

## Részletes összefoglaló jelentés

### 1. Hőátadási tényező vizsgálata egyidejű hő- és anyagátadási folyamatok esetén

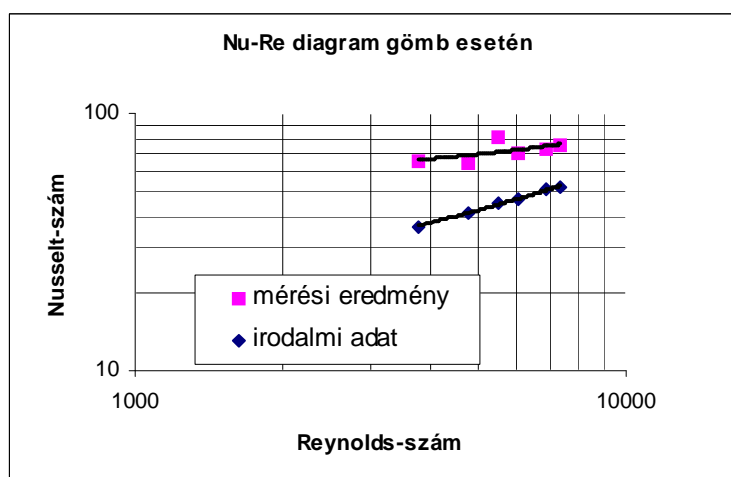
Az egyidejű hő- és anyagátadással járó szárítási folyamatoknál számos szerző utalt a hőátadási tényező speciális értelmezésére, amely abból a jelenségből fakad, hogy a tisztán hőátadási folyamatoknál definiálható hőátadási tényezőnél érzékelhetően nagyobb hőátadási tényező mutatkozik a folytonos felületi nedvesítés szakaszán. A hőátadással foglalkozó irodalmak a hőátadási tényezőt dimenziótlan egyenlet –  $Nu = f(Re)$  kapcsolat - formájában vizsgálják. Síklap esetén - a kutatóhelyen korábban folytatott mérések felhasználásával - elemeztünk ezt a jelenséget.

Sun, S.H, Marrero, T.H. Int. J. Heat Mass Transfer. Vol 39, No.17.pp.3599-3565, (1996) közleményében henger alakú anyagokra közölt hasonló kapcsolatot a hőátadással és az egyidejű hő- és anyagátadással járó folyamatokra.

A kutatási munka következő fázisában megtörtént a konvekciós szárítócsatorna átalakítása, amely alkalmassá vált különböző geometriájú minták rögzítésére és a precíz tömeg- és hőmérséklet mérésre. Elkészült a mérési eredmények adatgyűjtő rendszere, amely biztosítja a mérési adatok korszerű feldolgozását.

Kísérleti méréseket végeztünk különböző gáz sebesség esetén gömb alakú próbatestekkel, melyek nedvességtartalma a felületi nedvességtől az egyensúlyi nedvességtartalmat megközelítő értékig változott. Megvizsgáltuk az anyagon belüli hőmérséklet-eloszlást valamint a nedvességtartalom alakulását a szárítási idő függvényében. Megállapítottuk, hogy stabil állandó száradási sebességű szakasz alakul ki, amely alkalmas a hőátadási tényező kellő pontossággal történő meghatározására. Megfelelő és reprodukálható eredményeket adott a hőmérséklet-eloszlás módszere. Az alkalmazott termoelemes mérési elv pontos, az anyag szerkezetét nem befolyásoló módon méri a belső hőmérsékletet. A szárító egység ismertetését, valamint a mérések leírását [1] ismerteti.

Gömb, felületi nedvesség száradási szakaszán, a mérési eredmények felhasználásával határoztuk meg a hőátadási tényezőt. Változó Reynold-számokkal végzett mérésekkel, meghatározhatóvá válik az 1. ábrán látható, dimenziótlan számokkal jellemzett kapcsolat [2].



