

X. Évfolyam 1. szám - 2015. március

CSURGAI József - SOLYMOSSI Máté
icsurgai@gmail.com - solym21@gmail.com

LEVEGŐSZŰRŐK HATÉKONYSÁGÁNAK MÉRÉSE I. RÉSZ AZ AEROSZOL SZŰRÉS ALAPJAI, A POR- ÉS RÉSZECSKESZŰRŐK MINŐSÍTÉSÉNEK RENDSZERE

Absztrakt

Jelen írásunk egy háromrészes cikksorozat első munkája, amely áttekinti a levegőben lebegő részecskék szűrővel való visszatartásának alapjait, bemutatja a por- és részecskeszűrők osztályozásának, minősítésének rendszerét és részletesen taglalja azokat az eljárásokat és tesztek, amelyek szabványba rendezve lehetőséget adnak a por- és részecskeszűrők hatékonyságának meghatározására.

The actual paper is the first part of series of three papers overviewing basics of the filter arrestance of the floating particles and describing system classifying particulate air filters. Also the paper provides detailed information about standard procedures and tests related to determine efficiency of particulate air filters.

Kulcsszavak: aeroszol, HEPA, por- és részecskeszűrő ~ aerosol, HEPA, particulate air filter

BEVEZETÉS

Életünk jelentős részét épületek belső tereiben töltjük, csak kisebb részét töltjük friss levegőn, annak is jelentős részét lakott településen, szerencsésebb esetben vidéki kisvárosban, kevésbé szerencsés esetben nagyvárosi környezetben. Otthonunkban, munkahelyünkön tartózkodunk a legtöbbet. Az ipari vagy szolgáltatói célú berendezések, gépek még normál üzemi körülmények mellett is bocsátanak ki különböző légszennyező anyagokat, emiatt a belső terekben a levegő szennyezettsége magasabb koncentrációjú lehet. A levegőben lévő anyagok közül a szálló por jelenti vizsgálódásunk tárgyát, ami a lebegő szilárd és folyékony részecskék elegye. A szálló porrészecskék toxikus anyagokat, baktériumokat, vírusokat stb. kötnek meg.

A munkahelyek és egyéb nagy forgalmú objektumok (gyárak, középületek, bevásárlóközpontok, hotelek, kórházak, aluljárók, földalatti és metróvonalak, stb...) tiszta levegővel való ellátása érdekében nagy teljesítményű szűrő-szellőztető rendszereket működtetnek. Hasonló módon, de természetesen kisebb léptékben, tömegközlekedési eszközökön, sőt, személygépkocsikban is komoly szűrőberendezésekkel biztosítják az utasok, valamint a hajtóművek számára a tiszta levegőt.

A levegőszűrés fontosságát szem előtt tartva, elhatároztuk, hogy egy három részes cikksorozatban bemutatjuk a levegőszűrés és a szűrés hatékonysága mérésének különböző technikáit. Célunk alapvetően gyakorlati jellegű. Szeretnénk a szakembereknek segítséget nyújtani egyrészt a tanintézeti oktatásban, másrészt a különböző szűrők, szűrőrendszerek mérése során azzal, hogy röviden összefoglaljuk a különböző szűrési technikák elméletét, majd részletesen foglalkozunk a mérésekre vonatkozó aktuális szabványokkal, illetve kitérünk a mérések gyakorlati kivitelezésének kérdéseire. Az anyag nagyobb részben irodalmi összefoglaláson alapul, azonban, főleg a cikksorozat második, illetve harmadik részében, megosszuk azokat a gyakorlati tapasztalatokat is, amelyeket sokéves, ipari környezetben végzett mérési munkáink során szereztünk, illetve amelyekre szakmai fórumokon tettünk szert.

A levegő por-, illetve aeroszol szűrésének további jelentősége van olyan speciális alkalmazásoknál, mint a tűzoltó és katonai szervezeteknél az egyéni, illetve a kollektív védőeszközök (járművek, óvóhelyek, stb.) légzésvédő eszközei, amelyek rendeltetése a környezetben, légnemű formában jelen lévő radioaktív, biológiai és vegyi szennyező anyagok elleni védelem. Az ilyen kombinált szűrőeszközök, berendezések szerves részét képezi egy nagy hatásfokú por- és aeroszol szűrő.

Cikksorozatunk első részében az ilyen, a por-, illetve az aeroszol részecskék levegőből való kiszűrésére szolgáló szűrők hatásfokának mérésével foglalkozunk és áttekintjük az erre vonatkozó, a nemzetközi ajánlásokkal harmonizáló európai szabályozást. Meg fogjuk érteni azt az elvi különbséget, ami a por- és részecskeszűrők, illetve a nagy hatásfokú, ún. HEPA szűrők minősítésének fizikai tartalma között van.

A második részben részletesen foglalkozunk mindenfajta aeroszol-koncentráció mérésének központi eljárásával, a részecskeszámlálással, az összrészecske koncentráció, illetve a részecskék méret szerinti spektrumának mérésével, az áramlási sebesség és térfogatáram-mérés módszereivel, a mérőrendszer felépítésével, valamint az adatok kiértékelésének módszerével. Ugyanitt megvizsgáljuk, hogy miként tudunk végrehajtani ipari környezetben in-situ hatásfokvizsgálat célzatú mérést, amikor nem áll rendelkezésünkre, az első részben tárgyalt szabványok követelményrendszerét teljes mértékben kielégítő ideális laboratóriumi vizsgálóberendezés, viszont a mérés során mégiscsak figyelembe kell venni az aktuális szabvány ajánlásait és követelményeit.

Cikksorozatunk befejező részében áttekintjük a levegőszűrés másik nagy területét, az aktív szén szűrést, illetve annak két, széleskörűen alkalmazott fajtáját, az adszorpciós és a retenciós szűrést.

1. AZ AEROSZOL SZŰRÉS MECHANIZMUSAIRÓL ÁLTALÁBAN [1, 3, 7]

A gázokban jelenlévő lebegő szilárd anyagok (aeroszolok) elválasztására különböző légszűrők használatosak. A légszűrőkön történő szilárd szemcse leválasztás alapvetően négy mechanizmus szerint mehet végbe:

1. Kiülepedés
2. Tehetetlenségi erő hatására történő ütközés
3. A szűrőelem-keresztezés hatására történő visszatartás
4. Diffúziós hatás

1.1 Kiülepedés

A kiülepedés csak a nagy részecskék (2 μm átmérő és nagyobb) esetén jelentős, elsősorban alacsony áramlási sebességek esetén. A részecske a ráható gravitációs erő hatására kilép az áramlás irányából, azt keresztezve ütközik a szűrő részecskéjével.

Ezt a mechanizmust az alábbiakban megmagyarázzuk.

