

Doktori (PhD) értekezés tézisei

**Légtechnikai rendszerek hűtési energia igényének
csökkentése indirekt evaporatív léghűtővel**

Kostyák Attila

Témavezető: Dr. Csáky Imre



DEBRECENI EGYETEM

Pekár Imre Gépészeti Tudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2025

1. Bevezetés

A fejlett országokban az emberek életüknek csaknem 90 %-át töltik épületen belül. Az épületben a határolószerkezetek által körül határolt tér biztosítja a tevékenységek elvégzéséhez, pihenéshez szükséges feltételeket. Az épületek üzemeltetése során célunk, hogy az emberek komfortigényének megfelelő belső környezeti minőséget kialakítsuk és fenntartsuk. Az épületek belső környezeti minőségének fenntartása jelentős energiafelhasználást eredményez. Magyarországon az energia közel 40 százalékának felhasználása az épületekben keletkező igények kiszolgálásához kötődik. Az épületekben felhasznált energia közel kétharmada fordítódik a fűtési és hűtési igények kielégítésére.

Magyarország éghajlata folyamatos változásokon megy keresztül, amelynek eredményeként a nyári középhőmérséklet és a hóhullámok száma és intenzitása egyaránt növekedett. A modern épületekben a gépi hűtési rendszer megoldások alkalmazása egyre szélesebb körben elterjedt az elvárt komfortszint fenntartása érdekében. A légkondicionáló rendszerek széleskörű alkalmazása a csúcsterhelési időszakokban jelentős problémákat okoz, növelve a villamosenergia-költségeket és felborítva az energiaegyensúlyt.

Az épületekben elvárt komfortszint fenntartására felhasznált hűtési energia mennyisége nagy mértékben függ az épület fizikai adottságaitól, a kiszolgáló épületgépészeti rendszer műszaki színvonalától, valamint az üzemeltető és vezérlő automatika rendszerek képességeitől.

A belső környezet minőségét a belső levegő minősége és a tartózkodási zónában kialakuló hőérzet érdemben befolyásolja. E tényezőkre a légtechnikai rendszerek jelentős hatást gyakorolnak. A modern légtechnikai rendszerek feladata a friss levegő kezelése (szűrése, temperálása, páraszintjének szabályozása), valamint az igényelt hűtési és fűtési energia egy részének vagy egészének a tartózkodási zónába juttatása. Az előállított befűvási légállapot a komfort zóna légállapotjelzőinek értékeitől, a helyiségben megvalósuló állapotváltozásoktól, valamint a szellőztető levegő mennyiségétől függ.

A levegő kezelése során felhasznált energia mennyiségének csökkentése érdekében különböző hőviszanyerő rendszer megoldások kerültek beépítésre a légkezelő berendezésekbe. A hőviszanyerés során cél, hogy a távozó levegő energiát adjon át (fűtési esetben), vagy energiát vonjon el (hűtési esetben) a kezelt levegőtől, ezáltal csökkentve a befűvási légállapot eléréséhez szükséges egyéb forrásból származó fűtési és hűtési energia mennyiségét.

A modern légkezelő berendezések felépítése lehetőséget teremt további energiacsökkentő rendszer megoldások alkalmazására.

2. Kutatás célkitűzései

Kutatói munkám az épületek hűtési energiaigénye csökkentésének vizsgálatát célozza. A felhasznált hűtési energia mennyisége az épület külső forrásból származó hőterhelésétől, valamint a szellőztetésre felhasznált friss levegő bejuttatni kívánt mennyiségétől nagy mértékben függ.

A vizsgálatok fő célkitűzései:

- Nagy transzparens szerkezettel rendelkező épületek hőterhelésének elemzése, amely alapján következtetések vonhatóak le az épület hűtési rendszerének működésére, szabályozási kihívásaira.
- Az indirekt evaporatív léghűtés alkalmazhatóságának vizsgálata komforttereket kiszolgáló légtechnikai rendszerek esetén.
- Az indirekt evaporatív léghűtés hűtési rendszer működésére gyakorolt hatásának vizsgálata.
- Az evaporatív léghűtés vízfelhasználás szempontjából optimalizált működtetésének vizsgálata.

3. Kutató munka választott módszerei

A magyarországi éghajlati viszonyoknak megfelelő körülmények között vizsgáltam a nagy transzparens szerkezettel rendelkező épületek külső forrásból származó hőterhelésének mértékét. A vizsgálat során kiemelt figyelmet fordítottam a transzparens szerkezetek tájolásának, az épület hőtároló kapacitásának és a beltérben tartani kívánt komfort állapotoknak a hőterhelésre gyakorolt hatására.

A külső forrásból származó hőterhelés mértékére a vizsgálati napok meteorológiai paraméterei is érdemi hatást gyakorolnak. A külső forrásból származó hőterhelés napi lefutását nyári, hőség és forró napokon egyaránt vizsgáltam. A vizsgálatok során az adott napok felhőképződését korrigáltam, a vizsgálati napok során tiszta égboltot feltételeztem.

A vizsgálataim során felhasználtam a Debreceni Egyetem Épületgépészeti és Létesítménymérnöki tanszékén korábban végzett kutatások és laboratóriumi mérések eredményeit. Kutatásom során igyekeztem újszerű megközelítést alkalmazni és a külső forrásból származó hőterhelés vizsgálatát adott időszakra fókuszálva elvégezni, amely hatásosan képes érzékeltetni az épületek hőtároló

kapacitásának a hatását a hőterhelés nagyságára és megjelenési időpontjára vonatkozóan.

Kutatásom második része a légtechnikai rendszerek energia igényének csökkentésére fókuszál. Az irodalomkutatás eredménye alapján az indirekt evaporatív léghűtés alkalmazásának vizsgálatát helyeztem előtérbe. Az indirekt evaporatív léghűtési eljárás alkalmazásával a légkezelő berendezésekben található hővisszanyerő egység által kinyerhető hűtési teljesítmény, valamint a hővisszanyerő hasznos üzemideje jelentősen növelhető.

A vizsgálatok elvégzéséhez egyedi mérőpadot hoztam létre a Debreceni Egyetem Légtechnikai Laboratóriumában. A laboratóriumi mérési eredményeket felhasználva vizsgáltam az indirekt evaporatív léghűtés hatásosságát befolyásoló paramétereket. Külön figyelmet fordítottam az indirekt evaporatív léghűtés önálló használatával elérhető érezhető hűtési teljesítmény, valamint a hűtőrendszer működésére gyakorolt elsődleges és az azokból származó másodlagos hatások vizsgálatára. A laboratóriumi mérések alapján szerzett tapasztalatokat és feltárt összefüggéseket felhasználva valós körülmények közötti mérési sorozatot végeztem egy általam átalakított komfort légkezelő berendezés esetén egy budapesti bevásárló központban. A mérés eredményeit felhasználva az indirekt evaporatív léghűtés illesztési és szabályozási lehetőségeit vizsgáltam.

Az általam végzett mérési sorozatok adatainak és a Debreceni Egyetem Agro-Meteorológiai állomás 2009-2021 közötti adatsorainak felhasználásával vizsgáltam az indirekt evaporatív léghűtés hosszútávú hatását a légkezelő berendezések működésére vonatkozóan.

4. Kutató munka összefoglalása és a tézisek ismertetése

A modern épületek határoló szerkezetei nagy arányban tartalmaznak transzparens szerkezeteket, amellyel a tervezők célja az esztétikusabb épületkialakítás, valamint a szoláris energia kihasználása, a természetes fényforrással történő helyiségmegvilágítás elősegítése, a fűtési energia igény csökkentése. A tervezés során azonban figyelembe kell venni, hogy a nyári időszakban a szoláris nyereség növeli a helyiség hőterhelését, amely nagyobb hűtési energia igényt és romló komfort paramétereket eredményezhet.

Kutatásom során külső forrásból származó hőterhelés mértékét és időbeli lefutását vizsgáltam különböző komfortkategóriáknak megfelelő operatív beltéri hőmérséklet tartása mellett. A vizsgálat során kitértem az épület

hőtároló kapacitása és a transzparens szerkezetek tájolásának hatására nyári, hőség és forró napokon egyaránt. A vizsgálatok eredményeit adott időszakra (8-16 h) szűkítve külön értékeltem.

1. Tézis

a, pont

A nagy transzparens felületi aránnyal rendelkező épületek esetén a külső forrásból származó hőterhelés mértékére az épület hőtároló kapacitása jelentős hatással van. Az MSZ EN 16798-1:2019 „I.”, „II.” „III.” komfortkategóriájának megfelelő operatív belső hőmérsékletek mellett, megállapítottam, hogy a hőtechnikai szempontból könnyű és nehéz szerkezetű, de minden más szempontból azonos épületfizikai tulajdonságokkal rendelkező, fő égtájak felé néző transzparens szerkezetekkel rendelkező épület esetén, a maximális hőterhelés értékek közötti arány nem állandó.

