



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék
Pattantyús Ábrahám Géza Gépészeti Tudományok Doktori Iskola

Nyíltfelszínű, nyugvó víz atmoszférikus párolgása
állandósult állapotban

PhD értekezés téziszülete

Varju Evelin

Témavezető:
Dr. Poós Tibor
egyetemi docens

BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS

A párolgás jelenségének fontos szerepe van a háztartásban, a meteorológiában és a műszaki alkalmazások területén. Ipari párolgás során a folyadékvesztéséget sok esetben nem lehet elhanyagolni, mivel azt pótolni kell, ugyanakkor bizonyos esetekben a párolgással a légkörbe került szennyezőanyag koncentrációja is fontos paraméter lehet. Így az úszómedencék, a víztározók, tavak és hűtőtavak párolgási sebességének ismerete számos esetben elengedhetetlen. Egy uszodában üzemelő légkezelő rendszer műveleti tervezésénél, valamint az energiafogyasztás meghatározásánál kulcsfontosságú a párolgási sebesség helyes számítása. A párolgási sebesség alábecslése a légkezelő rendszer alulméretezéséhez vezethet, a túlbecslése pedig magasabb beruházási költséget és indokolatlanul magas energiafogyasztást, így magasabb üzemeltetési költséget von maga után. Az ivóvízkészlet pontosabb becslésére egyre nagyobb szükség van, mivel száraz környezetben a víztározókban és a tavakban lévő víz egy része párolgással veszteségként távozik a környezetbe. A veszteség valószínűleg elkerülhetetlen, de nagyságának, valamint a párolgást befolyásoló tényezőknek az ismerete elengedhetetlen, hogy ezt a mennyiséget pótolni tudják, vagy csökkentse a veszteség mértékét. Az erőművekben a hűtési feladatokat ellátó, felhasznált hűtővíz hőmérsékletének csökkentésére hűtőtavakat is alkalmaznak, melyek méretezése során kritikus pontnak számít a párolgási hővesztés meghatározása.

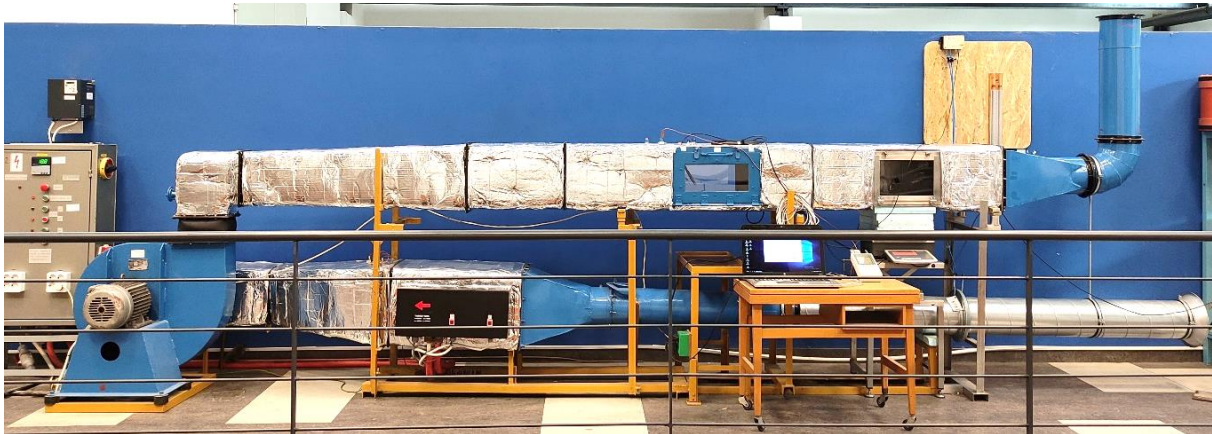
Párolgás során a folyadékfelszín felett lévő gáz vékony rétege a molekuláris diffúzió hatására telítődik a folyadék gőzével. Ha nincs gázmozgás, akkor a gőz diffúzióval terjed tovább a főtömegbe. Ha van kényszerített gázmozgás, akkor a telített gázréteget a gázáram magával ragadja, és a helyére szárazabb gázt szállít, így növelve a párolgás sebességének hajtóerejét. Kevert áramlásnál a gáz sűrűségkülönbségből származó felhajtóerő és a gázsebességből eredő kényszerített mozgás hatásai közel azonos mértékűek, így azokat együttesen kell figyelembe venni. Ezt a párolgási folyamatot több gáz és folyadék állapotjelző, illetve tulajdonság befolyásolja. A szakirodalomban jelenleg nem található olyan összefüggés, amelyet adott feltételek mellett nagy biztonsággal lehetne a párolgási sebesség meghatározására alkalmazni. Ezen felül a szakirodalmi összefüggések csak abban az esetben használhatóak, ha ismert, hogy melyek a használatukhoz kötött érvényességi tartományok, azonban ezek a legtöbb esetben hiányoznak. Továbbá az általuk adott eredmények nagyban függenek az alkalmazott mérőberendezéstől és a méréstechnikai körülményektől.

Az egyidejű hő- és anyagátadás kutatása, főként a szárítás témakörében, már rendelkezik előzményekkel az Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszéken. Természetes, illetve kevert vagy kényszerített gázáramlás melletti nyíltfelszínű víz párolgására javaslok dimenzió nélküli összefüggéseket, amellyel a párolgási sebesség adott gáz és folyadék állapotjelzők esetén számítható. Utóbbi összefüggés létrehozásához a Stokes Laboratóriumban található konvekciós szárító (1. ábra) gépészetileg és méréstechnikailag korszerűen felszerelt, így a folyadékpárolgás vizsgálatára is alkalmas.

