

| | | |
|--------|--------------------------------------|----|
| 5.3 | Porlasztva szárítás | 2 |
| 5.3.1. | A porlasztó fejek kialakítása..... | 5 |
| 5.3.2. | A cseppelpárolgás mechanizmusa | 8 |
| 5.3.3. | Szemcseméret | 10 |

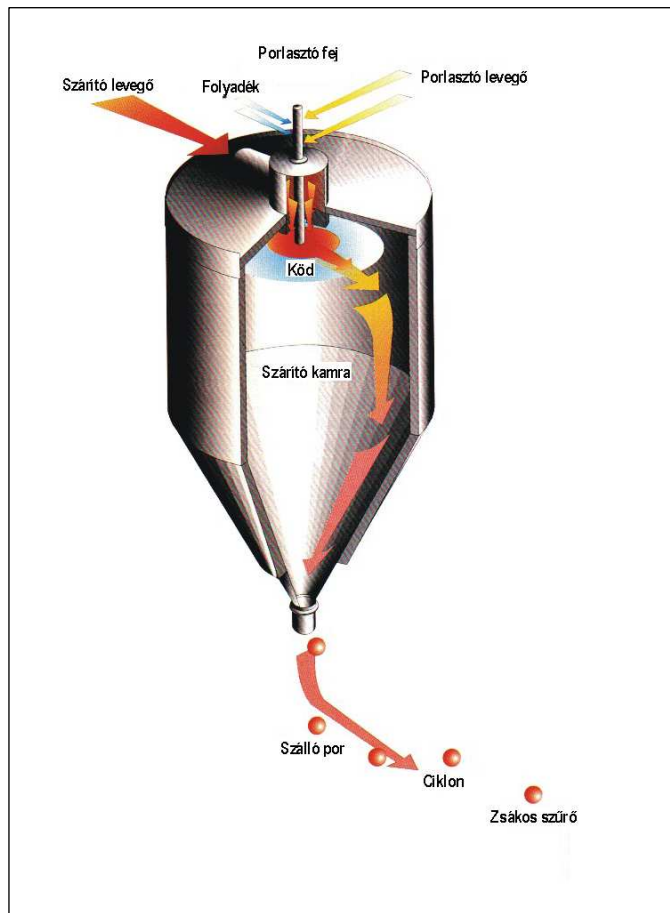
5.3 Porlasztva szárítás

A feldolgozási művelet sor legvégén, amikor már a piaci igényeknek, előírásoknak megfelelő állapotba hozzuk a terméket, kerül sor a szárításra. Szinte minden anyag specifikációja tartalmaz a víztartalomra vonatkozó megköötést. A nedvességtartalmat, vagy a szárítási veszteséget a vevő érdekében korlátozzák, nehogy vizet vásároljon az értékes anyag árában.

A kis mennyiségű, nem kötött víz eltávolításának jellemző művelete a szárítás, amelynek során a termékben lévő vizet a vele érintkező levegőbe párologtatjuk és visszük el.

A szárítás műveletével a Vegyipari műveletek tárgy foglalkozik, ebben a tananyagban csak egy nagyon speciális területet, a porlasztva szárítást tárgyaljuk, mivel ez egy kellően kéméletes, a biológiai anyagok aktivitását nem csökkentő szárítási mód.

A szárítás során általában valamilyen szemcsés/kristályos szilárd anyagból párologtatják el a vizet/oldószert, ami az anyag felületét részben vagy teljesen nedvesíti. A porlasztva szárítás speciális eset, ennél folyadékcseppek felületén megy végbe a párolgás. Az anyag a szárítás első fázisában sokáig folyadék halmazállapotú (oldat, szuszpenzió) marad, és csak a végén - amikor bepárlódik - alakul át szilárd porrá. A porlasztás kifejezés itt azt jelenti, hogy a betáplált folyadékot a szárító levegőbe diszpergálják, apró cseppekre osztatják. A porlasztó fejen keresztül jut az anyag a légkamrába/szárító térbe. A felmelegített szárító levegővel érintkezve lefekeződik és leülepszik. A cseppek felületén megy végbe a párolgás. A teljes elpárologtatás után egy másik diszperziót, szálló port kapunk, amit a készülékből való kilépés után le kell választani. Ennek tipikus eszközei a légciklonok (15-20 cm átmérővel), illetve ezek mögött még zsákos légszűrők fogják meg a maradék lebegő port (1. ábra).



