



## A kettős üveghomlokzat hatása az irodaépületekre – a szingapúri példa

*Számos előnyös tulajdonsága miatt a teljes üveghomlokzatot egyre gyakrabban alkalmazzák irodaházakon Szingapúrban is. A trópusi viszonyok miatt egyszeres üveghomlokzat alkalmazása esetén azonban nagy a légkondicionálás energiafogyasztása, hőszabályozási és zajvédelmi problémák merülnek fel. E problémák kiküszöbölése érdekében célszerű kettős üveghomlokzatot alkalmazni. Az összeállítás modellezési módszerek alapján összeveti a két üvegfal közötti térrész különféle szellőztetési módszereinek hatását. A hőmérsékleti kényelemérzet eléréséhez elegendő a természetes konvekció, a kéményhatás kihasználása, de az éjszakai párakicsapódás csak mechanikai szellőztetés, ventilátorok alkalmazásával szüntethető meg.*

---

Tárgyszavak: kettős üveghomlokzat; TAS; CFD; természetes konvekció; szellőzés; modellezés.

---

Számos előnyös tulajdonsága miatt a teljes üveghomlokzatot egyre gyakrabban alkalmazzák Szingapúrban. Csökkenti a világításra fordított energiafogyasztást a természetes fény kihasználása révén, valamint teljes kilátást tesz lehetővé. Az esztétikum, az építészeti divat is mellette szól. Az egyszeres üveghomlokzat alkalmazása esetén azonban nagy a légkondicionálás energiafogyasztása, hőszabályozási és

zajvédelmi problémák merülnek fel. E problémák kiküszöbölése érdekében célszerű kettős üveghomlokzatot alkalmazni. A két üvegfelület közötti térben a levegő áramlását, így az ott keletkező hő és a lecsapódó nedvesség elszállítását többféle módon lehet elérni: a természetes áramlás is elegendő lehet a kéményhatás miatt, de alkalmazható keringető ventilátor is. Ez utóbbi esetben a levegő mozgásának se-

bessége tág határok között változtatható, de ennek növelése egyben a keringetés energiaigényét is fokozza. Általános az a nézet, hogy a szellőzéses kettős üveghomlokzattal energia takarítható meg, kellemes hőérzet érhető el, és a nagy közlekedési zajszintű belvárosi környezetben elegendő zajvédelmet tesz lehetővé. A Szingapúrban uralkodó nedves trópusi időjárás további kihívásokat jelent a tervezőknek.

## **Európai és amerikai tapasztalatok**

Az elmúlt években számos kísérleti, numerikus és elméleti vizsgálat járult hozzá a kettős üveghomlokzatú építési rendszerek jobb megértéséhez. Németországban három kettős homlokzatú épületet vizsgáltak. A dortmundi Siemens-épület teljes légkondicionáló berendezését leszerelték. A mérések szerint, bár a homlokzat üvegrétegei közötti térben a hőmérséklet 10 °C-kal meghaladta a külső hőmérsékletet, a belső hőmérséklet a megengedhető határértékek között maradt. A düsseldorfi Viktória Biztosító Társaság hűtőrendszere mechanikai szellőztetés nélkül működött. Bár a hőmérséklet a homlokzat terében 8 °C-kal nagyobb volt a külső hőmérsékletnél, az egész év folyamán csak 46 órán át haladta meg a belső hőmérséklet a 26 °C-ot. Az esseni RWE toronyépületben mind hűtőberendezés, mind

mechanikai szellőztetés működött. A homlokzat terében az átlagos hőmérséklet 15 °C-kal haladta meg a külső hőmérsékletet, ez azonban csak mérsékelt hatással volt a belső hőmérsékletre.

Egy másik vizsgálat során spektrális optikai modellt és a számítógépes áramlásdinamikai (computational fluid dynamic, CFD) modellt használták a napenergiának az épület belső részeibe való behatolásának modellezéséhez. A két módszer kombinációja tekintetbe veszi a hőáramlást, a hővezetést és a hőszugárzást, ezért alkalmas a kettős üveghomlokzat modellezésére. Kimutatták, hogy a jól tervezett, természetes konvekciójú kettős üveghomlokzat képes a másodlagos hőátadási tényezőt 2%-kal, a napenergia teljes átbocsátási tényezőjét pedig 10%-kal csökkenteni.