Célkitűzés

Doktori munkám során a természetes, a kevert és a kényszerített gázáramlás melletti nyíltfelszínű folyadék párolgásának vizsgálatával foglalkoztam. A kutatásom célja a víz párolgási sebességének meghatározására alkalmas összefüggés létrehozása volt, ami kisebb hibával képes megadni a párolgási sebesség értékét széles érvényességi tartományban, így a kutatómunkám az alábbi főbb lépésekből állt:

1. Irodalmi források segítségével a folyadékok párolgásának vizsgálati és csoportosítási lehetőségeinek rendszerezése, illetve a párolgási sebesség meghatározására közölt összefüggések összegyűjtése.
2. Módszer kifejlesztése a gáz és folyadék állapotjelzők alapján a természetes, a kevert és a kényszerített gázáramlás melletti, nyíltfelszínű folyadékok párolgási eseteinek csoportosítására.
3. Számítási algoritmus kidolgozása a természetes, a kevert és a kényszerített gázáramlás melletti, állandó gáz és folyadék állapotjelzőjű, nyíltfelszínű folyadék párolgásának leírására alkalmas dimenzió nélküli egyenletek paramétereinek meghatározására.
4. Mérési és szakirodalmi eredmények alapján a természetes, a kevert és a kényszerített gázáramlás melletti, állandó gáz és folyadék állapotjelzőjű, nyíltfelszínű folyadék párolgásának leírására alkalmas dimenzió nélküli számokból képezett összefüggések kidolgozása
5. Az új, dimenzió nélküli egyenletek szakirodalmi összefüggésekkel történő összehasonlítása.



1. ábra. Párolgási sebesség vizsgálatára alkalmas mérőállomás

SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Folyadékok párolgásával már az 1800-as évek óta foglalkoznak a kutatók, és az elmúlt évtizedek során született nagy mennyiségű publikáció bizonyítja a párolgás jelenségének komplexitását és fontosságát. A párolgást különböző szempontok szerint lehet csoportosítani, ilyen a gázáramlás jellege, a fellépő hajtóerők típusa és iránya, a párolgási sebességet megadó egyenlet és a párolgás típusa. A gázáramlás [1]–[4] szerint beszélhetünk természetes, kevert és kényszerített gázáramlás melletti párolgásról. Ez a csoportosítás igen gyakori a szakirodalomban, azonban a légsebességen kívül nem veszi figyelembe a párolgást befolyásoló más paraméterek hatását. A párolgás jelenségének alapjait használja fel a fellépő hajtóerők típusa (nedvességtartalom- és hőmérséklet-különbség) és iránya szerinti csoportosítás [5], azonban ez a hely és idő szerinti változásokat nem veszi figyelembe. Ha adott egy párolgási eset, akkor az egyenlet szerinti csoportosítás [6], [7] alapján nem lehet megmondani, hogy melyik alkalmazásával számítható ki a megfelelő párolgási sebesség érték. A párolgás típusa szerinti csoportosítás [2], [7] a gyakorlat szempontjából megfelelő lehet, mivel a hasonló párolgási jelenségek vannak egy esetben csoportosítva, azonban ekkor olyan párolgási folyamatok is kerülhetnek külön esetben, amik azonos paraméterekkel leírhatóak, vagyis azonos jelenségek kerülnek megkülönböztetésre.

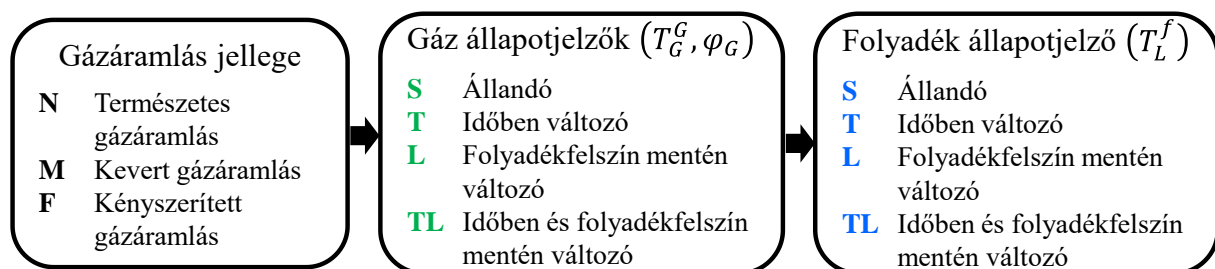
Szakirodalomkutatás során összegyűjtöttem azokat a publikációkat, amik a folyadékok párolgásával foglalkoznak, illetve a párolgási sebességet megadó egyenleteket táblázatosan foglaltam össze. Azonos körülmények között az összefüggések által adott eredményekben nagy eltérést figyeltem meg, ami alapján arra a megállapításra jutottam, hogy a szakirodalomban jelenleg nem található olyan összefüggés, amelyet nagy biztonsággal lehetne a párolgási sebesség számítására alkalmazni, illetve a legtöbb kutató által elfogadott lenne. Ezek ugyanis nagyban függenek az alkalmazott mérőberendezéstől és mérés technikai körülményektől, így valószínűleg ez is az oka, hogy tekintélyes mennyiségű összefüggés lelhető fel az irodalomban a párolgási sebességre. A publikációkban a mérőberendezés és a mérés során alkalmazott mérőeszközök adatai megfelelő részletességgel szerepeltek, azonban a legnagyobb hiányosságot az okozta, hogy a mérés során beállított üzemi paraméterek értékeit és az eredményeket hiányosan, vagy nem megfelelően közölték. A mérési eredmények alapján létrehozott egyenlet a párolgási sebesség számítására csak abban az esetben használható, ha ismert, hogy az egyenlet milyen körülményekre lett létrehozva, és mik a használatához kötött érvényességi tartományok. Ezek sok esetben nem, vagy hiányosan lettek megadva, így használatuk és az azokkal kapott eredmények megkérdőjelezhetővé válnak. Ezen felül a mérési körülmények tartományként történő megadása nem elégséges feltétele az eredmények reprodukálhatóságának, mivel a nem elegendő számú feltétel megadásával félrevezető és pontatlan eredményt kaphatunk a paraméterek számos kombinációi miatt. Így elengedhetetlen a kutatásokban a mérési körülmények pontos leírása, az eredmények táblázatban vagy diagramon történő megjelenítése és az összes paraméter érvényességi tartományának megadása.