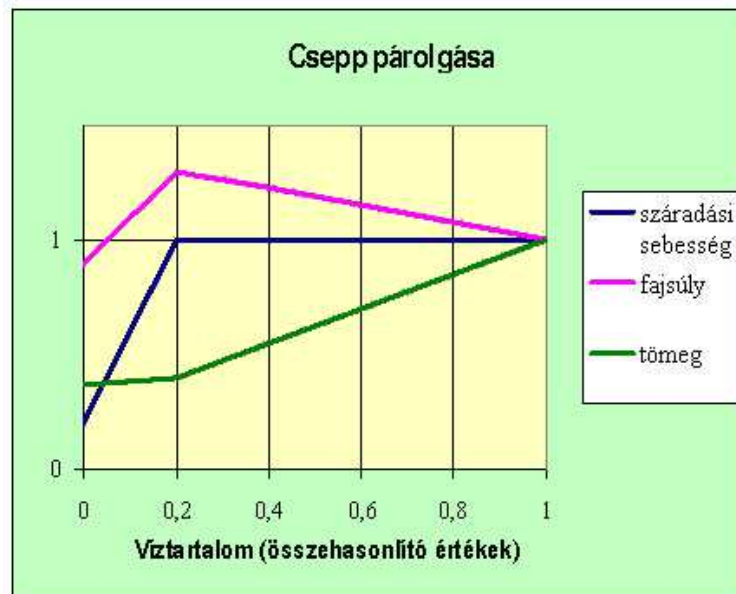
5.3. 1. ábra A porlasztva szárító felépítése

A szárítás különböző módszerei között a porlasztás előnye, hogy:

- az apró cseppekre osztott anyagnak nagy a fajlagos felülete
- emiatt gyorsan elpárolog a folyadék
- emiatt rövid a kontaktidő, az anyag hőterhelése kicsi
- ezáltal kéméletesen szárítja a hőérzékeny anyagokat.

A szárítóban a cseppek egyszerre párolognak és ülepednek. Mindkét folyamatban meghatározó szerepe van a fizikai jellemzőknek, a méretnek, a tömegnek és a sűrűségnek. A meleg levegőben mozgó/lebegő csepp párolgása két szakaszra osztható:

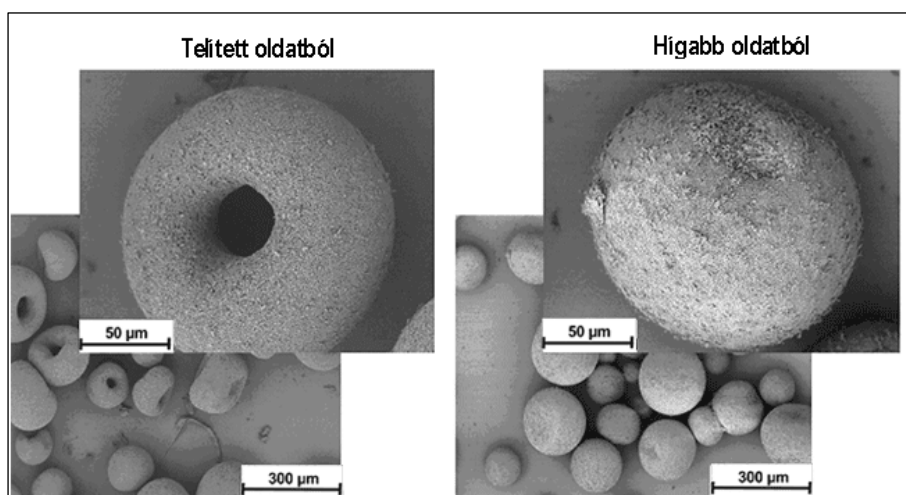
Amíg folyadékfilm borítja a felületet, addig közel állandó a párolgási sebesség, a tömeg a vízvesztés miatt csökken, a fajsúly növekszik, ha az oldott anyagok sűrűsége nagyobb, mint a vízé (2. ábra, összehasonlító értékek).



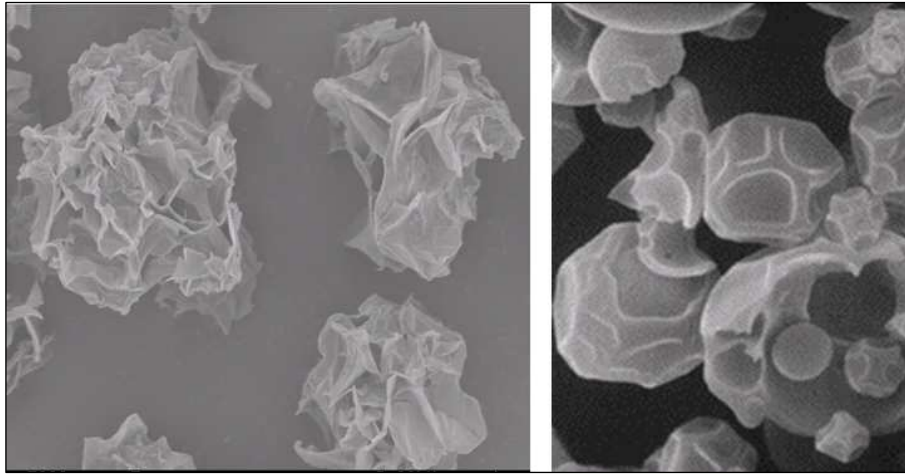
5.3. 2. ábra Fizikai paraméterek változása a párolgás során

Amikor a felület „megszárad”, már csak a kapilláris víz távozik – lassabban párolog, a tömeg alig csökken, a térfogat viszont állandó marad, ettől a fajsúly csökken.

A keletkező porszemcsék ritkán szabályos gömb alakúak. Ilyen forma általában csak nagyon híg oldatokból keletkeznek. Töményebb oldat betáplálásánál szabálytalan, gyűrött alakok, illetve belül üres héjak keletkeznek (3., 4. ábra).