A részecske egy külső erő (gravitáció, elektromos erő, centrifugális erő stb.) és a közegellenállási erő egyensúlya esetén a külső erő nagyságával arányos sebességgel halad (ülepedik). Lamináris áramlás esetén ($Re < 2320$) kapjuk az alábbi összefüggést [7]:

$$F = \frac{3\pi\mu Vd}{C_C} \quad (1.1)$$

$$C_C = 1 + \frac{2\lambda}{d} \left(A_1 + A_2 \cdot e^{-\frac{A_3 \cdot d}{\lambda}} \right) \quad (1.2)$$

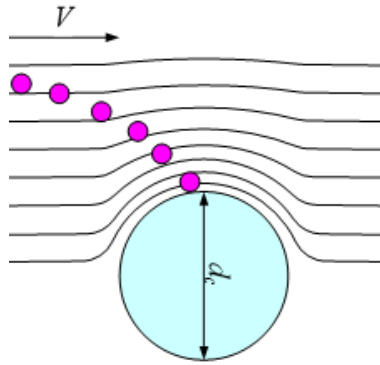
A Cunningham-faktorral figyelembe vettük a részecske gömbalaktól eltérő geometriáját, majd a sebesség, az erő és a részecske tömegének arányából kifejezzük a relaxációs időt, ami alatt egy részecske sebessége felveszi egy adott külső erőnek megfelelő sebességet:

$$\tau = \frac{V \cdot m}{F} = \frac{\frac{\pi}{6} d^3 \cdot \rho \cdot V \cdot C_C}{3\pi\mu Vd} = \frac{\rho \cdot d^2 \cdot C_C}{18\mu} \quad (1.3)$$

Ahol

V	Részecske ülepedési sebessége
F	Külső erő
d	Részecske jellemző mérete
d_c	Akadály jellemző mérete
μ	Közeg viszkozitása
C_C	Cunningham-faktor
λ	A részecske közegben megtett szabad úthossza
A_1	Tapasztalati konstans, értéke: 1,257
A_2	Tapasztalati konstans, értéke: 0,4
A_3	Tapasztalati konstans, értéke: 0,55
m	Részecske tömege
ρ	Részecske sűrűsége
s_m	Megállási távolság
τ	Relaxációs idő
τ	Relaxációs idő
μ	A közeg viszkozitása
T	Abszolút hőmérséklet
k	Boltzmann-állandó
D	Diffúziós tényező

Megjegyzés: a továbbiakban, a fenti felsorolásban található jelzéseket alkalmazunk.



1. ábra. Kiüledéses szűrési mechanizmus [1]

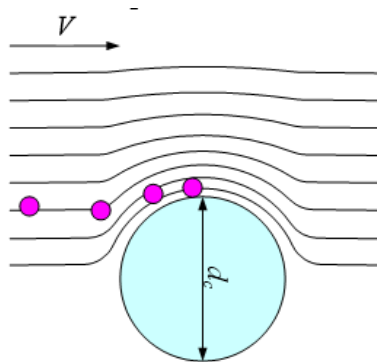
A relaxációs idő és az ülepedési sebesség szorzata egy ún. megállási távolságot ad, aminek a fizikai jelentése az, hogy az adott részecske mennyire tudja követni az áramlási tér áramvonalait egy akadály körül. Ennek a távolságnak és a fizikai akadálynak az aránya a Stokes-szám, amely az ülepedés mértékét jellemzi:

$$St = \frac{s_m}{d_c} = \frac{V \cdot \tau}{d_c} \quad (1.4)$$

Az ülepedési mechanizmus sajátossága, hogy a kölcsönhatás akkor lesz jelentős, ha a megállási távolság és a fizikai akadály mérete egymással összemérhető, pontosabban az $St \geq 0,5$ esetén. Ez, figyelembe véve az 1.1 – 1.3 összefüggéseket, csak mintegy 2-3 μm részecskeméret felett jöhet szóba.

1.2 Tehetetlenségi erő hatására történő ütközés

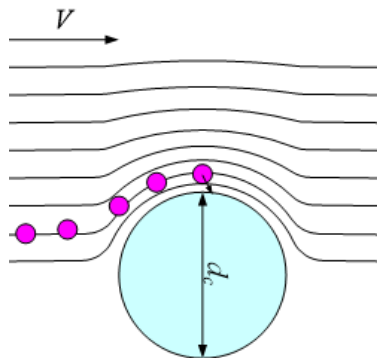
Ha megfelelő impulzussal rendelkező részecske áramlási iránya a szűrő részecske hatására hirtelen változik, akkor az kiléphet az áramlás irányából és a szűrő részecskével ütközve, megfogódik. A tehetetlenségi erő hatására a szűrő részecskéjére történő ütközés mechanizmusát a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra. . Ütközéses szűrési mechanizmus [1]

1.3 A szűrőelem-keresztvezés hatására történő visszatartás

A keresztvezés hatására történő visszatartás az egyetlen olyan mechanizmus, amikor az áramló részecske eredeti áramlási profilját nem hagyja el, csak a szűrő részecskéhez olyan közel kerül, hogy annak vonzó hatására megfogódik. A mechanizmust az itt látható 3. ábra szemlélteti.



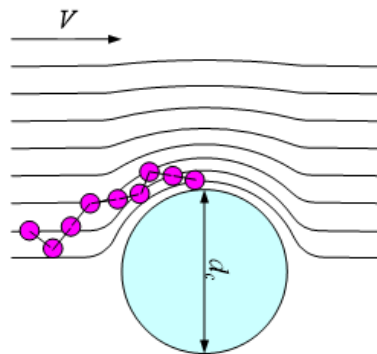
3. ábra. Keresztvezéses szűrési mechanizmus [1]

A szűrőn történő visszatartás a szűrő porozitásának (c), valamint a részecskeméret (d) és a szűrő pórusméret (R), az d/R arányának függvénye. A visszatartás hatékonysági függvény, ER a következőképpen fejezhető ki:

$$ER = f(c, d/R) \quad (1.5)$$

ER értéke d/R növekményével nő.

1.4 Diffúziós hatás



4. ábra. Diffúziós szűrési mechanizmus [1]

A kismértékű részecskék Brown mozgása diffúziót hoz létre a koncentráció gradiens irányában. A diffúziós tényezőt az Einstein egyenlet definiálja:

$$D = \frac{k \cdot T \cdot C_c}{6 \cdot \mu \cdot d} \quad (1.6)$$

D értéke erőteljesen nő C_c/d növekedésével, vagyis a részecskeméret csökkenésével a diffúziós hatásra bekövetkező részecske-elválasztás hatékonysága növekszik. A mechanizmus a 4. ábrán látható.

2. ÁTERESZTÉS, PENETRÁCIÓ, SZŪRÉSI HATÁSFOK, MPPS TARTOMÁNY

Amikor egy adott szűrő hatékonyságát meg akarjuk adni, valójában arra vagyunk kíváncsiak, hogy a szűrőelem kimeneti oldalán mért részecsk koncentráció milyen mértékben csökken a bemeneti oldalán mérthez képest, vagyis, adott átmenő térfogatáram mellett, milyen lesz a kimeneti és a bemeneti oldalán mért részecskék számának aránya. Ezt az arányt, százalékban

kifejezve, áteresztésnek, idegen szóval penetrációnak nevezzük. A gyakorlatban használják még a permeabilitás megnevezést is, ami szintén korrekt, valójában az a lényeg, hogy mindenki az alábbi összefüggések szerinti paramétereket értse ez alatt:

$$P = \frac{C_{ki}}{C_{be}} \cdot 100 = \frac{\frac{N_{ki}}{\dot{V}_{ki} \Delta t}}{\frac{N_{be}}{\dot{V}_{be} \Delta t}} (\%) \quad (2.1)$$

