

Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem  
Bolyai János Katonai Műszaki Kar  
Katonai Műszaki Doktori Iskola



# **Aeroszol és gáztisztító szűrők minősítése a Paksi Atomerőmű technológiai rendszerében**

**PhD értekezés**

**Eigemann József Gábor**

**Dr. Vincze Árpád, PhD**  
egyetemi docens  
témavezető

Budapest, 2008.

# Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Szellőző rendszerek ismertetése .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1. Hermetikus tér üzemi elszívó szellőző rendszere (TN02).....</b>	<b>9</b>
2.1.1. Aeroszol szűrők .....	9
2.1.2. Jódshűrők.....	11
<b>2.2. Hermetikus tér karbantartási szívó szellőzése (TN01) .....</b>	<b>12</b>
2.2.1. Aeroszol szűrők .....	13
2.2.2. Jódshűrők.....	14
<b>2.3. Hermetikus tér recirkulációs légtisztító rendszere (TL02) .....</b>	<b>14</b>
2.3.1. Aeroszol szűrők .....	14
2.3.2. Jódshűrők.....	15
<b>2.4. Főépületi speciális gáztisztító rendszer (TS) .....</b>	<b>15</b>
2.4.1. Adsorber .....	16
<b>2.5. Hatósági követelmények.....</b>	<b>17</b>
2.5.1. Speciális gáztisztító rendszerek .....	17
2.5.2. Szellőző rendszerek .....	18
<b>3. Aeroszol szűrők.....</b>	<b>19</b>
<b>3.1. Az aeroszol szűrés mechanizmusa.....</b>	<b>20</b>
3.1.1. Kiüledés .....	21
3.1.2. Tehetetlenségi erő hatására történő ütközés .....	21
3.1.3. Elektrosztatikus kölcsönhatás .....	21
3.1.4. Diffúziós hatás .....	22
<b>3.2. Aeroszol szűrő berendezések .....</b>	<b>23</b>
3.2.1. A HEPA szűrő .....	23
3.2.2. Szűrőanyagok .....	23
3.2.3. Szűrőegységek jellemzői .....	25
<b>3.3. A paksi atomerőműben alkalmazott aeroszol szűrő típusok .....</b>	<b>26</b>
3.3.1. C-500 aeroszol szűrő .....	26
3.3.2. ABSOLUTE 1DT típusú aeroszol szűrő és AIROPAC 90 típusú előszűrő.....	26
<b>3.4. Vizsgálati módszerek.....</b>	<b>26</b>
3.4.1. Aeroszolok mintavételezése .....	26
3.4.2. Aeroszolok detektálása .....	28
3.4.3. Aeroszol szűrők minősítése .....	30
3.4.4. Tesztelési módszerek áttekintése .....	30
<b>3.5. Mérési módszer kidolgozása a C-500 típusú aeroszol szűrők hatásfokának helyszíni ellenőrzésére.....</b>	<b>36</b>
3.5.1. A módszer rövid ismertetése .....	36
3.5.2. Injektálási pontok kiválasztása .....	36
3.5.3. A vizsgálathoz alkalmazott eszközök és anyagok .....	37
3.5.4. Az ellenőrzés kivitelezése.....	39
3.5.5. A mérési eredmények értékelése .....	40
<b>3.6. Összefoglalás, eredmények .....</b>	<b>41</b>
<b>4. Gáztisztítók .....</b>	<b>44</b>
<b>4.1. Nemesgázok adszorpciója aktív szénen .....</b>	<b>45</b>
4.1.1. Kromatográfiai megfontolások.....	46

<b>4.2.</b>	<b>A retenciót befolyásoló tényezők .....</b>	<b>51</b>
4.2.1.	Az aktív szén pórusossága .....	51
4.2.2.	Relatív légnedvesség tartalom .....	52
4.2.3.	Hőmérséklet.....	54
4.2.4.	A gáz áramlási sebessége.....	54
4.2.5.	Öregedés .....	54
4.2.6.	Halmazsűrűség .....	54
<b>4.3.</b>	<b>A retenció mérése .....</b>	<b>54</b>
4.3.1.	A retenció mérésére kifejlesztett folyamatos mérőrendszer .....	54
4.3.2.	Az eljárás elve .....	55
4.3.3.	A mérőrendszer telepítése.....	56
4.3.4.	A retenció mérési módszer továbbfejlesztése.....	57
4.3.5.	A 01TS70N002 adszorber mérése az eredeti módszer szerint.....	59
4.3.6.	A 01TS70N002 adszorber mérése az új módszer szerint .....	60
<b>4.4.</b>	<b>Modell vizsgálatok .....</b>	<b>62</b>
4.4.1.	Modell szűrőágy és retenciós mérés elvégzésére alkalmas mérő és vezérlő berendezés tervezése és kivitelezése .....	62
4.4.2.	Adszorbens kiemelésére alkalmas berendezés.....	67
4.4.3.	Mintavétel.....	68
4.4.4.	A modell szűrőágy kialakítása.....	68
4.4.5.	Modellágyak kondicionálása .....	69
4.4.6.	Mínősítő mérések .....	72
4.4.7.	Következtetések.....	74
<b>4.5.</b>	<b>A szűrőágak helyszíni szárítási módszerének kifejlesztése .....</b>	<b>75</b>
4.5.1.	Az aktív szén szárításának elvi alapjai és módszerei.....	76
4.5.2.	Szárításra vonatkozó modell kísérletek .....	78
4.5.3.	A szárítási modell kísérletekből levonható következtetések.....	86
<b>4.6.</b>	<b>Főépületi gáztisztító adszorberek szárítása .....</b>	<b>87</b>
4.6.1.	A szárítás előtti állapot .....	90
4.6.2.	A szárítás kivitelezése .....	90
4.6.3.	Retenció mérés a szárítás előtt.....	90
4.6.4.	A szárítás alatt mért paraméterek.....	91
4.6.5.	Retenció mérés a szárítás után.....	94
4.6.6.	A szárítás eredményének értékelése .....	96
<b>4.7.</b>	<b>Retenciós kritérium rendszer felülvizsgálata .....</b>	<b>97</b>
4.7.1.	Kritériumok .....	97
4.7.2.	Maximális terhelés számítása .....	97
4.7.3.	A főépületi gáztisztítóba kerülő aktivitás számítása .....	99
4.7.4.	Elméleti retenciós idő számítása.....	103
4.7.5.	Eredmények.....	104
4.7.6.	Kritériumok módosítása .....	109
<b>5.</b>	<b>Összefoglalás .....</b>	<b>110</b>
<b>6.</b>	<b>Új tudományos eredmények .....</b>	<b>114</b>
<b>7.</b>	<b>Hivatkozások jegyzéke .....</b>	<b>115</b>
<b>8.</b>	<b>Az értekezéssel kapcsolatos saját közlemények .....</b>	<b>118</b>
<b>9.</b>	<b>Köszönetnyilvánítás.....</b>	<b>120</b>
<b>10.</b>	<b>Függelék .....</b>	<b>121</b>
10.1.	Technológiai sémák .....	121

# 1. Bevezetés

A nukleáris létesítmények (atomerőmű, reprocesszáló üzem, stb.) még normál üzemi körülmények mellett is bocsátanak ki radioaktív izotópokat a környezetükbe. Ez a kibocsátás egy esetleges baleset, terrortámadás, stb. következtében katasztrofális következményekkel is járhat. A polgári lakosság, a potenciálisan veszélyeztetett és/vagy a nukleárisbaleset-elhárításban közreműködő katonai erők sugárvédelme szempontjából alapvető feladat a lehetséges kibocsátások minimalizálása, a környezet folyamatos ellenőrzése, és a kollektív védelmet nyújtó létesítmények ellenőrzött levegőellátása.

Egy nukleáris létesítmény esetében a biztonsági intézkedések legfontosabb célja, hogy mind normál üzemben, mind üzemzavari körülmények között a radioaktív kibocsátások társadalmi kockázata elfogadható mértékű legyen. A kibocsátás határértékét ennek megfelelően szigorú hatósági előírások szabályozzák. Ezek betartását a kibocsátási útvonalakba telepített olyan műszaki gáttakkal lehet elérni, amelyek még méretezési üzemzavari/baleseti események esetén is biztosítják a radioaktív anyagok megfelelő mértékű visszatartását.

A kollektív védelmet nyújtó létesítmények (óvóhelyek, védett vezetési pontok, atomerőmű vezénlyőterme, stb.) esetében a cél az, hogy a környezet radioaktív elszennyeződése esetén megakadályozzák a szennyezés bejutását a létesítménybe, biztosítva ezzel az ott tartózkodók egészségének megóvását, a munkaképesség (harckészség) megtartását. Az alkalmazott műszaki gátak ilyen esetekben is hasonló elven működnek, csak a visszatartás iránya fordított.

A Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Katasztrófavédelmi Tanszékén évek óta folyik olyan újfajta eljárások, eszközök kutatása és fejlesztése, amelyek a fentebb említett feladatok elvégzését könnyítik, tökéletesítik, hozzájárulva ezzel a személyi állomány és a lakosság fokozottabb védelméhez. Ezeknek a technikáknak a fejlesztése és rendszerbe állítása a hazai nukleáris ipar és a Magyar Honvédség ABV védelmi képességének a NATO követelményekhez történő igazodása szempontjából is alapvetően fontos.

A fentieknek megfelelően a Paksi Atomerőmű Zrt. technológiai rendszereiben is különböző szűrőberendezések vannak beépítve, amelyek fizikai gátként funkcionálva a normál üzem során és üzemzavari események következtében keletkező radioaktív aeroszolok, gáz és gőz halmazállapotú radioaktív anyagok környezetbe történő kibocsátását megakadályozzák, illetve minimális mértékűre csökkentik. Ezzel elérhető, hogy a környezetben élő lakosságot és az erőmű üzemeltető személyzetét érő többlet dózisterhelés az erőmű üzemeltetésével összefüggésben minimális értékű, a természetes háttérből fakadó értéknél is alacsonyabb legyen. A nukleáris iparban alkalmazott jól működő műszaki megoldások emellett mintaként szolgálnak a kollektív védelmet biztosító létesítmények szűrt levegőjét biztosító műszaki gátak tervezése és ellenőrzése szempontjából is.

A szűrőberendezésekkel kapcsolatban elsődendő szempont, hogy a tervezett hatásosságuk folyamatosan biztosított legyen. A hatásosság biztosításához ismernünk kell a berendezések állapotát. Ehhez a szűrőberendezések hatásosságát (hatásfokát) rendszeresen ellenőrizni, monitorozni kell. Ilyen ellenőrzéseket az erőmű üzemelési idejének kezdetén nem végeztek, így szükségessé vált a különböző szűrőberendezésekhez ellenőrzési módszerek, az

ellenőrzések végrehajtásához pedig eszközök kifejlesztése, majd ezek birtokában a rendszeres ellenőrzések ipari körülmények közötti elvégzése, az eredmények értékelése. A berendezések állapotának ismeretében meg lehet hozni azokat az intézkedéseket, amelyek az előírt határfok biztosításához szükségesek.

Egy atomerőműben a radioaktív kibocsátás csökkentésére több gátat is beépítenek. Elsődleges gát maga az üzemanyag mátrix, amely erősen csökkenti a belőle kikerülő hasadvány termékek mennyiségét. A következő gát a fűtőelem pálcák hermetikus burkolata, amely megakadályozza az elsősorban gáz halmazállapotú hasadvány termékek kijutását a hőelvonást végző primer hűtőközegbe. A harmadik gát a primer hűtőközeget tartalmazó primer kör nyomásálló burkolata, amely megakadályozza radioaktív primerkörüli hűtőközeg kijutását.

Az előbbi gátak közül egyik sem tökéletes, az üzemanyag mátrixból is kerülnek ki hasadvány termékek, a fűtőelem pálcák egy része is tömörtelen. A primer hőhordozó, amely nem csak a fűtőelem pálcákból kikerülő hasadvány termékek, hanem a benne levő szennyező anyagok felaktiválódása miatt is radioaktív, a szervezett (technológiai szükségszerűségből történik, elvezetése „szervezetten” megoldott) és szervezetlen (meghibásodásból eredő, nem az előző kategóriába tartozó) szivárgások, vagy üzemzavari helyzetek (pl. különböző átmérőjű csövek törése) következtében kikerülhet a primer hűtőkörből.

Ám ez még ekkor sem jelenti a radioaktív közeg környezetbe kerülését, mert van egy következő fizikai gát, amely a kiszivárgott, vagy kifolyt hűtőközeget visszatartja, ez pedig az ún. konténment, vagy más néven hermetikus tér. A hermetikus tér belül fémlemez borítású, nyomásálló vasbeton épület, amely magába foglalja az atomerőmű azon berendezéseit és rendszereit, amelyek radioaktív közeget tartalmaznak.

A primer körből kijutó radioaktív közeg egy része gőz, gáz vagy aeroszol formájában a hermetikus tér légtérébe jut. Ezek környezetbe történő kijutásának megakadályozását a hermetikus tér szellőztető rendszereibe épített szűrőberendezések végzik. A hermetikus tér rendelkezik üzemi és karbantartási szívó-nyomó szellőzőrendszerekkel (ezek csekély depressziót biztosítanak az ellenőrzött kibocsátás érdekében), illetve egy recirkulációs szellőző rendszerrel (feladata néhány belső térrész tisztított levegővel történő ellátása, illetve a kibocsátás csökkentése az elszívott levegő előtisztításával). A szívó rendszerek és a recirkulációs rendszer különböző típusú aeroszol szűrőkkel és jódszűrőkkel vannak felszerelve, amelyek feladata a hermetikus térből a környezetbe jutó levegő megtisztítása a különböző megjelenési formájú radioaktív szennyeződéstől, biztosítva ezzel a hatósági korlátok betartását.

Az eddig említett útvonalon kívül van még egy, amelyen keresztül légnemű radioaktív szennyeződés juthat a környezetbe. A paksi blokkok primer körében a keringtető szivattyúk nem hermetikus kivitelűek, így szükség van állandó pótvíz forgalom fenntartására. A primer körből elvett hűtőközeg termikus gáztalanítása is megtörténik, amely során eltávoznak a hőhordozóban lévő oldott gázok. A gáztalanítóból a gőz-gáz elegyet a hidrogénégető rendszerbe továbbítják, ahol katalitikus úton megtörténik a hidrogén tartalom csökkentése. A folyamat fenntarthatósága érdekében a hidrogénégetőből részarámú gázelvétel történik. Az elvezetett gáz a radioaktív szivárgások gyűjtő tartályának szellőztetéséből származó gázzal együtt a gáztisztító rendszerbe kerül, ahol a környezetbe való kibocsátás előtt egy aktív szén adszorberen áthaladva megtörténik a gázelegyenben található nemesgázok retenci-

ója. Így az egyes nemesgáz izotópok aktivitása a retenció (visszatartás) következtében több nagyságrenddel csökken, a gázelegy a környezetbe kibocsáthatóvá válik

Az atomerőmű légnemű kibocsátására, a különböző szűrőberendezések hatásosságára hatósági korlátok és előírások vonatkoznak.

Először 1989-ben kerültem közelebbi kapcsolatba a témával, amikor az atomerőmű ösztöndíjasaként, a BME Gépészmérnöki Kar hallgatójaként, diplomamunkámat a Karlsruhei Atomkutató Központban (Kernforschungszentrum Karlsruhe) az atomerőművi jódszűrők-ből származó szénminták laboratóriumi hatásfok ellenőrzésének elméleti alapjairól és gyakorlati végrehajtásáról írtam.

Ezután néhány év szünet következett, majd a 90-es évek közepén ismételten a figyelem középpontjába került a légszűrő és gáztisztító berendezések hatásosság-ellenőrzésének kérdése. Ekkor kezdtük meg az erőmű blokkvezénylőit üzemzavar esetén szűrt levegővel ellátó szellőző rendszer létesítésének előkészítését. A Budapesti Műszaki Egyetem Fizikai Kémia Tanszéke (továbbiakban BME) 1994-ben végzett el az egyik gáztisztító adszorberen retenció mérést, illetve ekkor írta elő a nukleáris hatóság, hogy a radioaktív kibocsátást befolyásoló különböző légszűrő és gáztisztító berendezések rendszeres hatásfok ellenőrzését el kell végezni, a megfelelő eljárásokat ki kell dolgozni.

Ekkor igen sokrétű és kiterjedt tevékenység vette kezdetét, amely munka ma is folyamatban van, és amely hatására az erőmű technológiájában és a hatósági korlátozásokban is változások történtek.

A jódszűrő berendezések esetében nem rendelkezünk hatásfokra vonatkozó kritériumokkal, így először ezeket kellett meghatározni. Ezt a munkát a BME végezte el, az eredmény pedig hatósági kritériumként jelent meg. Ezután ki kellett dolgozni az erőműben beépített AU-1500 típusú jódszűrők helyszíni, metil-joddal történő hatásfok ellenőrzésének módszerét, mert a szűrőtípus töltetéből nem lehet mintát venni. Meg kellett teremteni a laboratóriumi ellenőrzés lehetőségét is, mert a blokkvezénylők már említett szellőző rendszerébe korszerű, mintavételezhető töltetű jódszűrők kerültek beépítésre. Erről a munkáról Dr. Nagy Károly mérnök alezredes úr számolt be 2002-ben készített PhD értekezésében [1-1]. Az elvégzett mérések eredményeként a kimerült AU-1500 típusú jódszűrők kiváltása jelenleg folyamatban van a blokkvezénylőihez hasonló kialakítású, mintavételezhető szűrőtípusra. A kiváltás 2008. végéig befejeződik, ezért helyszíni, radioaktív metil-joddal történő hatásfokmérésekre 2008-tól már nem lesz szükség, minden jódszűrő töltet hatásosság ellenőrzése az évenként vett aktív szén minták laboratóriumi ellenőrzésével fog történni.

