoló egy új alternatívaként jelenhet meg, amivel a külső oldali árnyékoló hatékonyabban helyettesíthető, mivel képes elnyelni a megfelelő energiamennyiséget, a jó konstrukció és helyes használata révén hatékonyan meg tudja akadályozni a túlmelegedést. A hagyományosan külső oldali redőnyszerkezetekhez képest ráadásul számos kedvező tulajdonsággal is rendelkezhet a PCM árnyékoló.

A redőnyszekrény beépítése általában a homogén termikus burok megszakításával jár. A fázisváltó árnyékoló kiküszöbölhetné ezt a gyakran hőhidas megoldást. Karbantartása, tisztítása háztartási eszközökkel megoldható, nem igényel extra munkát, netán alpinistát, bármilyen magasan is helyezkedjen el. A homlokzat megjelenése függetlenné válhat az árnyékolási igényektől.

A PCM árnyékoló reflektív oldala olyan minőségű visszaverődést képes produkálni, mint a használatban lévő reflexiós bevonattal ellátott belső oldali árnyékolók. Ezzel a belső térben rekedt hő mennyisége körülbelül a 20-28%-a a beeső sugárzási nyereségnek. Ennek a maradék hőnek az elnyelését biztosítja a fázisváltó anyag. A számítások alapján ez lehetséges, tehát a PCM árnyékoló akár egyenértékűen is helyettesítheti a hagyományos külső oldali árnyékolót.



14. ábra: A reflexiós bevonattal ellátott belső oldali árnyékoló hatásfoka [28]

8. Számítás

8.1. A számítások célja

A számításokat a szerkezet működésének bizonyítására végeztük. A valós működés pontos adatai csak komolyabb szimulációval határozhatóak meg, aminek alapja egy modell, melynek paraméterei egy adott épület tulajdonságaitól függenek. A szimuláció tehát egyedi, vagy tipikusként meghatározott konkrét esetekre adhat eredményeket, míg az itt következő számítások általános érvényűek.

8.2. A PCM mennyisége

A GlassX kísérleti eredményei alapján az üvegszerkezetekbe integrált, mindössze 16 mm rétegvastagságú fázisváltó anyag jelentős hatást gyakorolt a belső tér lég hőmérsékletének

alakulására. Ez a termék átlagos nyílászárók üvegeként alkalmazva is megállta a helyét, így az ebben használt anyagmennyiség becslésként alapértéknek tekinthető. A számítás során ennél nagyobb vastagságban is vizsgáljuk a potenciális hőtároló kapacitást. A szerkezet tábla jellege miatt a rétegvastagsága a fajlagos anyagmennyiség meghatározója.

8.3. Számítás a fűtési időszakra

A működési leírásban szereplő állítások igazolása érdekében bizonyítjuk, hogy a fázisváltó árnyékoló alkalmazásával a direkt nyereségek hasznosulási tényezője akár az 1.00 értéket is megközelítheti. Ehhez példaként egy konkrét PCM jellemző adatait használjuk. Jelen esetben ez legyen a PlusICE által gyártott S23 típusú sóhidrát. Azt kell megvizsgálnunk, hogy a legnagyobb nyereséget mutató időszakban a nem hasznosuló hőmennyiséget képes-e elnyelni a fázisváltó anyag, miközben megolvad. Ha az épület alapterületére vonatkoztatott tömege 400 kg/m^2 alatti, akkor a 7/2006 TNM rendelet alapján, a PCM-nek a nyereség 50%-át kell elnyelnie. Ha ennél nagyobb az épület fajlagos tömege, akkor a nyereség 25%-át.

A fűtési időszakban a legnagyobb szoláris nyereség az október-novemberi és a március-áprilisi hónapban van. Ekkor a totális 400 kWh/m^2 nyereség 22,5%-a érkezik az épületre, azaz 90 kWh/m^2 . Ebből az átlagos napi nyereség is kiszámolható, ami $2,903 \text{ kWh/m}^2$. Ennek a hőmennyiségnek a hasznosulni nem képes hányadát kellene elnyelnie a PCM árnyékolónak. ^{[1][27]}

A számítás a PCM szükséges mennyiségét mutatja meg. Ez a szerkezet szempontjából annál jobb, minél kevesebb anyag használatával érhetjük el a kívánt hatásfokot. Ha tehát a naptényezőt a lehető legkisebb, $g=0,87$ értékűnek tekintjük, és teli üvegfelülettel számolunk, akkor a kívánt hatásfok nagyobb, mint a valóságban, így a pozitív irányba tévedünk. Számításunkban ezzel az egyszerűsítéssel élünk.