$$E = 100 - P(\%) \quad (2.2)$$

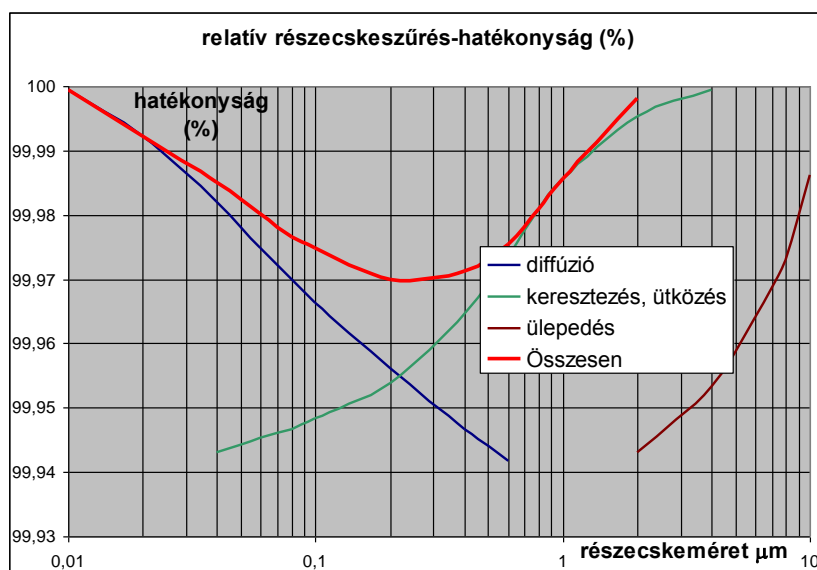
Ahol

- C_{be} - a szűrőegység előtt mért aeroszol koncentráció
- C_{ki} - a szűrőegység után mért aeroszol koncentráció
- N_{be} - a szűrőegység előtt mért részecskeszám
- N_{ki} - a szűrőegység után mért részecskeszám
- P - az szűrőelemen keresztül menő részecske áteresztés (penetráció)
- $\dot{V}_{ki,be}$ - a szűrőelemen átmenő levegő térfogatárama, egymást követő mérések során
- Δt - mérési idő
- E - a szűrőelem hatásfoka

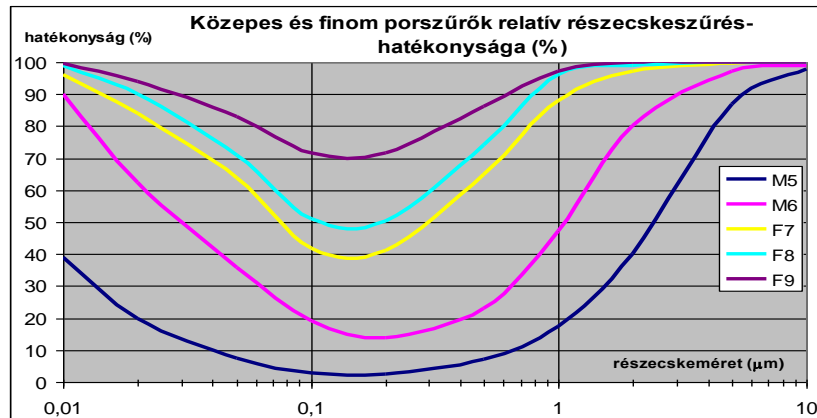
A fenti összefüggésekből látjuk, hogy a szűrő hatékonyságát az áteresztésből képezzük és valójában ez az a lényeges paraméter, amivel az adott szűrőt jellemezzük.

Ha a szűrő két oldalán a mérést lézeres optikai részecskeszámlálóval mérjük, lehetőségünk nyílik a részecskék méret szerinti megkülönböztetésére is. Ekkor részecskeméret spektrumot kapunk, és a szűrő hatásfokát meg tudjuk határozni különböző mérettartományokra is. Meg sem lepődünk azon, hogy természetesen különböző mérettartományokban más és más, hatásfokot kapunk. Innen nagyon helyesen azt a következtetést vonjuk le, hogy a fentiekben tárgyalt szűrési mechanizmusok leválasztási hatékonysága (melyek összesítve szolgáltatják a szűrési hatásfokot) a részecskék méretével jelentősen változik.

Így az aeroszolokban bekövetkező részecske-elválasztás mechanizmusait áttekintve összefoglalóan kimondható, hogy az első három mechanizmussal végbemenő leválasztás hatékonyságának a részecskeméret növekedése kedvez, a diffúziós mechanizmus viszont a kisebb részecskeméreteknél hatékonyabb. Az elmondottakat szemléltetik az alábbi ábrák [7]:



5. ábra. A HEPA szűrőkben a szűrési hatásfok függése a részecske átmérőtől



6. ábra. Közepes és finom porszűrőkben a szűrési hatások függése a részecske átmérőtől

Természetesen, egyes szűrők adott részecskeméretre adódó hatékonysága változó lehet, de összességében a fenti ábrák jól mutatják, hogy a különböző kölcsönhatások összegzéséből adódó összhatékonyság minimuma a 0,1 – 0,3 μm-es tartományba esik. Éppen ezért ezt a részecskeméret tartományt nevezi a szakirodalom az MPPS (the Most Penetrating Particle Size) tartománynak, amit a legnagyobb áteresztésű mérettartománynak fordíthatnánk, de a munkánk során megmaradunk a nemzetközileg elfogadott megnevezésnél. A későbbiekben látni fogjuk, hogy az MPPS mérettartományban való áteresztés és hatékonyság mérése a HEPA szűrők hatékonyságvizsgálatának is az alapját képezi.

3. AZ AEROSZOL SZŰRŐK MINŐSÍTÉSÉNEK RENDSZERE [4, 5, 7]

Az aeroszol szűrők minősítésének szabványosítása visszanyúlik egészen az 1930-as évekig, ugyanis ekkor kezdték az Egyesült Államokban a szűrők tesztjét ASHVE és AFI kódú módszerekkel. A következő jelentős állomás 1968, amikor az amerikai ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) kibocsátotta a légszűrők tesztelésének módszertanára vonatkozó szabványát. Jelenleg az ASHRAE által publikált szabványok lefedik az alábbi területeket:

- Mérés és teszt módszertan
- Szabványos fejlesztés
- Szabványos alkalmazás

Az EU szabályozása a szűrőket G, M, F, E, H, és U osztályokba, sorolja, az osztályokat pedig arab számmal jelölt szintekre osztja. Az első három osztályba tartoznak az általánosan használt durva (G1-4), közepes (M5-6) és finom (F7-9) részecske- és porszűrők, ezek tesztjét az Egyesült Államokban az ASHRAE-ANSI 52.1-1992 és ASHRAE 52.2-2007 szabványok szerint végzik, míg e szűrők tesztelése érdekében Európában az ASHRAE nyomdokain létrehozták az azzal máig harmonizáló EN 779: 2012 (Particulate air filters for general ventilation) szabványt. E két szabvány alapvetően a szűrők hatékonyságát a levegő részecskéinek tömegvisszatartó képességével vizsgálja.

A légszűrők másik sajátos csoportjának, a nagy hatékonyságú részecskeszűrők (EPA E10-12, HEPA H13-14 és ULPA U15-17) minősítésének nemzetközi EU szabványa az EN 1822: 2010. Az adott szabvány eltérése az előző kettőtől, hogy itt a mérések alapvetően részecskeszámláláson alapulnak. A hatásfokot a legnagyobb áthatolóképeségű részecskeméret – MPPS intervallumába eső penetrációból számítja. A szabvány a tömegvisszatartó képességet egyáltalán nem említi, ennek az oka a HEPA szűrők funkcionális sajátossága. Az általános por és részecskeszűrők esetében a feladat a szűrőn átáramló levegőből kiszűrni az aeroszolk

meghatározott tömegarányát adott ellenállás intervallum és teljesítményszükséglet mellett. Ezzel ellentétben a nagy hatékonyságú részecskeszűrők feladata a levegő megtisztítása a lehetséges vírus, bakteriális, radioaktív és egyéb káros aeroszoloktól, ami sokkal tisztább tereket eredményez, mint ami az általános por és részecskeszűrők által biztosítható és a költséghatékonyságra irányuló törekvés itt természetesen sokadrangú szempont.

A szabványosított teszt eljárások célja az alábbiakban foglalható össze:

- Összehasonlítani a termékek jellemző tulajdonságait
- Meghatározott körülményeket teremtő mérőrendszer megteremtése
- A gyakorlatban megvalósuló körülményeket szimulálni és vizsgálni a szűrők viselkedését.