A számításokhoz felhasznált fő égtájak felé néző nagy transzparens felületi aránnyal rendelkező szimmetrikus kialakítású épület esetén végzett számítások eredményei induktív módon bizonyítják a leírtakat:

Az MSZ EN 16798-1:2019 szabvány szerinti „I”, komfortkategóriáknak megfelelő 23,5°C belső operatív hőmérséklet mellett a könnyű szerkezetű épületvariáns maximális hőterhelése 1,61-1,67 szerese a nehéz szerkezetű épületvariáns maximális hőterhelésértékéhez képest.

Az MSZ EN 16798-1:2019 szabvány szerinti „II”, komfortkategóriáknak megfelelő 26°C belső operatív hőmérséklet mellett a könnyű szerkezetű épületvariáns maximális hőterhelése 2,14-2,4 szerese a nehéz szerkezetű épületvariáns maximális hőterhelésértékéhez képest.

Az MSZ EN 16798-1:2019 szabvány szerinti „III”, komfortkategóriáknak megfelelő 27°C belső operatív hőmérséklet mellett a könnyű szerkezetű épületvariáns maximális hőterhelése 2,53-2,94 szerese a nehéz szerkezetű épületvariáns maximális hőterhelésértékéhez képest.

b, pont

Nagyarányú, helyiségenként egy fő égtáj felé néző, eltérő orientáltságú transzparens határoló felülettel, de azonos egyéb épületfizikai jellemzőkkel rendelkező helyiségek esetén a direkt szoláris nyereség jelentősen befolyásolja a külső forrásból származó hőterhelés maximális értékét. Megállapítottam, hogy a keleti tájolású transzparens szerkezettel rendelkező helyiség hőterhelése a legnagyobb mértékű a 8-16h-ig terjedő időszakban.

Az épületgépészeti rendszerek által előállított és felhasznált hűtési energia mennyisége nagyban függ a külső forrásból származó hőterheléstől és a beltérbe bejuttatni kívánt friss levegő mennyiségétől. Komfort terület kiszolgálásában részt vevő légkezelő berendezésben alkalmazott indirekt evaporatív léghűtési eljárás vizsgálata során az alábbi eredményekre jutottam:

2. Tézis

Megállapítottam, hogy a komfort légkezelő berendezésekben alkalmazható indirekt evaporatív léghűtési eljárás önálló alkalmazásával a belső légállapot, a légvezetési rendszer, a bepárolgó víz mennyisége és a hővisszanyerő berendezés paraméterei függvényében meghatározható a kültéri légállapotokra vonatkozó izoterm befűvási határ. Az izoterm befűvási határt leíró képletek által kijelölt működési mezőbe eső kültéri légállapot esetén, az indirekt evaporatív léghűtés önálló használatával a komfort légkezelő berendezés képes az elszívott levegő léghőmérsékletével megegyező, vagy attól alacsonyabb befűvási léghőmérséklet előállítására. A kültéri légállapotra vonatkozó izoterm befűvási határt leíró összefüggéseket kidolgoztam:

$$t_{1,limit} = \frac{t_5 - \eta t_{5r}}{1 - \eta} = \frac{t_5 - \eta \left[t_5 - \frac{\Delta x (r + c_{pvg} t_5)}{c_p + c_{pvg} (x_5 + \Delta x)} \right]}{1 - \eta} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

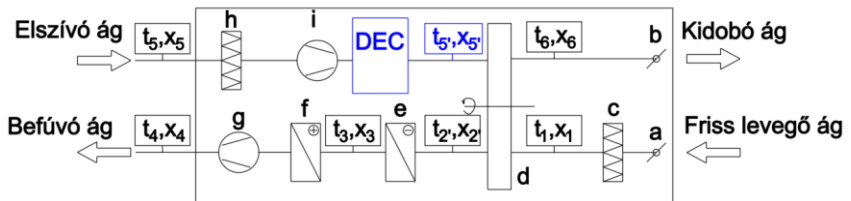
$$x_{1,limit} = \frac{0,622 \exp \left(23,752 + \frac{-4134,9088}{238,5104 + \left[t_5 - \frac{\Delta x (r + c_{pv} t_5)}{c_p + c_{pv} (x_5 + \Delta x)} \right]} \right)}{101325 - \exp \left(23,752 + \frac{-4134,9088}{238,5104 + \left[t_5 - \frac{\Delta x (r + c_{pv} t_5)}{c_p + c_{pv} (x_5 + \Delta x)} \right]} \right)}$$

[kg/kg]

$$h_{1,limit} = c_p t_{limit} + x_{limit} (r + c_{vg} t_{limit}) \text{ [kJ/kg]}$$

Ahol, t_5 – a légkezelő által beltérből elszívott levegő száraz léghőmérséklete [°C]; x_5 – a légkezelő által beltérből elszívott levegő abszolút nedvességtartalma [kg/kg]; η – a hővisszanyerő berendezés érezhető hatásfoka [-]; Δx – az evaporatív léghűtő egységgel elpárologtatott víz fajlagos mennyisége [kg/kg]; r – a víz fajlagos párolgáshője [kJ/kg]; c_p – a levegő állandó nyomáson vett fajhője [kJ/kgK]; c_{pv} – a vízgőz állandó nyomáson vett fajhője [kJ/kgK].

Az összefüggésekben felhasznált indexek az 1. ábrának megfelelően kerültek felhasználásra.



1. ábra Hűtve szárításra alkalmas légkezelő berendezés indirekt evaporatív léghűtővel, elvi séma

a, b – motoros zsalu; c, h – szűrő; d – hővisszanyerő; e – hűtőkalorifer; f – fűtőkalorifer; g, i – ventilátor; DEC – evaporatív léghűtő

3. Tézis

Megállapítottam, hogy befűjt léghőmérsékletre szabályozott komfort célú légkezelő berendezés esetén, az indirekt evaporatív léghűtés alkalmazása mellett, a légkezelő berendezést kiszolgáló hűtőkalorifer által leadott hűtési teljesítmény csökkenthető.

Bizonyítottam, hogy amennyiben a légkezelő berendezés nem önállóan biztosítja a helyiség komfortparamétereinek fenntartásához szükséges hűtési energia bevitelét, úgy nem elegendő a légkezelő energiafogyasztásának önálló vizsgálata, mivel annak üzemi körülményeinek változása kihat a kiegészítő hűtési rendszer energiafelvételére is.

Igazoltam, hogy befűvási léghőmérsékletre vezérelt légkezelő berendezés alkalmazása esetén, a magas hőmérsékletű léghűtés arányának növekedésével (indirekt evaporatív léghűtési eljárás) a beltérbe juttatott, kültéri levegőből származó nedvességterhelés növeli az alacsony hőmérsékletű, kiegészítő hűtési rendszer látens hőenergia felvételét, amennyiben a kültéri levegő nedvességtartalma meghaladja a beltéri légállapot nedvességtartalmát.

4. Tézis

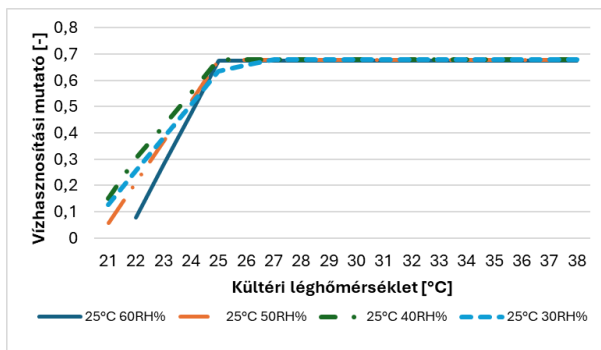
Megalkottam az indirekt evaporatív léghűtésre vonatkozó vízhasznosítási mutatót (ω_w), amely megmutatja az indirekt evaporatív léghűtéssel kinyert, a légkezelő számára hasznos hűtési energia arányát a víz párolgása során elvont összes hőenergiához képest.

$$\omega_w = \frac{\Delta q_{IEC}}{r} [-]$$

Ahol, Δq_{IEC} – az indirekt evaporatív léghűtés által elért többlet fajlagos hűtési energia mennyisége [kJ/kg]; r – a víz fajlagos párolgáshője [kJ/kg]

Amennyiben a célunk az indirekt evaporatív hűtési eljárás vízfelhasználás oldali optimalizálása, úgy a vízhasznosítási mutató értékei alapján szükséges mérlegelni az eljárás alkalmazását.

Szemléltetés céljából, a mutató értékeinek a változását a laboratóriumi mérési körülményekkel megegyező esetben a 2. ábra mutatja be a kültéri hőmérséklet és beltéri légállapotok függvényében.