Fűtési időszak	D	Q_{TOT}	Q_D	Q_{haszn1}	Q_{PCM1}
	Napok száma	Maximális havi szoláris nyereség	Napi átlagos nyereség g-t figyelembe véve	Hasznosult nyereség 400kg/m ² fölött ($\epsilon=0,75$)	Elvárás a PCM árnyékolóval szemben ($1-\epsilon=0,25$)
	DB	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	$1-\epsilon=0,25$
			$(Q_{TOT}/D)*0,87$	$Q_{TOTD}*\epsilon$	$Q_{TOTD}*(\epsilon-1)$
			$(90/31)*0,87$	$2,903*0,75$	$2,903*0,25$
	31	90	2,526	1,894	0,631

Q_{haszn2}	Q_{PCM2}
Hasznosult nyereség 400kg/m ² alatt ($\epsilon=0,5$)	Elvárás a PCM árnyékolóval szemben ($1-\epsilon=0,5$)
$\epsilon=0,5$	$1-\epsilon=0,5$
$Q_{TOTD}*\epsilon$	$Q_{TOTD}*(\epsilon-1)$
$2,903*0,5$	$2,903*0,5$
1,263	1,263

5. táblázat: A fűtési időszakban elvárt teljesítmény

Az árnyékolóban a nappali nyereség felvétele közben a PCM szilárdból folyékony halmazállapotúvá válik, ezt követően az esti, éjjeli órákban az olvadáshő leadásával szilárdul vissza. Ez azt jelenti, hogy az energiatároló képesség egy nap leforgása alatt az egyszeri fázisváltásból származó látens hővel jellemezhető.

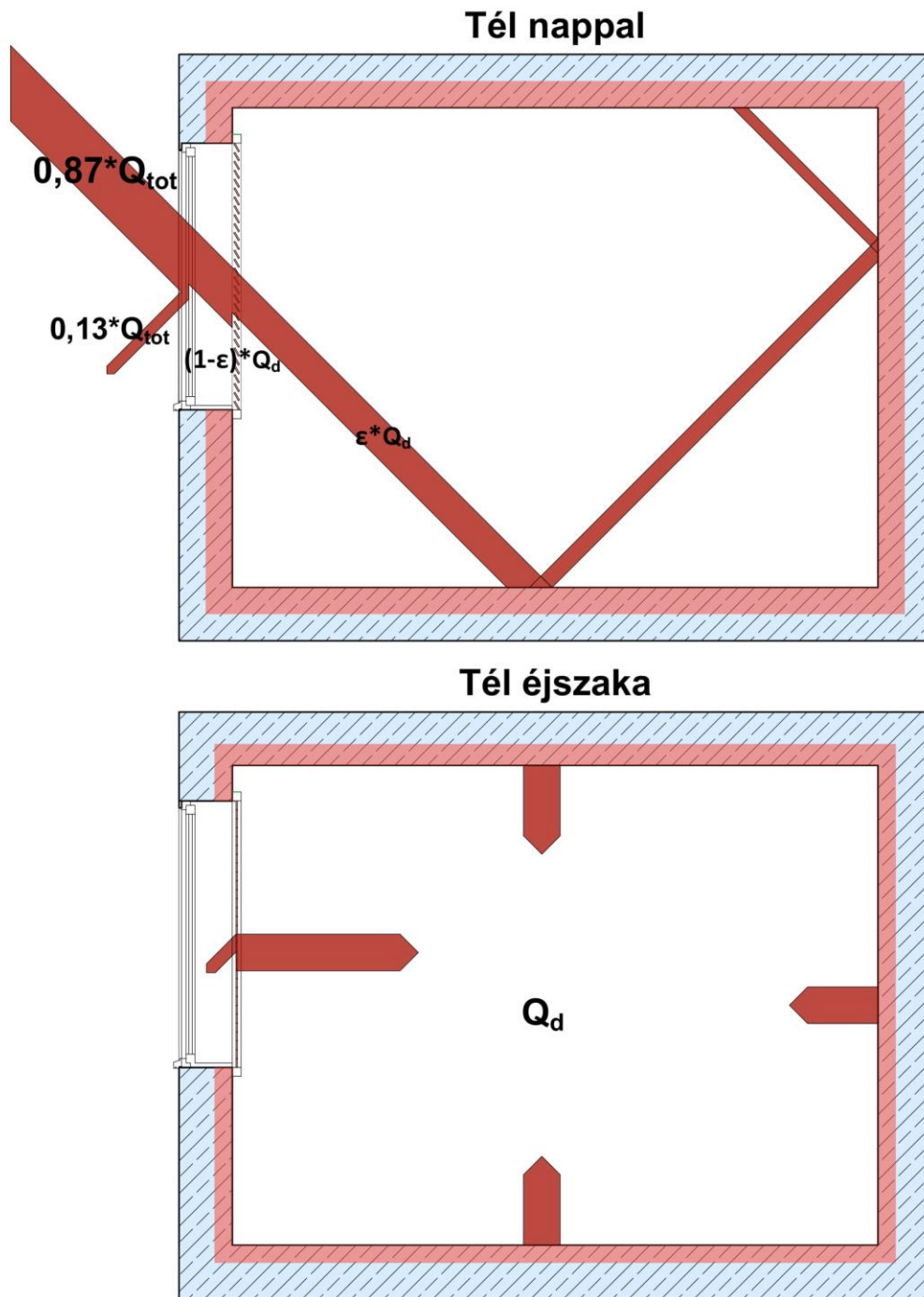
A PCM mennyiségének ismeretében a fázisváltáshoz tartozó hőtároló képesség az anyagi jellemzők alapján számítható ki. Ha az anyag elhelyezésekor az árnyékolóban alkalmazott rétegvastagságot tekintjük változónak, akkor az energiatároló képesség négyzetméterre vonatkoztatva is megadható, a kapacitás ebben az összefüggésben egyértelműen a rétegvastagság függvénye. Így összehasonlítható a nyereség elnyelni kívánt hányadával, hiszen azonos a két mennyiség dimenziója.