Egy további vizsgálat során a TAS szoftver (thermal analysis software = hőtani elemző program) segítségével összehasonlították az egyszeres és kettős üveghomlokzatú épületek termikus viselkedését. A vizsgálatok során tekintetbe vették a homlokzat és a szél irányát, a szélvédettség mértékét. Arra a következtetésre jutottak, hogy a szél hatása és a kéményhatás egyes esetekben egymást ellensúlyozza. A rétegek közötti levegő keringési sebességét a viszonyoknak megfelelő változó módon javasolták beállítani.

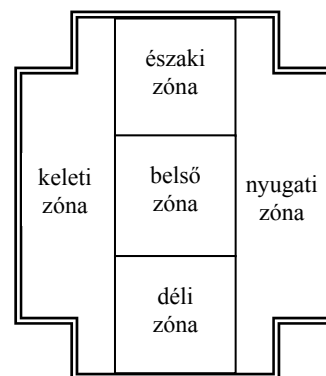
Mivel Szingapúr éghajlata nedves és meleg, a természetes szellőzés az irodaépületekben általában nem jöhet szóba, a légkondicionálás elkerülhetetlen. Elképzelhető, hogy a második üvegréteg alkalmazása ezt a megszokást is megkérdőjelezi, illetve az is vizsgálendő kérdés, hogy elegendő-e a természetes szellőzés a homlokzat két üvegrétege között. Ezen összeállítás az energiafelhasználás, a hőérzet és a párakicsapódás szempontjaiból elemzi az egyes változatokat.

### Az alkalmazott módszerek

A kutatásokban az imént már említett TAS és CFD modellezési eljárásokat használták. A TAS többzónás szimulációs szoftver, amely jól alkalmazható az összes megcélzott szempont elemzésére, tehát az energiafogyasztás számítására, a kellemes hőérzet és a kicsapódási problémák vizsgálatára. Ahhoz, hogy pontosan ismerjék a légcseré sebességét a homlokzati térben, a CFD-t használták fel a kettős homlokzat áramlási terének számításához.

Háromféle épületet modelleztek a vizsgálatok során: szintjeik száma hat volt, alaprajzuk egyforma volt, a szimulációt mindhárom esetben az 1. emeletről az 5. emeletig végezték el. Az

első modell egyszeres üveghomlokzatú épület, a második modell kettős üveghomlokzatú rendszer, amelynél a rétegek közötti tér természetes szellőzését csak a kéményhatás okozza. A külső hőelnyelő üvegréteg 1 m távolságra van a belső homlokzattól. A harmadik modell mechanikus szellőztetésű, kettős üveghomlokzatú rendszer. A ventilátorokat a kettős homlokzat terének tetején helyezték el a légmozgás gyorsítása céljából. Az épületek alaprajzát és az egyes zónák elhelyezkedését az 1. ábra mutatja be, az egyetlen különbség a második üvegréteg megléte, illetve hiánya. Az egyes modellekre vonatkozó bemeneti paramétereket és anyagi jellemzőket az 1. és 2. táblázat adja meg. A számítások során a szingapúri felhőtlen napokra vonatkozó évi átlagos merőleges napsugárzási intenzitásokat használták, a tájolásnak megfelelően. A CFD modellel végzett számítás eredményeit a 3. táblázat foglalja össze.



1. ábra Az épületváltozatok alaprajza és zónái

1. táblázat

Az épület jellemző adatai

	Egyszeres üveghomlokzat	Kettős üveghomlokzat, kéményhatás	Kettős üveghomlokzat, mechanikus szellőztetés
Emeletek magassága (m)	4,5	4,5	4,5
Zónák száma emeletenként	5	5	5
Zónák száma összesen	25	25	25
Száraz belső hőmérséklet (°C)	23–25	23–25	23–25
Relatív páratartalom (%)	75	75	75
A légcserre sebessége	0,2 légcserre/h minden zónában	0,2 légcserre/h minden zónában	0,2 légcserre/h minden zónában
A világítási teljesítmény (W/m <sup>2</sup> )	Észak: 16,7 Kelet: 16,3 Dél: 16,7 Nyugat: 16,3 Belső: 3,1	Észak: 16,7 Kelet: 16,3 Dél: 16,7 Nyugat: 16,3 Belső: 3,1	Észak: 16,7 Kelet: 16,3 Dél: 16,7 Nyugat: 16,3 Belső: 3,1

