

Szárítási kitevők a fluidizációs szárítás csökkenő száradási sebességű szakaszán

Drying exponents in the falling drying rate period at fluidized bed drying

POÓS Tibor¹, PhD egyetemi docens, SZABÓ Viktor, PhD

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,
Épületgépészeti és Gépészeti Eljárás technika Tanszék
H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., D épület 110. Tel.:+3614632639, <http://www.epget.bme.hu>,
poos.tibor@gpk.bme.hu

Abstract

In our work, we examined the characteristics of the falling drying rate period at fluidization drying. On the falling drying rate period, we determined the drying exponents of the different models, which establish a relationship between the volumetric heat transfer coefficient and the moisture content of the particles. During the experiments we dried barley, red sorghum and rapeseed to determine the drying exponents. We examined the drying models of Peichi and Pei, Knysch, Lebedev and Sfredo.

Keywords: fluidized bed drying, falling drying rate period, drying exponents, drying curves, volumetric heat transfer coefficient

Kivonat

Munkánkban a fluidizációs szárítás csökkenő száradási sebességű szakaszát vizsgáltuk. A csökkenő száradási sebesség szakaszán meghatároztuk a különböző modellek szárítási kitevőit, amelyek kapcsolatot teremtenek a térfogati hőátadási tényező és az anyag nedvességtartalma között. A meghatározáshoz méréseket végeztünk, amely során árpát, vörös cirkot, és repcét szárítottunk. Peichi és Pei, Knysch, Lebedev, valamint Sfredo szárítási modelljeit vizsgáltuk.

Kulcsszavak: fluidizációs szárítás, csökkenő száradási sebesség, szárítási kitevő, szárítási görbék, térfogati hőátadási tényező

1. Bevezetés

A vegyipar, élelmiszeripar és gyógyszeripar gyakran használt művelete a szárítás, amelynek célja az anyag nedvességtartalmának csökkentése. A folyamat során hőenergiaközlés hatására a nedvesség gőzfázisba kerül, majd a szárítógázzal együtt távozik a szárítótérből. Szárítás alatt azt az egyidejű hő- és anyagátadással megvalósuló folyamatot értjük, amely során hőközlés hatására a nedvesség gőze diffúzióval távozik a hőközlő, illetve hordozó közegbe. A nedvesség leggyakrabban víz, míg a hőközlő, valamint szállítógáz levegő, de elterjedt a nitrogén, füstgáz alkalmazása is. Az anyag száradását jelentősen befolyásolják a hordozógáz tulajdonságai (hőmérséklet, nedvességtartalom), valamint a szárítandó szilárd anyag szerkezeti tulajdonságai, vízmegkötési mechanizmusai [1].

A kritikus nedvességtartalom elérése után a száradó anyag felületének folyamatos nedvesítése megszűnik, száraz foltok jelennek meg rajta, amely állapotot a szárítás csökkenő száradási sebességű szakaszának nevezünk. A száraz foltok miatt a száradási sebesség csökken, a felületi hőmérséklet növekedni kezd. Ezen szakaszban a száradó felületen továbbra is a szabad nedvességtartalom párolgása történik, míg a száraz foltok már csak kötött nedvességet tartalmaznak [2]. A száradási sebesség megmutatja, hogy egységnyi idő alatt, egységnyi felületről mekkora tömegű nedvesség távozik. A száradási sebesség az alábbi összefüggéssel határozható meg a szárítás teljes tartományán [3]:

$$N = N_{\text{áll}} \left(\frac{X - X^*}{X_{kr} - X^*} \right)^n \quad \text{ha } X \leq X_{kr}, \quad (1)$$

$$N = N_{\text{áll}} \quad \text{ha } X > X_{kr}, \quad (2)$$

ahol N a száradási sebesség, $N_{\text{áll}}$ a száradási sebesség az állandó száradási sebesség szakaszán, X a száradó anyag nedvességtartalma, X^* az egyensúlyi nedvességtartalom, X_{kr} a kritikus nedvességtartalom, n a száradási kitevő.