PCM: PlusICE S23 sóhidrát $T_{\text{küszöb}} = 23^{\circ}\text{C}$	Olvadáshő	Fajhő	Alkalmazott vastagság	Felület	Sűrűség	Alkalmazott mennyiség	A szerkezetben tárolódó látens hő	
	[kJ/kg]	[kJ/kg*K]	[m]	[m ²]	[kg/m ³]	[kg]	[kJ]	[kWh]
	$\Delta_m H$	c	d	A	ρ	m	Q_{PCM}	Q_{PCM}
						$d \cdot A \cdot \rho$	$\Delta_m H \cdot m$	$\Delta_m H \cdot m / 3600$
	175	189	0,016	1	1530	24,48	4284	1,190
	175	189	0,018	1	1530	27,54	4819,5	1,339
175	189	0,020	1	1530	30,6	5355	1,488	
175	189	0,022	1	1530	33,66	5890,5	1,636	
175	189	0,024	1	1530	36,72	6426	1,785	

6. táblázat: A szerkezet hőtároló kapacitása a fázisváltó anyag mennyiségének függvényében (egyszeri halmazállapot változás során)

Az eredmény szerint az árnyékolóban reális mennyiségű PCM elhelyezésével teljesíthető a maradék direkt nyereség tárolása. Nehéz épületszerkezetek esetén az árnyékoló hatékonysága már kevesebb fázisváltó anyag esetén is felülmúlja az elvárásokat, könnyebb szerkezetek esetén azonban már legalább 18 mm vastagságban érdemes a PCM-et alkalmazni. Mivel a követelményként számolt hőmennyiség a napi átlagot veszi figyelembe, inkább 20-24 mm rétegvastagság ajánlott, ez biztosítja a hatékony működést csúcsidőben is.

Ez a számítás megmutatja, hogy a szerkezet reális mennyiségű PCM alkalmazásával képes hatékonyan működni a fűtési időszakban, azaz használatával a direkt nyereségek hasznosulási tényezője az 1,00 értéket is megközelítheti. Számolnunk kell természetesen néhány százalék veszteséggel is, ami a kisebb visszaverődések miatt léphet fel, de ennek mértéke nem számottevő.