Az utolsó pontban meghatározott cél sajnos nem tud maradéktalanul teljesülni, mivel a szabványok eljárásrendje nem veheti figyelembe a szűrők felhasználásának környezeti paramétereit. Ezek jelentősen eltérhetnek a tesztek szabványos környezetének paramétereitől, pl. a porszűrők esetében az alkalmazott ASHRAE tesztpor eltér az adott ipari, vagy egyéb környezetben keletkező por tulajdonságaitól, valamint a határfok tesztnél alkalmazott aeroszol is más, mint ami az adott környezetben keletkezik, a levegő relatív páratartalma is széles tartományban változhat, stb... Mindez azt befolyásolja a szűrők reális környezetben való viselkedését, ami a jellemző paraméterek változását okozza óhatatlanul. Ettől függetlenül, egy adott feladatra kiválasztott szűrőnél az elsődleges információ természetesen a szabványos tesztek eredménye kell, hogy legyen.

Az alábbiakban figyelmünket a két említett EU szabványra korlátozzuk, az amerikai ASHRAE szabványcsalád esetében megelégszünk azzal, hogy alapvetően az EN 779 módszertana megfelel annak, hiszen, mint feljebb említettük, az amerikai szabvány az európai elődjének tekinthető.

4. A DURVA, KÖZEPES ÉS FINOM POR- ÉS RÉSZECSKESZÜRŐK MÉRÉSÉNEK ÉS MINŐSÍTÉSÉNEK RENDSZERE (EN 779:2012) [6]

A szabvány az adott szűrőtípus csoport vizsgálatára komplex tesztet ír elő, aminek az elemei a vizsgálandó szűrő típusától (G, M, F) függnék. Ennek értelmében a különböző szűrőtípusok mérései többé-kevésbé eltérő célokat követnek, amelyeket röviden így tudunk összefoglalni:

1. Durva szűrők (G) esetén: *átlagos visszatartás* meghatározása szabványos összetételű porra
2. Közepes szűrők (M) esetén: optikai (lézeres) részecskeszámlálóval történő *átlagos határfok* mérése
3. Finom szűrők (F) esetén: optikai (lézeres) részecskeszámlálóval történő *minimális és átlagos határfok* mérése

A komplex vizsgálat során az alábbi teszteket kell végrehajtani:

1. *Ellenállás teszt* (resistance test) tiszta szűrőn a névleges
2. *Térfogatáram* 25, 50, 75, 100 és 125 %-os értékénél
3. Öt lépésből álló *pormegkötő képességi teszt* (arrestance test), amelynek első fázisában (beadagolási fázis) szabványos teszt por (ASHRAE test dust) kerül beadagolásra egy porgenerátorból a tesztszűrőre. A beadagolást mindaddig folytatják, amíg a szűrőre kapcsolt differenciális nyomásmérő el nem éri a maximális ellenállás (G-szűrők esetében 250 Pa, M és F szűrők esetén 450 Pa) 20, 40, 60, 80 és 100 %-át, majd az adott lépés során mért por visszatartás értékeket meghatározzák (gravimetrikus módszer). A teszt végén kiszámolják az *átlagos visszatartás* értékét és a szűrő *pormegkötő képességét*.

4. *Szűrési hatásfok teszt* (efficiency test) minden egyes részecskeméret intervallumra, először tiszta szűrőn, majd minden egyes beadagolási fázis végén mért hatásfok érték meghatározása, majd az *átlagos hatásfok* értékének kiszámítása.

4.1 A pormegkötő képességi teszt végrehajtásának módszere

A teszt során alkalmazott szabványos por (ASHRAE teszt por) összetétele [2]:

SAE szabvány J726 teszt por (fine Arizona road dust)	72 %
Szénpor	23 %
Őrölt pamut szál	5 %

A pormegkötő képességi teszt egy úgynevezett betáplálási fázissal kezdődik, melynek során a porgenerátor által létrehozott szennyező anyag egyenletes eloszlásban (lásd 6. ábra) áramlik a tesztelendő szűrőre addig, amíg a szűrő el nem éri a szűrőtípusra vonatkozó maximális ellenállás kitüntetett értékét (ezt az adatot a tesztelendő szűrőre kapcsolt differenciális nyomásmérő szolgáltatja). Ekkor a porgenerátorból fogyott anyag tömegéből és a tesztszűrő tömegnövekedéséből meghatározható az adott ellenállás intervallumra vonatkozó visszatartás:

$$A_i = \frac{\Delta m_i}{M_i} \cdot 100\% \quad (4.1),$$

ahol

- A_i - a visszatartás pillanatnyi értéke
- Δm_i - a tesztszűrőn, az adott betáplálási fázis során mért tömegnövekedés
- M_i - por fogyása az adott betáplálási fázis során

Miután mind az öt lépés végrehajtásra került, megkapjuk az *átlagos visszatartás* értékét, majd a szűrő *pormegkötő képességét*:

$$A_a = \frac{\sum_{i=1}^5 M_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^5 M_i} \cdot 100\% = \frac{\sum_{i=1}^5 \Delta m_i}{\sum_{i=1}^5 M_i} \cdot 100\% \quad (4.2)$$

$$C_d = \frac{A_a}{100} \cdot \sum_{i=1}^5 M_i \quad (4.3)$$

ahol

- A_a - az átlagos visszatartás értéke
- C_d - a tesztszűrő pormegkötő képessége

A pormegkötő képességi teszt során a tesztszűrő után egy segédzűrőt illesztnek a rendszerbe. Ennek a feladata a tesztszűrő által átengedett por min. 98%-ának visszatartása. Ezen kívül, a segédzűrőn és a tesztszűrőn visszatartott por mennyiségének, illetve a porgenerátorból fogyott por mennyiségének összehasonlításából következtetni lehet az esetleges szivárgásokra, tömítetlenségekre. A teszt végrehajtása után javasolt végrehajtani egy ellenállás tesztet a telített szűrőn, ami a későbbiekben segítséget nyújt a szűrőrendszer tervezőjének a teljesítményszükséglet számításánál.

4.2 A hatásfok teszt végrehajtásának módszere

A tesztszűrő hatásfok tesztjét, a visszatartás teszthez hasonlóan, több lépcsőben végzik. Az első mérést az ellenállás teszttel egy időben, még tiszta szűrőn hajtják végre, majd a többi lépcsőt az egyes por betáplálási fázisokat követően, a HEPA szűrők minősítéséhez is használt DEHS (diethyl-hexil-szebacát) aeroszollal végzik. A hatásfok tesztet az egyes lépcsőkben a teszt aeroszol kimeneti és bemeneti koncentrációjából számítják, a $0,4 \mu m$ mérettartományra viszonyítva:

$$P_i = \frac{C_{Ki}}{C_{Be}} \cdot 100\% \quad (4.4)$$

$$E_i = 100 - P_i \quad (4.5)$$

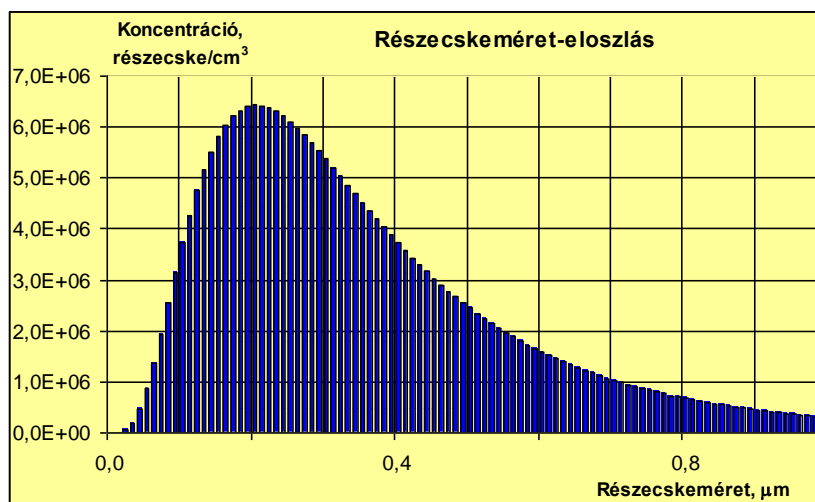
A szűrő minősítésénél használt átlagos hatásfokot az egyes lépcsők hatásfok értékeiből kapjuk egyszerű átlagolással:

$$E_a = \frac{\sum_{i=1}^6 E_i}{6} \quad (4.6)$$

ahol

- CBe - a szűrőegység előtt mért aeroszol koncentráció
- CKi - a szűrőegység után mért aeroszol koncentráció
- Pi - az adott lépcsőre számított penetráció
- Ei - az adott lépcsőre számított hatásfok
- Ea - az átlagos hatásfok

A teszthez használt aeroszol részecske-méret eloszlásának biztosítani kell a kb. 0,4 μm átlagméretet, ami a 7. ábrán látható eloszlásnál teljesül.



7. ábra. Ideálisnak tekinthető részecskeméret-eloszlás a hatásfok teszthez használt aeroszolban

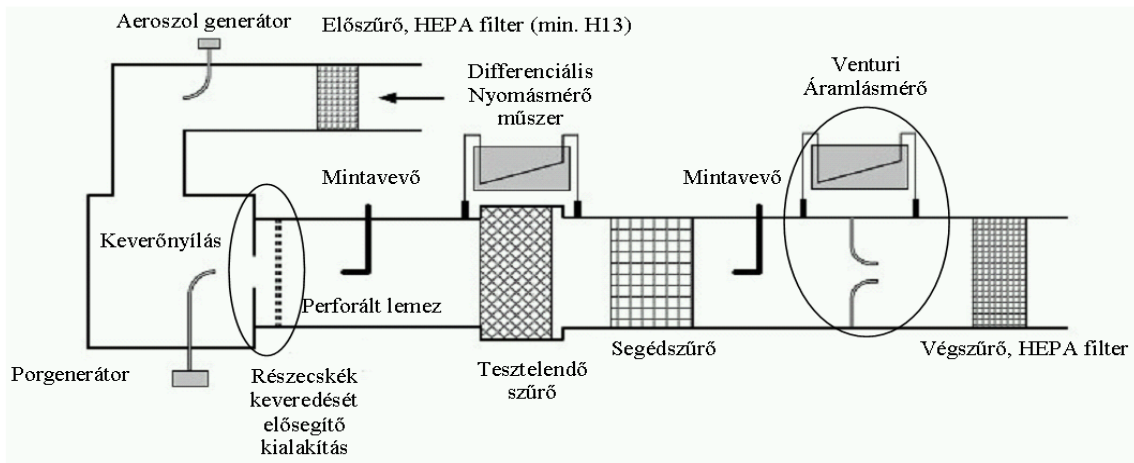
4.3 Minimális szűrési hatásfok teszt

Sajnos az aeroszol és pormegkötő szűrők piacán sok olyan versenytárs is jelen van, ahol a termékek szűrőképessége majdnem teljes egészében az elektrosztatikus pormegkötő hatáson alapul. Az ilyen szűrők esetében a szűrő viselkedését nagymértékben befolyásolja a levegő nedvességtartalma, illetve finom olaj-aeroszlok jelenléte, vagyis minden, ami esetlegesen a töltések semlegesítését előidézhetheti.

Az aktuális szabvány, az EN 779:2012 éppen ezért bevezette a minimális szűrési hatásfok fogalmát az ilyen szűrők minősítésére, amely a következő módon történik.

A szűrőanyagot előbb izopropanolba mártják, hogy a töltések semlegesítődjenek, majd elvégzik rajta a fenti, 3.1 és 3.2 pontokban meghatározott visszatartási és hatásfok tesztet.

4.4 Mérőrendszer



8. ábra. Az EN 779 szabvány szerinti teszt végrehajtására szolgáló laboratóriumi tesztberendezés sémája

A mérőrendszer lehet szívó, vagy nyomóágú. A nyomóágú berendezés rések esetén a laboratórium levegőjébe nyomhatja a teszt port és a teszt aeroszolt, míg szívórendszer esetén a laboratórium levegőjéből kerülhetnek be részecskék és befolyásolhatják esetlegesen a határfok tesztet. A berendezés mindkét végén HEPA szűrő biztosítja a környezet részecskéinek, illetve a berendezésben keletkezett por és ködrészecskék visszatartását.

A tesztelendő szűrő szabványos keresztmetszete (lásd EN 15805) 592x592 mm, ezt egy 610x610 mm-es foglalatba helyezik.

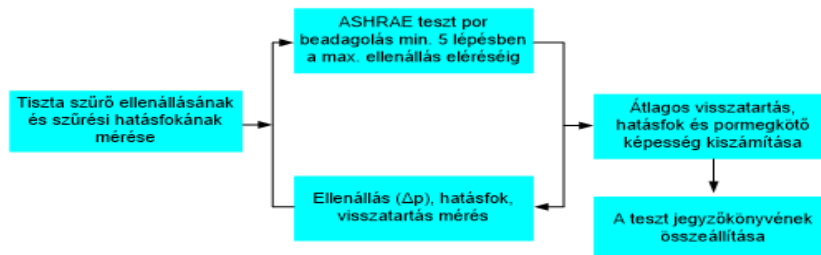
A berendezés légforgalmának 0,24 és 1,5 m³/s közé kell esnie, a szabványos szűrőelem vizsgálatához 3400 m³/h, vagyis ~1 m³/s térfogatáramot írnak elő, de ez az adott térfogatáram-intervallumban más értéket is felvehet, azonban törekedni kell arra, hogy a vizsgálat alatt a térfogatáram állandó legyen.

A berendezés sémája tartalmazza mindazon elemeket, amelyek a komplex teszt során szükségesek. Természetesen a különböző fázisokban egyes elemek nem működnek, illetve el vannak távolítva. A por betáplálása során az aeroszol generátor és a hozzá tartozó mintavevők nincsenek a berendezéshez illesztve. A por betáplálását a határfok teszt követi, előtte a rendszerből kiveszik a porgenerátort, valamint a segédszűrőt és csatlakoztatják az aeroszol generátort és az aeroszol mintavevőket.

Ha a komplex tesztet durva porszűrőn (G1-4) végzik, az aeroszol generátor és az aeroszol mintavevők hiányoznak a berendezésből, mivel a durva szűrő tesztje csak a visszatartás és pormegkötő kapacitás mérésére irányul.

4.5 A teszt végrehajtásának menete

Az alábbi sematikus folyamatábrán a komplex teszt lépései láthatók. A durva szűrők tesztje során a folyamatból hiányzik a szűrési határfok mérése, itt csak az átlagos visszatartást, illetve a szűrő pormegkötő képességét mérjük.



9. ábra. Az EN 779 szabvány szerinti teszt végrehajtásának főbb lépései

A közepes és finom szűrők esetében a teljes tesztet végre kell hajtani, ezen kívül a finom szűrőkre, ha azok részecske- és pormegkötő képessége a szűrőanyag elektrosztatikus megkötő hatásán alapszik, el kell végezni még a minimális szűrési határfok tesztet is. Az utóbbi sémája megfelel a fenti ábrán láthatóval, csak mintegy a nulladik lépésben kiegészül a szűrőanyag izopropanolba történő belemerítésével.