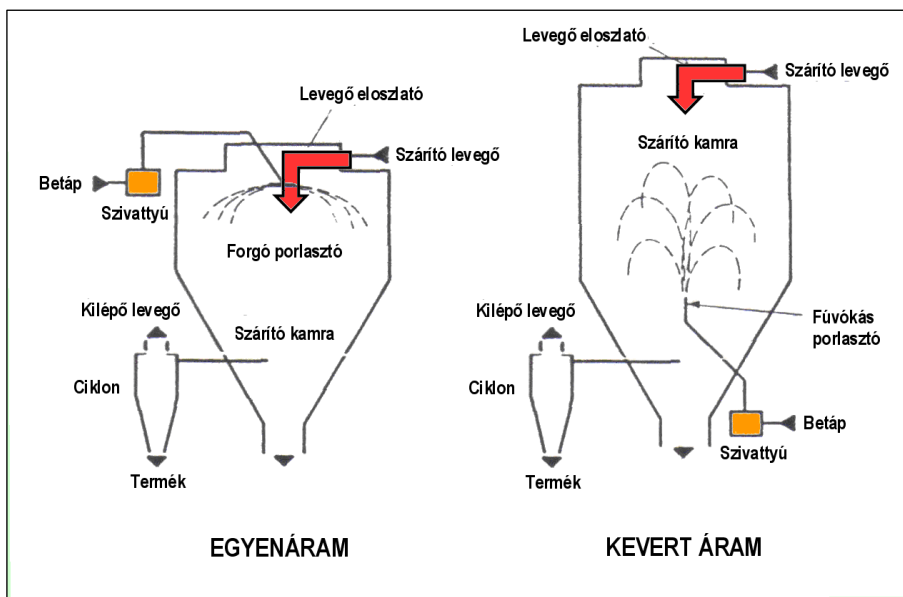


5.3. 3. ábra Bepárolt cseppekből képződő szemcsék



5.3. 4. ábra Szabálytalan alakú szemcsék

Hő- és anyagátadási műveleteknél alapvető kérdés, hogy a mozgó fázisok hogyan érintkeznek egymással. A porlasztva szárító berendezéseknél a folyadék és a levegő áramlása szerint egyenáramú és kevert áramú rendszereket alkalmaznak. Az ellenáram azért nem lehetséges, mert levegő és a szárított por együtt lépnek ki a készülékből (5. ábra).



5.3. 5. ábra Egyenáramú és kevert áramú porlasztva szárító berendezések

A porlasztás során különböző méretű cseppek keletkeznek. A méretezésnél ezek közül a legnagyobbakat kell figyelembe vennünk, mert

- méretük miatt ezek párolognak el utoljára,

- ezek ülepednek a leggyorsabban, → ezek töltik a legrövidebb időt a készülékben, → és ez alatt a rövid idő alatt kell teljesen elpárologtatni.

Így a cseppek létrehozásánál, kialakításánál mindenhol a d_{\max} -ot keressük, és erre méretezzük a szárítót.

5.3.1. A porlasztó fejek kialakítása

A szárítás első, és kritikus lépése a diszperzió létrehozása. A folyadékot többféle, különböző elven működő elosztóval vihetjük be a szárítótérbe. A porlasztófejeket kialakításuk és működésük szerint csoportosíthatjuk:

- fúvókás
 - mechanikus
 - pneumatikus
- forgótárcsás
 - tárcsás,
 - fúvókás,
 - lapátos

Fúvókás, mechanikus porlasztófej: egyfázisú (csak folyadék, segédlevegő nélkül) betáplálás. A szivattyúval benyomott folyadékot a fúvókában cirkulációs áramlásra kényszerítik. Ez megvalósítható tangenciális betáplálással, illetve megfelelő kivitelű áramlás terelő betétek alkalmazásával.



5.3.1. 1. ábra Mechanikus porlasztófej

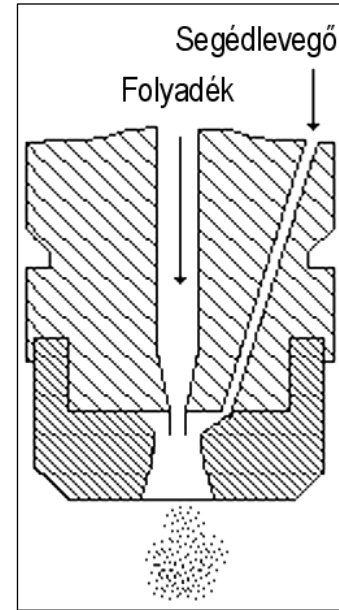
A porlasztó nyílás tengelye körül légmag képződik, a forgásban lévő folyadék a nyílásból kilépve kúppalást alakú összefüggő folyadékhártyát alkot. Állandó sebesség és térfogatáram mellett a kúpos szétterüléssel a folyadékfilm vastagsága egyre vékonyodik, és végül cseppekre szakad. A legnagyobb cseppek mérete az anyagi és geometriai jellemzőkön túl a kilépési sebesség négyzetével fordítottan arányos (Bär-egyenlet):

$$d_{\max} = \frac{8K\sigma_f}{\rho_f v_0^2}$$

- ahol:
- d – a csepp átmérője
 - K – anyagi állandó
 - σ – felületi feszültség
 - ρ – a folyadék sűrűsége
 - v_0 – kilépési sebesség