2. táblázat

Felhasznált építési anyagok

	Egyszeres üveghomlokzat	Kettős üveghomlokzat, kéményhatás	Kettős üveghomlokzat, mechanikus szellőztetés
Üveg	Átlátszó, belső árnyékolás	Átlátszó kettős üveg, árnyékolás a belső oldalon; 6 mm-es hőelnyelő üveg a külső oldalon	Átlátszó kettős üveg, árnyékolás a belső oldalon; 6 mm-es hőelnyelő üveg a külső oldalon
Tető	Betonlemez (k = 0,25 W/m <sup>2</sup> °C)	Betonlemez (k = 0,25 W/m <sup>2</sup> °C)	Betonlemez (k = 0,25 W/m <sup>2</sup> °C)

3. táblázat

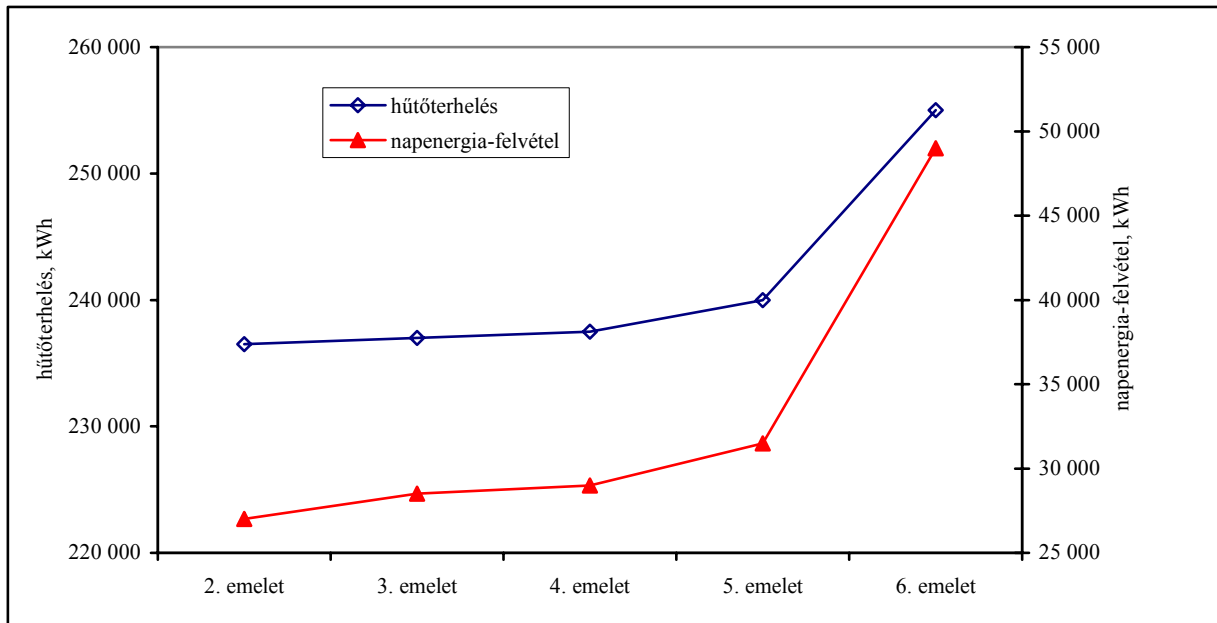
A CFD szimuláció eredményei

	Kettős üveghomlokzat, kéményhatás	Kettős üveghomlokzat, mechanikus szellőztetés
Rács	30 × 100, 1 m × 30 m-es egységek	30 × 100, 1 m × 30 m-es egységek
A szellőztetés típusa	Kéményhatás a külső és belső homlokzat közötti üregben	Mechanikai szellőztetés
A szellőztetés sebessége (légcserre/óra)	Észak: 111 Kelet: 131 Dél: 113 Nyugat: 131	320 az északi, a keleti, a déli és a nyugati zónára