PÁROLGÁSI ESETEK

A párolgás jelenségét különböző szempontok szerint lehet csoportosítani (gázáramlás jellege, fellépő hajtóerők típusa és iránya, párolgási sebességet megadó egyenlet és párolgás típusa), de eddig egyik kutatás sem vette alapul igazán a párolgás sebességét befolyásoló hatásokat vagy jellemzőket, amik alapján egy adott esetben tartozó kutatási eredmények egymással összehasonlíthatóvá vagy összevonhatóvá válnak. Így olyan csoportosítási szempontra volt szükség, amelyik segítségével egy adott párolgási eset egyértelműen besorolható a megfelelő csoportba, és nem fog össze olyan eseteket, amik együtt nem kezelhetők. Ha a jelenséget alapvetően befolyásoló tényezők hasonlósága vagy különbözősége szerint történik a csoportosítás, akkor sokkal differenciáltabb és szabatosabb felosztást kapunk. Ezen tényezők közé tartozik a gáz folyadékfelszín feletti nyomása, anyagi minősége (összetétel), hőmérséklete, nedvességtartalma, jellemző sebessége és az áramlás turbulenciafoka; valamint a folyadék anyagi minősége (összetétel, tenzió), felszíni hőmérséklete, konvekciója és a folyadékfelszín nagysága. Így különböző párolgási esetek kategorizálhatóak a gáz főtömegbeli (T_G^G, φ_G) , valamint a folyadékfelszíni (T_L^f) állapotjelzők és tulajdonságok ismeretében a 2. ábra szerint a természetes, a kevert és a kényszerített gázáramlás melletti párolgásra, ha a következő feltételek teljesülnek:

- állandó atmoszférikus nyomás;
- környezetre nyitott folyadékfelszín (továbbiakban nyíltfelszínű folyadék),
- a folyadékfelszín sík felszínnel jellemezhető (pl. nincs hullámozás, fodrozódás);
- a folyadék kényszerített mozgása elhanyagolható (pl. nincs keverés vagy folyadékáramlás);
- a párolgáson kívüli egyéb folyadékveszteség elhanyagolható.

Adott gázáramlási csoporton belül megkülönböztetünk állandó, időben változó, folyadékfelszín mentén változó, valamint időben és folyadékfelszín mentén változó állapotjelzőjű eseteket. Tehát a természetes, a kevert és a kényszerített gázáramlás melletti párolgási kategórián belül, a gáz és a folyadék állapotjelzők szerint 4×4 , vagyis 16 különböző eset lehetséges. A teljes csoportosítást tekintve így összesen $3 \times 4 \times 4$, vagyis 48 párolgási esetet különböztethetünk meg. A párolgási esetek gáz és folyadék állapotjelzők szerinti csoportosítása tézispontként jelent meg a tudományos eredményeim között.



2. ábra. Párolgási esetek csoportosítása állandó légnyomás esetén

PÁROLGÁS MÉRÉSEK ÉS KIÉRTÉKELÉSI MÓDSZEREK

A munkám célja olyan párolgási sebességet megadó összefüggések létrehozása volt a természetes, a kevert vagy a kényszerített gázáramlás melletti, állandó gáz és folyadék állapotjelzőjű párolgási esetekre, amik széles érvényességi tartományban alkalmazhatók, illetve az alkalmazásukhoz kötött feltételek megfelelő részletességgel vannak megadva. Az összefüggésekben szereplő dimenzió nélküli számokat dimenzióanalízissel állítottam elő. A dimenzió nélküli egyenletek előnye, hogy általános érvényűnek tekinthetők, mivel tartalmazzák az anyagjellemzők hőfokfüggését és a párolgó felszín jellemző méretét is. Természetes gázáramlás melletti anyagátadás esetén a Sh -szám a következő összefüggéssel adható meg:

$$Sh = ARa_m^B Sc^C \phi_T^D \phi_p^E,$$

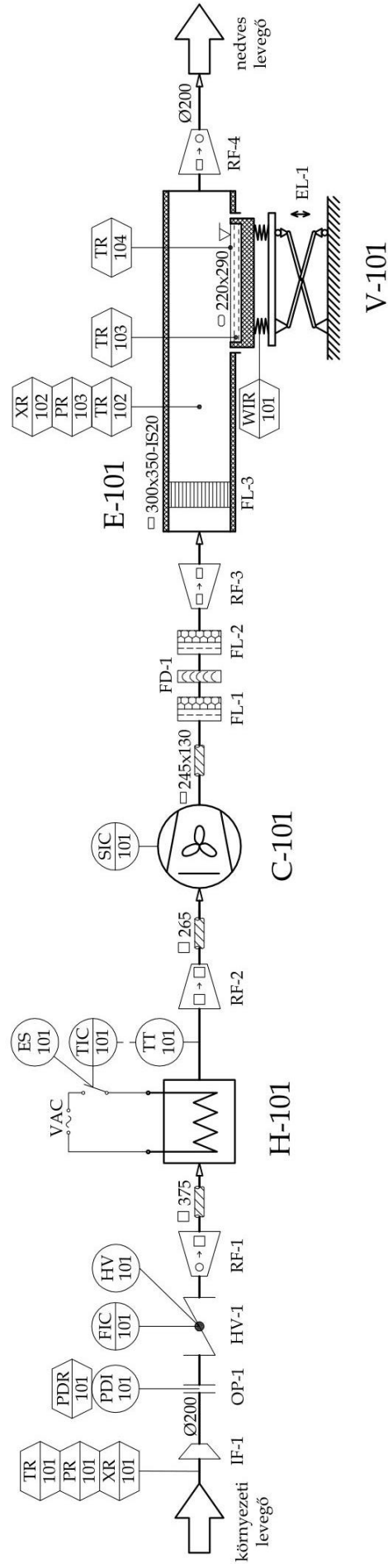
míg kevert vagy kényszerített gázáramlás melletti párolgás esetén:

$$Sh = ARi^B Re^C Sc^D \phi_T^E \phi_p^F.$$

Az új dimenzió nélküli egyenletek megalkotásához a szakirodalomban található mérési eredményeket használtam fel, amelyeket kiegészítettem a tanszéki mérőállomáson végzett párolgás mérések eredményeivel. A mérőállomás a kevert vagy kényszerített gázáramlás melletti, állandó gáz és folyadék állapotjelzőjű párolgás vizsgálatára alkalmas, aminek műszerelemekkel bővített technológiai folyamatábrája a 3. ábrán látható. A mérés során rögzítésre került a környezeti levegő hőmérséklete, relatív nedvességtartalma és nyomása, a mérőperemen mért nyomáskülönbség, a csatornában áramló levegő hőmérséklete, relatív nedvességtartalma és nyomása, a víz felszíni és főtömegbeli hőmérséklete, az elpárolgott víz tömege és a mérés közben eltelt idő. Víz párolgási sebességét mértem ki különböző légsebességek, levegőhőmérsékletek és levegő nedvességtartalmak mellett. A szakirodalomban található mérési eredmények felhasználásával a saját mérési eredményeket is ellenőriztem, továbbá figyelembe vettem a különböző mérési módszerekből, mérőberendezésekből fakadó eltéréseket, valamint szélesebb érvényességi tartományra hoztam létre a leíró egyenleteket.