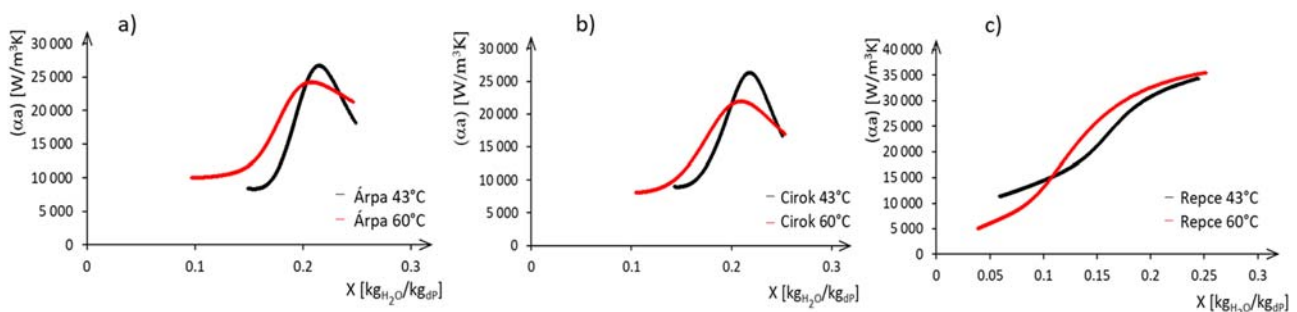
2. Módszer

Fluidizációs szárítás során a szemcse-szárítólevegő közötti érintkező felület számszerűsítése pontatlanságokat tartalmaz a szemcsék alakja, szemcseméret-eloszlása, összetapadása miatt. Ezen hiba csökkentése érdekében alkalmazható a térfogati hőátadási tényező, amelynek meghatározásához nem szükséges ismerni a száradó anyag és a szárítógáz közötti érintkező felület nagyságát [4]. Munkánk során a szárítás csökkenő száradási sebességű szakaszán kapcsolatot határoztunk meg a térfogati hőátadási tényező (αa) és a szemcsés anyag nedvességtartalma (X) között. Az 1. táblázatban láthatóak a szakirodalomból származó összefüggések, amelyek át lettek alakítva térfogati hőátadási tényezővel. A táblázatban T_G a szárítólevegő hőmérséklete, T_P a száradó szemcsés anyag hőmérséklete, η , n_k , a'_l , n_l , $a'_{s,1}$, $b'_{s,1}$, $a'_{s,2}$, $b'_{s,2}$ a különböző modellek konstansai, Nu' a módosított Nusselt-szám [4], Re a Reynolds-szám.

Térfogati hőátadási tényező és anyag nedvességtartalom közötti függvények 1. táblázat

Modell neve	Egyenlet	Hivatkozás
Peishi és Pei	$(\alpha a) = (\alpha a)_{const} \left(\eta + (1 - \eta) \frac{X - X^*}{X_{kr} - X^*} \right)$	[2]
Knysh	$(\alpha a) = (\alpha a)^* + [(\alpha a)_{const} - (\alpha a)^*] \left(\frac{X - X^*}{X_{kr} - X^*} \right)^{n_k}$	[5]
Levedev	$Nu' = a'_l Re^{0,5} \left(\frac{T_G}{T_P} \right)^2 \left(\frac{X}{X_{kr}} \right)^{n_l}$	[6]
Sfredo	$(\alpha a) = a'_{s,1} + b'_{s,1} \ln(X)$ $(\alpha a) = a'_{s,2} + b'_{s,2} \ln(X^2)$	[7]

A vizsgálat során laboratóriumi méréseket használtunk fel árpa, vörös cirok és repce fluidizációs szárításával, 43°C és 60°C belépő szárítógáz esetén. Az 1. ábrán láthatók a térfogati hőátadási tényező és az anyag nedvességtartalma közötti mérési eredmények, különböző belépő szárítógáz hőmérsékletek esetén.



1. ábra. Térfogati hőátadási tényező a száradó anyag nedvességtartalmának függvényében, árpa (a), vörös cirok (b) és repce (c) szárítása során, 43°C és 60°C belépési hőmérsékletű szárítógáz esetén

Minden mérést kb. 7000 másodpercig végeztünk el. Látható, hogy az árpának és a vörös ciroknak a száradása hasonló sebességgel történik, míg a repcénél ugyanannyi idő alatt alacsonyabb nedvességtartalom érhető el. Továbbá a diagramokon látható, hogy az árpa és cirok száradását hasonló jellegű görbék írják le, míg a repce szárítását jellemző görbék nincs maximum pontja.

3. Eredmények

A szárítási kísérletekből meghatározott szárítási kitevők és konstansok értékei a 2. táblázatban láthatók.