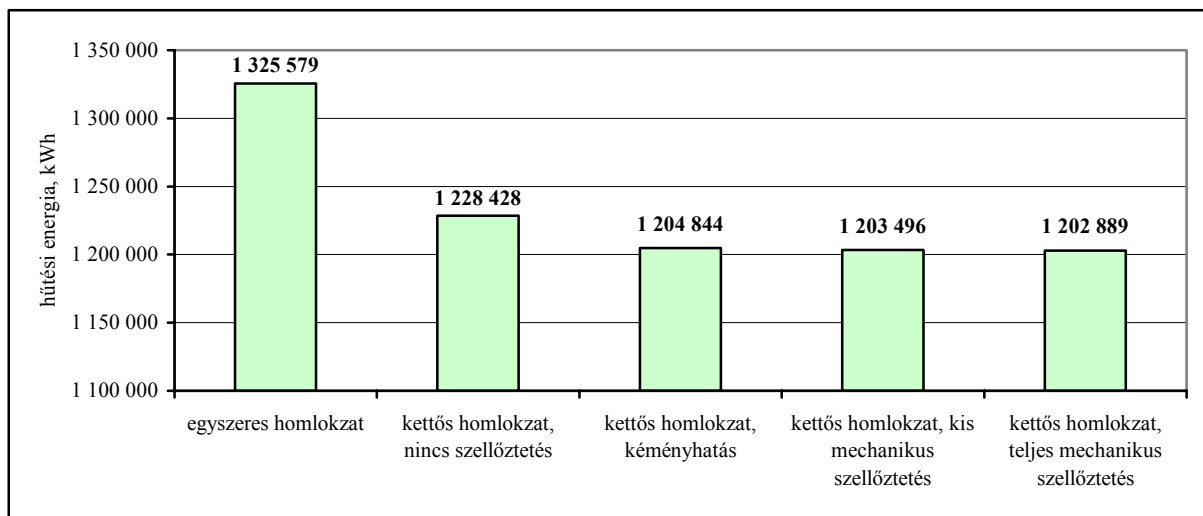
## Eredmények: energiafelhasználás

A szimulációk érdekes módon azt mutatták, hogy a hűtés teljesítményigénye az alacsonyabb emeletektől a magasabbak felé haladva növekszik; ez annak a következménye, hogy a homlokzat napenergia-felvétele a magassággal növekszik (2. ábra). A tájolás is szerepet játszik

ebben: nagyobb napenergia-felvételt találtak kelet-nyugati tájolás esetében, ami nagyobb hűtőterhelést von maga után. Mivel a kettős üveghomlokzat jelentősen képes csökkenteni a napenergia-felvételt, a tájolástól való függés sokkal nagyobb az egyszeres üvegréteg esetén, mint a kettősénél, ez utóbbinál a levegőkeringetés módjától gyakorlatilag függetlenül.



2. ábra A hűtőterhelés és a napenergia-felvétel kettős üveghomlokzatnál az egyes emeleteken