4.6 Kiértékelés

A komplex teszt végrehajtása után, a szűrő besorolásának megfelelően össze kell vetni a mérési adatokból számított jellemző paramétert a jellemző kritériummal, ezzel eldöntöttük, hogy az adott szűrő megfelel-e a gyártó által megadott besorolásnak. Ezen kritériumok az alábbi táblázatban láthatók:

	EU besorolás	Közepes visszatartás (%)	Közepes szűrési határfok (%)	Minimális szűrési határfok (IPA-al kezelve) (%)
Durva szűrők	G1	$A_a < 65$	—	—
	G2	$65 < A_a < 80$	—	—
	G3	$80 < A_a < 90$	—	—
	G4	$A_a \square 90$	—	—
Közepes szűrők	M5	—	$40 < E_a < 60$	—
	M6	—	$60 \square E_a < 80$	—
Finom szűrők	F7	—	$80 \square E_a < 80$	$E_{min} \square 35$
	F8	—	$80 \square E_a < 90$	$E_{min} \square 55$
	F9	—	$E_a \square 95$	$E_{min} \square 70$

1. táblázat. A por- és részecskeszűrők minősítésének kritériumai [6]

A többi mérési adat, illetve számított paraméter szintén részét képezi a mérési jegyzőkönyvnek, vagy tanúsítványnak, mivel a kritérium csak a szűrő megfelelőségét bizonyítja, azonban csak a többi paraméter ismeretében lehet egy szűrőt a többi analóggal összehasonlítani, pl. eldönteni a beszerzendő szűrő típusát a minőség/ár viszony ismeretében.

Az adott szűrő jellemzésére az alábbi paraméterek szükségesek:

1. Durva szűrő esetében:
 - a) Légellenállás teszt (resistance test) eredménye a tiszta szűrőn a névleges térfogatáram 25, 50, 75, 100 és 125 %-os értékénél (Δp)
 - b) Közepes visszatartás (A_a) – kritikus paraméter
 - c) Pormegkötő képesség (C_d)
2. Közepes szűrő esetében:
 - a) Légellenállás teszt (resistance test) eredménye a tiszta szűrőn a névleges légforgalom 25, 50, 75, 100 és 125 %-os értékénél (Δp)
 - b) Közepes visszatartás (A_a)
 - c) Pormegkötő képesség (C_d)
 - d) Közepes szűrési határfok (E_a) – kritikus paraméter
3. Finom szűrő esetében:
 - a) Légellenállás teszt (resistance test) eredménye a tiszta szűrőn a névleges légforgalom 25, 50, 75, 100 és 125 %-os értékénél (Δp)
 - b) Közepes visszatartás (A_a)
 - c) Pormegkötő képesség (C_d)
 - d) Közepes szűrési határfok (E_a) – kritikus paraméter
 - e) Minimális szűrési határfok (E_{min}) – kritikus paraméter

5. A NAGY HATÉKONYSÁGÚ RÉSZECSKESZŰRŐK (HEPA SZŰRŐK) MÉRÉSÉNEK ÉS MINŐSÍTÉSÉNEK RENDSZERE (MSZ EN 1822:2009) [4]

Mint a fentiekben (3. pont) már említettük, az E, H, és U osztályú szűrők minősítésének rendszerét az EN 1822 szabvány alapján végzik, amely az alábbi részekre tagozódik:

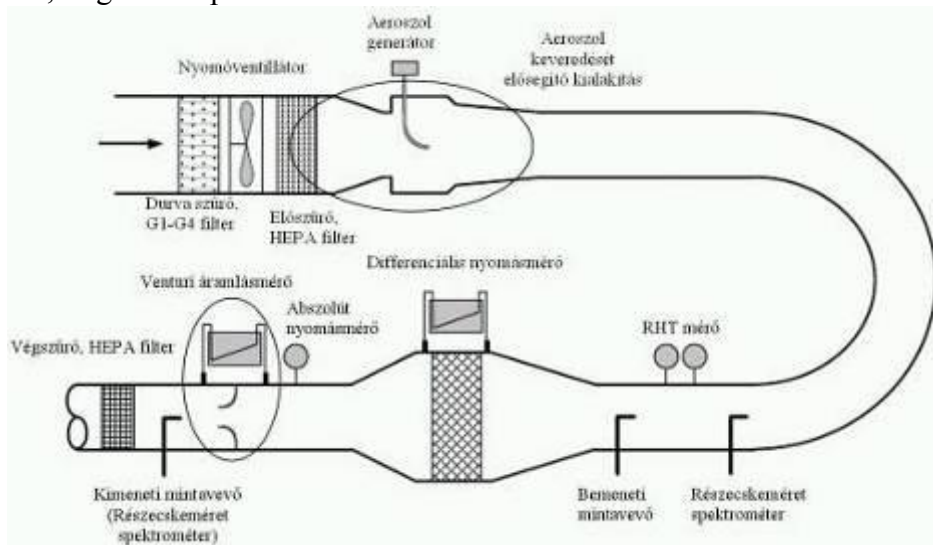
1. rész: Osztályozás, műszaki paraméterek vizsgálata, megjelölés
2. rész: Aeroszol-előállítás, mérőberendezés, részecskék statisztikai számlálása
3. rész: Sík szűrőlapok vizsgálatai
4. rész: A szűrőelemek átjárhatóságának meghatározása (pásztázó eljárás)
5. rész: A szűrőelemek hatékonyságának meghatározása

Ez a szabvány az MPPS mérettartományba tartozó részecskék szűrésének hatásfokán alapul, amit részecskeszámlálással határozzuk meg.

A méréshez folyékony aeroszolt használnak, az előzőekben említett DEHS-t, de lehetséges DOP (di-oktil-ftalát, di-2-etil-hexil-ftalát), vagy kis viszkozitású paraffin olaj alkalmazása. A teszt aeroszol méret szerinti eloszlása lehet mono-, vagy polidiszperz. Monodiszperz aeroszol (pl. meleg DOP aeroszol generálás) esetén egyszerű részecskeszámláló (pl. kondenzációs részecskeszámláló) alkalmazása is megfelelő.

Polidiszperz aeroszol alkalmazása esetén szükség van az aeroszol méreteloszlás spektrum felvételére, ami lézeres optikai részecskeszámláló alkalmazását követeli meg, azonban így gyakorlatilag a mért spektrumból meg lehet határozni az MPPS tartományt és a hozzá tartozó hatásfokot.

A vizsgálat elvégzéséhez használt berendezés sémája az alábbi, 10. sz. ábrán látható, nyomóágú elrendezésben. Természetesen a berendezést fel lehet építeni szívóágú elrendezésben is, azonban ebben az esetben a levegő relatív páratartalmát és hőmérsékletét a kimeneti mintavevő után kell mérni. A levegő hőmérsékletét a teszt során 23 ± 5 °C tartományban, míg relatív páratartalmát 75 % alatt kell tartani.



10. ábra. Az EN 1822 szabvány szerinti teszt végrehajtására szolgáló laboratóriumi tesztberendezés sémája

A berendezés térfogatárama az előző szabványnál a 3.4. alpontban tárgyalt tartományba kell, hogy essen. Ezt a séma kimeneti részén ábrázolt, Venturi csöves, mérőperemes, vagy más elven (ultrahang, turbina) működő eszközzel végezzük. A mérőperemes, vagy Venturi-csőves mérés esetében a szabvány légforgalom általában néhányszor 105 Re számú turbulens áramlást jelent, ahol a mérés relatív hibája jóval ± 1 % alatt tartható.