2. ábra vízhasznosítási mutató értékének lefutása a beltéri légállapot és kültéri hőmérséklet függvényében

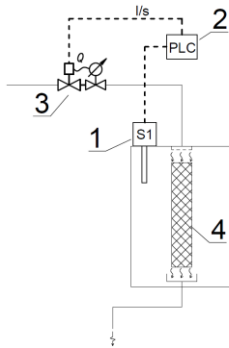
5. Tézis

Megállapítottam, hogy az evaporatív léghűtő berendezések víz oldali szabályozása adott működési paraméterek mellett szükséges a felesleges vízfogyasztás elkerülése érdekében. Kidolgoztam az átfolyási víztömegáram szükséges mértékét meghatározó összefüggést az evaporatív léghűtő műszaki paramétereinek függvényében:

$$\dot{m}_{\text{víz}} = n \rho_l \dot{V} \frac{\varepsilon (t_{be} - t_n) (c_p + c_{pvg} x_{be})}{r + c_{pvg} t_{be} - \varepsilon (t_{be} - t_n) c_{pvg}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

ahol, n – biztonsági szorzó tényező; ρ_l – a levegő sűrűsége [kg/m^3]; \dot{V} – a levegő térfogatárama [kg/s]; ε – az evaporatív léghűtő párasítási hatásfoka [-]; t_{be} – az evaporatív léghűtőbe belépő levegő száraz léghőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$]; t_n – az evaporatív léghűtőbe belépő levegő nedves léghőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$]; x_{be} – az evaporatív léghűtőbe belépő levegő abszolút nedvességtartalma [kg/kg]; c_p – a levegő állandó nyomáson vett fajhője [kJ/kgK]; c_{pvg} – a vízgőz állandó nyomáson vett fajhője [kJ/kgK]; r – a víz fajlagos párolgáshője [kJ/kg]

Az összefüggést felhasználva egyedi szabályzó rendszert dolgoztam ki, az átfolyós rendszerű evaporatív léghűtő berendezések számára. A kidolgozott eljárás használati mintaoltalmat szerzett (Ügyiratszám: U2400264/9; Lajstromszám: 5922).



3. ábra átfolyós rendszerű evaporatív léghűtő berendezés tápvíz oldali szabályozásának elvi sémája

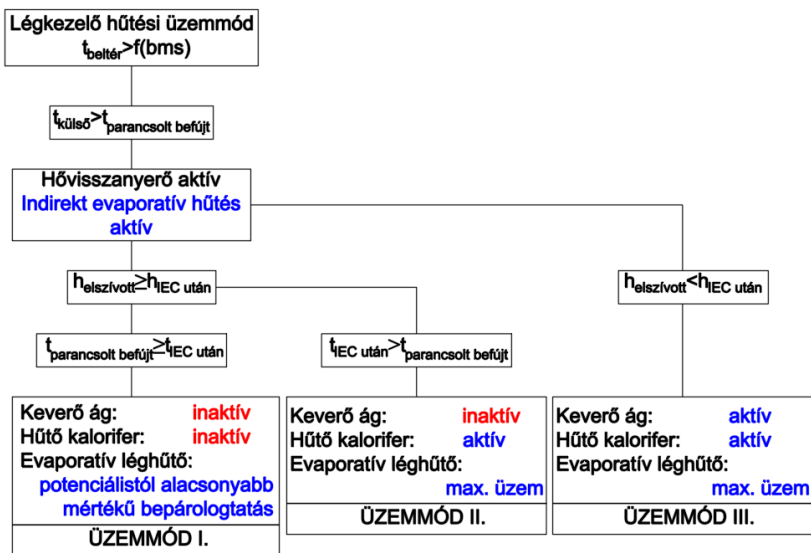
A kidolgozott szabályozási mód lehetővé tette az evaporatív léghűtő és hővisszanyerő berendezés összeépítését, úgy, hogy a rendszerelemek közötti távolság érdemben lecsökkenthető. Az eljárást felhasználva kialakításra került egy új légkezelő elem, amely az evaporatív léghűtő és hővisszanyerő egységet egy légkezelő elemben, közös csepptálca alkalmazásával tartalmazza. Az elrendezés által a légkezelő berendezés mérete és bekerülési költsége csökkenthető. A kidolgozott műszaki megoldás használati mintaoltalmat szerzett (Ügyiratszám: U2500077/4; Lajstromszám: 5923).



4. ábra közvetítő közeges légkezelő forrás oldali hőcserélőjével egybeépített evaporatív léghűtő berendezés – prototípus

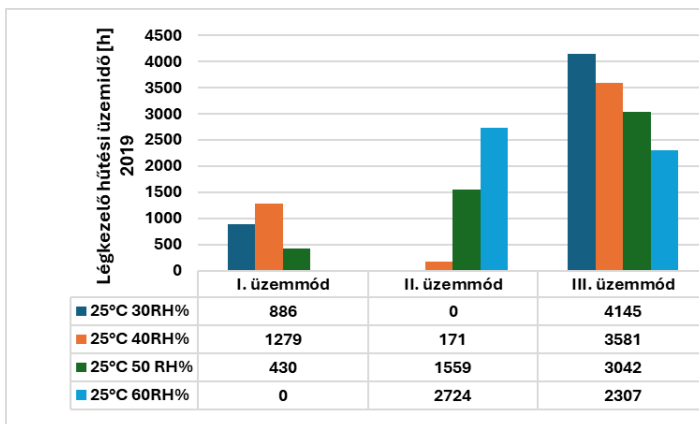
6. Tézis

Kidolgoztam az indirekt evaporatív léghűtési eljárást alkalmazó, befűjt léghőmérsékleti értékre vezérelt, keverőággal felszerelt, komfortcélú légkezelő berendezés üzemelési feltételrendszerét, amely alkalmazása mellett a hűtési rendszer által megtermelni szükséges hűtési energia és a felhasznált víz mennyisége minimalizálható.



Légkezelő berendezésbe integrált indirekt evaporatív léghűtés engedélyezési feltételrendszere

A helyiségből elszívott levegő állapotának a függvényében a feltételrendszerben meghatározott üzemmódokban eltöltött üzemidő nagymértékben változik. Vizsgálataim alapján kizárólag a beltéri nedvességtartalom változtatásával az egyes üzemmódok üzemelési óraszámja érdemben megváltozott, amelyet a 5. ábra szemléltet.



5. ábra A légkezelő üzemelési ideje energetikailag optimális üzemmódokban a beltéri légállapot függvényében

Mivel a kiszolgált komforttér állapota az üzemelés során változhat, így a légkezelő berendezés működésének az optimalizálása előre nem lehetséges, a valós üzemelési körülmények függvényében kell módosítani a légkezelő berendezés működési módját.

A légkezelő berendezés üzemelése során előfordul olyan üzemállapot (I. üzemmód és II. üzemmód), amely esetén a kültérből származó friss levegő kezelése alacsonyabb hűtési energiafelhasználást eredményez, mint ami a beltérből származó elszívott levegő részleges visszakeverésével és kezelésével érhető el. A 100% friss levegő bejuttatásával eltöltött, hűtési energiafelhasználás szempontjából optimális üzemelési órák száma az indirekt evaporatív léghűtés alkalmazásával jelentősen növekszik.

5. Elért eredmények hasznosítása

A kutatásom során elért eredmények hozzájárulhatnak a komfort célú épületek hűtési energiafelhasználásnak csökkentéséhez.

A külső forrásból származó hőterhelés vizsgálatából levonható következtetések felhasználhatóak az épületek építészeti és gépészeti tervezése során. Az épület külső forrásból származó hőterhelésének napi lefutásának elemzésével a hűtési energia előállító rendszer működtetésének optimalizációja érdekében használható fel. A különböző tájolással rendelkező helyiségek külső forrásból származó hőterhelésének a vizsgálata a hűtési energia leadó rendszer elemek üzemeltetése és tervezése kapcsán ad többlet információt a tervezési és üzemeltetési feladatok megoldásához.

A disszertációban vizsgált indirekt evaporatív léghűtési eljárással céltom a komfort célú légkezelő berendezések gépi hűtési energiaigényének csökkentése, oly módon, hogy az illeszkedjen az energetikai rendeletekben és direktívákban megfogalmazott elvárásokhoz.

Kutatásom során céltom volt az indirekt evaporatív léghűtési megoldások közül olyan rendszerelrendezés vizsgálata, amely könnyen beilleszthető a hagyományos légkezelő berendezésekbe, légtechnikai rendszerekbe, ami elősegíti az eljárás terjedését és alkalmazását akár új légkezelő berendezések konstruálásánál, akár meglévő légtechnikai rendszerek modernizálásánál.

Disszertációmban levezetett összefüggések alapján számítható adott műszaki és komfort paraméterek mellett az indirekt evaporatív léghűtési eljárással elérhető hűtési energia mennyisége, és az eljárás önálló alkalmazásával elérhető külső légállapokra vonatkozó izoterm működési határ. A gépészeti rendszerek jelenlegi ErP követelményeknek megfelelő műszaki paraméterek mellett, az indirekt evaporatív léghűtés alkalmazásával széles működési tartományban érhető el érezhető hűtési teljesítmény, amely új méretezési perspektívát mutat a HVAC rendszerek tervezésében.

Az indirekt evaporatív léghűtés alkalmazásával elképzelhető olyan hűtőkalorifer nélküli üzemelő szellőztető rendszer, amely a magyarországi éghajlati viszonyok mellett megfelelően képes a szellőztetési feladatokat kiszolgálni úgy, hogy a hűtési rendszer által előállított hűtési energia mennyisége érdemben csökken. A megfontolásra javasolt rendszerelrendezés további előnye, hogy a hűtési energia elosztó és szabályozó rendszert nem

szükséges kiépíteni a légkezelő berendezés számára, ami jelentős kivitelezési költségmegtakarítást is eredményezhet.

A laboratóriumi és valós körülmények közötti mérések alapján számos fejlesztési és vizsgálati kérdéskört találtam, amelyekben kevés magasan jegyzett szakmai publikáció született, valamint a piacon kapható rendszermegoldások nem kezelik.