A dimenzió nélküli összefüggések létrehozása csak akkor lehetséges, ha elegendő mérési adat áll rendelkezésre a számításhoz. Ahhoz, hogy a dimenzió nélküli összefüggéseket létre lehessen hozni, ismerni kell a párolgási sebességnek, a gázhőmérsékletnek, a gázsebességnek, a gáz relatív nedvességtartalmának, a folyadékfelszín feletti légnyomásnak, a folyadék felszíni hőmérsékletének az értékét, valamint a folyadékfelszín nagyságát és geometriáját. Ezen adatok felhasználásával az egyenletekben szereplő dimenzió nélküli számok meghatározására számítási módszert dolgoztam ki, ami tézisponként jelent meg a tudományos eredményeim között. A dimenzió nélküli számok kitevőinek és az egyenletben szereplő együttható regresszióanalízissel történő meghatározásához a MathWorks MATLAB szoftvert alkalmaztam. Az optimalizálás során az átlagos relatív hiba minimalizálása volt a cél a mért és a mérési adatokból számított Sh -számok között. Az egyenletek érvényességi tartománya, vagyis az alkalmazás határértékei az egyes paraméterekre a felhasznált adatsor minimum és maximum értékeiből határozhatók meg.

IF-1	OP-1	HV-1	H-101	C-101	E-101	V-101	EL-1
Kétpos levegő bevezető	Mérőperem	Pillangószelep	Elektromos légmelegítő	Radiális ventilátor	Párolgásmérő szakasz	Párolgásmérő tálca	Manuális emelő
RF-1	RF-2	FL-1	FD-1	FL-2	FL-3	RF-3	RF-4
Keresztmetszet váltó elem	Keresztmetszet váltó elem	Áramlás-simító elem	Áramlás-terelő elem	Áramlás-simító elem	Áramlás-simító elem	Keresztmetszet váltó elem	Keresztmetszet váltó elem



3. ábra. Párolgási sebesség vizsgálatára alkalmas mérőállomás műszerelemekkel és főbb légszatórnavezetési elemekkel ellátott technológiai folyamatábrája

EREDMÉNYEK

A szakirodalomban található és a tanszéki berendezésen elvégzett mérési eredmények segítségével, regresszióanalízissel létrehoztam a párolgási sebesség meghatározására alkalmas dimenzió nélküli egyenleteket természetes, illetve kevert vagy kényszerített gázáramlás melletti, állandó gáz és folyadék állapotjelzőjű párolgási esetekre. Ezen dimenzió nélküli összefüggések tézispontként jelentek meg a tudományos eredményeim között.

A létrehozott egyenleteket összehasonlítottam a szakirodalomban található párolgási sebesség számítására alkalmas összefüggésekkel. Ehhez statisztikai analízist végeztem, amely során négy statisztikai mutató (átlagos abszolút hiba, átlagos relatív hiba, négyzetes középérték hiba, determinációs együttható) alapján a mérési adatokból és az összefüggésekből számított Sh -szám értékeket hasonlítottam össze. Annak érdekében, hogy mind a négy statisztikai mutató által adott eredményt figyelembe lehessen venni és ezek alapján ki lehessen választani a legjobb összefüggést a párolgási sebesség számítására, az egyes statisztikai mutatók szerint rendszereztem az egyenleteket. Ehhez egy adott statisztikai mutató esetén az egyenletek 0 és 100 közötti pontszámot kaptak aszerint, mennyire közelítik meg a statisztikai mutató ideális értékét. Egy adott összefüggés esetén a négyféle statisztikai mutató által kapott pontszámot átlagoltam a végső sorrend felállításához. A végső, átlagolt pontszám szerint az egyenletek sorba rendezhetőek, és a legnagyobb pontszámmal rendelkező összefüggés használható a legnagyobb biztonsággal a párolgási sebesség meghatározására. Az új dimenzió nélküli egyenletek közelítették legjobban a mért Sh -számokat és így a mért párolgási sebesség értékeket is. Ugyanis azok adták a legkisebb hiba értékeket, valamint a legnagyobb determinációs együttható értéket, amit a Bland-Altman módszer segítségével is megerősítettem.