A paksi atomerőmű hermetikus térhez kapcsolódó szellőző rendszereibe két különböző típusú aeroszol szűrő berendezés van beépítve. Az egyik előtétiszűrővel rendelkező típus, az AIROPAC 90 előszűrővel ellátott ABSOLUTE 1DT aeroszol szűrő. Az előszűrő hosszabb élettartamot, kevesebb hulladékot eredményez, valamint a gyártója biztosít hozzá ellenőrzési módszert és berendezést. Ennél a szűrőtípusnál feltételezzük, hogy a hatásossága mindaddig megmarad, amíg mechanikai sérülés nem keletkezik a felületén, cserélni pedig akkor kell, amikor a légellenállása eléri a megengedett maximumot. A sérülésmentesség igazolására egy vizsgáló berendezés szolgál, amely olajködöt generál és azt egy kompresszor átnyomja a vizsgáló asztalra rögzített aeroszol szűrőn. Megfelelő fényforrással a mechanikai sérülés helyén átjutó olajköd felfedezhető, a hibás szűrő detektálható.

A másik aeroszol szűrő típus a speciális, regenerálható kialakítású C-500 aeroszol szűrő. Ennek megfelelőségét nem lehet a táskás szűrőéhez hasonlóan igazolni, mivel nem lehet a helyéről kiszerezni, a szűrőfelületet vizuálisan vizsgálni. Szükséges volt a nemzetközi eljárások adaptálásával kidolgozni a C-500 aeroszol szűrők helyszíni hatásfokmérésének módszerét, amelyről jelen dolgozatomban számolok be.

A másik terület, amely kutatásáról dolgozatomban beszámolok, a gáztisztító adszorberekkel kapcsolatosan végzett tevékenység. A gáztisztító rendszerekben működő aktív szén adszorberek esetében a Kr és Xe izotópokra van hatósági kritérium, adott légforgalomhoz tartozó retenciós idő formájában előírva. A BME által korábban kidolgozott retenció ellenőrzési módszer csak az előírt kritériumok egy részére, a Kr izotópokra vonatkozóan szolgáltatott eredményt. A feladat tehát ezen a téren az volt, hogy meg kellett teremteni a Xe izotópokra is az ellenőrzés lehetőségét, majd végrehajtani minden adszorberen az ellenőrzést. Az ellenőrzések eredményének ismeretében meg kellett határozni a szükséges intézkedéseket a megfelelő hatásosság biztosításához.

#### **Kutatási célkitűzéseim az alábbiak voltak:**

- Áttekinteni az aeroszol szűrők működési mechanizmusát, fontosabb típusait és minősítésük ismert módszereit.
- Megvizsgálni az ismert minősítési módszerek alkalmazhatóságának feltételeit valós (ipari) rendszerek minősítésére.
- Kidolgozni a paksi atomerőmű technológiai rendszereiben üzemelő C-500 típusú aeroszol szűrők minősítésének módszerét, megvalósítani az aeroszol szűrők minősítésének elvégzéséhez szükséges mérési konfigurációt.
- Modell és valós körülmények között tesztelni az ellenőrzési eljárást.
- Megvalósítani a C-500 típusú aeroszol szűrők rendszeres minősítését.
- Értékelni a minősítések eredményét, meghatározni a minősített állapot fenntartásához szükséges beavatkozásokat.
- Áttekinteni az aktív szén adszorberek működési mechanizmusát.
- Kidolgozni a paksi atomerőmű technológiai rendszereiben üzemelő aktív szén adszorberek minden előírt kritériumra vonatkozó minősítésének módszerét.
- Megvalósítani a minősítések elvégzéséhez szükséges mérési konfigurációt, modell és valós körülmények között tesztelni az ellenőrzési eljárást.
- Megvalósítani az aktív szén adszorberek rendszeres minősítését, értékelni a minősítések eredményét, meghatározni a minősített állapot fenntartásához szükséges beavatkozásokat.
- A tapasztalatok alapján megvizsgálni az egyes eljárások kombinálhatóságának feltételeit, a kollektív védelmet nyújtó kombinált szűrőrendszerek minősítésének egyszerűsítése érdekében.

**Kutatási módszereim:**

- Tanulmányoztam a témával kapcsolatos nemzetközi és hazai szakirodalmat és értékeltem azok alkalmazási lehetőségét a szűrők minősítésének megvalósítására.
- Elemeztem eddigi kutatási eredményeimet, tanulmányoztam a témakörben megjelent új elméleteket, eljárásokat.
- Kutatási eredményeimet folyamatosan publikáltam, részt vettem és előadásokat tartottam kutatói konferenciákon, szimpóziumokon.
- Modell berendezéseket építettem, azokon kísérleteket végeztem a minősítési módszerek validálására, megfelelő eljárások kiválasztására.
- Technológiai szűrőkön kísérleti méréseket végeztem a kifejlesztett minősítési módszerek finomítására.



## 2. Szellőző rendszerek ismertetése

Az atomerőműben üzemelő szellőző és gáztisztító rendszerek feladata a primerköri hőhordozó szervezett és szervezetlen szivárgása, valamint a hőhordozó termikus gáztalanítása útján kikerülő radioaktív aeroszolok és gázok megkötése, illetve visszatartása a környezetbe történő kibocsátás előtt. Az alábbiakban röviden ismertetem a szellőző és gáztisztító rendszerek és a szűrőberendezések felépítését a Paksi Atomerőmű Műszaki Leírása [2-1] alapján.

### 2.1. Hermetikus tér üzemi elszívó szellőző rendszere (TN02)

A hermetikus tér nyomástartó szellőztetése a reaktor normál üzemi állapotában úgy valósul meg, hogy egy nyomó szellőző rendszer (UH03) szűrt levegőt juttat a hermetikus tér helyiségeibe, és azt a tér különböző pontjairól a szívó szellőző rendszer (TN02) elszívja, megszűri, és a környezetbe bocsátja. A befúvásnál nagyobb térfogatáramú elszívás hatására a hermetikus térben a környezethez viszonyított szabályozott mértékű depresszió alakul ki.

A TN02 rendszer három párhuzamos ágból áll, amelyekből 1 üzemi, 2 tartalék. A rendszer teljesítménye 1.250 m<sup>3</sup>/h áganként. Mindegyik ág ventilátort, aeroszol és jódszűrőket, hermetikus csappantyúkat tartalmaz. A TN02 rendszer a gőzfejlesztők helyiségének alsó és felső részéből egyaránt szív. Elszívási helyei a helyiséggel közös légteret képező helyiségek.

Az egyes szűrő ágakban vannak elhelyezve a C-500 típusú aeroszol szűrők, 3-3 egység párhuzamosan, majd minden ágban ezekkel sorba kötve 1 db AU-1500 típusú, aktív szén töltetű jódszűrő. A párhuzamosan elhelyezett szűrőágak bármelyike bármelyik ventilátorral üzemeltethető, a csappantyúk működtetésével.

A ventilátorok közös nyomó légcsatarnája a nyomókamrába köt be, ahonnan a megtisztított levegő a szellőző kéményen át kerül ki a környezetbe.

A rendszer technológiai kapcsolását ábrázoló séma a Függelék 10.1. ábrán látható.

#### 2.1.1. Aeroszol szűrők

A C-500 aeroszol szűrő fő egységei: szűrőelem, amely 2 db perforált hengerből, és 2 db 1,5 µm átmérőjű, ultrafinom üvegszál paplanból készült csavart szűrőfelületből áll, valamint a köpeny és a fedél.

A szűrőelemet a karima rögzíti, mely a köpeny és a fedél között helyezkedik el, és csavarokötéssel van rögzítve. A perforált acélhengerben csavart állapotban lévő szűrőfelületet a csavarok rögzítik. A rozsdamentes hengeres ház tetején a dekontamináló oldat bevezető, alján az elvezető csonk helyezkedik el. A tisztítandó levegő a ház tetején lévő csonkon lép be a szűrőbe, a szűrőn áthaladva megtisztul, és a ház oldalán lévő csonkon lép ki.