A pneumatikus porlasztók

Két fázissal működik, a betáplált folyadékot a fúvókában segédlevegő áram segítségével porlasztják. Kisebb folyadéknnyomást igényelnek, és finomabb permetet adnak, mint a mechanikus fúvókák. Az anyag tulajdonságainak változására is sokkal kevésbé érzékenyek. Tapadós, viszkózus, szálas szuszpenziók szárítására is alkalmasak.



5.3.1. 2. ábra Pneumatikus porlasztófej

A maximális cseppméret és a fúvóka átmérő aránya:

$$\frac{d_{\max}}{D} = k \left(\frac{\eta_f^2 \rho_f}{\sigma_f D} \right)^a \left(\frac{\rho_{\text{lev}} v^2 D}{\sigma_f} \right)^{-0,45}$$

| | | |
|------|---------------------|-------------------------------------|
| ahol | k és a | – konstansok |
| | d_{\max} | – a legnagyobb csepp átmérője |
| | D | – a fúvóka kilépési átmérője |
| | σ_f | – felületi feszültség |
| | ρ_f | – a folyadék sűrűsége |
| | ρ_{lev} | – a levegő sűrűsége |
| | η_f | – a folyadék kinetikai viszkozitása |
| | v | – kilépési sebesség |

Mint látható, a cseppátmérő ez esetben is fordítottan arányos a kilépési sebességgel, de nem négyzetesen, hanem közel lineárisan.

Forgótárcsás porlasztók. A porlasztófejek másik csoportja a centrifugális erőt használja ki a folyadék szétesztésére. A típus alapja egy vízszintes síkban, nagy sebességgel pörgő tárcsa, amelynek felső felületére adják a folyadékot. Az a felületen filmet képez, és kifut a tárcsa szélére, és onnan cseppeke képezve szakad le. Az egyszerű sík tárcsát gyakran kiegészítik a peremen lapátokkal, vagy résekkel (fúvókákkal)

A folyadék adagolása a lehetőleg a tárcsa közepére történik, ahonnan a centrifugális erő hatására lefut, vékony filmet képezve. Ha a tárcsán szabálytalan film képződik és a cseppek mérete is egyenlőtlené válik. Ez a porlasztótípus eltömődésre nem érzékeny. Iszapok, szuszpenziók, paszták, sőt félszilárd anyagok porlasztására is jól használható. Adott tárcsátípus meghatározott folyadékmennyiség feldolgozására alkalmas, állandó fordulatszám esetén



5.3.1. 3. ábra Forgótárcsás porlasztófej

A folyadékmennyiség (terhelés) növelése esetén a tárcsaátmérőt is növelni kell, ellenkező esetben a képződött cseppek mérete változni fog. A maximális cseppátmérő itt is kifejezhető az eddig használt paraméterekkel:

$$d_{\max} = k \frac{D^{0,46} \sigma_f^{0,46} \mu^{0,08}}{v \rho_f^{0,54}}$$

ahol D – az áramlási keresztmetszet jellemző mérete (rés szélessége, film vastagsága)

Dimenzió analízissel levezetve a különböző típusú porlasztófejek működési egyenletei típusától függetlenül egyformává válnak:

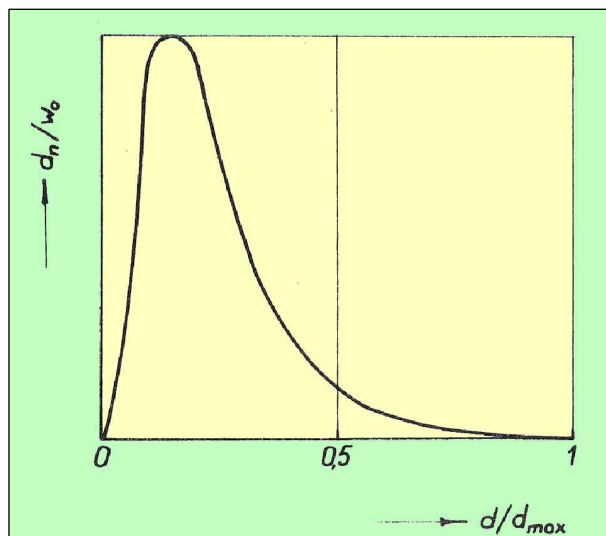
$$\frac{d_{\max}}{D} = k \operatorname{Re}^{-0,08} \operatorname{We}_{\text{kap}}^{-0,46}$$

ahol D és μ_f – jellemző méret (fúvóka átmérő, filmvastagság, rés nyílása)

$$\operatorname{Re} = \frac{v D \rho_f}{\mu_f} \quad \operatorname{We}_{\text{kapilláris}} = \frac{\rho_{\text{lev}} v^2 D}{\sigma_f}$$

A legnagyobb méretű csepp átmérőjének meghatározása mellett lényeges kérdés a keletkező cseppek méreteloszlása, illetve átlagos átmérője is.