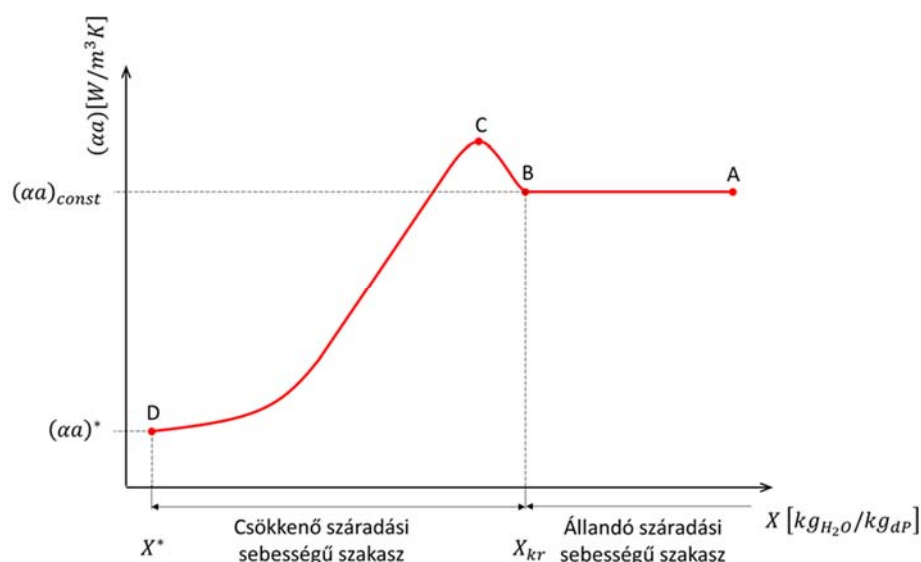
Modellek paraméterei árpa, vörös cirok és repce szárítására

2. táblázat

Modell	Kitevő, konstans	Árpa		Vörös cirok		Repce	
		43°C	60°C	43°C	60°C	43°C	60°C
<i>Peishi</i> és <i>Pei</i>	η	-1,61	-0,75	-1,83	-0,90	-0,07	-0,10
<i>Knysht</i>	n_k	8,21	6,29	10,1	6,36	2,34	1,80
<i>Lebedev</i>	a'_l	0,48	0,44	0,36	0,40	0,23	0,27
	n_l	5,38	2,35	3,43	2,39	1,00	1,29
<i>Sfredo</i>	$a'_{s,1}$	124082	83656	90714	76578	65327	77568
	$b'_{s,1}$	64076	37656	44644	34416	22687	27487

A *Peishi* és *Pei* modellben szereplő η minden esetben nőtt a hőmérséklet emelésével. A *Knysht* modellben szereplő n_k kitevő is kisebb értéket mutatott a hőmérséklet emelésével. A *Lebedev* modellben lévő a'_l konstans esetén nem figyelhető meg törvényszerűség a hőmérséklet változásával. Az n_l kitevő, valamint a *Sfredo* modell paraméterei repce szárításánál a hőmérséklet emelésével nőttek, míg a többi két anyag esetében csökkentek. Ezen megfigyelés is a repce eltérő száradási tulajdonságaira utal.

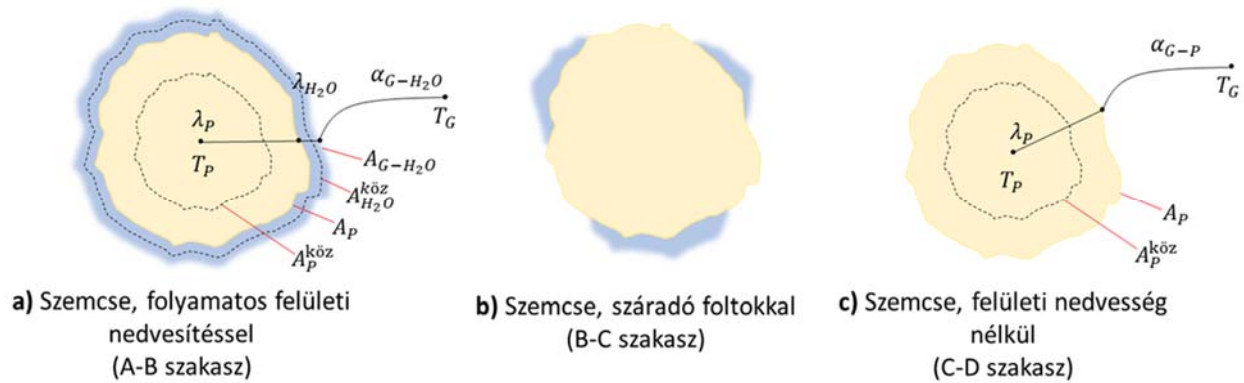
A szakirodalomban fellelhető modellek szerint a kritikus nedvességtartalom után a szárítógáz és a száradó anyag között értelmezett hőátadási tényező értéke folyamatosan csökken. A mérési eredmények szerint azonban a térfogati hőátadási tényező értéke a kritikus nedvességtartalom alatt növekszik, majd egy maximumot elérve csökken és egy adott értékhez, a szárazanyagra vonatkozó térfogati hőátadási tényezőhöz tart. A térfogati hőátadási tényező – anyag nedvességtartalom jellegdiagramja a 2. ábrán látható árpa és cirok szárítása esetén.