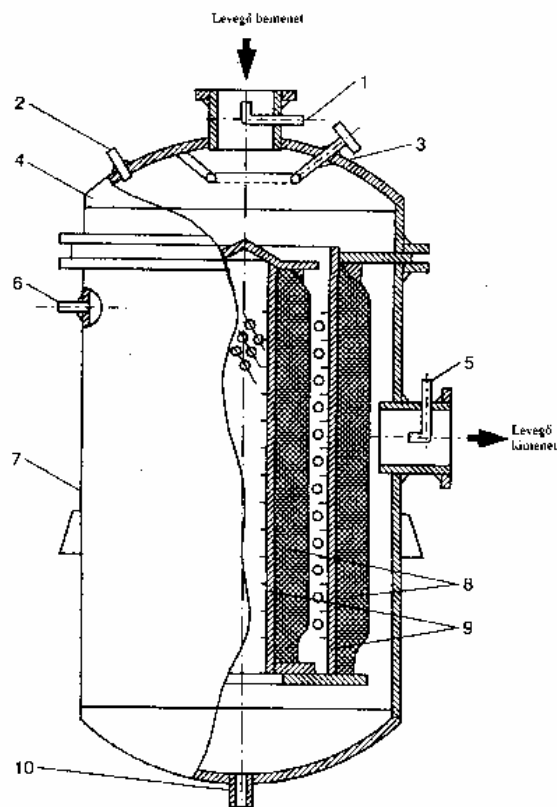
A C-500 szűrők regenerálhatók, azaz a szűrők eltömődése (a szűrő ellenállásának a megengedett érték fölé emelkedése) esetén savas és lúgos oldatokkal tisztíthatók. A szűrő eltömődésének mértékét, azaz a szűrő ellenállását differenciál nyomásmérő érzékeli. A szűrő öntisztuló tulajdonságokkal is rendelkezik, ugyanis a szűrőkön a tisztított levegőből lecsapódó nedvesség a szilárd részecskéket is kimoshatja a szűrőfelületről. A C-500 szűrők savas és lúgos regenerálásához szükséges vegyszerek vezetékeken vezethetők a szűrőkbe. Az oldatok a normál üzemben zárt üritő tolózárakon keresztül a speciális csatorna hálózatba kerülnek. A szűrő alapvető paramétereit a 2.1. táblázat tartalmazza. A 2.1. ábra a szűrők beépítését mutatja a TN02 rendszer egyik ágában. A szűrő szerkezete a 2.2. ábrán látható.

**2.1. táblázat**  
**A C-500 aeroszol szűrő jellemzői**

Szűrő jellemző	A jellemző értéke
Üzemi teljesítmény	500 m <sup>3</sup> /h
Szűrőanyag	M20UTV/0,85-0,65
Kezdeti nyomásesés	400 Pa
Üzemi közeg	levegő
Tisztítási tényező	99,95 % (0,3 μm)
Közeghőmérséklet max.	100 °C



**2.1. ábra**  
**C-500 aeroszol szűrők TN02 rendszerben**



2.2. ábra.

A C-500-as szűrő felépítése. 1 – bementi mintavételi csonk; 2 – bemeneti levegőztető; 3 - mosószerkezet; 4 – fedél; 5 – kimeneti mintavételi csonk; 6 – kimeneti levegőztető; 7 – ház; 8 – szűrő; 9 – perforált henger; 10 – folyadék leeresztő.

### 2.1.2. Jódszűrők

Az aktív szén töltetű AU-1500 jódszűrő egy hengeres ház, melyben a szorbens aktív szén van elhelyezve. A hengerpaláston kialakított felső csonkon belépő levegő a rozsdamentes rácson elhelyezkedő szorbensen átáramolva az ugyancsak a hengerpaláston lévő alsó csonkon át távozik. A szorbens réteget felülről mozgatható rugós keret és háló szorítja le.

A levegő esetleges magas páratartalma az aktív szén elvizesedését és a szűrőképesség romlását eredményezi [2-2, 2-3], ezért a jódszűrőket minden esetben az aeroszol szűrők után kapcsolják a szűrési folyamatban. Ez a kapcsolat egyszersmind megóvja a jódszűrőket attól, hogy aeroszolokkal telítődjenek. Az AU-1500 típusú jódszűrők főbb paraméterei a 2.2. táblázatban láthatóak. A 2.3. ábra a szűrő beépítését mutatja a TN02 rendszer egyik ágában.

**2.2. táblázat**  
**Az AU-1500 jódszűrő jellemzői**

Szűrő jellemző	A jellemző értéke
Üzemi teljesítmény	1500 m <sup>3</sup> /h
Szűrőanyag	SZKT-31
Nyomáscsökkenés min-max	500-2.500 Pa
Üzemi közeg	levegő
Közeghőmérséklet max	130 °C



**2.3. ábra**  
**AU-1500 jódszűrő a TN02 rendszerben**

## **2.2. Hermetikus tér karbantartási szívó szellőzése (TN01)**

A hermetikus tér karbantartási és üzemzavari szellőztető rendszere a reaktor karbantartás céljából történt tervszerű leállítását, vagy üzemzavarokat követően van üzemben. A reaktor normál üzeme alatt a rendszer üzemben kívül van. Az UH04 rendszer a hermetikus térbe szűrt, télen melegített és nyáron lehűtött külső friss levegőt szállít. A TN01 elszívó rendszer a hermetikus térből elszívott levegőt szűrőberendezéseken keresztül, vagy azok megkerülésével szállítja a szellőző kéménybe. A TN01 rendszer recirkulációs üzemmódra állítva a hermetikus tér levegőjének tisztítására is felhasználható.

A TN01 rendszernek csak egy ága van, amely aeroszol és jódszűrőket, ventilátort, hermetikus csappantyúkat és laptolózárat tartalmaz, teljesítménye 40.000 m<sup>3</sup>/h.

A TN01 rendszer által elszívott levegő áthalad az ABSOLUTE-1DT aeroszol szűrőkön, valamint az AU-1500 jódszűrőkön. A ventilátor ezután a levegőt a szellőző kéménybe nyomja.

Az aeroszol szűrők 4 db négyes csoportba vannak kapcsolva, ebből egyidejűleg 12 db szűrő üzemel, és 4 db szűrő tartalék. A 30 db AU-1500 jódszűrő két csoportba van osztva.

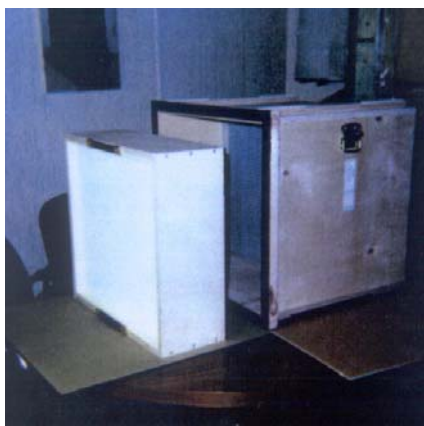
A rendszer technológiai kapcsolását ábrázoló séma a Függelék 10.2. ábrán látható.

### 2.2.1. Aeroszol szűrők

A rendszerben alkalmazott ABSOLUTE 1DT aeroszol szűrő AIROPAC 90 előszűrő egyéssel van ellátva. Ezek nem regenerálható, üvegszál anyagú szűrők.

Az előszűrő alacsonyabb szűrési határfokú, a lebegő anyagok 85 %-át megkötí, ezáltal az aeroszol szűrőt védi, élettartamát meghosszabbítja. Gyakori cseréje így csak az előszűrőnek szükséges, ami költségmegtakarítást és kevesebb radioaktív hulladékot eredményez.

A szűrők fotóját a 2.4. ábra mutatja, műszaki adataikat a 2.3. és 2.4. táblázatok tartalmazzák.



2.4. ábra

ABSOLUTE 1DT finomszűrő és AIROPAC 90 előszűrő

2.3. táblázat

Az AIROPAC 90 előszűrő jellemzői

Szűrő jellemző	A jellemző értéke
Üzemi teljesítmény	3.400 m <sup>3</sup> /h
Szűrőanyag	üvegszál
Nyomáscsökkenés min-max	140-600 Pa
Üzemi közeg	levegő
Tisztítási tényező	85 % (atmoszférikus por)
Közeghőmérséklet max	90 °C

**2.4. táblázat**  
**Az ABSOLUTE 1DT aeroszol szűrő jellemzői**

<b>Szűrő jellemző</b>	<b>A jellemző értéke</b>
Üzemi teljesítmény	3.400 m <sup>3</sup> /h
Szűrőanyag	üvegszál
Nyomáscsökkenés min-max	370-2.000 Pa
Üzemi közeg	levegő
Tisztítási tényező	99,997 % (0,3 µm)
Közeghőmérséklet max	90 °C

### **2.2.2. Jódszűrők**

Az AU-1500 típusú jódszűrők hármásával két nagy, 15 egységet tartalmazó csoportba vannak osztva, mely csoportok hermetikus csappantyúkkal zárhatók ki az áramlásból.