Az aktuális szabvány szerinti vizsgálatot 5 db szűrőn kell elvégezni, melynek során az alábbi méréseket, illetve tesztekkel kell végrehajtani:

1. A szűrő ellenállásának mérése terhelés előtti állapotban (erre nem térünk ki, hiszen ez közvetlen méréssel, a sémán látható differenciális nyomásmérő segítségével meghatározható), az ellenállás értékének a mintákon mért ellenállásoknak átlagértékét fogadjuk el.
2. Az MPPS méret megállapítása
3. Lokális áteresztés vizsgálat (pásztázó eljárás), ezt a tesztet csak a H és U típusú szűrők esetében kell elvégezni, az E szűrők esetében nem!
4. Szűrési hatások meghatározása

5.1 Az MPPS méret megállapítása

Az MPPS méret meghatározásához a spektrum felvételét az 1 µm alatti mérettartományra 6 csatornás felbontással kell elvégezni úgy, hogy minden egyes mintán felvesszük a részecskeméret-spektrumot, majd azokból csatornánként kiszámoljuk az áteresztést (penetrációt – P), azokat a minták között átlagoljuk, végül a képzett átlagokból kiválasszuk a maximum értéket. Az ehhez tartozó mérettartomány lesz az MPPS tartomány.

$$C_{i,ki} = \frac{N_i}{\dot{V}_{ki} \cdot t_{ki}} \quad (5.1)$$

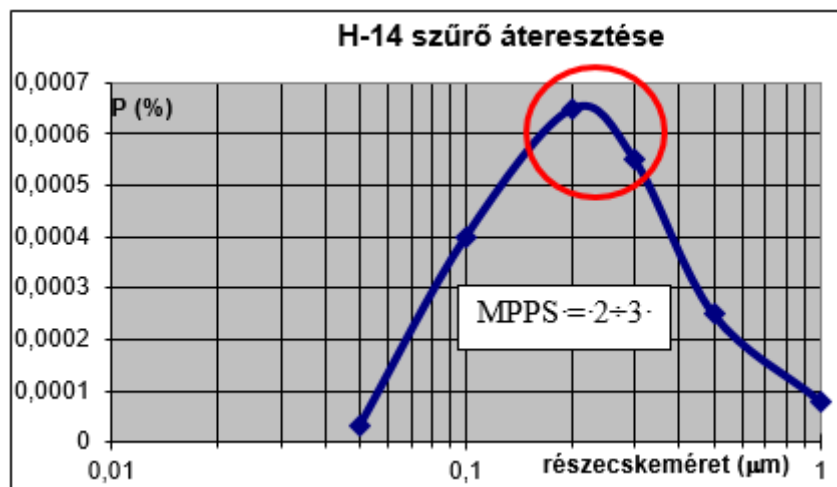
$$C_{i,be} = \frac{k_h \cdot N_i}{\dot{V}_{be} \cdot t_{be}} \quad (5.2)$$

$$P_i = \frac{C_{i,ki}}{C_{i,be}} * 100(\%) \quad (5.3)$$

$$\max(P_i) \Rightarrow \text{ch(MPPS)} \quad (5.4)$$

Ahol:

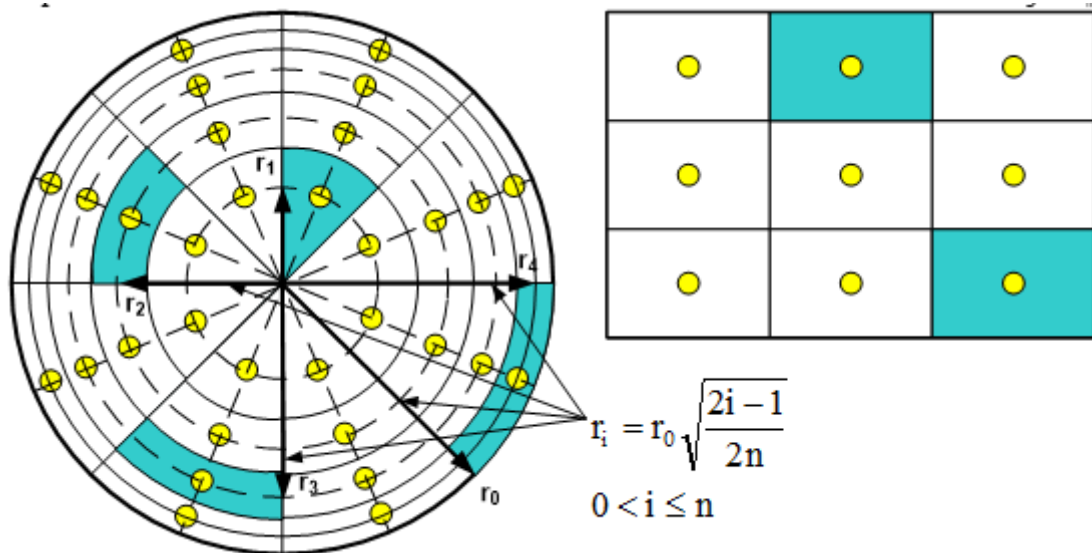
- N_i - az adott csatornában (mérettartományban) regisztrált részecskeszám
- $\dot{V}_{ki}, \dot{V}_{be}$ - a ki- és bemeneti levegő térfogatárama
- t_{ki}, t_{be} - mérés ideje a ki- és bemeneten
- k_h - hígító használata esetén a hígítási szám (10, 50, 100), hígító nélkül 1
- $C_{i,ki}, C_{i,be}$ - az adott csatornára számított ki- és bemeneti koncentráció
- P_i - az adott csatornára számított áteresztés (penetráció)



11. ábra. Az MPPS tartomány meghatározása grafikus módszerrel

5.2 Lokális áteresztés vizsgálat (pásztázó eljárás)

Miután meghatároztuk az MPPS tartományt, elvégezzük a lokális áteresztés vizsgálatot, amelynek célja, hogy a szűrő felületének közvetlen közelében megmérjük az adott pozíciókhoz tartozó helyi, vagy lokális áteresztés értékeit. Ennek érdekében a szűrő kimeneti felületét felosztjuk egyenlő területű elemi felületekre, majd azokhoz hozzárendelünk adott koordinátájú mérési pontot. A felosztás elvét különböző keresztmetszetekre az alábbi ábrán láthatjuk:



12. ábra. Különböző keresztmetszetű felületek felosztásának elve a lokális áteresztés meghatározása érdekében

Az ábrából megérthetjük, hogy kör keresztmetszet esetén az egyes mérési pontok azonos területű körcikkéket, illetve körszeleteket fednek le. Vegyük észre, hogy az egyes keresztmetszetek felosztása és a mérési pontok kijelölése teljes mértékben megegyezik az izokinetikus mérés során alkalmazott mérési pontok kijelölésének módszerével. A mérés során, az aeroszol mintavevő fejet pozícióról pozícióra kell mozgatni, és minden egyes mérési pontban meg kell határozni az MPPS mérettartományra az áteresztés értékét (4.1) – (4.3) összefüggések segítségével. Az aeroszol mintavevő fejének távolsága a szűrőelem felületétől nem lehet nagyobb, mint a mérési pontok közötti legkisebb távolság. Ezt a tesztet el kell végezni mind az öt mintára, majd a végén ki kell választani az összes adat közül a maximum értéket, és ez lesz az adott szűrőtípusra jellemző lokális áteresztés (P_{loc}), majd ebből számítjuk a lokális hatásfokot ($E_{loc} = 100 - P_{loc}$).