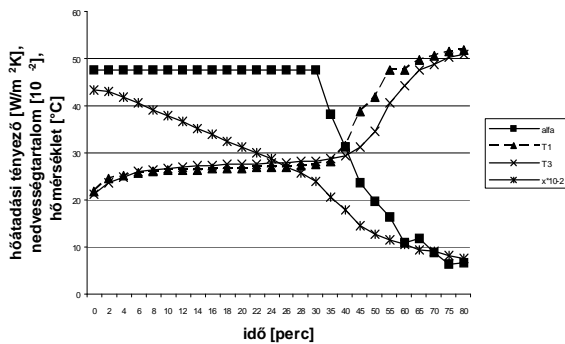
1. ábra Nu-Re kapcsolat gömb csak hőátadás (irodalmi adat) valamint egyidejű hő- és anyagátadás (mérési eredmény) esetén

## 2. A hőátadási tényező és a felületi nedvesítés kapcsolatának elemzése

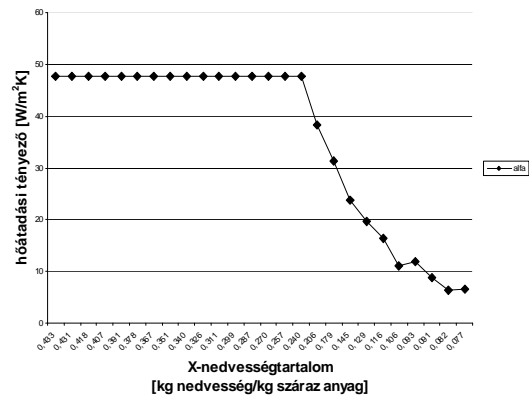
Kísérleti vizsgálatok és irodalmi elemzések alapján megállapítható, hogy egyidejű hő- és anyagátadással járó folyamatoknál a hőátadási tényező eltér a tisztán hőátadási folyamatoknál értelmezett hőátadási tényezőtől. E jelenség további vizsgálatát a felületi nedvesítés és a sűrűlódási viszonyok elemzésével végezzük

### 2.1 A jelenség kísérleti vizsgálata

A további vizsgálatok célja a száradó anyag nedvességtartalmának, a felületi nedvesítés jellegének és a hőátadási tényező kapcsolatának elemzése volt. Kapillár-pórusos anyagok nedvesség kötését karakterisztikusan jellemzi a felületi nedvesség és a kapillárisan kötött nedvesség szakasza. Ezen szakaszoknál – a kísérleti eredmények felhasználásával – megvizsgálható a hőátadási tényező változása. A 2. ábrán a hőátadási tényező változása a száradási idő függvényében, 3. ábrán a száradó anyag nedvességtartalmának függvényében látható. A folytonos felületi nedvesség megszűnésével – a kritikus nedvességtartalomnál kisebb nedvességtartalom esetén – a hőátadási tényező jelentős csökkenése figyelhető meg. E jelenség vizsgálatát [3] közlemény tartalmazza.



2. ábra A hőátadási tényező alakulása a szárítási idő függvényében



3. Hőátadási tényező változása az anyag nedvességtartalom függvényében

### 2.2 A jelenség sűrűlódási viszonyok alapján történő elemzése

A felületi nedvesítés, valamint a keresztteffektusok következtében módosult hőátadási tényező meghatározására modell készült. A kutatóhelyen korábban síklappal folytatott mérések felhasználásával, a felületi nedvesítés hőátadási tényezőre gyakorolt hatását oly módon kívántuk elemezni, hogy a felületen állandó csúsztató feszültséget feltételeztünk. Ezek figyelembe vételével a hő-, anyag- és impulzus megmaradási egyenletekből a csúsztatófeszültség meghatározásának elméletét [5] közleményben ismertettük. Az elmélet alapja, a nedves felületi határrétegre felírható

- impulzus mérleg egyenlet: 
$$\rho b \int_0^{\infty} u(u - U_{\infty}) dy = b \int_0^x \tau_0 dx,$$

- energia mérleg egyenlet: 
$$\rho b c_p \int_0^{\infty} u(T - T_{\infty}) dy = b \int_0^x j_q dx$$

$$\text{-páragóz tömegmérleg egyenlet: } \rho b \int_0^{\infty} (Y - Y_{\infty}) dy = b \int_0^x j_{mV} dx .$$

A vizsgált határrétegben a dimenzió nélküli

$$\text{sebesség: } \bar{u} = \frac{u - u_0}{U_{\infty} - u_0} = f_u(\eta_u),$$

$$\text{hőmérséklet: } \bar{T} = \frac{T - T_0}{T_{\infty} - T_0} = f_T(\eta_T),$$

$$\text{gáz nedvességtartalom: } \bar{Y} = \frac{Y - Y_0}{Y_{\infty} - Y_0} = f_Y(\eta_Y) ,$$

melyek az  $\eta$  dimenzió nélküli vastagságok függvényei.