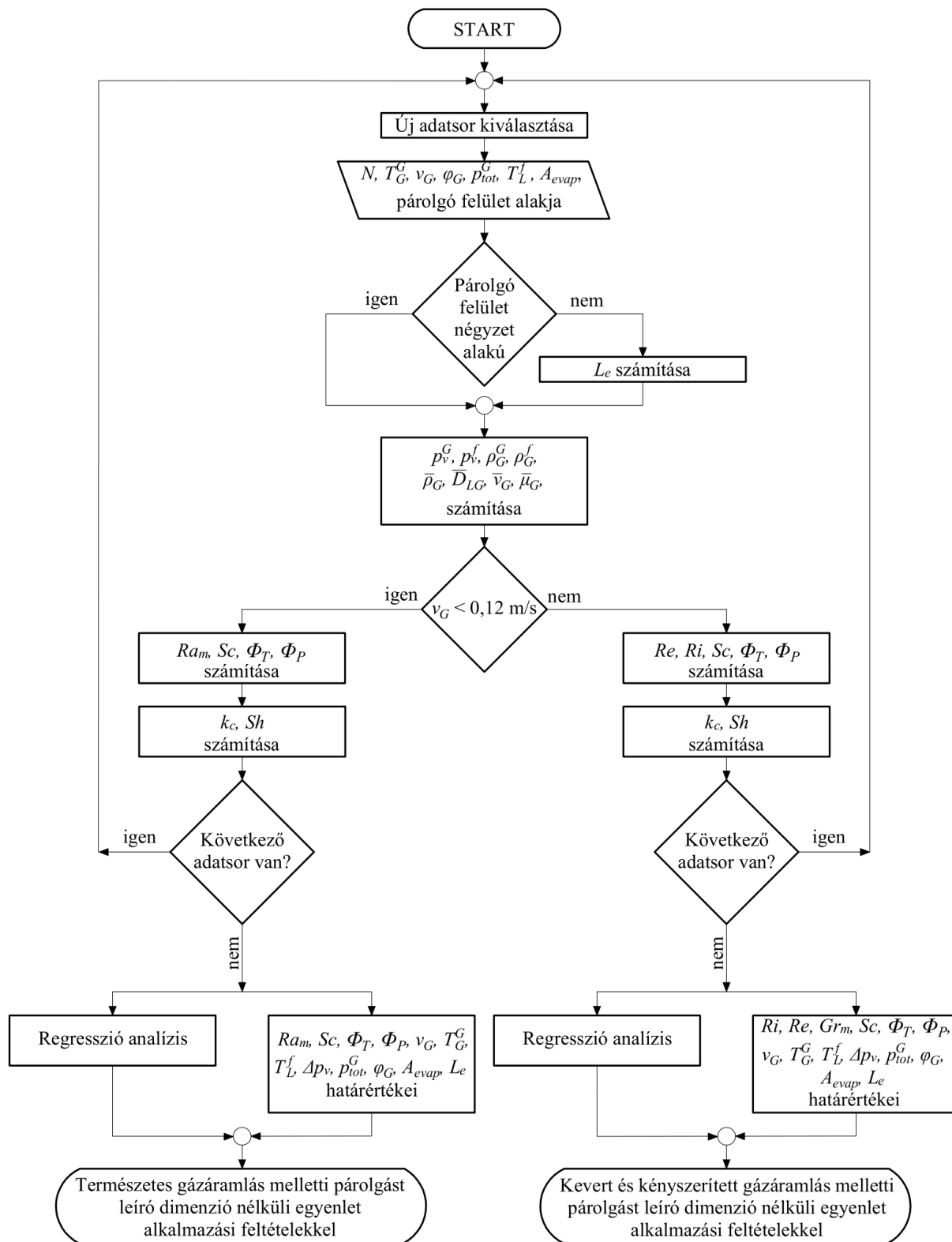
Új tudományos eredmények

1. tézis

A párolgás folyamata csoportosítható a gáz és a folyadék állapotjelzői és tulajdonságai szerint, ha az adott párolgási folyamatra érvényesek a következő feltételek:

- állandó atmoszférikus nyomás;
- környezetre nyitott folyadékfelszín;
- a folyadékfelszín sík felszínnel jellemezhető;
- a folyadék kényszerített mozgása elhanyagolható;
- a párolgáson kívüli egyéb folyadékveszteség elhanyagolható.

Így a feltételeknek megfelelő párolgási folyamat besorolható az ábrán látható 48 eset valamelyikébe.



Párolgást leíró dimenzió nélküli egyenletek mérési adatok alapján történő létrehozásának logikai blokkdiagramja

A számítási algoritmus alkalmazásához az alábbi adatok szükségesek:

1. párolgási sebesség (N);
2. gáz főtömegbeli hőmérséklete (T_G^G);
3. gázsebesség (v_G);
4. gáz relatív nedvességtartalma (φ_G);
5. folyadékfelszín feletti légnyomás (p_{tot}^G);
6. folyadék felszíni hőmérséklete (T_L^f);
7. folyadékfelszín nagysága (A_{evap}) és geometriája.

Az ábrán szereplő jelölések jelentése:

N [$kg/(m^2s)$]	párolgási sebesség (tömegáramsűrűség);
T_G^G [$^{\circ}C$]	gáz főtömegbeli hőmérséklete;
v_G [m/s]	gázsebesség;
φ_G [1]	gáz relatív nedvességtartalma;
p_{tot}^G [Pa]	gáznyomás;
T_L^f [$^{\circ}C$]	folyadékfelszín hőmérséklete;
A_{evap} [m^2]	párolgó folyadékfelszín nagysága;
L_e [m]	folyadékfelszín egyenértékű jellemző mérete, amely $L_e = \sqrt{A_{evap}}$;
p_v^G [Pa]	folyadék gőzének parciális nyomása a gáz főtömegbeli hőmérsékletén;
p_v^f [Pa]	folyadék gőzének parciális nyomása a folyadékfelszín hőmérsékletén;
ρ_G^G [kg/m^3]	nedves gáz sűrűsége a gáz főtömegbeli hőmérsékletén;
ρ_G^f [kg/m^3]	nedves gáz sűrűsége a folyadékfelszín hőmérsékletén;
$\bar{\rho}_G$ [kg/m^3]	a nedves gáz átlagos sűrűsége a folyadékfelszíni és a gáz főtömegbeli hőmérsékletén;
\bar{D}_{LG} [m^2/s]	a gáz és a folyadék közötti átlagos molekuláris diffúziós tényező a folyadékfelszíni és a gáz főtömegbeli hőmérsékletén;
\bar{v}_G [m^2/s]	a nedves gáz átlagos kinematikai viszkozitása a folyadékfelszíni és a gáz főtömegbeli hőmérsékletén;
$\bar{\mu}_G$ [m^2/s]	a nedves gáz átlagos dinamikai viszkozitása a folyadékfelszíni és a gáz főtömegbeli hőmérsékletén;
Gr_m [1]	Grashof-szám, $Gr_m = (\rho_G^G - \rho_G^f) \frac{gL_e^3 \bar{\rho}_G}{\bar{\mu}_G}$, ahol g [m/s^2] a gravitációs gyorsulás;
Re [1]	Reynolds-szám, $Re = \frac{v_G L_e}{\bar{v}_G}$;
Ri [1]	Richardson-szám, $Ri = \frac{Gr_m}{Re^2}$;
Ra_m [1]	Rayleigh-szám, $Ra_m = (\rho_G^G - \rho_G^f) \frac{gL_e^3}{\bar{v}_G \bar{\rho}_G \bar{D}_{LG}}$;
Sc [1]	Schmidt-szám, $Sc = \frac{\bar{v}_G}{\bar{D}_{LG}}$;
Φ_T [1]	hőmérsékletekből származó korrekciós tag, $\Phi_T = \frac{T_G^G + 273,15}{T_L^f + 273,15}$;
Φ_p [1]	parciális gőznyomásból származó korrekciós tag, $\Phi_p = \frac{\Delta p_v}{p_{tot}^G}$, ahol Δp_v [Pa] a folyadék gőzének parciális nyomáskülönbsége a