Kutatásom során feltártam, hogy az indirekt evaporatív léghűtési eljárással megtakarítható energia mennyisége a légkezelő berendezés üzemeltetési feltételrendszerének átalakításával, fejlesztésével lehetséges. Egy általános légkezelő elrendezéshez illeszkedően az eljárás alkalmazásának a feltételeit meghatároztam.

A piacon kapható, légkezelőkbe beépíthető, evaporatív léghűtő berendezések jelentős része átfolyós rendszerű a higiéniai kockázatok minimalizálása érdekében. A műszaki megoldás szükségessé teszi az átfolyó vízmennyiség korlátozását. Kutatásom során meghatároztam az elszívott levegő légállapotának és a légkezelő berendezés műszaki paramétereinek függvényében egy összefüggést, amellyel az átfolyó víz mennyisége meghatározható. A kutatás során elvégzett mérési sorozatok alapján láthatóvá vált, hogy előfordulhat olyan üzemállapot, amely során nem szükséges a berendezésbe épített evaporatív léghűtő maximális potenciáljának a kiaknázása, ekkor az átfolyó vízmennyiség szabályozása szintén szükséges. Az összefüggést felhasználva kidolgoztam egy szabályozási eljárást, amely képes a fenti probléma kezelésére.

Kutatásom során megállapítottam, hogy a hűtési rendszerek jellemzésére alkalmazott EER és SEER mutatószámok önmagukban nem alkalmasak a zárt hűtőköri körfolyamatokon alapuló hűtési megoldások és az evaporatív léghűtés összevetésére, mivel azok nem veszik figyelembe a vízfelhasználást, amely az evaporatív léghűtés meghatározó erőforrása. A probléma kezelésére új mutatószámokat dolgoztam ki, amellyel az eljárások összehasonlíthatóak gazdasági alapon.

Összegezve, az indirekt evaporatív léghűtési eljárás általam vizsgált verziója a gyakorlatban jól alkalmazható és megfelelő módon illeszkedik a jelenleg alkalmazott rendszermegoldásokhoz. Bevezetése a magyar épületgépészeti gyakorlatba rövid időn belül megvalósítható.

PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Kostyák, A., Szekeres, S., Nagy, G. E., Kostyák, F., Csáky, I. (2025): Légkezelő berendezések energiahatékonyságának növelése indirekt evaporatív léghűtéssel: Energetikai vizsgálat a magyar éghajlati viszonyok figyelembevételével. *M. Épületgépészet*. 74 (4), 1-11,

Kostyák, A., Kostyák, F., & Bodnár, I. (2024). Hygienic investigation of the evaporative cooling system installed in air handling units. *Journal of Physics Conference Series*, 2911(1), 012025.

Kostyák, A., Szekeres, S., & Csáky, I. (2024). The effect of indirect evaporative cooling applied to existing AHU systems. *Journal of Architectural Engineering*, 30(4).

Kostyák, A., Szekeres, S., & Csáky, I. (2024). Assessment of the Actual and Required Cooling Demand for Buildings with Extensive Transparent Surfaces. *Energies*, 17(23), 5814.

Kostyák, A. (2023). Indirect evaporative cooling primary and secondary effects for the cooling energy consumption of the Air Handling Units. *Journal of Physics Conference Series*, 2628(1), 012016.

Kostyák, A., Szekeres, S., & Csáky, I. (2023). Investigation of Sensible Cooling Performance in the Case of an Air Handling Unit System with Indirect Evaporative Cooling: Indirect Evaporative Cooling Effects for the Additional Cooling System of Buildings. *Buildings*, 13(7), 1800.

Kostyák, A., Béres, C., Szekeres, S., & Csáky, I. (2022). Buffer tank discharge strategies in the case of a centrifugal water chiller. *Energies*, 16(1), 188.

Kostyák, A., Csáky, I. (2022). Evaporatív hűtés felhasználási lehetőségei komfortterekben - Az indirekt alkalmazás lehetőségei, *Magyar Épületgépészet*, - 71 : 11-12. (2022), p. 9-13

Kostyák, A., Kostyák, F. (2021). Direkt evaporatív léghűtés alkalmazásának vizsgálata munkaterekben, a 3/2002. (II. 8.) SzCsM-EüM rendelet alapján, *Magyar épületgépészet*, 69 (5), 19-24, 2020.



Nyilvántartási szám: DEENK/527/2025.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Kostyák Attila

Doktori Iskola: Pekár Imre Gépészeti Tudományok Doktori Iskola

MTMT azonosító: 10072835

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Magyar nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (3)

1. **Kostyák, A.**, Szekeres, S., Nagy, G. E., Kostyák, F., Csáky, I.: Légkezelő berendezések energiahatékonyságának növelése indirekt evaporatív léghűtéssel: Energetikai vizsgálat a magyar éghajlati viszonyok figyelembevételével.
M. Épületgépészet. 74 (4), 1-11, 2025. ISSN: 1215-9913.
2. **Kostyák, A.**, Csáky, I.: Evaporatív hűtés felhasználási lehetőségei komfortterekben: az indirekt alkalmazás lehetőségei.
Magyar Épületgépészet. 71 (11-12.), 9-13, 2022. ISSN: 1215-9913.
3. **Kostyák, A.**, Kostyák, F.: Direkt evaporatív léghűtés alkalmazásának vizsgálata munkaterekben, a 3/2002. (II. 8.) SzCsM-EÜM rendelet alapján.
Magyar épületgépészet. 69 (5), 19-24, 2020. ISSN: 1215-9913.

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (6)

4. **Kostyák, A.**, Szekeres, S., Csáky, I.: Assessment of the Actual and Required Cooling Demand for Buildings with Extensive Transparent Surfaces.
Energies. 17 (23), 1-19, 2024. ISSN: 1996-1073.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en17235814>
IF: 3.2
5. **Kostyák, A.**, Kostyák, F., Bodnár, I.: Hygienic investigation of the evaporative cooling system installed in air handling units.
J. Phys. Conf. Ser. 2911 (1), 1-6, 2024. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2911/1/012025>
6. **Kostyák, A.**, Szekeres, S., Csáky, I.: The Effect of Indirect Evaporative Cooling Applied to Existing AHU Systems.
J Architect Engineer. 30 (4), 1-14, 2024. ISSN: 1076-0431.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1061/JAEIED.AEENG-1846>
IF: 1.5





7. **Kostyák, A.**, Béres, C., Szekeres, S., Csáky, I.: Buffer Tank Discharge Strategies in the Case of a Centrifugal Water Chiller.
Energies. 16 (1), 1-15, 2023. ISSN: 1996-1073.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en16010188>
IF: 3
8. **Kostyák, A.**: Indirect evaporative cooling primary and secondary effects for the cooling energy consumption of the Air Handling Units.
J. Phys. Conf. Ser. 2628, 1-6, 2023. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2628/1/012016>
9. **Kostyák, A.**, Szekeres, S., Csáky, I.: Investigation of Sensible Cooling Performance in the Case of an Air Handling Unit System with Indirect Evaporative Cooling: Indirect Evaporative Cooling Effects for the Additional Cooling System of Buildings.
Buildings. 13 (7), 1-17, 2023. EISSN: 2075-5309.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/buildings13071800>
IF: 3.1

További közlemények

Magyar nyelvű könyvek (1)

10. Németh, B., Hámori, S., **Kostyák, A.**, Vigh, G.: Különböző funkciójú épületek klimatechnikája III.: segédlet ipari épületek lég- és klimatechnikai rendszereinek tervezése. Magyar Mérnöki Kamara, Budapest, 121 p., 2019. (Magyar Mérnöki Kamara kiadványsorozata ; 46.)

Magyar nyelvű könyvrészletek (2)

11. Balogh, L., Bodnár, I., **Kostyák, A.**: Direkt evaporatív léghűtő rendszerek környezeti és higiéniai vizsgálata.
In: Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2025: konferenciakötet.
Szerk.: Szodrai Ferenc, szerk. Bondár Nikolett, MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága, Debrecen, 30-36, 2025. ISBN: 9789634907343
12. Nagy, G. E., **Kostyák, A.**: Kültérből származó munkalevegővel megvalósított indirekt evaporatív hűtés vizsgálata.
In: Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2025: konferenciakötet.
Szerk.: Szodrai Ferenc, szerk. Bondár Nikolett, MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága, Debrecen, 25-29, 2025. ISBN: 9789634907343

Magyar nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (4)

13. Szekeres, S., **Kostyák, A.**: Hígítás, helyi elszívás, szennyező anyagok ipari csarnokokban.
Magyar épületgépészet. 70 (5), 20-24, 2021. ISSN: 1215-9913.





14. Hámori, S., **Kostyák, A.**: Baromfi-feldolgozó üzem légtechnikai rendszerének vizsgálata.
Épületgépész. 9 (6), 32-36, 2020. ISSN: 2063-5400.
15. **Kostyák, A.**, Szodrai, F.: Szélszatornaépítés a gyakorlatban = Wind tunnel making in practise.
IJEMS. 2 (1), 19-24, 2017. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2017.1.4>.
16. **Kostyák, A.**, Szodrai, F.: Létesítmény szélenergia hasznosításának lehetőségei = Wind energy harnessing options at buildings.
IJEMS. 1 (2), 51-58, 2016. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2016.2.7>.