15. ábra: Sematikus működési ábra a fűtési időszakban

8.4. Számítás a hűtési időszakra

A szerkezet passzív hűtési képessége a fűtési időszakra vonatkozó számításhoz hasonló módon igazolható, ebben az esetben az árnyékoló hőtároló kapacitását a túlmelegedést okozó hőmennyiséggel kell összehasonlítani. A működési leírás szerint a beeső sugárzás 62%-a reflexiók bevonat segítségével visszaverhető, ekkor tehát az árnyékoló szerkezetnek a maradék 28%-ot kell elnyelnie ahhoz, hogy a túlmelegedést megakadályozza. Ha ennél több energia elnyelésére is alkalmas, akkor a belső tér levegőjéből is képes hőt elvonni.

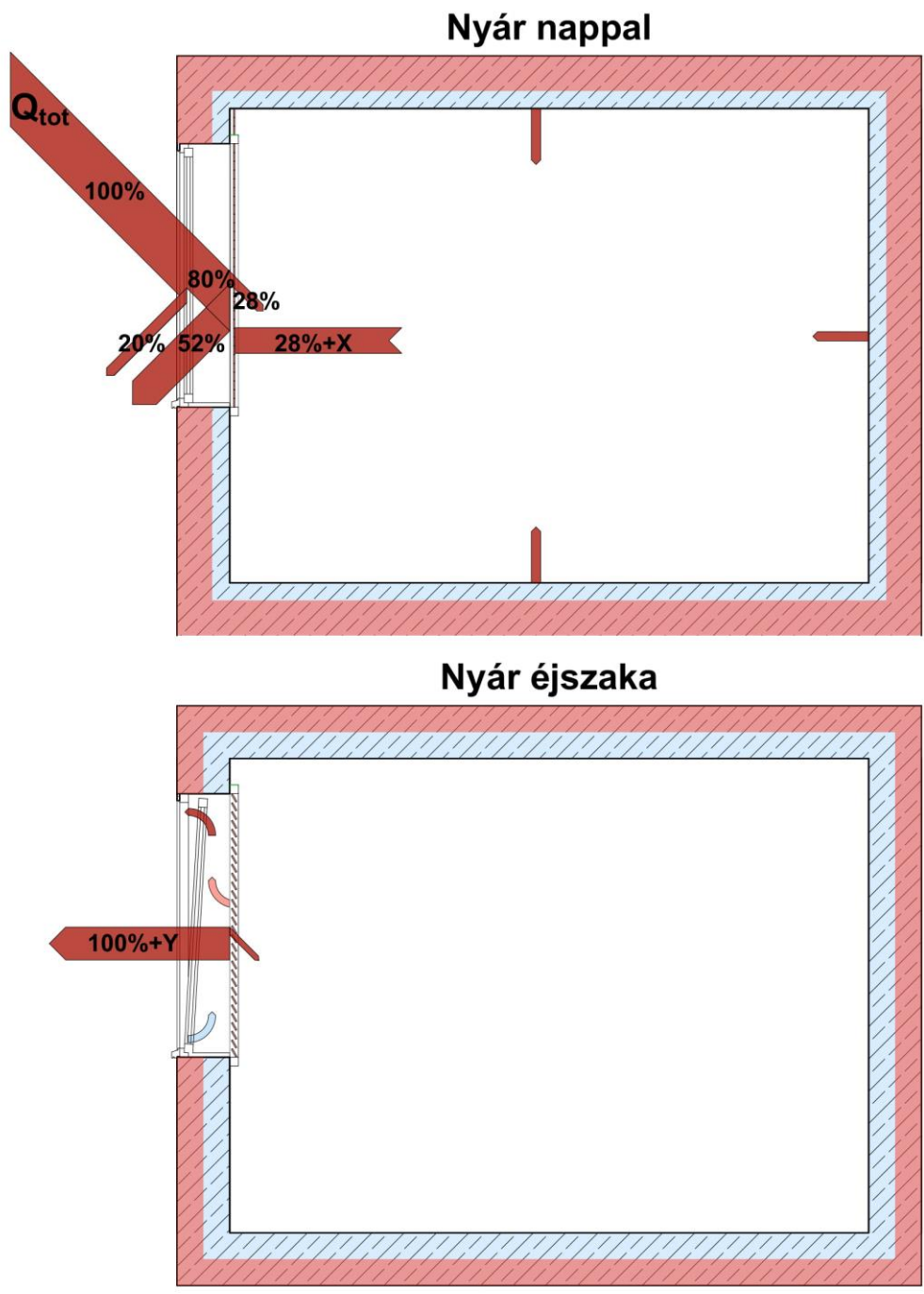
A nyári túlmelegedés veszélyének számításakor a 7/2006 TNM rendelet alapján havi 150 kWh/m² direkt nyereséggel számolunk, ennek a sugárzásból eredő hőmennyiségnek a 28%-át kell a fázisváltó anyagnak elnyelnie a nappali időszakban. A felesleges hőt az esti, éjjeli órákban a külső tér irányába adja le a szerkezet. Ebben az esetben is a napi egyszeri fázisváltás kapacitását hasonlítjuk össze az egy napi maximális nyereség elnyelni kívánt hányadával.