A határréteg vastagság polinommal történő közelítésével, valamint a határréteg kiterjesztésével igazolható, hogy a felületen feltételezett  $u_0$  sebesség növekedésével csökken a hidrodinamikai ellenállást okozó  $\tau$  feszültség. A felületi – szabad – nedvességtartalomnál nagyobb anyag nedvesség esetén a hidrodinamikai ellenállás kisebb, mint a száraz felület esetén, azaz  $u_0$ -sebesség növeli a hőáram sűrűséget. Ebből levonható az a következtetés, hogy egyidejű hő- és anyagátadással kísért folyamatoknál a hőátadási tényező nagyobb értéket mutat, mint tisztán hőátadásos folyamatoknál.

A kutatómunka további fázisaiban nagy nedvességtartalom változást megvalósító alkalmazások esetén vizsgáljuk a szárítási folyamatokat. Nagy nedvességtartalmú anyagok hőkezelése és nedvességtartalmának csökkentése megvalósítható kevert dob jellegű szárítóban vagy porlasztva szárítóban. Mindkét esetben a hőátadási tényező – nedvességtartalom csökkenés miatti - változása hatást gyakorolhat a készülék fő méreteire.

### **3. Szemcsés halmazok kontakt-konvektív szárításának vizsgálata**

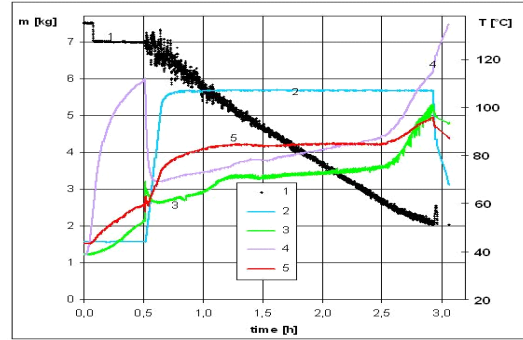
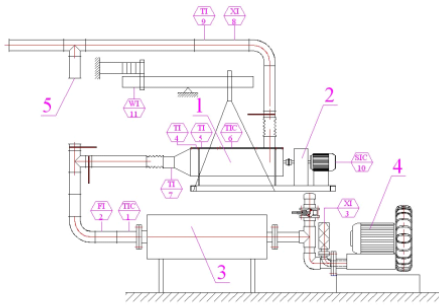
Kevert szemcsés anyagok szárításának vizsgálatához megtörtént a szárító berendezés korszerűsítése és átalakítása, amellyel alkalmassá vált a száradási jellemzők – különböző működtetési paraméterek melletti - meghatározására. Mérési és kiértékelési módszer készült a térfogati hő- és anyagátadási tényezők meghatározására. Kontakt-konvektív hőközlést megvalósító szárítók matematikai modellje lehetőséget biztosít arra, hogy az átadási tényezők ismeretében megvizsgálható legyen a működtetési paraméterek készülék méretre gyakorolt hatása.

#### **3.1. Kísérleti berendezés**

A kevert halmazok szárítására kialakított mérőrendszer alkalmas a gázáramban elosztatott nedves részecskék hő- és anyagátadási jellemzőinek vizsgálatára. A hőátadási és anyagátadási tényezőket jelentős mértékben befolyásolja a hőt közvetítő közeggel történő érintkeztetés.

Megtörtént a tömegmérés hibáinak elemzése és a megbízható hőmérséklet és gáz nedvességtartalom mérés kialakítása. A kísérleti berendezés 4. ábrán látható, a berendezés ismertetését [6] tartalmazza.

A térfogati átadási tényezők meghatározási módszeréről, valamint a modell alkalmazhatóságáról és a paraméterek készülék fő méretre gyakorolt hatásáról [8,9] közleményekben számoltunk be.



4. ábra. Keverős, kontakt-konvektív hőközlést megvalósító szárító és mérési eredmények

### Matematikai modell

Kontakt-konvektív hőközlést megvalósító szárítók hő- és anyagátadási folyamatainak modellezésére olyan módszert ismertettünk, amely figyelembe veszi a szárítógázzal érkező, valamint a falon keresztül érkező hőáramot is [8].

A szárító elemi részére felírható hő- és anyagmérleg egyenletek segítségével levezethető a szárítógáz és a száradó anyag hőmérsékletének és nedvességtartalmának alakulása a szárító hossza mentén. Ezek segítségével méretezhető az adott szárítási feladathoz szükséges szárító.