	főtömegbeli és a folyadékfelszín feletti nedves gázra, amely
	$\Delta p_v = p_v^f - p_v^G$;
k_c [m/s]	mólkonzentrációval értelmezett anyagátadási tényező, amely
	$k_c = \frac{N}{M_L \left(\frac{p_v^f}{R(T_L^f + 273,15)} - \frac{p_v^G}{R(T_G^G + 273,15)} \right)}$, ahol R az egyetemes gázállandó, $R =$
	8,314 [J/molK];
Sh [1]	Sherwood-szám, $Sh = \frac{k_c L_e}{\bar{D}_{LG}}$.

Kapcsolódó publikációk: [S1], [S2], [S3].

3. tézis

A párolgási sebesség, nyíltfelszínű folyadék természetes gázáramlás melletti, állandó gáz állapotjelzőjű és állandó folyadékhőmérsékletű párolgása esetén, az alábbi dimenzió nélküli összefüggésből számítható levegő-víz rendszerre:

$$Sh = 0,7 Ra_m^{1/4} Sc^{1/3} \Phi_T^{-0,6} \Phi_p^{-0,05}.$$

Az egyenlethez tartozó 90%-os konfidencia-intervallum felső határa +26%, míg az alsó határa -22%, továbbá az egyenlet átlagos relatív hibája 11,9% az alábbi érvényességi tartományban és mérési körülmények esetén:

$$\begin{aligned} 3,67 \cdot 10^5 \leq Ra_m \leq 2,48 \cdot 10^8 & \quad 7^\circ C \leq T_G^G \leq 27^\circ C \\ 0,58 \leq Sc \leq 0,7 & \quad 53\% \leq \varphi_G \leq 98\% \\ 0,8 \leq \Phi_T \leq 1 & \quad 5 \text{ g/kg} \leq Y_G \leq 19 \text{ g/kg} \\ 0,003 \leq \Phi_p \leq 0,8 & \quad 220 \text{ Pa} \leq \Delta p_v \leq 80000 \text{ Pa} \\ & \quad 84300 \text{ Pa} \leq p_{tot}^G \leq 102300 \text{ Pa} \\ & \quad 8^\circ C \leq T_L^f \leq 94^\circ C \\ & \quad 0,023 \text{ m}^2 \leq A_{evap} \leq 0,278 \text{ m}^2 \\ & \quad 0,15 \text{ m} \leq L_e \leq 0,52 \text{ m} \end{aligned}$$

ahol

Sh [1] Sherwood-szám, $Sh = \frac{k_c L_e}{\bar{D}_{LG}}$, ahol k_c [m/s] a mólkonzentrációval értelmezett anyagátadási tényező a levegő és a víz között; L_e [m] a vízfelszín jellemző egyenértékű jellemző méret, amely $L_e = \sqrt{A_{evap}}$, ahol A_{evap} [m²] a párolgó vízfelszín nagysága; \bar{D}_{LG} [m²/s] a levegő és a víz közötti átlagos molekuláris diffúziós tényező a vízfelszíni és a levegő főtömegbeli hőmérsékletén;

Ra_m [1] Rayleigh-szám, $Ra_m = (\rho_G^G - \rho_G^f) \frac{g L_e^3}{\bar{\nu}_G \bar{\rho}_G \bar{D}_{LG}}$, ahol ρ_G^G [kg/m³] a nedves levegő sűrűsége a főtömegbeli hőmérsékletén; ρ_G^f [kg/m³] a nedves levegő sűrűsége a vízfelszín hőmérsékletén; $\bar{\rho}_G$ [kg/m³] a nedves levegő átlagos sűrűsége a vízfelszíni és a levegő főtömegbeli hőmérsékletén; g [m/s²] a gravitációs gyorsulás; $\bar{\nu}_G$ [m²/s] a nedves levegő átlagos kinematikai viszkozitása a vízfelszíni és a levegő főtömegbeli hőmérsékletén;

Sc [1]	Schmidt-szám, $Sc = \frac{\bar{v}_G}{\bar{D}_{LG}}$;
Φ_T [1]	hőmérsékletekből származó korrekciós tag, $\Phi_T = \frac{T_G^G + 273,15}{T_L^f + 273,15}$, ahol T_G^G [°C] a levegő főtömegbeli hőmérséklete; T_L^f [°C] a víz felszíni hőmérséklete;
Φ_p [1]	parciális gőznyomásból származó korrekciós tag, $\Phi_p = \frac{\Delta p_v}{p_{tot}^G}$, ahol Δp_v [Pa] a vízgőz parciális nyomáskülönbsége a főtömegbeli és a vízfelszín feletti nedves levegőre, amely $\Delta p_v = p_v^f - p_v^G$; ahol p_v^f [Pa] a vízgőz parciális nyomása a vízfelszín hőmérsékletére; p_v^G [Pa] a vízgőz parciális nyomása a főtömegbeli levegő hőmérsékletén;
p_{tot}^G [Pa]	a nedves levegő össznyomása;
φ_G [1]	a levegő relatív nedvességtartalma.

Kapcsolódó publikációk: [S2], [S5], [S7].