Természetesen, a teszt során nagyon fontos a berendezés stacionárius állapotban működjön, tehát, a légforgalom, az aeroszol generálás intenzitása és a levegő termodinamikai jellemzői állandó értéket kell, hogy felvegyenek.

5.3 Szűrési hatásfok meghatározása

A vizsgálatoknak ez a része valójában nem más, mint a 4.1 pontban elvégzett mérések adatainak feldolgozása és értékelése. A 4.1 pontban meghatároztuk az MPPS mérettartományt és rendelkezünk erre a tartományra jellemző, mintánként egy, azaz öt áteresztés értékkel. Ez lesz a kiinduló adatsorunk. A továbbiakban kiszámoljuk az átlagos áteresztés értékét, majd ehhez hozzáadjuk a sorozatból képzett kétszeres standard deviáció értékét, így meg is határozzuk a maximális áteresztést 95 %-os konfidencia szinttel.

Természetesen, az ehhez tartozó minimális hatásfokot is megadjuk az alábbiak szerint:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (5.5)$$

$$sd = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{P} - P_i)^2}{n-1}} \quad (5.6)$$

$$P_{\max} = \bar{P} + 2 \cdot sd \quad (5.7)$$

$$E_{\min} = 100 - P_{\max} (\%) \quad (5.8)$$

Ahol

- \bar{P} - átlagos áteresztés
- P_i - az egyes minták MPPS csatornára számított áteresztése (penetrációja)
- n - mintaszám (5)
- sd - standard deviáció
- P_{\max} - az MPPS csatornára számított maximális áteresztés
- E_{\min} - az MPPS csatornára számított minimális szűrési hatásfok

5.4 A minősítés kritériumai

Miután elvégeztük a nagyszámú mérést és feldolgoztuk az adatokat, a meghatározott kritikus paramétereket (E_{\min} , P_{\max} , E_{loc} , P_{loc}) összehasonlítjuk a szabvány által, az adott típusú szűrőre vonatkoztatott értékekkel, amely szerint, értelemszerűen a kapott hatásfokok a táblázati értékeknél nagyobbak, míg az áteresztés értékei a táblázati értékeknél kisebbek kell, hogy legyenek.

EU besorolás	szűrési hatásfok - E_{\min} (%)	Áteresztés - P_{\max} (%)	lokális hatásfok - E_{loc} (%)	lokális áteresztés - P_{loc} (%)
E10	85	15	-	-
E11	95	5	-	-
E12	99,5	0,5	-	-
H13	99,95	0,05	99,75	0,25
H14	99,995	0,005	99,975	0,025
U15	99,9995	0,0005	99,9975	0,0025
U16	99,99995	0,00005	99,99975	0,00025
U17	99,999995	0,000005	99,9999	0,0001

2. sz. táblázat: A nagy hatékonyságú részecskeszűrők minősítésének kritériumai [4]

A TESZTEKKEL KAPCSOLATOS EGYÉB KÖVETKEZTETÉSEK, ÖSSZEGZÉS

A fentiekben tárgyalt tesztek végrehajtása során minden fázisban mérjük a szűrők ellenállását. Ha ez korrekt módon dokumentálásra és közlésre kerül, egy új szűrőrendszer tervezése során lehetőség nyílik, a tervezett légforgalom és a tisztítandó terek szennyezettségi paramétereinek ismeretében, a szűrő élettartamára megbecsülni a teljesítményszükségletet és költségkalkulációt is végezni.

Az EN 779 szabvány alapján végzett visszatartás teszt sajnos nem reprezentatív a legtöbb ipari, vagy kommunális rendszerre. Ennek az oka, hogy a tesztben használt ASHRAE teszt por sokkal nagyobb arányban tartalmaz durva szemcséket (főleg a szénporból), mint a normál atmoszférikus por és aeroszol. Ez viszont azt is jelenti, hogy, főleg a G és M osztályú szűrők

esetében, a visszatartás teszt alapján meghatározott pormegkötő képesség jobb lesz, mint a normál üzemi körülmények között működő szűrők esetében.

A minősítő vizsgálatok során végrehajtott hatásfok tesztek jó konzervatív információt nyújtanak, mivel a szűrők összh hatásfoka lényegesen nagyobb általában, mint az MPPS mérettartományban kapott minimális hatásfok értékek. Mindazonáltal, a szűrők üzemideje alatt a környezeti paraméterek lényegesen eltérnek a szabványok által előírt laboratóriumi körülményektől, ami az üzemelő szűrő hatásfokát is befolyásolhatja.

Meg kell említenünk a víznek a szűrőkre gyakorolt hatását, főleg, ha a szűrőanyag nem vízlepergető, valamint a levegő által tartalmazott oldódó szennyezőanyagok, mint pl. só, a kipufogógázok SO_x és NO_x tartalma befolyásolhatja a szűrési hatásfokot. Egyes esetekben a gyártó kiegészítő teszteket is végez a speciális környezetben üzemelő szűrők részére.

Végezetül, még egy nagyon fontos (talán a legfontosabb!) dolgot kell megemlítenünk. A szűrőkön végrehajtott tesztek speciális, laboratóriumi körülmények között folynak, ami lehetővé teszi, hogy a mérési eredmények kizárólag a szűrőt jellemezzék. Miután a szűrőt beépítettük egy ipari, kommunális, vagy laboratóriumi biztonsági, vagy normál üzemű rendszerbe, onnantól kezdve nem a szűrő paraméterei érdekelnek minket, meg nem is azt mérjük, hanem a rendszer egészét, vagy részeit, ami tartalmazza a rendszer hibáit, tervezett, vagy véletlenszerű tömörtelenséget, alászívást, vagyis olyan jelenségeket, ami általában csökkenti a hatékonyságot. Ez azt eredményezi, hogy egy szűrőrendszer szűrési hatásfoka soha nem lesz olyan, mintha a benne levő szűrőt kiszerezelnék és lemérenék egy laboratóriumi minősítő berendezésben. Általában véve elfogadhatjuk ökölszabálynak, hogy ha egy szűrőrendszerhez meghatározunk egy kritériumot, akkor a beleépítendő szűrőt egy osztállyal magasabba kell sorolni, vagyis tegyük fel, ha a szűrőrendszerünknek teljesíteni kell a H13-as kategóriának megfelelő feltételt ($E \geq 99,95\%$), akkor H14-es szűrőt vegyünk hozzá. Lehetséges, hogy a rendszerünk egy jó minőségű H13-as szűrővel is teljesíti az elvárásokat, egyszer, kétszer, háromszor, de valamikor úgyis alácsúszik a megengedett hatásfok értéknek, ami nem azt jelenti, hogy a rendszer rossz, csak rosszul méreteztünk.

Felhasznált irodalom

- [1] ABV szűrőegység fejlesztése kollektív szűrőkhöz: Kutatás-fejlesztési jelentés, ALK-00044/2001, Szerződés száma: OMFb-00601/2002.
- [2] Melissa Wilcox, Richard Baldwin, Augusto Garcia-Hernandez, Klaus Brun: Guideline For Gas Turbine Inlet Air Filtration Systems, Gas Machinery Research Council, Southwest Research Institute, April 2010, Release 1.0
- [3] Á. Vincze, G. Eigemann, J. Solymosi: Filtration of radioaerosols in Nuclear Power Plant Paks, Hungary. AARMS, Vol. 5, No. 3. (2006) 335-344
- [4] MSZ EN 1822 1-5: Nagy hatékonyságú légszűrők (HEPA és ULPA)
- [5] ASME AG-1 1997, ANSI/ASME N510
- [6] European Air Filter Test Standard EN 779:2012
- [7] P.A. Baron and K. Willeke: Aerosol measurement, Wiley, 2001