A szárítógáz nedvességtartalmának megváltozása a szárítódob hossza mentén:

$$\frac{dY_l}{dH} = \frac{\sigma_{l-a} A_q}{m_l} (Y_F - Y_l)$$

A szárítógáz hőmérsékletének megváltozása a szárítódob hossza mentén:

$$-\frac{dT_l}{dH} = \frac{A_q}{m_l c_{nl}} \left[ \alpha_{l-a} a_{l-a} (T_l - T_F) - k_{kv} a_{f-l} (T_g - T_l) \right] + \frac{c_{pWG}}{c_{nl}} \frac{dY_l}{dH} (T_l - T_F)$$

A száradó anyag nedvességtartalmának megváltozása a szárítódob hossza mentén:

$$-\frac{dX}{dH} = \frac{m_l}{m_a} \frac{dY_l}{dH}$$

A száradó anyag hőmérsékletének megváltozása a szárítódob hossza mentén:

$$\frac{dT_a}{dH} = \frac{A_q}{m_a c_{na}} \left[ k_{kt} a_{f-a} (T_g - T_a) + \alpha_{l-a} a_{l-a} (T_l - T_a) \right] + \frac{r_F}{c_{na}} \frac{dX}{dH}$$

A modell alkalmazhatóságához a térfogati átadási tényezők ismerete szükséges, melyet kísérleti úton határoztunk meg.

### Térfogati hőátadási tényezők meghatározása

Az anyag és a szárítógáz közötti térfogati hőátadási tényező meghatározó jelentőségű kevert dob jellegű szárítók méretezéséhez. Változó műveleti paraméterek mellett, különböző szemcsés anyagokkal (kőles, kukorica mag és őrlemény, iszapszemcsék stb.) folytattunk kísérleti méréseket. A mérések során változtatható volt a levegő hőmérséklete és áramlási sebessége, a fal felület fűtése, a töltési fok, a keverő elem fordulatszáma, stb. A kiértékelés módszerét [4] ismerteti. Az elvégzett kísérletek alapján, a  $Nu'$ -  $Re'$  dimenziótlanszámok formájában létrehozott kapcsolatot az 5. ábra mutatja.

Nusselt-szám a térfogati hőátadási tényezővel értelmezve:

$$Nu' = \frac{(\alpha \cdot a)_{l-a} \cdot d^2}{\lambda_{lev}}$$

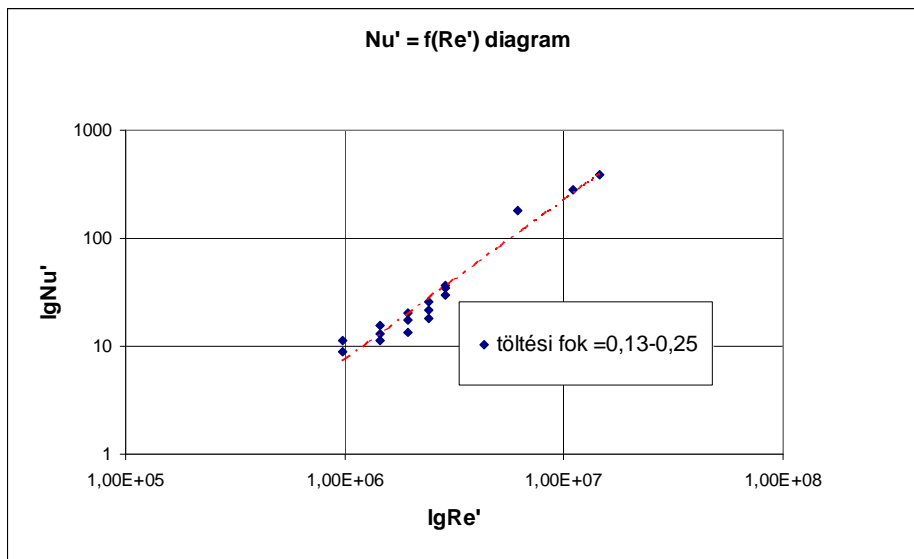
Reynolds-szám a kerületi és az axiális sebességgel értelmezve:

$$Re' = \frac{v \cdot d}{V_{lev}}$$

ahol  $d$  – a részecske átmérője

$$v = \sqrt{v_{ker}^2 + v_{ax}^2}$$

A töltési fok: 
$$\varphi = \frac{V_{anyag}}{V_{dob}}$$



5. ábra Térfogati hőátadási tényező  $Nu'$  –  $Re'$  kapcsolatban

A kísérleti mérések részletes leírását, a műveleti paraméterek hatását közleményben ismertetjük, amely megjelenése a kutatási munka lezárása után várható.