Hűtési időszak		Q_{TOT}	Q_D	Q_{haszn}	Q_{PCM}
	Napok száma	Maximális havi szoláris nyereség	Napi átlagos nyereség	Visszavert hányad (62%)	Elvárás a PCM árnyékolóval szemben (28%)
		[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]
			90/31	4,839*0,62	4,839*0,28
	31	150	4,839	3,04857	1,40331

7. táblázat: A hűtési időszakban elvárt teljesítmény

A szerkezet és az abban alkalmazott PCM tulajdonságai ugyanazok a fűtési és a hűtési időszakban is. Így a fenti táblázat alapján már a 20 mm-es rétegvastagságban elhelyezett S23 fázisváltó anyag is képes elnyelni a megfelelő mennyiségű energiát, ennél több PCM alkalmazásával már a belső tér léghőmérsékletét csökkenthetjük a nappali időszakban.

A számítás alapján tehát a fázisváltó árnyékoló szerkezet képes felvenni a versenyt a külső oldali árnyékolók hatékonyságával, illetve ezen felül még akár passzív hűtésre is alkalmas.



16. tábla: Sematikus működési ábra a hűtési időszakban

8.5. Optimális küszöbhőmérséklet

A fűtési időszakban a belső elvárt hőmérsékletet 22°C-nak állítjuk be. Ekkor az árnyékoló abszorbens felülete a napsugárzás hatására képes magasabb hőmérsékletre is felmelegedni. Ha a PCM 23°C-on olvad meg, akkor ez a nappali órákban be is következik, az anyag képes elnyelni a megfelelő hőmennyiséget. Ezt leadni akkor tudja, ha a közege alacsonyabb hőmérsékletű, tehát az elvárt 22°C éppen megfelelő ahhoz, hogy a 23°C alatt megdermedő fázisváltó anyag a belső tér irányába leadhassa a megfelelő mennyiségű hőenergiát.

A hűtési időszakban ugyanígy működik a PCM. A 23°C-nál magasabb hőmérsékletre melegedett belső tér irányából az árnyékoló szerkezet hőt von el, ezzel akadályozza a további túlmelegedést. A nyári éjszakai minimum hőmérsékleti adatokat figyelembe véve hazánkban 1-2 nap kivételével éjjelente tartósan 23°C alá csökken a hőmérséklet, így az éjjeli visszadermedés teljesülhet a számításunkban alkalmazott PCM esetében.

Mindezeket figyelembe véve a 23°C küszöbhőmérsékletű fázisváltó anyag általánosan alkalmas lehet az árnyékolónkban. Ez nem minden esetben igaz, hiszen a nyílászáró tájolásán is múlik a működés, illetve az épület belső elvárt hőmérséklete is befolyásolhatja az anyagválasztást. Ezek a tényezők az adott konkrét épülettől függnek, a 23°C egy általános irányadó mértéknek tekinthető.

9. Tervezett és javasolt további kutatási feladatok

Az elvi működés sémái és a számítási eredmények ígéretesek, a következő lépés szimulációk segítségével a konkrét szerkezet termék szintű megtervezése, majd annak valós alkalmazási és hatékonysági tesztje. Ehhez a lehető legtöbb általános szituációt érdemes megvizsgálni, a vizsgálatok mérési eredményei alapján a szerkezetet tovább fejleszteni, az adott szituációkra hangolni. Ez a munka elindult, tervezett eredményeinek publikálása egy következő dolgozat tárgya lehet.