Statisztikai módszerekkel vizsgálva a szemcsék méreteloszlását megállapították, hogy az nem szabályos Gauss-görbével leírható normális eloszlású, hanem egy maximumos, de aszimmetrikus eloszlást mutat (9. ábra).



5.3.1. 4. ábra A porlasztott cseppek méreteloszlása

5.3.2. A cseppelpárolgás mechanizmusa

A cseppből való elpárolgás problémája tulajdonképpen szimultán hő- és anyagátadási probléma. Ezek vizsgálatához a csepp útját ismét két szakaszra kell bontani, most más szempontok alapján, mint azt a fejezet elején tettük. A két szakaszban eltérő a mozgás jellege, más mechanizmussal működnek a transzportok is.

Az első szakasz „fékút”, amíg a fejből kilépő, leszakadó csepp lelassul, és felveszi az állandó ülepedési sebességet. A második az *ülepedési szakasz*, ahol a csepp állandó (relatív) sebességgel ülepedik.

A második, ülepedési szakasz leírása az egyszerűbb, kezdjük ezzel. Általában a Ranz és Marshall egyenleteit használják:

$$Nu = 2 + 0,6 Re^{0,5} Pr^{1/3}$$

$$Sh = 2 + 0,6 Re^{0,5} Pr^{1/3}$$

Ebből a $Nu = Sh = 2$ a tiszta diffúzió, az additív tag pedig a konvekciós transzport.

Kis cseppekre ($d < 80 \mu m$, $Re < 0,9$) az ülepedési sebesség elhanyagolható, az additív tag eltűnik. Ez a feltétel vizes oldatoknál mindig teljesül – vagy már a porlasztásnál, vagy a párolgás miatti méretcsökkenés következtében. Magasabb hőmérsékleteken, intenzívebb transzportok esetén korrekciós tényezőkkel egészítik ki a Nusselt-szám kifejezését:

$$Nu = 3,32 Re^{0,5} Pr^{1/3} Fr^{-0,077} \left(\frac{\Delta H}{c_p \Delta T} \right)$$

ahol: ΔH - a párolgáshő
 c_p - fajhő állandó nyomáson

A „fékút” leírása bonyolultabb, mert mindkét fázis turbulensen viselkedik, és ezek a viszonyok a porlasztófejtől távolodva gyorsan változnak. A fő hatásokat összefoglalva:

- a csepp körül az áramlás nem lamináris
- a csepp még nem gömb alakú, lüktet, hullámzik
- a csepp belsejében is van áramlás és hőtranszport

- a párolgással kilépő gőz megvastagítja a felületi határréteget

A határfelület hullámzó mozgása mindenfajta transzport jelenség fokozását eredményezi. Így van ez a cseppek esetében is, amikor a belső cirkuláció, a felület hullámzó-oszcilláló mozgása és a felületi feszültség helyi változása útján kiváltott mozgás az átadás intenzifikálásához vezet. A már kialakult csepp esetében azonban van egy minimális méret, amelyen alul a csepp merev gömbként viselkedik, azaz mindenféle felületmozgás megáll. Ennek a kritikus cseppméretnek a határértékét a Bond-Newton formula adja meg:

$$\frac{d_{\text{krit}}^2 \Delta \rho}{\sigma} = 2$$

ahol: $\Delta \rho$ - a sűrűség-különbség a csepp és a környező közeg között,
 σ - a felületi feszültség.

Ha tehát a párolgás során a cseppek mérete ez alá a határérték alá csökken, akkor csak a csepp körül áramló levegő viselkedése szabja meg a transzportok sebességét.

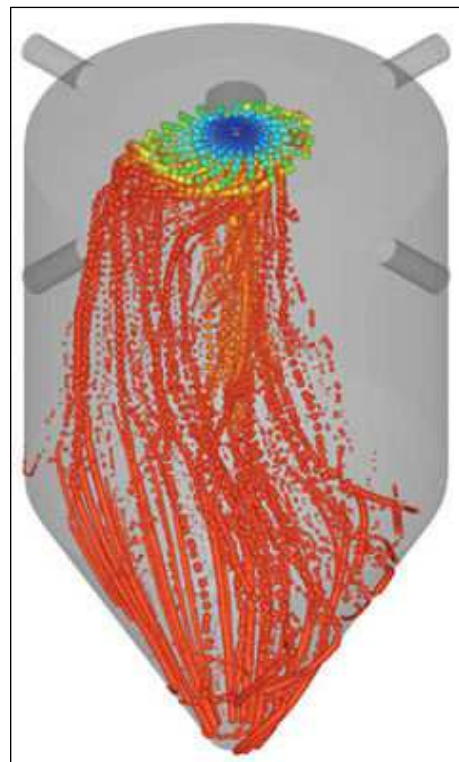
A fékeződő cseppek hőátadására kezelhető, egyszerű modell a Graffon-egyenlet, amely a határréteg vastagságát veszi figyelembe korrekciós tényező gyanánt:

$$Nu = Sc^{1/3} \frac{2d}{\delta}$$

ahol d - a csepp átmérője
 δ - a határréteg vastagsága.