## **2.3. Hermetikus tér recirkulációs légtisztító rendszere (TL02)**

A hermetikus tér recirkulációs tisztító rendszere a blokk normál üzemállapotában szükség szerint, továbbá az üzemzavarokat követő állapotban üzemel.

Feladata a gőzfejlesztők helyisége és a főkeringtető szivattyúk helyisége légterének rész-áramban történő megtisztítása a radioaktív aeroszoloaktól és gázoktól recirkulációs üzemmódban normál üzem alatt, és primerköri hűtőközeg folyásával járó üzemzavar után.

A rendszer két párhuzamos ágából áll, 1 üzemi, 1 tartalék. Minden ág ventilátort, hermetikus csappantyúkat, aeroszol és jódszűrőket tartalmaz. A rendszer teljesítménye 10.000 m<sup>3</sup>/h áganként.

A levegő elszívása a gőzfejlesztők helyiségéből történik, a tisztítás után a levegő a hermetikus tér hűtő szellőző rendszer (TL01) nyomó légcatornájába kerül. Ez lehetőséget ad arra, hogy a TL01 rendszer kiterjedt légcatorna hálózatát kihasználva a megtisztított levegő a hermetikus tér minden helyiségébe eljusson.

A rendszer mindkét ágában 7 db AU-1500 jódszűrő és 20 db C-500 aeroszol szűrő van elhelyezve.

A rendszer technológiai kapcsolását ábrázoló séma a Függelék 10.3. ábrán látható.

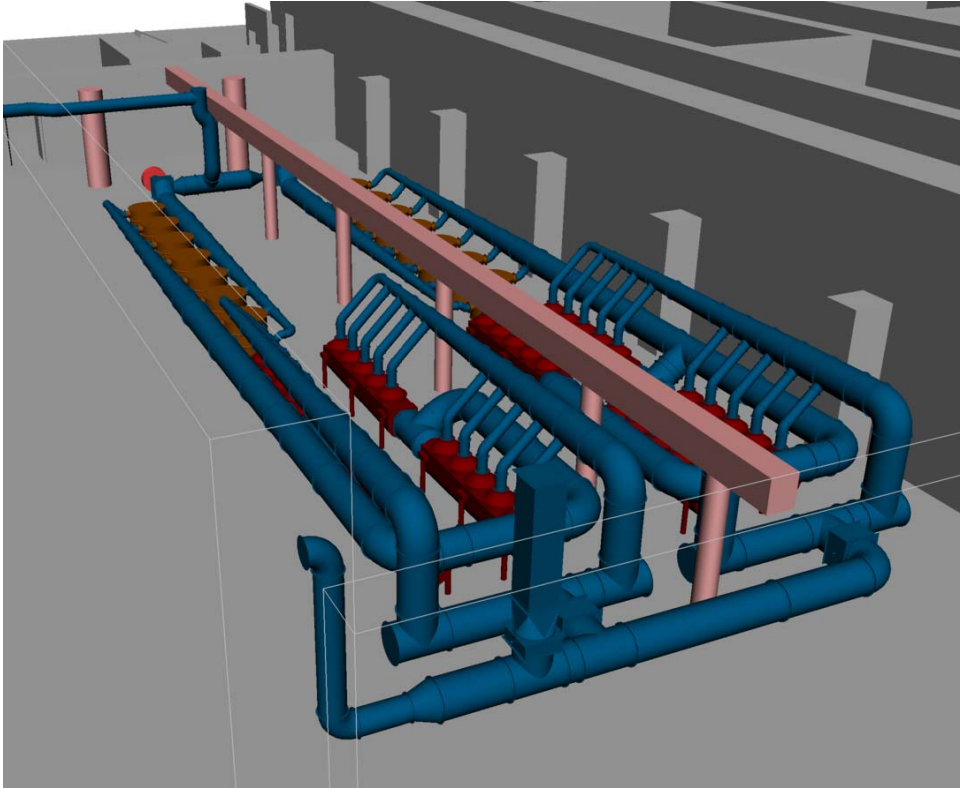
### **2.3.1. Aeroszol szűrők**

Áganként 20 db szűrő van beépítve, melyek ezen belül két, 10 db szűrőből álló csoportra vannak osztva. A kilépő oldalon csoportonként 5-5 db szűrő közös kollektorra van összerakva, majd a két vezeték egyesítése után kerül a levegő a jódszűrőkre.

### 2.3.2. Jódszűrők

Az AU-1500 típusú jódszűrőből áganként 7 db van párhuzamosan kapcsolva.

Az aeroszol- és jódszűrők elhelyezését a TL02 rendszerben a 2.5. ábra mutatja be.



2.5. ábra

C-500 aeroszol szűrők és AU-1500 jódszűrők elhelyezkedése a TL02 rendszerben

### 2.4. Főépületi speciális gáztisztító rendszer (TS)

A primerköri hőhordozóból üzem közben folyamatos leiszapolás történik. Az elvezetett hőhordozó a termikus gáztalanítóba kerül, ahol a benne oldott gázok eltávolítása történik. A gázok elvezetésre kerülnek a hidrogén égető rendszerbe, ahol a gáz hidrogén koncentrációjának megfelelő mértékű csökkentése megy végbe. A hidrogén égetőből részarámú gáz-elvezetés történik a főépületi speciális gáztisztítóba.

A primerköri hűtőközeggel üzemszerűen érintkező légtereket úgy tervezik, hogy minél kisebb térfogattal, a többi légtértől hermetikusan elzárva és külön légtisztító rendszerrel, az ún. speciális gáztisztító rendszerrel rendelkeznek.

Ennek a rendszernek az alapvető feladata a nemesgázok kibocsátásának késleltetése addig az ideig, ameddig az aktivitás jelentős hányadát képező, rövid felezési idejű radioaktív nemesgáz izotópok aktivitása a bomlás következtében a hatósági korlát alá csökken.

A főépületi speciális gáztisztító a hidrogén égetőből, valamint a szennyezett kondenzátum tartályok légtérének öblítéséből származó gázelegyet többlépcsős tisztítás után a szellőző kéménybe bocsátja. A rendszer két blokkra közös, három, azonos berendezéseket tartalmazó, párhuzamos ágból áll.

A gázelegyet a hidrogén égető rendszer gázfűvői nyomják a gáztisztító rendszerbe. A gáz-hűtőre kerülve a közeg lehül, és a cseppeválasztóban kiválik a nedvesség nagyobb része. Tovább haladva az öntisztuló szűrőn a maradék nedvességtől és aeroszol tartalmától tisztul meg a közeg. Ezután az egymással párhuzamos kapcsolásban lévő zeolit szűrők közül az üzeminek kiválasztott szűrőre kerül a gázelegyet. Itt a maradék nedvességtartalom megkötődik. A két szűrő kb. 250-300 óra üzemidőt tesz lehetővé egyhuzamban. A száraz gázelegyet az aktív szénrel töltött adszorberre áramlik, és miközben ezen áthalad, a radioaktív nemesgáz tartalma lecsökken. A gázelegyet ezután a közös vezeték szakaszra kerül, ahonnan a szellőző kéménybe jut.

A rendszer technológiai kapcsolását ábrázoló séma a Függelék 10.4. ábrán látható.

### 2.4.1. Adszorber

Az adszorber 12 db, aktív szénrel töltött, sorba kapcsolt, síkfedelű, hengeres tartályból áll. A tartályok az oldalukon felül gáz be- és kilépő csatlakozásokkal, az alsó részükön kondenzátum elvezetővel vannak ellátva. Az adszorber töltete SZKT-3 típusú aktív szén. A szűrő közepén egy lemezzel el van választva, így a gáz áramlási iránya szerint kétjáratú. A szűrő alján egy rácsos tartó van, amely a töltetet tartja, az alatta levő rész a fordító kamra. A gázáramhoz képest nagy aktív szén térfogat hosszú tartózkodási időt biztosít az adszorber szűrőn.