Érdeemes lenne a PCM árnyékoló működését különböző szerkezeti felépítésű épületekben megfigyelni, de legalább pontosan szimulálni. Nagy tömegű szerkezetek esetében a PCM működése során más eredmények várhatók, mint könnyűszerkezetes épületeknél. A kifejlesztendő szerkezet részesedése az épület energiaháztartásában könnyű szerkezetek esetén nagyon jelentős

lehet, ugyanis ennek az építési módnak egyik legnagyobb hiányosságát, a gyenge hőtároló képességet a fázisváltó anyagok képesek lehetnek pótolni.

Egy épület összesített energiamérlegében a PCM árnyékoló szerepe igen változó lehet az épület hőszigetelésének mértékétől függően is. A komfortigények is változóak lehetnek, ami szintén kihat az árnyékoló hatékonyságára. Például egy temperált, esetleg csak ideiglenes használatú épület esetében az is elképzelhető, hogy a PCM árnyékoló képes a hőmérsékleti igényeket teljes mértékben önállóan, egyéb gépészeti rendszer nélkül kielégíteni. Az adott üvegszerkezet minősége is jelentősen befolyásolhatja a hatékonyságot, ahogy az üveg felületi arányai is.

További fontos kutatási irány a fázisváltó anyagot tartalmazó szerkezetek együttműködési lehetőségeinek vizsgálata. A modern, energetikailag méretezett épületek esetében akár egyszerre több ilyen szerkezet is alkalmazható. Ezek egymásnak hatásfok növekedést, de csökkenést is okozhatnak. Az adott épület geometriájához, és térfogatához meghatározható lenne egy optimális PCM mennyiség, amit energetikai szempontok alapján érdemes alkalmazni.

10. Összegzés

A fázisváltó anyagok ígéretes potenciált jelentenek az épületek energiaigényének csökkentése szempontjából. Épületszerkezeti kihasználásuk egyre sokrétűbb, egyre kifinomultabb lehetne. Az ilyen szerkezetek elterjedését mindenképpen ösztönöznünk kell, ennek érdekében a jövő kutatási célja olyan költséghatékony megoldások kifejlesztése, melyek a nagyközönség számára is elérhetőek. E hatékonyan működő szerkezetek széles körű elterjedése jelentős fűtési és hűtési energiaigény csökkenést eredményezhet az épületeinken, ezzel egy újabb, globális lépést tehetnénk az erőforrások felhasználásának csökkentése irányába.

A konstrukciós javaslat a PCM kutatás eddigi eredményein alapszik, azokra támaszkodva célozza meg egy nagyobb körben elterjeszhető, több problémára egyszerre reagáló szerkezet kialakítását. Lényeges előnye, hogy könnyen beilleszthető a holisztikus szemlélettel tervezett energiahatékony épületekbe, de a hőtechnikailag legkedvezőtlenebbekbe is. Olyan elem, mely nem feltétlenül meghatározó az épület építészeti koncepciója szempontjából, hiszen a nyílászárók alig észrevehető tartozéka a belső árnyékoló szerkezet; ennek ellenére, ha a tervezés során minél több PCM beépítése a cél, akár kiemelt elem is lehet ez az árnyékoló. A meglévő épületek korszerűsítése során

még nagyobb jelentőséget tulajdoníthatunk egy ilyen szerkezetnek, hiszen nagyon egyszerűen utólag is, gyorsan és tisztán beépíthető. Hatékonysága ilyenkor elsősorban az adott üvegfelület nagyságán és minőségén múlik, de az adottságokat maximálisan kihasználhatja. Egyszeri és gyors beavatkozásként akár egyéb korszerűsítési eljárásoktól függetlenül is alkalmazható.

PCM árnyékoló kialakítási javaslatunk olyan elvi működésen alapul, aminek számításaink szerint a valóságban kellően nagy hatékonysága lehet. A szerkezet pontos kidolgozása és a fázisváltó anyagokkal kapcsolatos újabb felvetések vizsgálata további kutatómunkát igényel.

A fázisváltó anyagok épületszerkezeti alkalmazása a jövő ígéretes megoldásai közé tartozik.

11. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani Dr. Becker Gábor tanár úrnak a téma felkínálásáért és a kidolgozása során mindvégig nyújtott segítségért és támogatásért, és Szikra Csaba tanár úrnak a számításokban nyújtott segítségért. Továbbá köszönöm Dr. Jelinkó Róbert úrnak és Szegedi Anitának a Lasselsberger-Knauf alkalmazástechnikai vezetőjének és termékmenedzserének a rendelkezésemre bocsátott információkat.

12. Irodalomjegyzék

- ¹ Szikra Csaba: A szolári épületek szerkezeti és méretezésük, előadássorozat anyaga
- ² Reis Frigyes - Várfalvi János - Zöld András: Az épületfizika alapjai, 22-27.o., egyetemi jegyzet Budapesti Műszaki Egyetem
- ³ Dr. Fülöp László PTE: Épületek hőtechnikai előírásai, energetikai mutatók, előadás anyag
<https://docplayer.hu/232432-Epuletek-hotechnikai-eloirasai-energetikai-mutato.html>
- ⁴ https://holnaphaz.blog.hu/2014/01/22/energiagyujto_fal
- ⁵ Magyar Kémikusok Lapja, LXIX. évf. 12. szám 2014. december 368-372. oldal
http://real.mtak.hu/20091/1/Magyar_Kemikusok_Lapja_2014_12_u_132919.648218.pdf
- ⁶ <https://docplayer.hu/46111693-Termodinamikai-rendszerek-kalorimetria-extenziv-es-intenziv-mennyisegek-hokapacitas-fajho-mennyi-a-felvett-ho.html>
- ⁷ <https://www.briangwilliams.us/weather-change/latent-heat-and-adiabatic-cooling-and-warming.html>
- ⁸ Balogh Diána, Hódosi Dániel, Hollósi Katalin: Fázisváltó anyagok az energiatudatos építészetben, BME TDK, 2012
- ⁹ https://pdfs.semanticscholar.org/631b/c9d9432c3c96a8499fd450311628d7319d21.pdf?_ga=2.267337870.1462436122.1536581718-1724016294.1536581718
- ¹⁰ <https://www.1-act.com/pcmselection/>
- ¹¹ <http://microteklabs.com/how-do-pcms-work.html>
- ¹² <http://www.ofroom.at/basf-micronal-pcm/>
- ¹³ <http://www.pcmproducts.net/files/PlusICE%20Range-2013.pdf>
- ¹⁴ <http://phasechangematerials.blogspot.com/2011/09/phase-change-material-trombe-wall.html>
- ¹⁵ A Lasselsberger-Knauf által küldött információk alapján
- ¹⁶ <http://www.rigips.com/alba.html>
- ¹⁷ <http://glassx.ch/index.php?id=314>
- ¹⁸ https://www.researchgate.net/publication/257227544_Review_of_passive_PCM_latent_heat_thermal_energy_storage_systems_towards_buildings%27_energy_efficiency

- 19 <https://www.researchgate.net/publication/261099613> Numerical evaluation of a phase change material-shutter using solar energy for winter nighttime indoor heating
- 20 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814010093>
- 21 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431115002835>
- 22 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916309011?via%3Dihub>
- 23 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816300032>
- 24 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881500119X>
- 25 <https://link.springer.com/article/10.1007/s40243-015-0047-8>
- 26 Mehling Harald. Strategic project “Innovative PCM-Technology” ---results and future perspectives, 8th expert meeting and work shop, Kizkalesi, Turkey, April 18-24, 2004.
[https://www.semanticscholar.org/paper/on-thermal-energy-storage-with-phase-change-\(PCMs-Zhou-Zhao/631bc9d9432c3c96a8499fd450311628d7319d21/figure/11](https://www.semanticscholar.org/paper/on-thermal-energy-storage-with-phase-change-(PCMs-Zhou-Zhao/631bc9d9432c3c96a8499fd450311628d7319d21/figure/11)
- 27 <http://www.physics.ttk.pte.hu/pages/munkatarsak/nemetb/10-SzkDolg-2010-MengyanTamas-hotarolas.pdf>
- 28 <https://kreativlakas.com/napos-haz/ablakok-es-hatarolok-uvegezese-hoszigetelo-uvegezes/>