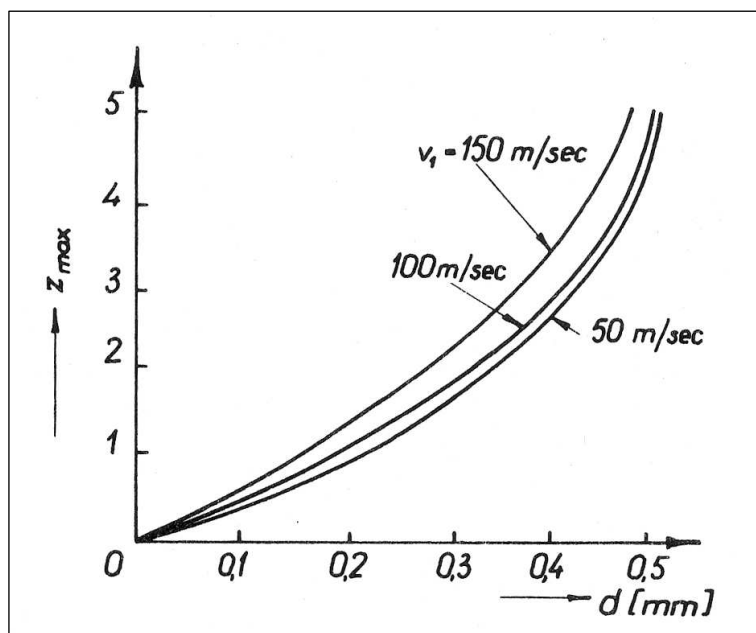
A turbulens áramlások következtében ebben a szakaszban a párolgás sokkal intenzívebb, mint az ülepedésnél. Az egész folyamatra vonatkoztatva sokszor a víz ~90 %-a ebben a szakaszban lép ki. Ennek megfelelően a készülék kialakítását, a művelet kivitelezését erre részfolyamatra célszerű optimálni. A hő és a pára átlépése a csepp felületén csak egy lépése a teljes transzportnak. Ha a csepp nem érintkezik kellő mennyiségű szárító közeggel és így nincs jelen elegendő hőhordozó, az egyensúlyi állapot gyorsan bekövetkezik, a transzport leáll. Ezért célszerű a befűvott meleg levegőt közvetlenül a porlasztófej közelébe juttatni, ezért kedvezőbb ennél a szárítási műveletnél az egyenáram.

A porlasztó szárító torony méretezésének módszerei különbözők. A térfogati hőátadási tényezőn alapuló számítás csak a toronytérfogatot adja meg, és tetszőleges L/D arány felvételét lehetővé teszi. A fékezési szakasz nagy hatékonyságának ismerete viszont támpontot ad a geometria kialakításához. A készülék sugarát úgy kell megválasztani, hogy a fékezési szakasz „beleférjen”. A cseppek akár vízszintesen, akár ferdén, akár ívelten mozognak, ne ütközzenek a falba lelassulásuk előtt. A cseppek mozgását és hőmérséklet változását egy tárcsás porlasztóval ellátott szárítóban szemlélteti a 10. ábra.



5.3.2. 1. ábra A cseppek mozgása tárcsás porlasztóban

Így alakult ki az a gyakorlat, hogy a tárcsás porlasztóval működő szárítók L/D viszonya közel egy, míg a fúvókás porlasztóhoz karcsúbb, magasabb tornyok tartoznak. A lassulási szakasz hossza elsődlegesen a cseppek méretétől függ. A nagyobb tömeg, illetve impulzus növeli a fékutat, a keresztmetszet, illetve a terület pedig a közegellenállást, fékező hatást erősíti. A két hatás eredőjeként a fékezési szakasz hossza közel négyzetesen függ a csepp átmérőjétől (11. ábra).



5.3.2. 2. ábra A cseppátmérő hatása a fékezési szakasz hosszára

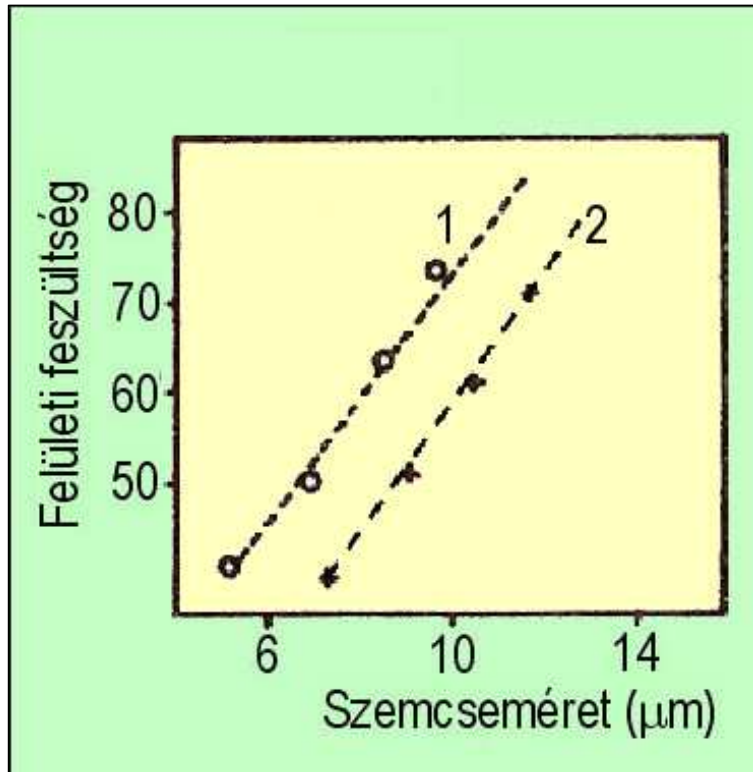
Tehát ennél a megközelítésnél is a legnagyobb átmérőjű csepre kell méretezni, ennek röppályájához kell igazítani a készülék sugarát.