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (3)

17. **Kostyák, A.**, Szekeres, S., Kostyák, F., Csáky, I.: Investigation of the possibility of intermittent water supply in evaporative air coolers.
J. Architect. Engineer. "Accepted by Publisher", 1-26, 2025. ISSN: 1076-0431.
IF: 1.5 (2024)
18. Szekeres, S., **Kostyák, A.**, Csáky, I.: Analysis of capture velocity in the case of local exhaust ventilation.
J. Archit. Eng. 30 (2), 1-8, 2024. ISSN: 1076-0431.
DOI: <https://doi.org/10.1061/JAEIED.AEENG-1781>
IF: 1.5
19. Szekeres, S., **Kostyák, A.**, Szodrai, F., Csáky, I.: Investigation of Ventilation Systems to Improve Air Quality in the Occupied Zone in Office Buildings.
Buildings. 12 (4), 1-17, 2022. EISSN: 2075-5309.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/buildings12040493>
IF: 3.8

Magyar nyelvű konferencia közlemények (2)

20. **Kostyák, A.**, Szodrai, F.: Az alföldi szélenergia-potenciál vizsgálata = Investigation of Wind Energy Potential in the Great Hungarian Plain.
In: A XXI. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka előadásai = Proceedings of the XXIth National Scientific Conference of Young Engineers. Szerk.: Bitay Enikő, Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 233-236, 2016, (Műszaki tudományos közlemények, ISSN 2393-1280, 5.)
21. **Kostyák, A.**, Szodrai, F.: Szélenergetikai vizsgálatok adott turbinatípusok mellett.
In: Műszaki tudomány az Észak-Kelet Magyarországi régióban 2016. Szerk.: Bodzás Sándor, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 253-260, 2016. ISBN: 9789637064333





Magyar nyelvű absztrakt kiadványok (2)

22. Biró, B., **Kostyák, A.**: Indirekt Evaporatív léghűtő rendszer vizsgálata.
In: Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2024: Konferencia előadások kivonatai. Szerk.: Dömötör Csaba, MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága, Miskolc, 80-80, 2024. ISBN: 9789637064456
23. **Kostyák, A.**, Csáky, I.: Evaporatív léghűtés alkalmazási lehetőségének vizsgálata komfort légtechnikai rendszerekben.
In: Műszaki tudomány az észak-kelet magyarországi régióban 2022 : konferencia előadások kivonatai. Szerk.: Kocsis Imre, Dezső Gergely, MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága, Nyíregyháza, 20, 2022. ISBN: 9786156032508

Szabadalmak (2)

24. Csáky, I., **Kostyák, A.**, Szekeres, S.: Moduláris szellőztető berendezés. 2024
Hatáskör: Magyarország
Bejelentés ideje: -
Ügyiratszám: U2400177 ()
Szabadalmi szám: P2400435
Szabadalom státusza: Oltalom fennáll - Végleges oltalom alatt áll
25. Csáky, I., **Kostyák, A.**, Szekeres, S., Szodrai, F.: Légtérelő egység beépített szellőztető rendszerekhez. 2022
Hatáskör: Magyarország
Bejelentés ideje: -
Ügyiratszám: U2100156/7 ()
Szabadalmi szám: -
Szabadalom státusza: Oltalom fennáll - Végleges oltalom alatt áll

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 17,6

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre): 10,8

A DEENK a Jelölt által a Tudósterbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudánymetriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2025.09.17.



**Short thesis for the degree of doctor of philosophy
(PhD)**

**Reduction of Cooling Energy Demand in Air
Handling Systems through Indirect
Evaporative Air Cooling**

by Attila Kostyák

Supervisor: Dr. Imre Csáky



UNIVERSITY OF DEBRECEN

Doctoral School of Mechanical Engineering

Debrecen, 2025

1. Introduction

In developed countries, people spend nearly 90% of their lives indoors. The spaces enclosed by building envelope structures provide the conditions necessary for performing activities and for rest. During building operation, the primary objective is to establish and maintain an indoor environmental quality that meets human comfort requirements. Maintaining indoor environmental quality in buildings, however, results in significant energy consumption. In Hungary, nearly 40% of total energy consumption is associated with meeting the demands arising within buildings. Almost two-thirds of this energy use is dedicated to satisfying heating and cooling needs. Hungary's climate is undergoing continuous change, resulting in both an increase in the average summer temperature and a rise in the frequency and intensity of heat waves. In modern buildings, mechanical cooling systems have become increasingly widespread in order to maintain the expected comfort levels. However, the extensive use of air-conditioning systems during peak load periods poses considerable challenges, leading to higher electricity costs and disturbing the overall energy balance. The amount of cooling energy required to sustain the desired comfort level in buildings largely depends on the physical characteristics of the building, the technical standard of the building services systems, as well as the capabilities of the operation and control automation systems. The quality of the indoor environment is fundamentally influenced by indoor air quality and by the thermal sensation experienced within the occupied zone. These factors are significantly affected by air handling systems. The function of modern air handling systems is to treat fresh air (including filtration, temperature adjustment, and humidity control), as well as to deliver part or all of the required heating and cooling energy into the occupied zone. The supply air conditions achieved depend on the comfort parameters, the state changes occurring within the room, and the volume of ventilation air delivered. In order to reduce the amount of energy consumed during air treatment, various heat recovery solutions have been integrated into air-handling units. The objective of heat recovery is for the exhaust air to transfer energy (in the case of heating) or to extract energy (in the case of cooling) from the treated air, thereby reducing the demand for additional heating or cooling energy from

other sources to achieve the required supply air conditions. The design of modern air-handling units also provides the opportunity to implement further energy-saving system solutions.

2. Research Objectives

My research focuses on investigating strategies to reduce the cooling energy demand of buildings. The amount of cooling energy consumed largely depends on the external heat loads acting on the building, as well as on the quantity of fresh air required for ventilation.

The main objectives of the study are as follows:

- Analysis of the heat load of buildings with extensive transparent structures, providing insights into the operation and control challenges of the building's cooling system.
- Examination of the applicability of indirect evaporative air cooling in air-handling systems serving occupied spaces.
- Investigation of the impact of indirect evaporative air cooling on the operation of cooling systems.
- Evaluation of the optimized operation of evaporative air cooling with respect to water consumption.

3. Research Methods

Under climatic conditions corresponding to those in Hungary, I examined the magnitude of the external heat load in buildings with large transparent structures. In the course of the investigation, particular attention was given to the effects of the orientation of transparent structures, the thermal storage capacity of the building, and the desired indoor comfort conditions on the resulting heat load.

The magnitude of the external heat load is also significantly influenced by the meteorological parameters of the examined days. The daily profile of the external heat load was analyzed on summer days, hot days, and torrid days alike. During the analysis, cloud formation was corrected, and clear-sky conditions were assumed for the examined days.

My research relied on the findings of previous studies and laboratory measurements conducted at the Department of Building Services and Building Engineering of the University of Debrecen. A novel approach was applied by focusing the investigation of external heat loads on specific time intervals, which effectively illustrates the impact of the building's thermal storage capacity on both the magnitude and timing of the heat load.

The second part of my research focuses on reducing the energy demand of air-handling systems. Based on the results of the literature review, the analysis of indirect evaporative air cooling was prioritized. The application of indirect evaporative cooling can substantially increase both the extractable cooling capacity of the heat recovery unit integrated in air-handling equipment and the effective operating hours of the heat recovery system.

To carry out the investigations, I developed an experimental test rig at the Air Technology Laboratory of the University of Debrecen. Using the laboratory measurement results, I examined the parameters influencing the effectiveness of indirect evaporative air cooling. Particular attention was paid to the achievable sensible cooling capacity when applying indirect evaporative cooling as a standalone method, as well as to the primary effects on the operation of the cooling system and the secondary effects derived from them. Building on the experience gained and the relationships identified during the laboratory measurements, I conducted a series of on-site tests under real conditions using a modified comfort air-handling unit in a shopping center in Budapest. Based on these measurements, I investigated the integration and control possibilities of indirect evaporative air cooling. By combining the data obtained from my measurement series with the datasets of the University of Debrecen's Agro-Meteorological Station for the period 2009–2021, I further examined the long-term impact of indirect evaporative air cooling on the operation of air-handling units.

4. Summary of the Research and Statement of the Theses

The envelope structures of modern buildings contain a high proportion of transparent elements, intended by designers to achieve a more aesthetic architectural appearance, to utilize solar energy, to enhance indoor illumination through natural daylight, and to reduce heating energy demand. However, during the design process it must be taken into account that in the summer period, solar gains increase the internal heat load, which may lead to higher cooling energy demand and deteriorating comfort parameters.

In the course of my research, I examined the magnitude and temporal profile of the external heat load while maintaining indoor operative temperatures corresponding to different comfort categories. The analysis also addressed the impact of the building's thermal storage capacity and the orientation of transparent elements during summer, hot, and torrid days. The results of the investigations were additionally evaluated for a specific time interval (08:00–16:00).