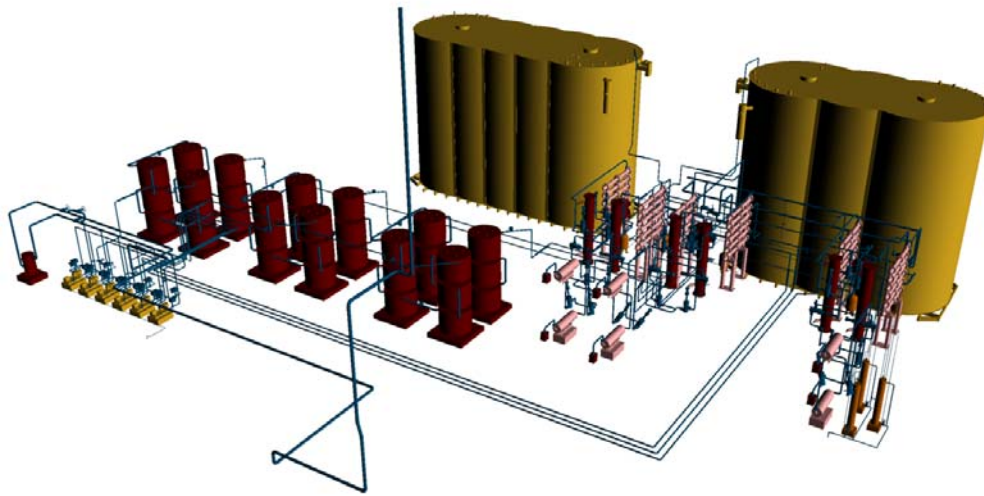
Az adszorber szűrő paramétereit a 2.5. táblázat mutatja.

2.5. táblázat  
Adszorber szűrő paramétereit

Paraméter	Érték
Teljes térfogat	27,6 m <sup>3</sup> (12 x 2,3 m <sup>3</sup> )
Aktív szén térfogat	19,8 m <sup>3</sup> (12 x 1,65 m <sup>3</sup> )
Normál üzemi hőmérséklet	20 °C
Térfogatáram	10-65 Nm <sup>3</sup> /h
Üzemi nyomás	0,88 bar
Közeg	gázelegyet
Szorbens	SZKT-3 aktív szén

A főépületi speciális gáztisztító rendszer berendezéseinek elhelyezkedését a 2.6. ábra mutatja be. Az ábrán láthatóak a szennyezett kondenzátum tartályai, amelyek nem részei a gáztisztító rendszernek, de ezek légtéréből is történik elszívás.





2.6. ábra

A főépületi speciális gáztisztító rendszer berendezéseinek elhelyezkedése

## 2.5. Hatósági követelmények

A technológiai rendszerekben alkalmazott jód, aeroszol és gáztisztító szűrők hatásosságával kapcsolatos hatósági követelményeket az Országos Atomenergia Hivatal Nukleáris Biztonsági Igazgatóságának TJ-62-04/006.sz. jegyzőkönyve [2-4], és a Nukleáris Biztonsági Szabályzat (NBSZ) 3.7. sz. Útmutatója [2-5] tartalmazza.

### 2.5.1. Speciális gáztisztító rendszerek

2.10. táblázat  
Speciális gáztisztító rendszer adszorber szűrő hatásosságára vonatkozó követelmények [2-4]

Izotóp	Retenció (késleltetési) idő* [h]
Kriptonok (Kr-85m, Kr-87, Kr-88)	30
Xenonok (Xe-133, Xe-135, Xe-135m)	420

\* 10 Nm<sup>3</sup>/h gázterhelés és 20 °C hőmérséklet esetén.

## 2.5.2. Szellőző rendszerek

2.8. táblázat

Atomerőművi aeroszol szűrők hatásfokára vonatkozó követelmények a különböző rendszerekben várható klímparaméterek maximális értékei mellett [2-5]

Rendszer	Hőmérséklet [°C]	Relatív páratartalom [%]	Nyomás [bar]	Hatásfok* [%]
Hermetikus tér üzemi depresszióját biztosító elszívás légtisztító rendszere (TN02)	130	100**	2,5	99,97
Hermetikus tér recirkulációs légtisztító rendszere (TL02)	130	100**	2,5	99,97
Hermetikus tér karbantartási légtisztító rendszere (TN01)	60	60	1,0	99,97
Vezénylőterem üzemzavari légtisztító rendszere (UH20)	60	60	1,0	99,97

\* A hatásfok értékek 0,3 µm aerodinamikai ekvivalens részecske-átmérőjű aeroszokra vonatkoznak.

\*\* 100 %-os relatív páratartalom mellett, párakicsapódás nélkül.

2.9. táblázat

Atomerőművi jódszűrők hatásfokára vonatkozó követelmények a különböző rendszerekben várható klímparaméterek maximális értékei mellett [2-5]

Rendszer	Hőmérséklet [°C]	Relatív páratartalom [%]	Nyomás [bar]	Hatásfok* [%]
Hermetikus tér üzemi depresszióját biztosító elszívás légtisztító rendszere (TN02)	130	100**	2,5	97,50
Hermetikus tér recirkulációs légtisztító rendszere (TL02)	130	100**	2,5	90,00
Hermetikus tér karbantartási légtisztító rendszere (TN01)	60	60	1,0	99,90
Vezénylőterem üzemzavari légtisztító rendszere (UH20)	60	60	1,0	99,90

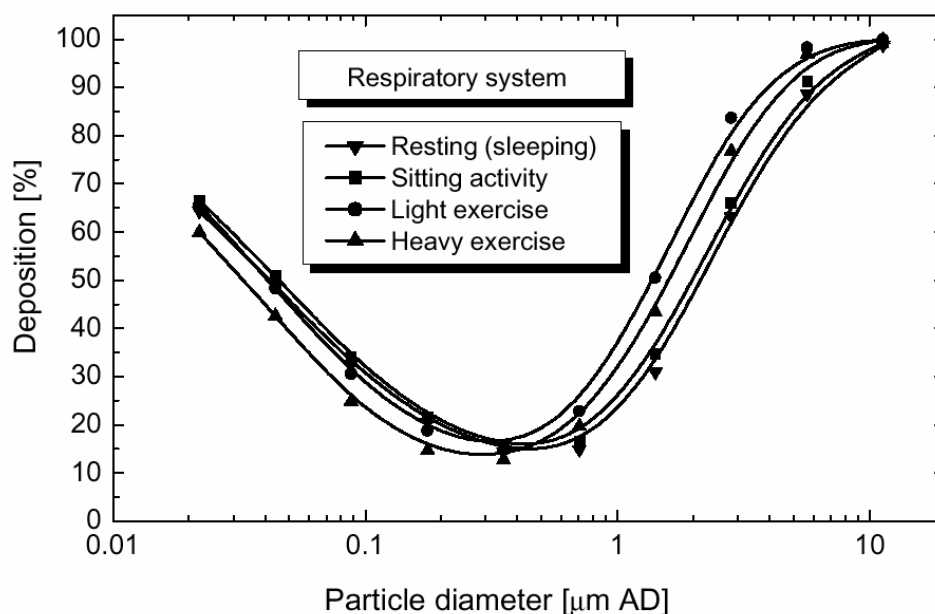
\* A hatásfok értékek metil-jodidra (CH<sub>3</sub>I) vonatkoznak.

\*\* 100 %-os relatív páratartalom mellett, párakicsapódás nélkül.

### 3. Aeroszol szűrők

A csernobili baleset során is bebizonyosodott, hogy a nukleáris létesítményekben keletkező radioaktív aeroszolok igen nagy területekre eljuthatnak. Dózisterhelés szempontjából a veszélyességük nagyobb, ha közvetlen inhaláció történik, ugyanis a tüdő egyes részein kiülepedve a dózisterhelés nagyobb lehet, mint külső expozíció esetében [3-1]. Az aeroszolként tüdőbe jutott veszélyes anyagok káros hatása ismert [3-2], azonban az aeroszolok tüdőben történő kiülepedése még nem teljesen tisztázott, ezért a mechanizmus megértése érdekében még mindig sokan vizsgálják a problémát és számos tudómodell látott napvilágot [3-3], [3-4], [3-5].

Nemrégiben megvizsgálták városi aeroszolok kiülepedésének az aeroszol részecske mérettől történő függését különböző humán aktivitásokra [3-6], az eredmény a 3.1. ábrán látható.



3.1. ábra

A kiülepedés függése a részecske mérettől [3-6] alapján.

Látható, hogy a kiülepedés a 0,1-1  $\mu\text{m}$  tartományban a legkisebb, és 0,3  $\mu\text{m}$  részecske méret körül minimuma van.

A tüdő szűrési hatékonysága is hasonló az ipari aeroszol szűrőkéhez, a kiülepedés minimuma szintén a 0,3  $\mu\text{m}$ -es részecske méretnél van [3-6].

Az atomerőművekben alkalmazott szűrőrendszerek egyik legfontosabb eleme az ún. nagy hatásfokú részecske levegő szűrő, közismert néven a HEPA (angolul High Efficiency Particulate Air filter) szűrő [3-7].

A paksi atomerőműben többféle HEPA szűrő van beépítve a technológiai rendszerekbe. A feladat a nem cserélhető szűrőbetéttel rendelkező C-500 típusú aeroszol szűrők helyszíni hatásfokmérési módszerének kidolgozása volt, illetve a módszer alapján a szűrők rendszeres ellenőrzésének biztosítása.