5.3.3. Szemcseméret

Joggal feltételezhető, hogy a porlasztva szárításnál a kialakuló porszemcsék mérete arányos a bevitt cseppek méretével. Ebből következik, hogy a szárított szemcsék méreteloszlása is megegyezik a cseppek aszimmetrikus gyakoriság-függvényével. A legnagyobb, illetve átlagos méretű részecskék mérete viszont összefüggésbe hozható az anyagi, illetve technológiai paraméterekkel. Az egyes változók hatását első közelítésben a már vizsgált Bär-egyenlettel értelmezhetjük.

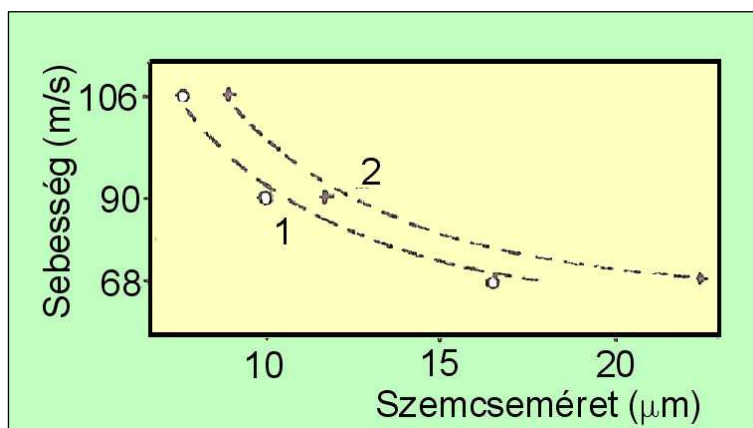
$$d_{max} = \frac{8K\sigma_f}{\rho_f v_0^2}$$

A cseppek/szemcsék mérete az egyenlet szerint egyenesen arányos az oldat felületi feszültségével. Ez összhangban van a kísérleti eredményekkel, különböző szárítandó oldatok felületi feszültségét felületaktív anyagokkal módosítva az elméletnek megfelelő változásokat észlelték (12. ábra). Ha tehát sikerül a felületi feszültséget csökkenteni, csökken a cseppek mérete is. A kisebb cseppek gyorsabban száradnak, és a képződött apróbb szemcsék szárazabb állapotban érik el a szárító falát. Ez a finomabb por kevésbé tapad ki a készülék falára, viszont nehezebb feladat a kilépés utáni leválasztása. Nagyobb hányada szökik át a ciklonon, ezt azután zsákos szűrőkkel kell felfogni.



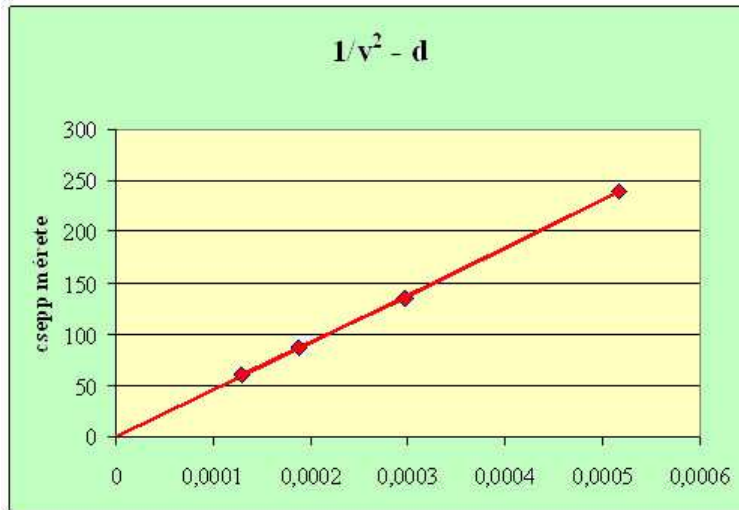
5.3.3. 1. ábra A szemcseméret és a felületi feszültség kapcsolata

A Bär-egyenletben szereplő másik technikai jellemző a *sebesség*. Ez alatt cseppeknek a szárító levegő sebességére vonatkoztatott relatív sebességét értjük, ami jól mérhető változást okoz a szárított anyag szemcseméretében. A folyadékcseppek kilépési sebességét jó közelítéssel megadja a porlasztótárcsa kerületi sebessége. Az egyenlet fordított másodfokú arányosságot jelez, ami összhangban van a Tanszékünkön mért adatokkal (13, 14. ábra).