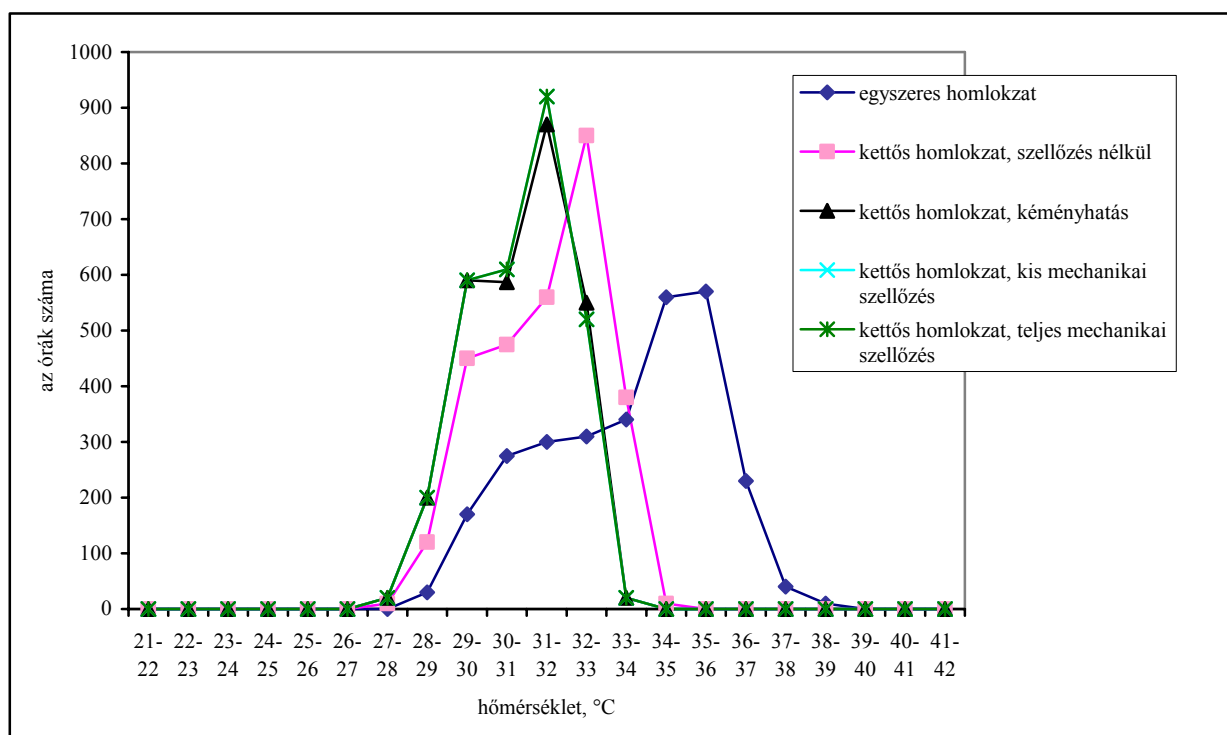
3. ábra Az éves hűtési energiaigények az ötféle modellre

A 3. ábrából kiderül, hogy az éves hűtési energiaterhelés a kettős homlokzat alkalmazásával jelentősen csökken (a csökkenés közel 120 MWh/év 1325 MWh/évről). Ez két tényezőnek tulajdonítható: az egyik a napenergia-felvétel nagyfokú csökkenése, a másik a hom-

lokzat szellőzése, ami hőt von el, és csökkenti a belső felület hőmérsékletét. Érdekes azonban, hogy nincs nagy különbség a kétféle keringetés között: a mechanikus ventilátor esetében csekély (kb. 1,3 MWh/év) a hűtőterhelés további csökkenése a kéményhatást hasznosító

modellhez képest. Ezt az értéket 2 m/s levegőáramlási sebességre kapták, a sebesség növelése 6 m/s-ra csak további 0,6 MWh/év csökkenést eredményez a hűtési energiafelhasználásban. A költségekre átszámítva (minden kWh megtakarításánál 0,7 USD költségcsökkenést feltételezve) kettős homlokzatnál kéményhatás esetén a várható megtakarítás évi 8451,45 USD. A mechanikus szellőztetés további évi 100-130 USD megtakarítást eredményez. Tehát bár a ventilátorral ellátott kettős homlokzatú modell esetében a légcserese sebessége nagymértékben megnő, ez mégsem csökkenti jelentősen a hűtőterhelést a második modellhez képest. Ebből úgy tűnik, hogy a szellőztetés módjának nincs nagy szerepe a hűtőteljesítmény alakulásában.

A szellőzés módja ugyanakkor jelentős szerepet játszik mindkét üvegfelület hőmérsékletének alakulásában. A 4. ábra bemutatja a belső üvegfal belső felületi hőmérsékletének valószínűségeit (az éven belüli órák számát) az egyes szellőztetési módokra. A kettős üveghomlokzat nem csökkenti, hanem az üvegházhatás miatt növeli a belső felületi hőmérsékletet. A belső felület hőmérsékletének legvalószínűbb értéke az egyszeres üveghomlokzat esetén a legnagyobb, 35–36 °C. Szellőzés nélküli kettős üveghomlokzat esetében a legvalószínűbb hőmérséklet 32–33 °C a kisebb hőfelvétel miatt. Szellőztetés esetén a legkisebb a kettős üveghomlokzat esetében a legvalószínűbb hőmérséklet, értéke 31–32 °C, a szellőztetés módja azonban alig játszik szerepet.