Thesis 1

a.

In buildings with a high proportion of transparent surfaces, the magnitude of the external heat load is significantly influenced by the building's thermal storage capacity. Under indoor operative temperatures corresponding to comfort categories “I,” “II,” and “III” defined in MSZ EN 16798-1:2019, I established that for buildings with identical physical properties in all respects except for thermal mass—i.e., lightweight and heavyweight structures—with transparent elements oriented towards the cardinal directions, the ratio between the maximum heat load values is not constant.

The results of the calculations performed for a symmetrically designed building with a high proportion of transparent surfaces oriented towards the cardinal directions inductively confirm the above statement:

- At an indoor operative temperature of 23.5 °C, corresponding to comfort category “I” according to MSZ EN 16798-1:2019, the

maximum heat load of the lightweight building variant is 1.61–1.67 times higher than that of the heavyweight building variant.

- At an indoor operative temperature of 26 °C, corresponding to comfort category “II” according to MSZ EN 16798-1:2019, the maximum heat load of the lightweight building variant is 2.14–2.40 times higher than that of the heavyweight building variant.
- At an indoor operative temperature of 27 °C, corresponding to comfort category “III” according to MSZ EN 16798-1:2019, the maximum heat load of the lightweight building variant is 2.53–2.94 times higher than that of the heavyweight building variant.

b.

In rooms with a large proportion of transparent envelope surfaces facing a single cardinal direction, but otherwise identical building-physical characteristics, the direct solar gain has a substantial impact on the maximum value of the external heat load. I established that, within the time interval of 08:00–16:00, the heat load is highest in the room with east-oriented transparent elements.

The cooling energy demand of building services systems largely depends on the external heat load and on the quantity of fresh air to be supplied indoors. In examining the application of the indirect evaporative air cooling process in an air-handling unit serving occupied spaces, I arrived at the following results:

Thesis 2

I established that, when applying the indirect evaporative air cooling process independently in comfort air-handling units, the isothermal supply air boundary for outdoor air conditions can be determined as a function of the indoor air state, the air distribution system, the amount of evaporated water, and the parameters of the heat recovery device. When the outdoor air state falls within the operating range defined by the equations describing the isothermal supply air boundary, the standalone application of indirect evaporative cooling enables the comfort air-handling unit to produce a supply air temperature equal to or lower than the exhaust air temperature. I developed the relationships describing the isothermal supply air boundary for outdoor air conditions:

$$t_{1,limit} = \frac{t_5 - \eta t_{5'}}{1 - \eta} = \frac{t_5 - \eta \left[t_5 - \frac{\Delta x (r + c_{pv} t_5)}{c_p + c_{pv} (x_5 + \Delta x)} \right]}{1 - \eta} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$x_{1,limit} = \frac{\exp \left(23,752 + \frac{-4134,9088}{238,5104 + \left[t_5 - \frac{\Delta x (r + c_{pv} t_5)}{c_p + c_{pv} (x_5 + \Delta x)} \right]} \right)}{101325 - \exp \left(23,752 + \frac{-4134,9088}{238,5104 + \left[t_5 - \frac{\Delta x (r + c_{pv} t_5)}{c_p + c_{pv} (x_5 + \Delta x)} \right]} \right)} \quad [\text{kg}/\text{kg}]$$

$$h_{1,limit} = c_p t_{limit} + x_{limit} (r + c_{vg} t_{limit}) \quad [\text{kJ}/\text{kg}]$$

Where, t_5 – dry-bulb temperature of the exhaust air from the comfort air-handling unit [°C]; x_5 – absolute humidity of the exhaust air from the comfort air-handling unit [kg/kg];

η – sensible efficiency of the heat recovery device [-]; Δx – specific amount of water evaporated in the evaporative cooling unit [kg/kg]; r – specific latent heat of vaporization of water [kJ/kg]; c_p – specific heat capacity of air at constant pressure [kJ/kgK]; $c_{p,v}$ – specific heat capacity of water vapor at constant pressure [kJ/kgK].

The indices used in the equations are consistent with those shown in Figure 1.

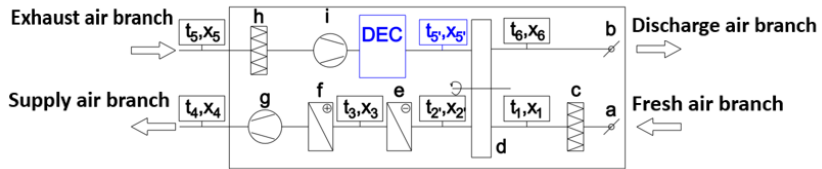


Figure 1. Schematic diagram of an air-handling unit suitable for cooled dehumidification with an indirect evaporative cooler
a, b – motorized damper; c, h – filter; d – heat recovery unit; e – cooling coil;
f – heating coil; g, i – fan; DEC – evaporative cooler

Thesis 3

I established that, in the case of a comfort air-handling unit controlled based on supply air temperature, the application of indirect evaporative cooling allows for a reduction in the cooling coil load.

I demonstrated that if the air-handling unit does not independently provide the cooling energy required to maintain the indoor comfort parameters, it is not sufficient to examine only the energy consumption of the air-handling unit itself, since changes in its operating conditions also affect the energy demand of the supplementary cooling system.

I verified that, in the case of an air-handling unit controlled based on supply air temperature, an increase in the share of high-temperature cooling (indirect evaporative cooling process) raises the moisture load introduced into the indoor environment from the outdoor air. This, in turn, increases the latent heat demand of the low-temperature supplementary cooling system, provided that the absolute humidity of the outdoor air exceeds that of the indoor air state.

Thesis 4

I developed the water utilization index (ω_w) for indirect evaporative air cooling, which expresses the ratio of the useful cooling energy gained by the air-handling unit through indirect evaporative cooling to the total heat energy removed during the evaporation of water.

$$\omega_w = \frac{\Delta q_{IEC}}{r} [-]$$

Where, Δq_{IEC} – additional specific cooling energy achieved by indirect evaporative air cooling [kJ/kg]; r – specific latent heat of vaporization of water [kJ/kg].

If the aim is to optimize the water consumption side of the indirect evaporative cooling process, the applicability of the process should be evaluated based on the values of the water utilization index.

For illustration purposes, Figure 2 presents the variation of the index values under laboratory-equivalent conditions as a function of outdoor temperature and indoor air conditions.

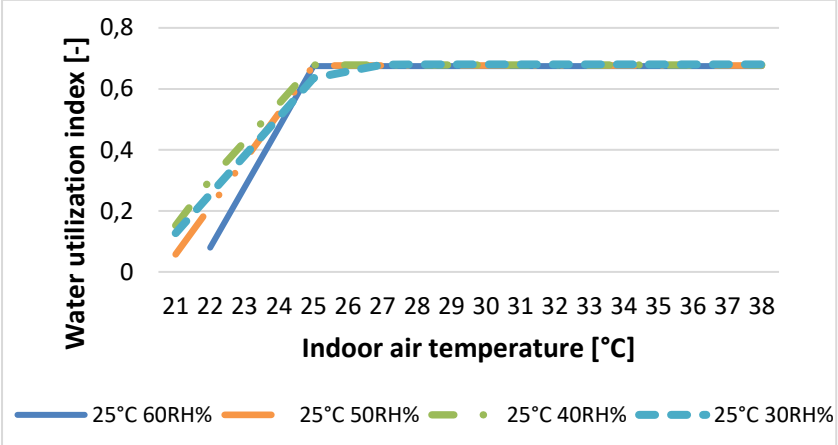


Figure 2. Variation of the water utilization index as a function of indoor air conditions and outdoor temperature

Thesis 5

I established that water-side control of evaporative cooling devices is necessary, under given operating parameters, to avoid excessive water consumption. I developed the relationship for determining the required mass flow rate of water as a function of the technical parameters of the evaporative cooler and the heat recovery device:

$$\dot{m}_{viz} = n\rho_l\dot{V} \frac{\varepsilon(t_{be} - t_n)(c_p + c_{pv}x_{be})}{r + c_{pv}t_{be} - \varepsilon(t_{be} - t_n)c_{pv}} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Where, n – safety factor; ρ_l – air density [kg/m^3]; \dot{V} – air volume flow rate [kg/s]; ε – humidification efficiency of the evaporative cooler [-]; t_{be} – dry-bulb temperature of the air entering the evaporative cooler [$^{\circ}C$]; t_n – wet-bulb temperature of the air entering the evaporative cooler [$^{\circ}C$]; x_{be} – absolute humidity of the air entering the evaporative cooler [kg/kg]; c_p – specific heat capacity of air at constant pressure [kJ/kgK]; c_{pv} – specific heat capacity of water vapor at constant pressure [kJ/kgK]; r – specific latent heat of vaporization of water [kJ/kg].

Using the developed relationship, I designed a custom control system for through-flow evaporative cooling devices. The developed method has been granted utility model protection (Case No.: U2400264/9; Registration No.: 5922).