5.3.3. 2. ábra A kerületi sebesség hatása a szárított por szemcseméretére

A folyadék beadagolási sebességének növekedésekor egy meghatározott érték felett a porlasztótárcsa a folyadéksúrlódás miatt fékeződni kezd, ezért forgási sebessége csökken, ez is befolyásolja a csepp- ill. szemcseméret alakulását.

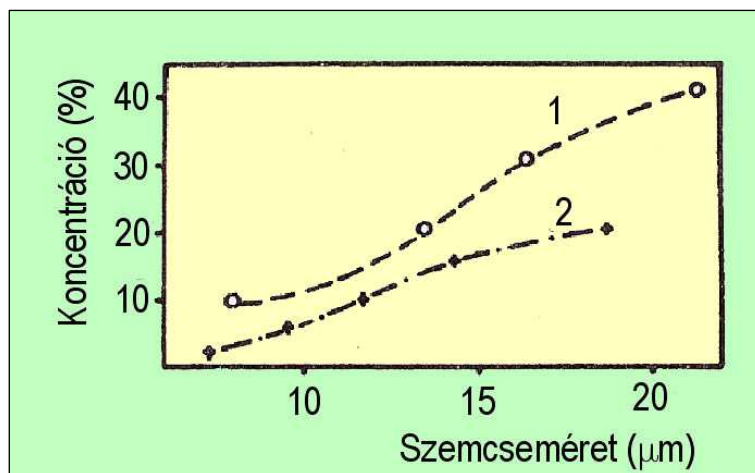


5.3.3. 3. ábra Linearizált kapcsolat a sebesség és a cseppméret között

A folyadék beadagolási sebességének növekedésekor egy meghatározott érték felett a porlasztótárcsa a folyadéksúrlódás miatt fékeződni kezd, ezért forgási sebessége csökken, ez is befolyásolja a csepp- ill. szemcseméret alakulását.

Felmerülhet még a csepp- ill. szemcseméretet befolyásoló anyagi jellemzők között a viszkozitás esetleges befolyása is. Ez a paraméter a Bär-egyenletben nem szerepel, és a kísérletek szerint nincs érdemleges hatása.

Befolyásolja a szemcseméretet a szárítandó oldat koncentrációja is. Ha az elporlasztott cseppek mérete a koncentráció növekedésével változatlan marad, a leszártott szemcsék mérete a nagyobb szárazanyag tartalom miatt jelentősen növekedik. A koncentráció közvetett hatásai viszont már a cseppek kialakulásánál érvényesülnek, hiszen az oldat koncentrációjának növekedésével változik (általában növekszik) annak sűrűsége is. Másrészt az oldott anyag koncentrációja befolyásolhatja a felületi feszültséget is. Mindkét paraméter szerepel a Bär egyenletben, hatásuk ellentétes. Emiatt a koncentráció hatása a szárított por szemcseméretére nem egyértelmű, a mérési adatok változó hajlású, de monoton emelkedő görbéket adnak (15. ábra).



5.3.3. 4. ábra A koncentráció hatása a szemcseméretre

Hőtani méretezés szempontjából alapvető paraméter a szárító levegő hőmérséklete. A cseppek, illetve a porszemcsék méretére ennek nincs kimutatható hatása. A biológiai anyagok szárításánál viszont figyelembe kell venni a termék hőérzékenységet. Szerencsére a szárítási folyamat túlnyomó részében az anyag a cseppben oldva van jelen, így a hőmérséklet nem haladhatja meg a forráspontot, 100 °C-ot, illetve a „nedves hőmérő hőmérsékletét”.

A szárító terhelhetőségét a kg elpárologtatott víz/óra mértékegységben adják meg.

$$W (H_{levegő\ be} - H_{levegő\ ki}) = w_{víz} H_{párolgási}$$

A bevitt hő mennyisége a levegő térfogatáramától (ez általában rögzített, beépített érték) és a belépő hőmérséklettől (ez szabályozható) függ. A kilépő levegő hőmérséklete terheléstől függ – minél nagyobb mennyiségű vizet kell elpárologtatni, annál alacsonyabb lesz. Technológiailag tehát az alacsony kilépési hőmérséklet lenne célszerű, de ezt megint csak az anyag tulajdonságai szabják meg. Olyan kilépő hőfokot kell választani, hogy az anyag „elegendő mértékben” megszáradjon – ne maradjon benne a kívánnál több víz, ne maradjon ragacsos, ne tapadjon a készülék és a ciklon falához. Ezt a hőfokot minden anyagra tapasztati úton, kísérletekkel kell meghatározni.

Összefoglalva tehát megállapíthatjuk, hogy a porlasztva szárítás a biológiai anyagokra jól alkalmazható művelet, amelynek sok paramétere jól leírható az egyszerű Bär-egyenlettel, de ugyanakkor egyes tényezők csak kísérletes úton határozhatók meg.