4. tézis

A párolgási sebesség, nyíltfelszínű folyadék kevert vagy kényszerített gázáramlás melletti, állandó gáz állapotjelzőjű és állandó folyadék hőmérsékletű párolgása esetén, az alábbi dimenzió nélküli összefüggésből számítható levegő-víz rendszerre:

$$Sh = 0,24 Ri^{0,03} Re^{0,7} Sc^{1/3} \Phi_T^{-2} \Phi_p^{0,1}$$

Az egyenlethez tartozó 90%-os konfidencia-intervallum felső határa +26%, míg az alsó határa -24%, továbbá az egyenlet átlagos relatív hibája 12,4% az alábbi érvényességi tartományra és mérési körülményekre:

$2,34 \cdot 10^{-6} \leq Ri < 7,4$	$-19^\circ C \leq T_G^G \leq 79^\circ C$
$1400 \leq Re \leq 1,85 \cdot 10^5$	$0,17 \text{ m/s} \leq v_G \leq 5,7 \text{ m/s}$
$3,27 \cdot 10^4 \leq Gr_m \leq 8,47 \cdot 10^9$	$4\% \leq \varphi_G \leq 99\%$
$0,58 \leq Sc \leq 0,7$	$0,5 \text{ g/kg} \leq Y_G \leq 47 \text{ g/kg}$
$0,88 \leq \Phi_T \leq 1,15$	$25 \text{ Pa} \leq \Delta p_v \leq 10000 \text{ Pa}$
$0,0003 \leq \Phi_p \leq 0,1$	$84300 \text{ Pa} \leq p_{tot}^G \leq 101400 \text{ Pa}$
	$1^\circ C \leq T_L^f < 61^\circ C$
	$0,015 \text{ m}^2 \leq A_{evap} \leq 1,09 \text{ m}^2$
	$0,12 \text{ m} \leq L_e \leq 1,04 \text{ m}$

ahol

Sh [1]	Sherwood-szám, $Sh = \frac{k_c L_e}{\bar{D}_{LG}}$, ahol k_c [m/s] a mólkoncentrációval értelmezett anyagátadási tényező a levegő és a víz között; L_e [m] a vízfelszín jellemző egyenértékű jellemző méret, amely $L_e = \sqrt{A_{evap}}$, ahol A_{evap} [m ²] a párolgó vízfelszín nagysága; \bar{D}_{LG} [m ² /s] a levegő és a víz közötti átlagos molekuláris diffúziós tényező a vízfelszíni és a levegő főtömegbeli hőmérsékletén;
----------	--

Re [1]	Reynolds-szám, $Re = \frac{v_G L_e}{\bar{\nu}_G}$, ahol $\bar{\nu}_G$ [m/s] a levegő sebessége; ν_G [m ² /s] a nedves levegő átlagos kinematikai viszkozitása a vízfelszíni és a levegő főtömegbeli hőmérsékletén;
Ri [1]	Richardson-szám, $Ri = \frac{Gr_m}{Re^2}$, ahol a $Gr_m = (\rho_G^G - \rho_G^f) \frac{g L_e^3 \bar{\rho}_G}{\bar{\mu}_G}$, ahol ρ_G^G [kg/m ³] a nedves levegő sűrűsége a főtömegbeli levegő hőmérsékletén; ρ_G^f [kg/m ³] a nedves levegő sűrűsége a vízfelszín hőmérsékletén; $\bar{\rho}_G$ [kg/m ³] a nedves levegő átlagos sűrűsége a vízfelszíni és a levegő főtömegbeli hőmérsékletén, g [m/s ²] a gravitációs gyorsulás; $\bar{\mu}_G$ [Pa · s] a nedves levegő átlagos dinamikai viszkozitása a vízfelszíni és a levegő főtömegbeli hőmérsékletén;
Sc [1]	Schmidt-szám, $Sc = \frac{\bar{\nu}_G}{\bar{D}_{LG}}$;
Φ_T [1]	hőmérsékletekből származó korrekciós tag, $\Phi_T = \frac{T_G^G + 273,15}{T_L^f + 273,15}$, ahol T_G^G [°C] a levegő főtömegbeli hőmérséklete; T_L^f [°C] a víz felszíni hőmérséklete;
Φ_p [1]	parciális gőznyomásból származó korrekciós tag, $\Phi_p = \frac{\Delta p_v}{p_{tot}^G}$, ahol Δp_v [Pa] a vízgőz parciális nyomáskülönbsége a főtömegbeli és a vízfelszín feletti nedves levegőre, amely $\Delta p_v = p_v^f - p_v^G$; ahol p_v^f [Pa] a vízgőz parciális nyomása a vízfelszín hőmérsékletére; p_v^G [Pa] a vízgőz parciális nyomása a főtömegbeli levegő hőmérsékletén;
p_{tot}^G [Pa]	a nedves levegő össznyomása;
φ_G [1]	a levegő relatív nedvességtartalma.

Kapcsolódó publikációk: [S1], [S3], [S4], [S5], [S11], [S12].

ELÉRT EREDMÉNYEK HASZNOSÍTHATÓSÁGA

A párolgás során lejátszódó hő- és anyagátadási folyamatok ismerete fontos lehet különböző ipari berendezések és műveletek, illetve környezeti folyamatok szempontjából, amelyek során a folyadékvesztést sok esetben nem lehet elhanyagolni, mivel annak pótlása szükséges. A folyadékok párolgásával számos tanulmány foglalkozott, de a művelet összetettsége miatt a leegyszerűsített modellek, összefüggések pontosítása a mai napig aktuális kutatási téma.

A párolgás jelenségét a párolgás sebességét befolyásoló gáz és folyadék állapotjelzők szerint csoportosítottam, amik alapján differenciáltabb és szabatosabb felosztást kaptam, így egy adott esetben tartozó kutatási eredmények egymással összehasonlíthatóvá vagy összevonhatóvá váltak. A kutatók a későbbiekben e csoportosítás szerint sorolhatják be az eredményeiket és az egyenleteiket. A szakirodalomban eddig fellelhető publikációkat és a párolgási sebesség számítására alkalmas összefüggéseket a párolgási esetek szerint táblázatos formában foglaltam össze. Ezen táblázatok más kutatások alapjául vagy kiindulási pontjául szolgálhatnak, ezzel egyszerűsítve a kutatók munkáját.