4. ábra A belső üvegréteg belső felületének hőmérsékleti valószínűségei

## Eredmények: termikus komfortérzet

A termikus komfortérzetet (hőmérsékleti kényelemérzetet) a második, a negyedik és a hatodik emeletre vizsgálták mindegyik modellre. Egy-egy napot választottak ki a szingapúri időjárásra jellemző két évszaktól: június 20. jellemző a meleg száraz évszakra, december 21. pedig a viszonylag hűvösebb esős évszakra. A Fanger-féle termikus komfort modell\* alapján a PMV-indexet (PMV predicted mean vote – az előre jelzett várható értékelés) és a PPD-indexet (percentage of people dissatisfied – az elégedetlen emberek százalékos aránya) számolták minden modellre és minden tájolasra. A zónák és a modellek között összehasonlító vizsgálatokat végeztek. Termikus komfortnak azt az állapotot tekintették, amikor az emberek 80%-a elégedett. A 20 %-os PPD  $\pm 0,85$  PMV-nek felel meg. Ha a PMV-index kisebb

mint  $-0,85$ , ez elfogadhatatlanul hidegnek, ha nagyobb mint  $+0,85$ , ez elfogadhatatlanul melegnek felel meg. A levegő hőmérsékletét és a relatív páratartalmat a TAS-modell alapján határozták meg, a légkondicionált helyiségekben a légáramlás sebességét  $0,15$  m/s-nek tekintették.

A 4. táblázatból kiderül, hogy a PPD-index kisebbnek bizonyult a kettős, mint az egyszeres üveghomlokzat mellett. Kettős homlokzat esetén a kéményhatás és a mechanikus szellőzés között alig volt különbség. Az egyszeres homlokzat nem tette lehetővé a termikus komfortérzetet, mivel a PPD mutató értéke nagyobb volt 20%-nál. A PPD-középértékek alapján a kettős homlokzat választása 5%-kal több embert tesz elégedetté, mint az egyszeres homlokzat. Kettős homlokzat esetén a mechanikus szellőztetés csak további 0,05%-kal növeli az elégedett emberek számát.

4. táblázat

A PMV és a PPD mutatók közepes értékei a három modellre

	Egyszeres homlokzat		Kettős homlokzat, kéményhatás		Kettős homlokzat, mechanikai szellőzés	
	Június	December	Június	December	Június	December
PMV	0,96	0,89	0,82	0,78	0,81	0,77
PPD (%)	24,5	22,0	19,6	18,0	19,5	18,0

\* Hét fokozatú skála, végpontjai a  $-3$  és  $+3$ ; az előbbi a hidegnek, az utóbbi a forrónak felel meg

A PMV és a PPD indexek minden modellre júniusban kedvezőbbek, mint decemberben a decemberi hűvösebb idő miatt. A legjobb hőmérsékleti kényelemérzet decemberben az északi zónában, a második emeleten valószínűleg a kettős üveghomlokzat alkalmazása mellett. A legkedvezőtlenebb a termikus komfort június folyamán a keleti és nyugati zónában, a hatodik emeleten egyszeres üveghomlokzat alkalmazása mellett.

### **Eredmények: a pára kicsapódás**

A pára kicsapódás vizsgálatához olyan hét napot választottak ki, amelyekre mind szélsőséges, mind mérsékelt időjárási viszonyok jellemzőek Szingapúrban. A kiválasztott napok: január 2., június 3., május 30., április 16., szeptember 17., november 1. és november 15. E napokon az épületek összes zónájában és a felületeken ellenőrizték, hogy bekövetkezett-e pára kicsapódás.

Június 3.-án, május 30.-án és november 17.-én, amikor a külső hőmérséklet  $26,5\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a relatív nedvesség  $70\text{--}85\%$  volt napközben, pára kicsapódást nem tapasztaltak. E napokon pára kicsapódást éjjel sem tapasztaltak, ekkor a külső hőmérséklet  $25\text{--}26,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a relatív páratartalom  $85\text{--}95\%$  volt, csak reggelre érte el a  $100\%$ -ot. Bár éjjel a relatív nedvesség nagyon nagy volt,

de a külső felület és a környezeti levegő hőmérséklete közötti különbség csak  $0,1\text{--}0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  volt, így a vízgőz nem érte el a telítési pontot.