A fejezetben először irodalmi áttekintést adok az aeroszol szűrés mechanizmusáról, az aeroszol szűrők felépítéséről. Ezután bemutatom a paksi atomerőműben alkalmazott aeroszol szűrő típusokat, az aeroszol szűrők vizsgálati módszereit. Ismertetem a C-500 típusú aeroszol szűrők helyszíni hatásfok ellenőrzésére kiválasztott mérési módszert, és értékelem a mérési eredményeket.

### 3.1. Az aeroszol szűrés mechanizmusa

A diszperz rendszereket, melyekben szilárd vagy cseppfolyós anyagok gáz halmazállapotú közegben vannak elosztatva, aeroszoloknak nevezzük. Az aeroszolok 3 fő fajtája:

1. Por aeroszolok, melyeket tágabb értelemben füstnek nevezzük. A részecskék nagysága alapján beszélhetünk durva porokról ( $d > 10 \mu\text{m}$ ), finom porokról ( $d = 0,5-10 \mu\text{m}$ ), illetve kolloid porokról ( $d < 0,5 \mu\text{m}$ ).
2. Folyadék aeroszolok. Beszélhetünk - a cseppek méretétől függően - felületi aeroszoloiról ( $d = 50-100 \mu\text{m}$ ), tér aeroszoloiról ( $d = 1-50 \mu\text{m}$ ) és valódi aeroszoloiról ( $d < 1 \mu\text{m}$ ).
3. Keverék aeroszolok. (Itt a helyzet bonyolultabb, a részecskék lehetnek szilárdak és folyadékcseppek is.)

A radioaktív légszennyező részecskék, a radioaktív gázoktól eltekintve, általában a kolloid por aeroszol tartományba esnek [3-8], [3-9].

Az atomerőműben a radioaktív légszennyezők egy része szubmikron részecskeméretű aeroszolok formájában keletkezik. Ezek leválasztására az atomerőmű szellőzőrendszereibe nagy hatásfokú aeroszol szűrő berendezések vannak beépítve.

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

1. Kiüledés
2. Tehetlenségi erő hatására történő ütközés
3. Elektrosztatikus kölcsönhatás
4. Diffúziós hatás

### 3.1.1. Kiülepedés

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

Az ülepedésre a Stokes szám (St) állapít meg összefüggést:

$$St = \frac{t * v}{d} \quad (3.1)$$

ahol

t - ülepedési idő [s]

v - az ülepedő részecske sebessége [cm/s]

d - a szűrőelem jellemző mérete [cm]

Az ülepedéssel történő részecske leválasztás csak megfelelően nagy St szám ( $St > 0,5$ ) esetén jelentős. Mivel az ülepedési idő a részecskeméret négyzetével arányos, ez a mechanizmus csak megfelelő részecskeméret felett jöhet szóba.

### 3.1.2. Tehetetlenségi erő hatására történő ütközés

Ha megfelelő impulzussal rendelkező részecske áramlási iránya a szűrő anyag hatására hirtelen változik, akkor az kiléphet az áramlás irányából és a szűrő anyaggal ütközve megfogódik.

### 3.1.3. Elektrosztatikus kölcsönhatás

Az elektrosztatikus kölcsönhatás az egyetlen olyan mechanizmus, amikor az áramló részecske eredeti áramlási profilját nem hagyja el, csak a szűrő anyaghoz olyan közel kerül, hogy annak vonzó hatására megfogódik.

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

$$E_R = f(c, a/R) \quad (3.2)$$

$E_R$  értéke a/R növekvő értékével nő.

### 3.1.4. Diffúziós hatás

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

$$D = \frac{k * T * C}{6 * \eta * a} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (3.3)$$

ahol

k - a Boltzmann tényező [J/K]

T - az abszolút hőmérséklet [K]

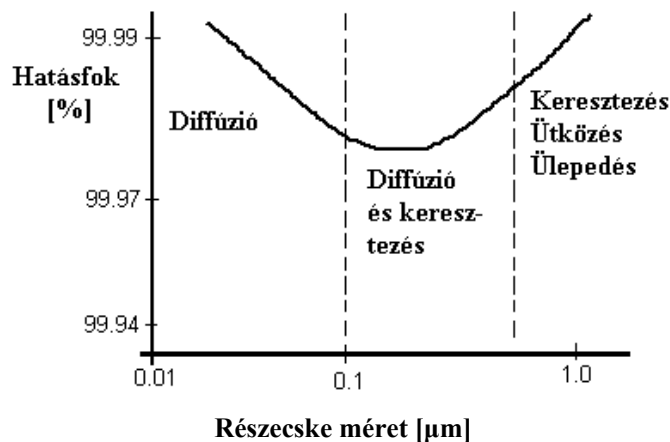
C - a Cunningham-Knudsen-Weber-Millikan dimenzió nélküli tapasztalati tényező

a - a részecskeméret [cm]

$\eta$  - a közeg viszkozitása [kg/cm s]

D értéke erőteljesen nő C/a növekedésével, vagyis a részecskeméret csökkenésével a diffúziós hatásra bekövetkező részecske-elválasztás hatékonysága növekszik.

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 szemlélteti a következő ábra:



3.2. ábra

A szűrési hatásfok függése a részecske mérettől

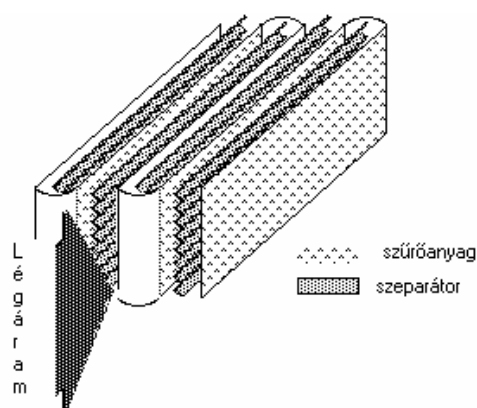
Kimutatható tehát, hogy 0,05-0,3 µm részecske méret intervallumban a szűrés hatásfokának minimuma van.

## 3.2. Aeroszol szűrő berendezések

### 3.2.1. A HEPA szűrő

Aeroszolkok szűrésére, szilárd anyagok gázokból, illetve levegőből való eltávolítására olyan szűrőket kell alkalmazni, amelyek a kisméretű aeroszol részecskéket is nagy hatékonysággal kötik meg nagy légforgalom és a lehető legalacsonyabb légellenállás mellett.

A kisméretű részecskék megkötéséhez a szűrőanyag szálai nagyon kis átmérővel ( $< 1 \mu\text{m}$ ) rendelkeznek. A nukleáris létesítményekben használatos szűrőrendszerek gyakran nagyon nagy légforgalommal működnek (akár  $100.000 \text{ m}^3/\text{h}$ ), így az aeroszol szűrőknek nagy felületre van szükségük. A nagy felület biztosítására tipikus megoldást szemléltet a 3.3. ábra, ahol a szűrőpapírt harmonikaszerűen hajtogatják össze, a megfelelő légeloszlás biztosítására pedig speciális rácsot (szepearátor) alkalmaznak, valamint szigeteléssel látják el [3-7].



3.3. ábra

HEPA szűrő tipikus felépítése. Négyzetes, ún. "mély" szűrőbetét

### 3.2.2. Szűrőanyagok

A szűrőanyagok egyik csoportját az úgynevezett szálal anyagok képezik. Ilyen a varrott nemez, a különböző textíliák. Ezeket a szűrőket természetes anyagokból (gyapjú, pamut), vagy szintetikus szálakból (üveg, poliészter, poliakrilnitril, aromás poliamid, polipropilén, poli-tetrafluor-etilén) állítják elő. A szűrés részben felületi, részben mélységi, azaz a levegőből leválasztott szilárd anyag szemcséi részben a felületen, részben a pórusokban maradnak vissza. A visszatartást esetenként kiegészítő műveletekkel javítják, így zsugorítással, lágyítással, hőkezeléssel, impregnálással, vagy rétegeléssel.

### 3.2.2.1. Üvegszál

Az üvegszálás technika fejlődésével ez a szűrőanyag típus nagyon elterjedtté vált. A szálak átlagos átmérője kisebb, mint 1 µm, és speciális gyártási technológiával a szűrési feltételeknek ideális szűrő készíthető, ugyanakkor a hajtogatást óvatosan kell végezni az esetleges törések elkerülése érdekében, amely gyakran a nem megfelelő szűrési hatékonyság legfőbb oka.

Az üvegszálás szűrőket jó hőtűrés jellemzi, így 350 °C-t is kibírnak, nem gyúlékonyak. Jó vízállóságuk miatt nagy páratartalom mellett is kielégítően működnek, jól ellenállnak a kémiai és korrozív hatásoknak is.