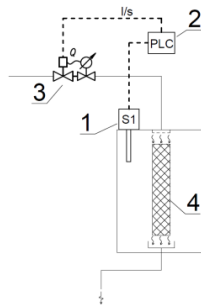


Figure 3. Schematic diagram of the feedwater-side control of a through-flow evaporative cooling device

The developed control method enabled the integration of the evaporative cooler and the heat recovery device in such a way that the distance between the system components could be significantly reduced. Based on this procedure, a new air-handling component was created, which incorporates both the evaporative cooler and the heat recovery unit into a single element using a common condensate tray. This arrangement allows for a reduction in both the size and the installation cost of the air-handling unit. The developed technical solution has been granted utility model protection (Case No.: U2500077/4; Registration No.: 5923).



Figure 4. Prototype of an evaporative cooling device integrated with the source-side heat exchanger of a liquid-coupled air-handling unit

Thesis 6

I developed the operational framework for a comfort air-handling unit equipped with a mixing branch, controlled based on supply air temperature, and applying the indirect evaporative cooling process. With its application, both the cooling energy required to be produced by the cooling system and the amount of water consumed can be minimized.

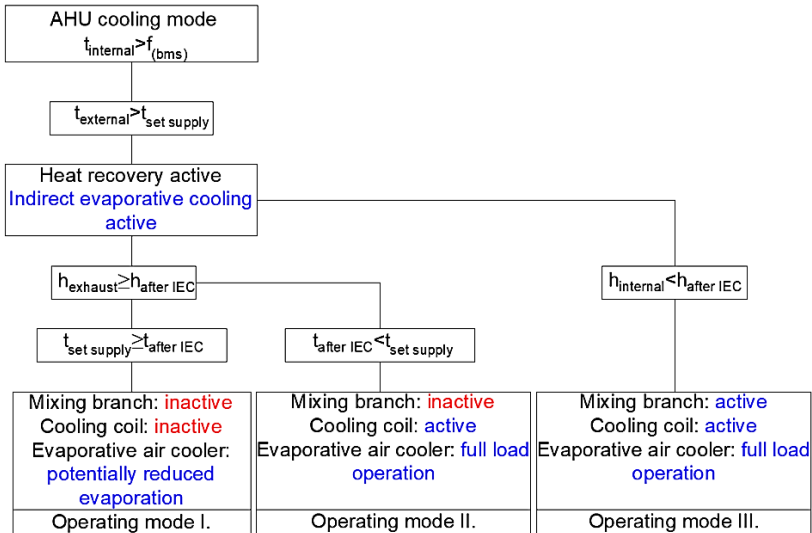


Figure 5. Regulatory framework for the integration of indirect evaporative cooling into air-handling units

Depending on the state of the exhaust air from the room, the operating hours spent in the modes defined within the framework vary significantly. Based on my investigations, modifying only the indoor humidity content resulted in substantial changes in the operating hours of the individual modes, as illustrated in Figure 5.

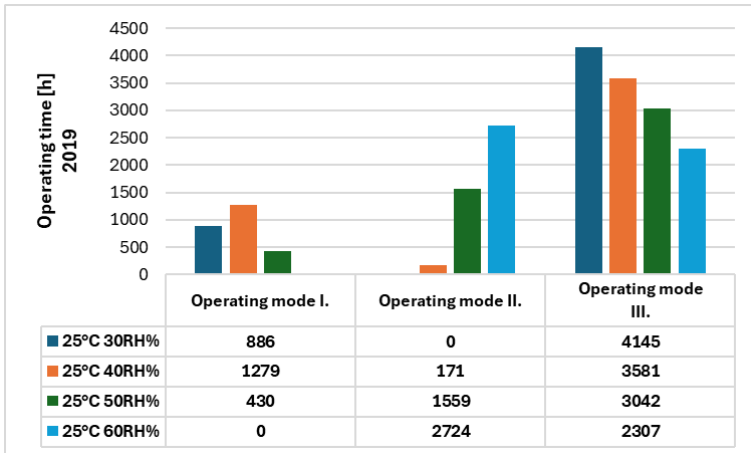


Figure 5. The operating time of the air handling unit in energetically optimal modes depending on the indoor air conditions.

Since conditions in the conditioned space may vary during operation, the optimization of the air-handling unit’s performance cannot be predetermined. Depending on the actual operating conditions, the air-handling unit must adjust its mode of operation accordingly.

During the operation of the air-handling unit, there are operating modes (Mode I and Mode II) in which the treatment of outdoor fresh air results in lower cooling energy consumption than that achievable through partial recirculation and treatment of exhaust air from the indoor environment. The number of operating hours with 100% fresh air supply that are optimal in terms of cooling energy consumption increases significantly with the application of indirect evaporative cooling.

5. Utilization of the Achieved Results

The results achieved in my research may contribute to the reduction of cooling energy consumption in comfort-oriented buildings.

The conclusions drawn from the investigation of external heat loads can be utilized in both the architectural and mechanical design of buildings.

Analyzing the daily profile of external heat loads provides a basis for optimizing the operation of cooling energy generation systems. The examination of external heat loads in rooms with different orientations offers additional information for the design and operation of cooling energy distribution system components, thereby supporting the solution of design and operational tasks.

With the indirect evaporative cooling process investigated in this dissertation, my objective is to reduce the mechanical cooling energy demand of comfort air-handling units in a way that complies with the requirements set out in energy regulations and directives.

In my research, my aim was to investigate a system configuration among indirect evaporative cooling solutions that can be easily integrated into conventional air-handling units and air distribution systems. Such an arrangement facilitates the wider adoption and application of the process, both in the design of new air-handling units and in the modernization of existing air distribution systems.

Based on the relationships derived in my dissertation, the amount of cooling energy achievable through the indirect evaporative cooling process, as well as the isothermal operating boundary with respect to outdoor air conditions when applying the process independently, can be calculated under given technical and comfort parameters. With technical parameters in line with current ErP requirements for mechanical systems, the application of indirect evaporative cooling provides sensible cooling capacity across a wide operating range, offering a new design perspective in HVAC system engineering.

With the application of indirect evaporative cooling, it is conceivable to operate a ventilation system without a cooling coil, which, under Hungarian climatic conditions, can adequately fulfill ventilation requirements while significantly reducing the amount of cooling energy produced by the cooling system. An additional advantage of the proposed system configuration is that no cooling energy distribution and control system needs to be installed for the air-handling unit, which may also result in considerable savings in installation costs.

Based on laboratory and real-condition measurements, I identified several development and research issues for which only a limited number of high-impact publications are available, and which are not addressed by the system solutions currently available on the market.

In my research, I revealed that the potential energy savings with the indirect evaporative cooling process can be increased through the modification and development of the operational framework of the air-handling unit. For a general air-handling configuration, I defined the conditions for the application of the process.

Most of the evaporative cooling devices available on the market for integration into air-handling units are through-flow systems, in order to minimize hygienic risks. This technical solution requires the limitation of the water flow rate. In my research, I defined a relationship—based on the air state of the exhaust air and the technical parameters of the air-handling unit—by which the amount of through-flow water can be determined. The measurement series conducted during the research revealed that operating conditions may occur under which it is not necessary to exploit the maximum potential of the evaporative cooler built into the unit; in such cases, regulation of the water flow rate is also required. Using this relationship, I developed a control procedure capable of addressing this issue.

In my research, I established that the EER and SEER indicators commonly used to characterize cooling systems are not, on their own, suitable for comparing vapor-compression cooling solutions with evaporative cooling, as they do not account for water consumption, which is a determining resource in evaporative cooling. To address this issue, I developed new indicators that enable a comparison of the processes on an economic basis.

In summary, the version of the indirect evaporative cooling process examined in my research is practically applicable and can be appropriately integrated into the system solutions currently in use. Its introduction into the practice of building services engineering in Hungary can be realized within a short period of time.

Publications Forming the Basis of the PhD Dissertation

Kostyák, A., Szekeres, S., Nagy, G. E., Kostyák, F., Csáky, I. (2025): Légkezelő berendezések energiahatékonyágának növelése indirekt evaporatív léghűtéssel: Energetikai vizsgálat a magyar éghajlati viszonyok figyelembevételével. *M. Épületgépészet*, 74 (4), 1-11,

Kostyák, A., Kostyák, F., & Bodnár, I. (2024). Hygienic investigation of the evaporative cooling system installed in air handling units. *Journal of Physics Conference Series*, 2911(1), 012025.

Kostyák, A., Szekeres, S., & Csáky, I. (2024). The effect of indirect evaporative cooling applied to existing AHU systems. *Journal of Architectural Engineering*, 30(4).

Kostyák, A., Szekeres, S., & Csáky, I. (2024). Assessment of the Actual and Required Cooling Demand for Buildings with Extensive Transparent Surfaces. *Energies*, 17(23), 5814.

Kostyák, A. (2023). Indirect evaporative cooling primary and secondary effects for the cooling energy consumption of the Air Handling Units. *Journal of Physics Conference Series*, 2628(1), 012016.

Kostyák, A., Szekeres, S., & Csáky, I. (2023). Investigation of Sensible Cooling Performance in the Case of an Air Handling Unit System with Indirect Evaporative Cooling: Indirect Evaporative Cooling Effects for the Additional Cooling System of Buildings. *Buildings*, 13(7), 1800.