A párolgási sebesség mérésére alkalmas mérőberendezés került bemutatásra, ami gépészetileg és mérés technikailag korszerűen felszerelt. Részletesen ismertetésre került, hogy milyen paraméterek rögzítése szükséges a párolgási sebesség meghatározásához, illetve milyen körülmények és feltételek mellett kell elvégezni a mérést. Mérési eredményekből származó adatok alapján a párolgási sebesség meghatározására alkalmas dimenzió nélküli egyenletet hoztam létre a természetes, illetve a kevert vagy kényszerített gázáramlás melletti párolgás leírására. Jelenleg ezen dimenzió nélküli számokból álló egyenlet adja meg legpontosabban a párolgási sebesség értékét adott érvényességi tartományban. Egy számítási algoritmust hoztam létre, ami bemutatja, hogyan hozhatóak létre ezek a dimenzió nélküli egyenletek, ami arra is alkalmas, hogy újabb mérési eredmények felhasználásával az egyenlet érvényességi tartományát kiterjesszük vagy pontosítsuk az egyenlet által adott eredményeket. A létrehozott új dimenzió nélküli összefüggések szimulációs szoftverbe integrálhatók, illetve alapjául szolgálnak az állandósult állapot melletti párolgásnál bonyolultabb esetek leírásához is. Az időben vagy a térben változó állapotjelzőjú párolgási eseteknél a párolgási sebesség leírható az idő vagy hely szerint állandósultnak tekinthető differenciaszakaszok egymásutánosságával, amelyek már számíthatóak az új dimenzió nélküli összefüggésekből.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] M. T. Pauken, 'An experimental investigation of combined turbulent free and forced evaporation', *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 18, no. 4, pp. 334–340, 0 1998, doi: 10.1016/S0894-1777(98)10038-9.
- [2] M. M. Shah, 'Methods for calculation of evaporation from swimming pools and other water surfaces', *ASHRAE Trans.*, vol. 120, no. 2, pp. 3–17, 2014.
- [3] A. Jodat, M. Moghiman, and M. Anbarsooz, 'Experimental Comparison of the Ability of Dalton Based and Similarity Theory Correlations to Predict Water Evaporation Rate in Different Convection Regimes', *Heat Mass Transf.*, vol. 48, no. 8, pp. 1397–1406, Aug. 2012, doi: 10.1007/s00231-012-0984-z.
- [4] S. O. Hanssen and H. M. Mathisen, 'Evaporation from Swimming Pools', *Proc Roomvent*, no. 31, pp. 1–15, 1990.
- [5] E. Sartori, 'A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces', *Sol. Energy*, vol. 68, no. 1, pp. 77–89, 0 2000, doi: 10.1016/S0038-092X(99)00054-7.
- [6] K. R. Helfrich, E. E. Adams, A. L. Godbey, and D. R. F. Harleman, 'Evaluation of Models for Predicting Evaporative Water Loss in Cooling Impoundments', Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Energy Laboratory 017, 1982.
- [7] T. A. McMahon, B. L. Finlayson, and M. C. Peel, 'Historical developments of models for estimating evaporation using standard meteorological data', *WIRES Water*, vol. 3, no. 6, pp. 788–818, 2016, doi: 10.1002/wat2.1172.

Saját közlemények

- [S1] Varju, E.; Poós, T.: *Investigation of simultaneous heat and mass transfer for open-surface evaporation in mixed and forced convection*. 22nd International Drying Symposium (IDS 2022), 2022.
- [S2] Varju, E.; Poós, T.: *New dimensionless correlation for mass transfer at evaporation of open liquid surface in natural convection*. International Communications in Heat and Mass Transfer 136, 2022. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106102. IF: 6,782 (2021), D1
- [S3] Varju, E.; Poós, T.: *Investigation of evaporation with open water surface in forced convection*. International Scientific Journal of Innovations 9 (3), 114-117, 2021.
- [S4] Poós, T.; Varju, E.: *Mass transfer coefficient for water evaporation by theoretical and empirical correlations*. International Journal of Heat and Mass Transfer 153, 1-10, 2020. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119500. IF:5,584, D1
- [S5] Poós, T.; Varju, E.: *Anyagátadási tényező elméleti és empirikus összefüggéssel történő meghatározása víz párolgása esetén*. XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia (OGÉT 2019), 373-376, 2019.
- [S6] Poós, T.; Varju, E.: *Review for Prediction of Evaporation Rate at Natural Convection*. Heat and Mass Transfer, 55 (6), 1561-1660, 2019, DOI: 10.1007/s00231-018-02535-4. IF:1,867, Q3

- [S7] Poós, T.; Varju, E.: *Párolgási sebességet meghatározó egyenletek áttekintése természetes áramlás esetén*. XXVI. Nemzetközi Gépészeti Konferencia (OGÉT 2018), 373-376, 2018.
- [S8] Poós, T.; Varju, E.: *Review of evaporation rate at natural convection*. 10th International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Resources and Efficiency (EXPRES 2018), 61-64, 2018.
- [S9] Poós, T.; Varju, E.: *Párolgás jelensége gáz-folyadék érintkeztetőkben*. Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban, 403-410, 2017.
- [S10] Poós, T.; Varju, E.: *Műveleti paraméterek hatása abszorberben történő párolgásra*. XXV. Nemzetközi Gépészeti Találkozó (OGÉT 2017), 336-339, 2017.
- [S11] Poós, T.; Varju, E.: *Dimensionless evaporation rate from free water surface at tubular artificial flow*. Energy Procedia 112, 366-373, 2017.
- [S12] Poós, T.; Varju, E.; Szabó, V.: *Dimenziótlan párolgási sebesség szabad folyadékfelszín párolgásánál*. Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban, 766-773, 2016.
- [S13] Poós, T.; Varju, E.: *Párolgási sebesség meghatározása nyitott vízfelszín esetén*. XXIV. Nemzetközi Gépészeti Konferencia (OGÉT 2016), 355-358, 2016.
- [S14] Poós, T.; Varju, E.: *Determination of evaporation rate at free water surface*. 8th International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Resources and Efficiency (EXPRES 2016), 66-71, 2016.