#### 4. Hőátadási tényező hatásának vizsgálata porlasztva szárításnál

Nagy nedvességtartalom változást megvalósító folyamatok esetén - folyékony és pasztaszerű anyagoknál - a hőátadási tényezőben bekövetkező változás jelentős lehet a szárító fő méreteinek meghatározása szempontjából. Ilyen alkalmazási lehetőség – gömbbel közelíthető anyagok száradási folyamatainak vizsgálatára – a porlasztva szárítás. A porlasztva szárító mérőállomás korszerűsítése, mérés-adatgyűjtő rendszerrel történő kiegészítése lehetőséget biztosít a folyamat jellemzőinek folyamatos mérésére, regisztrálására, valamint a kapott adatok közvetlen kiértékelésére [3, 7].

Matematikai modell készült változó gáz állapotjelzők és részecske méret esetére, amely alkalmas a porlasztóban haladó csepp jellemzőinek és a szárításhoz szükséges esési magasság vizsgálatára.

Tökéletesen szigetelt szárítóra felírható hőmérleg:

$$-\int_{T_{Gbe}}^{T_{Gki}} c_{nG} \cdot \dot{m}_G \cdot dT_G = \int_{H=0}^{H=H} \alpha(T_G - T_F) \cdot A_0 \cdot a_{l-a} \cdot dH$$

Gázoldali nedvesség mérleg:

$$\int_{Y_m}^{Y_{ki}} \dot{m}_G \cdot dY = \int_{H=0}^{H=H} \sigma(Y_F - Y_G) \cdot A_0 \cdot a_{l-a} \cdot dH$$

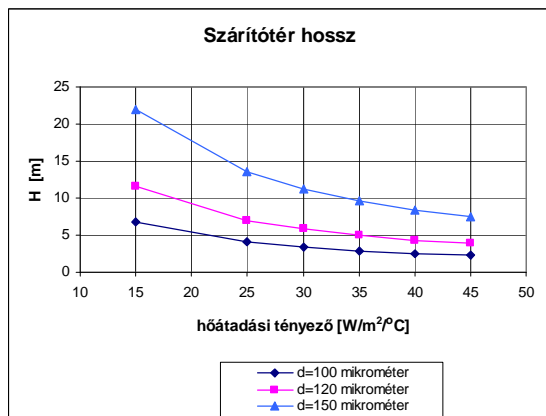
Nedvesség anyagmérleg a teljes szárítóra:

$$\int_0^t \dot{m}_G (Y_{ki} - Y_{be}) dt = \int_0^t \dot{m}_S (X_{be} - X_{ki}) dt$$

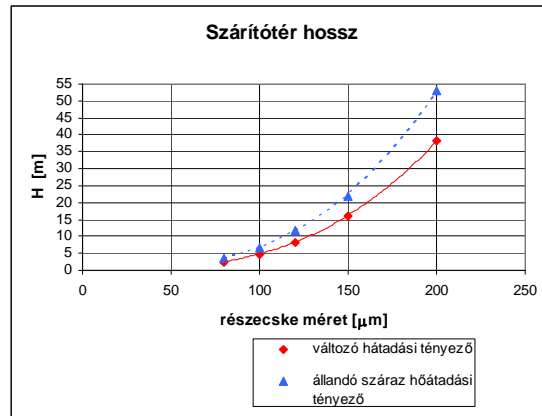
A nedvességtartalom-változáshoz szükséges magasság a száradási sebesség, a haladási sebesség figyelembe vételével, gömbbel közelíthető részecskék esetén:

$$dH = \left[ \frac{d^2 \cdot (\rho_{na} - \rho_G) \cdot g}{18 \cdot \mu_G} \pm \frac{\dot{m}_G \cdot 4}{\rho_G \cdot D^2 \cdot \pi} \right] \cdot \left[ -\frac{\rho_S \cdot d}{6} \cdot \frac{r_F}{\alpha \cdot (T_G - T_F)} \right] dX$$

A hőátadási tényező szárítótér magasságra gyakorolt hatását 6. és 7. ábrák mutatják. Változó hőátadási tényező esetén - a mérési eredményeknek megfelelően - a folytonos felületi nedvesítés szakaszán a „nedves hőátadási tényező”, míg a csökkenő száradás esetén a „száraz hőátadási tényezőt” vettük figyelembe a szárítótér magasságát meghatározó modellel végzett számításoknál. Az illusztrált eseteknél is látható, hogy a hőátadási tényező és a felületi nedvesítés hatásának figyelembevétele a szárítótér magasságának pontosabb meghatározását teszi lehetővé, amely nagy nedvességtartalom változást megvalósító szárítási feladatoknál jelentős lehet.



6. ábra



7. ábra