Kostyák, A., Béres, C., Szekeres, S., & Csáky, I. (2022). Buffer tank discharge strategies in the case of a centrifugal water chiller. *Energies*, 16(1), 188.

Kostyák, A., Csáky, I. (2022). Evaporatív hűtés felhasználási lehetőségei komfortterekben - Az indirekt alkalmazás lehetőségei, *Magyar Épületgépészet*, - 71 : 11-12. (2022), p. 9-13

Kostyák, A., Kostyák, F. (2021). Direkt evaporatív léghűtés alkalmazásának vizsgálata munkaterekben, a 3/2002. (II. 8.) SzCsM-EüM rendelet alapján, *Magyar épületgépészet*, 69 (5), 19-24, 2020.



Registry number:

DEENK/527/2025.PL

Subject:

PhD Publication List

Candidate: Attila Kostyák

Doctoral School: Pekár Imre Doctoral School of Mechanical Engineering

MTMT ID: 10072835

List of publications related to the dissertation

Hungarian scientific articles in Hungarian journals (3)

1. **Kostyák, A.**, Szekeres, S., Nagy, G. E., Kostyák, F., Csáky, I.: Légkezelő berendezések energiahatékonyságának növelése indirekt evaporatív léghűtéssel: Energetikai vizsgálat a magyar éghajlati viszonyok figyelembevételével.
M. Épületgépészet. 74 (4), 1-11, 2025. ISSN: 1215-9913.
2. **Kostyák, A.**, Csáky, I.: Evaporatív hűtés felhasználási lehetőségei komfortterekben: az indirekt alkalmazás lehetőségei.
Magyar Épületgépészet. 71 (11-12.), 9-13, 2022. ISSN: 1215-9913.
3. **Kostyák, A.**, Kostyák, F.: Direkt evaporatív léghűtés alkalmazásának vizsgálata munkaterekben, a 3/2002. (II. 8.) SzCsM-EüM rendelet alapján.
Magyar épületgépészet. 69 (5), 19-24, 2020. ISSN: 1215-9913.

Foreign language scientific articles in international journals (6)

4. **Kostyák, A.**, Szekeres, S., Csáky, I.: Assessment of the Actual and Required Cooling Demand for Buildings with Extensive Transparent Surfaces.
Energies. 17 (23), 1-19, 2024. ISSN: 1996-1073.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en17235814>
IF: 3.2
5. **Kostyák, A.**, Kostyák, F., Bodnár, I.: Hygienic investigation of the evaporative cooling system installed in air handling units.
J. Phys. Conf. Ser. 2911 (1), 1-6, 2024. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2911/1/012025>
6. **Kostyák, A.**, Szekeres, S., Csáky, I.: The Effect of Indirect Evaporative Cooling Applied to Existing AHU Systems.
J Architect Engineer. 30 (4), 1-14, 2024. ISSN: 1076-0431.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1061/JAEIED.AEENG-1846>
IF: 1.5





7. **Kostyák, A.**, Béres, C., Szekeres, S., Csáky, I.: Buffer Tank Discharge Strategies in the Case of a Centrifugal Water Chiller.
Energies. 16 (1), 1-15, 2023. ISSN: 1996-1073.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en16010188>
IF: 3
8. **Kostyák, A.**: Indirect evaporative cooling primary and secondary effects for the cooling energy consumption of the Air Handling Units.
J. Phys. Conf. Ser. 2628, 1-6, 2023. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2628/1/012016>
9. **Kostyák, A.**, Szekeres, S., Csáky, I.: Investigation of Sensible Cooling Performance in the Case of an Air Handling Unit System with Indirect Evaporative Cooling: Indirect Evaporative Cooling Effects for the Additional Cooling System of Buildings.
Buildings. 13 (7), 1-17, 2023. EISSN: 2075-5309.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/buildings13071800>
IF: 3.1

List of other publications

Hungarian books (1)

10. Németh, B., Hámori, S., **Kostyák, A.**, Vigh, G.: Különböző funkciójú épületek klimatechnikája III.: segédlet ipari épületek lég- és klimatechnikai rendszereinek tervezése. Magyar Mérnöki Kamara, Budapest, 121 p., 2019. (Magyar Mérnöki Kamara kiadványsorozata ; 46.)

Hungarian book chapters (2)

11. Balogh, L., Bodnár, I., **Kostyák, A.**: Direkt evaporatív léghűtő rendszerek környezeti és higiéniai vizsgálata.
In: Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2025: konferenciakötet. Szerk.: Szodrai Ferenc, szerk. Bondár Nikolett, MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága, Debrecen, 30-36, 2025. ISBN: 9789634907343
12. Nagy, G. E., **Kostyák, A.**: Kültérből származó munkalevegővel megvalósított indirekt- evaporatív hűtés vizsgálata.
In: Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2025: konferenciakötet. Szerk.: Szodrai Ferenc, szerk. Bondár Nikolett, MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága, Debrecen, 25-29, 2025. ISBN: 9789634907343



Hungarian scientific articles in Hungarian journals (4)

13. Szekeres, S., **Kostyák, A.**: Hígítás, helyi elszívás, szennyező anyagok ipari csarnokokban.
Magyar épületgépészet. 70 (5), 20-24, 2021. ISSN: 1215-9913.



14. Hámori, S., **Kostyák, A.**: Baromfi-feldolgozó üzem légtechnikai rendszerének vizsgálata.
Épületgépész. 9 (6), 32-36, 2020. ISSN: 2063-5400.
15. **Kostyák, A.**, Szodrai, F.: Szélcsatornaépítés a gyakorlatban = Wind tunnel making in practise.
IJEMS. 2 (1), 19-24, 2017. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2017.1.4>.
16. **Kostyák, A.**, Szodrai, F.: Létesítmény szélenergia hasznosításának lehetőségei = Wind energy harnessing options at buildings.
IJEMS. 1 (2), 51-58, 2016. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2016.2.7>.

Foreign language scientific articles in international journals (3)

17. **Kostyák, A.**, Szekeres, S., Kostyák, F., Csáky, I.: Investigation of the possibility of intermittent water supply in evaporative air coolers.
J. Architect. Engineer. "Accepted by Publisher", 1-26, 2025. ISSN: 1076-0431.
IF: 1.5 (2024)
18. Szekeres, S., **Kostyák, A.**, Csáky, I.: Analysis of capture velocity in the case of local exhaust ventilation.
J. Archit. Eng. 30 (2), 1-8, 2024. ISSN: 1076-0431.
DOI: <https://doi.org/10.1061/JAEIED.AEENG-1781>
IF: 1.5
19. Szekeres, S., **Kostyák, A.**, Szodrai, F., Csáky, I.: Investigation of Ventilation Systems to Improve Air Quality in the Occupied Zone in Office Buildings.
Buildings. 12 (4), 1-17, 2022. EISSN: 2075-5309.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/buildings12040493>
IF: 3.8

Hungarian conference proceedings (2)

20. **Kostyák, A.**, Szodrai, F.: Az alföldi szélenergia-potenciál vizsgálata = Investigation of Wind Energy Potential in the Great Hungarian Plain.
In: A XXI. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka előadásai = Proceedings of the XXIth National Scientific Conference of Young Engineers. Szerk.: Bitay Enikő, Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 233-236, 2016, (Műszaki tudományos közlemények, ISSN 2393-1280 5.)
21. **Kostyák, A.**, Szodrai, F.: Szélenergetikai vizsgálatok adott turbinatípusok mellett.
In: Műszaki tudomány az Észak-Kelet Magyarországi régióban 2016. Szerk.: Bodzás Sándor, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 253-260, 2016. ISBN: 9789637064333





Hungarian abstracts (2)

22. Biró, B., **Kostyák, A.**: Indirekt Evaporatív léghűtő rendszer vizsgálata.

In: Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2024: Konferencia előadások kivonatai. Szerk.: Dömötör Csaba, MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága, Miskolc, 80-80, 2024. ISBN: 9789637064456

23. **Kostyák, A.**, Csáky, I.: Evaporatív léghűtés alkalmazási lehetőségének vizsgálata komfort légtechnikai rendszerekben.

In: Műszaki tudomány az észak-kelet magyarországi régióban 2022 : konferencia előadások kivonatai. Szerk.: Kocsis Imre, Dezső Gergely, MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága, Nyíregyháza, 20, 2022. ISBN: 9786156032508

Patents (2)

24. Csáky, I., **Kostyák, A.**, Szekeres, S.: Moduláris szellőztető berendezés. 2024

Hatáskör: Magyarország

Bejelentés ideje: -

Ügyiratszám: U2400177 ()

Szabadalmi szám: P2400435

Szabadalom státusza: Oltalom fennáll - Végleges oltalom alatt áll

25. Csáky, I., **Kostyák, A.**, Szekeres, S., Szodrai, F.: Légtérelő egység beépített szellőztető rendszerekhez. 2022

Hatáskör: Magyarország

Bejelentés ideje: -

Ügyiratszám: U2100156/7 ()

Szabadalmi szám: -

Szabadalom státusza: Oltalom fennáll - Végleges oltalom alatt áll

Total IF of journals (all publications): 17,6

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 10,8

The Candidate's publication data submitted to the Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of the Journal Citation Report (Impact Factor) database.

17 September, 2025