November 1.-én kicsapódást tapasztaltak a kettős homlokzat esetében éjjelkor, de nem találtak kicsapódást egyszeres üveghomlokzatnál. Ez avval magyarázható, hogy az egyszeres üveghomlokzat felületi hőmérséklete ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) megegyezik a külső hőmérséklettel. A kettős üvegfalú üreg levegőjének hőmérséklete  $25,7\text{--}26\text{ }^{\circ}\text{C}$ , míg a külső üvegborítás belső felületének hőmérséklete csak  $25,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , így a kicsapódás végbement. A kicsapódás mértéke a szellőzés nélküli és a természetes konvekciójú esetben hasonló, mivel a két modell között az éjszaka során nincs különbség. A mechanikai szellőztetés a kettős üvegfal közti üregben a levegő hőmérsékletét  $25,7\text{--}26\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ról  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra csökkenti, ami közel van a külső fal belső felületének hőmérsékletéhez, ezért megszűnik a kicsapódás. A felületi hőmérsékletek különbsége miatt a kicsapódás mértéke kelet-nyugat irányú homlokzat mentén kisebb, mint az észak-dél irányú homlokzat mentén, ez a napközbeni napenergia-elnyelés különböző mértéke miatt történik.

A vizsgált napok közül január másodikán a legnagyobb Szingapúrban a relatív páratartalom, ezért kicsapódás fordult elő este 9 órától másnap reggel 6–8 óráig a külső hőelnyelő



üvegfal belső és külső felületén is. A novemberi esethez hasonlóan csak a mechanikai szellőztetés szüntette meg a kicsapódást. A részletek mellőzésével elmondható, hogy a kicsapódás mértékénél szerepet játszott mind a tájolás, mind a magasság, de a mechanikai szellőztetés mindegyik esetben teljesen meg tudta szüntetni a párakicsapódást.

### Következtetések

A kettős üveghomlokzat természetes konvekció, csak kéményhatás mellett elegendő hő von el a homlokzatok közötti üregből ahhoz, hogy a belső felület hőmérséklete alacsonyabb legyen. A levegő áramlásának gyorsítása mechanikus szellőztetéssel, ventilátorokkal elősegíti a hőelvonást, de a megtakarított energia elhanyagolható a beszerelés és a fenntartás árához képest. A kettős üveghomlokzat külső felületének hőmérséklete nagyon magas az üveg hőelnyelő képessége miatt. A kettős üvegfalú üregben bekövetkező hőleadás miatt azonban a belső üvegfal hőmérséklete kisebb, így a belső térnek továbbadott napenergia minimális.

A kettős üveghomlokzat tehát jó eszköz a hőmérsékleti kényelemérzet eléréséhez többemeletes irodaházakban. A termikus komfort majdnem az összes szinten és zónában elérhető, kivételt képez a hatodik emelet a június

hónap során. Ezt az idézi elő, hogy a kettős homlokzat közötti üregben a hőmérséklet a magasabb emeletek felé haladva a nagyobb hőfelvétel miatt növekszik. A termikus komfort szintjének egyenletessége és irányfüggesének csökkenése kettős üveghomlokzat alkalmazása esetén arra utal, hogy a keleti és nyugati tájolás mentén fellépő kéményhatás elegendő a megfelelő hőelvonás elérésére.

A nagy páratartalmú éjszakákon a külső környezet és az üvegfelület közötti hőmérsékletkülönbség a párakicsapódás legfőbb oka. Mechanikus szellőztetéssel, ventilátorok üzemeltetésével a párakicsapódás megelőzhető. A ventilátorok teljesítményét a kondenzáció mértékének megfelelően szabályozva a felhasznált energia minimalizálható.

**Összeállította: Schultz György**

### Irodalom

- [1] Hien, W. N.; Liping, W. stb.: Effects of double glazed facade on energy consumption, thermal comfort and condensation for a typical office building in Singapore. = Energy and Buildings, 37. k. 6. sz. 2005. p. 563–572.
- [2] Grabe, J. V.: A prediction tool for the temperature field of double facades. = Energy and Buildings, 34. k. 10. sz. 2002. p. 891–899.