2. ábra. Térfogati hőátadási tényező – száradó anyag nedvességtartalom jellegdiagram, árpa és cirok szárítása esetén

A szárítólevegő és száradó szemcsés anyag közötti hőátbocsátás termikus ellenállása több komponensből áll (3. ábra). A-B szakaszon a folytonos felületi nedvesítés szakaszán a hőátbocsátás termikus ellenállása a gázoldali hőátadásos, a felületi vízréteg vezetéses és a szemcse vezetéses termikus ellenállásából tevődik össze. Ezen a szakaszon a felületi vízréteg tekinthető a hőátvitel fő ellenállásának, de az állandó anyaghőmérséklet (nedves hőmérő hőmérséklet) miatt a hőáram ezen a szakaszon elhanyagolható. A B-C szakaszon a felületen megjelenő száraz foltok, majd a teljesen eltűnő felületi vízréteg magyarázatot adhat a kritikus nedvességtartalom után bekövetkező növekvő hőátadási tényező értékére. Ezenkívül a szemcse

felületének érdessége nagyobb, mint amikor az vízzel van borítva, így a hőátadás, anyagátadás és impulzusátadás analógiája szerint a hőátadási tényező értéke is nagyobb lesz az így kialakuló turbulencianövekedés miatt. A C-D szakaszon a maximum érték (C pont) után a hőátadási tényező csökken, a szemcse anyagának hővezetése a nedvességtartalom csökkenése miatt nagymértékben romlik. A D pontban az anyag eléri a szárítógáz által meghatározott egyensúlyi nedvességtartalmat, és a szemcse a gázzal termikus egyensúlyban kerül.



3. ábra. Hőátbocsátás a szárítás különböző szakaszaiban

4. Összefoglalás

A mérési eredményekből árpa, vörös cirok és repce száradását vizsgáltuk, két-két különböző belépő gázhőmérséklet mellett. A csökkenő száradási sebesség szakaszán meghatároztuk a különböző modellek szárítási kitevőit, amelyek kapcsolatot teremtenek a térfogati hőátadási tényező és az anyag nedvességtartalma között. A mérésekből származó értékek azonos nagyságrendűek, a görbék jellege a repcét kivéve megegyeznek: a kritikus nedvességtartalom alatt a térfogati hőátadási tényező értéke nő, majd egy maximumot elérve csökken és egy adott értékhez tart. Ez magyarázható a szemcsés anyagok eltérő anyagtulajdonságaival, amik a gáz-anyag közötti termikus ellenállásra hatással van.

Köszönetnyilvánítás

Köszönet a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatalnak (NKFIH FK-142204) a munkában nyújtott anyagi támogatásért.

Irodalmi hivatkozások

- [1] Örvös M., Poós T. *Diffúziós eljárások és berendezések, 1.rész (Szárítás)*. Budapest, 2015.
- [2] Peishi C., Pei D. C. T. *A mathematical model of drying processes*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 1989, 32(2), 297–310.
- [3] Ramli W., Daud W. *A Cross-Flow Model for Continuous Plug Flow Fluidized-Bed Cross-Flow Dryers*, Drying Technology, 2007, 25(7–8) 1229–1235.
- [4] Poós T., Szabó V. Poós, *Modeling of heat and mass transfer in fluidized bed dryers using the volumetric heat transfer coefficient. Part 1: Equations describing the simultaneous heat and mass transfer*, Drying Technology, 2022, 40(11), 2335–2344.
- [5] Knysh, V. A. *Heat transfer in the period of falling drying rate for plywood*, Journal of Engineering Physics, 1970, 19(4), 1261–1263.
- [6] Lebedev, P. D. *Heat and mass transfer between moist solids and air*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 1961, 1(4), 302–305.
- [7] Sfredo, M. A., Finzer, J. R. D., Limaverde, J. R. *Heat and mass transfer in coffee fruits drying*, Journal of Food Engineering, 2005, 70(1), 15–25.
- [8] Bálint, Á., Szabó V., Poós T. *Szárítási jellemzők meghatározása a fluidizációs szárítás csökkenő száradási sebességű szakaszán*, diplomamunka, BME ÉPGET, Budapest, 2022.