### 3.2.2.2. Polivinilklorid (PVC) és cellulóz-acetát

A szűrőanyagok egy másik csoportját megfelelő pórusszerkezettel rendelkező polimerek alkotják. Ezek közül az egyik legfontosabb a szuper finomságú polivinilklorid (PVC) polimer (fibrous polymeric perchlorvinyl = FPP) szálakból álló szűrőanyag, amelyben a szálak átlagos átmérője 1,5-2,5 µm tartományba esik. Ez egy hidrofób (víztaszító) anyag, olyan helyeken alkalmazható, ahol az átlagos hőmérséklet nem haladja meg a 60 °C-t.

Magasabb hőmérsékletű rendszerekben (150 °C-ig), cellulóz-acetát polimer alapú (fibrous polymeric acetate = FPA) szűrőanyag használatos, de az ilyen szűrők a cellulóz-acetát vízsedése miatt maximum 80 % relatív légnedvességtartalomig jók.

### 3.2.2.3. Hőre lágyuló műanyagok

Ezek a szűrőanyagok polietilén, nylon és polisztrén alapú műanyag szálakból készülnek. A szálak nagysága 0,5-1,5 µm tartományba esik. Előnyük, hogy a tartóvázat hasonló anyagból készítve tökéletesen hermetikus szűrő készíthető. Másrészt használat után az egész szűrőegység megfelelő oldószerben feloldható és bepárlással a hulladék térfogata minimálisra csökkenthető. További előnye, hogy jól ellenáll a kémiai és korróziós hatásoknak. Ugyanakkor gyúlékony és magasabb hőmérsékleten nem használható (max. 80-120 °C).

### 3.2.2.4. Kerámia

A magas hőmérsékletet (500 °C felett) hosszabb távon is kibíró szűrőanyagokkal szembeni igény vezetett a kerámia szűrők kifejlesztéséhez, amelyek leggyakrabban szinterezett alumínium-szilikátok. Vékony rétegben és szemcsésen is előállíthatók, de nagyon drágák. Jól ellenállnak a kémiai hatásoknak és akár 1.000 °C-ig is használhatók. Miután acélváz már nem használható ilyen magas hőmérsékleten, az egész szűrőegység kerámiából készül.



### 3.2.3. Szűrőegységek jellemzői

#### 3.2.3.1. Nyomásesés, szűrési ellenállás

A levegő áramlása az egyedi szűrő részecskék körül lamináris, a szálak egymásra gyakorolt hatását is figyelembe vevő, ún. cella modell alapján a következő összefüggés érvényes a nyomásesésre [3-10]:

$$\Delta P = \frac{4\alpha_F \mu V}{R_F^2} \frac{L}{H_S \varepsilon} \quad (3.4)$$

ahol

$\Delta P$	- nyomásesés [Pa]
$\alpha_F$	- szál térfogat tört
$\mu$	- viszkozitás [Pa/s]
$V$	- áramlási sebesség [cm/s]
$R_F$	- szálsugár [cm]
$L$	- szűrő vastagság [cm]
$\varepsilon$	- csúszási korrekciós tényező
$H_S$	- hidrodinamikai tényező csúszással

Az ún. csúszási tényező a szűrőszálak véletlenszerű elhelyezkedéséből adódó, nem azonos átlagos távolság hatását veszi figyelembe, az elméleti (3.4. egyenlet,  $\varepsilon=1$  esetén) és a mért nyomásesések hányadosa.

A hidrodinamikai tényező olyan nagyon finom szűrőbetétek esetén válik jelentőssé, amelyek esetében a szálak átmérője összemérhető a levegő részecskék átlagos szabad úthosszával. Ilyenkor a szűrő ellenállása lecsökken. A hidrodinamikai tényezőt a következő egyenlettel számíthatjuk:

$$H_S = H + 2 \frac{\lambda}{R_F} (H + 1/2) \quad (3.5)$$

ahol

$$H = -\frac{1}{2} \ln \alpha_F + \alpha_F - \frac{1}{4} \alpha_F^2 - \frac{3}{4}$$

$\lambda$  - átlagos szabad úthossz [cm]

### 3.2.3.2. Hatásfok, penetráció

A penetrációt (P) az alábbi módon definiáljuk:

$$P = \frac{C_{Ki}}{C_{Be}} \quad (3.6)$$

ahol

$C_{Be}$  - a szűrőegység előtti aeroszol koncentráció [ $1/m^3$ ]

$C_{Ki}$  - a szűrőegység utáni aeroszol koncentráció [ $1/m^3$ ]

A szűrőegység hatásfokát (Efficiency = E) az alábbi módon definiáljuk:

$$E = (1 - P) 100 \quad [\%] \quad (3.7)$$

A szabványos HEPA szűrők általában minimálisan 99,97 %-os hatásfokkal, illetve 0,0003 penetrációval rendelkeznek a 0,1-0,3  $\mu m$  átmérőjű aeroszol részecskékre vonatkozóan.

## 3.3. A paksi atomerőműben alkalmazott aeroszol szűrő típusok

### 3.3.1. C-500 aeroszol szűrő

A C-500 szűrők regenerálható aeroszol finomszűrők, melyek 1,5  $\mu m$  átmérőjű, ultrafinom üvegszálakból készült paplanokkal vannak bélelve. A szűrő hatásfoka a műszaki terv szerint 99,95 %. A C-500 szűrő részletes ismertetése a 2.1.1. pontban található.

### 3.3.2. ABSOLUTE 1DT típusú aeroszol szűrő és AIROPAC 90 típusú előszűrő

Az ABSOLUTE 1DT aeroszol szűrő és AIROPAC 90 előszűrő nem regenerálható, üvegszál anyagú szűrők. Az aeroszol szűrő hatásfoka 99,997 % 0,3  $\mu m$  ekvivalens részecskékre. A szűrők részletes ismertetése a 2.2.1. pontban található.

## 3.4. Vizsgálati módszerek

### 3.4.1. Aeroszokok mintavételezése

Az aeroszokok mintavételezésekor a legtöbb esetben az eredeti áramló fázis egy részét egy mintavevő rendszerbe vezetve analizáljuk. A mintavevő tervezésekor a következő szempontokat kell figyelembe vennünk, hogy a mintánk kellően reprezentatív legyen:

1. A mintavételezés izokinetikus legyen.
2. A mintavevő rendszerben a fajtázódás (méret szerinti szelektálódás) minimális legyen és a csővezetékek belső falain a kicsapódás, szorpció minimális legyen.

#### 3.4.1.1. Izokinetikus mintavételezés

Ha a mintavételezés során az analizálandó aeroszoláram sebessége ( $U_m$ ) és a mintavevőbe beáramló minta sebessége ( $U_s$ ) eltérő, akkor a mintavevő nyílásánál az aeroszol részecskék mérettől függő megoszlása játszódik le. Adott méretű részecskék mintabeli ( $n_s$ ) és főárambeli koncentrációjának ( $n_m$ ) az aránya az  $U_m/U_s$  aránytól és a részecske átmérőjétől függ [3-11]. Ha feltételezzük, hogy állandó a mintavételezés sebessége ( $U_s$ ), akkor kis főáramlási sebességek esetében a minta viszonylag reprezentatív ( $n_s=n_m$ ). Ekkor a részecskék tehetetlenségéből adódó hatások nem jelentkeznek. A főáramlás sebességét növelve azonban a nagyobb részecskék tehetetlenségüknél fogva kisebb hányadban kerülnek a mintavevőbe, ezért  $n_s/n_m$  csökken. Tovább növelve a sebességet azonban ez a hatás fordítottá válik,  $n_s/n_m$  ismét megközelíti az egységet  $U_m=U_s$  környékén, majd igen nagy  $U_m$  értékeknél a nagyobb részecskék dúsulnak fel a mintavevőbe áramló aeroszolban. Mivel e jelenség oka a részecskék tehetetlenségében van, a hatás növekszik a részecskék méretével. Azt az állapotot, amikor  $U_m=U_s$ , izokinetikus mintavételezésnek nevezzük. Ekkor  $n_s=n_m$ , ami a reprezentatív mintavételezés egyik alapvető feltétele. A mintavételezés során tehát úgy kell szabályoznunk az áramlási ill. mintavételezési sebességeket, hogy azok gyakorlatilag azonosak legyenek. Ez az áramlási sebességek pontos mérésével és szabályozásával megoldható.

#### 3.4.1.2. Fajtázódás és lerakódás

A részecskék mozgásának és transzportjának megértése áramló gáz esetében elengedhetetlen, ha a légáram mintavételezésére kell berendezést terveznünk. A részecskék mozgásának mechanizmusát elsősorban a méretük határozza meg. Ennek megfelelően kétféle jelenségről kell említést tennünk.

Konvektív diffúzióról beszélünk akkor, ha a részecskék átlagos átmérője kisebb, mint  $1\ \mu\text{m}$ . Ez a határ természetesen változhat a sebességek és a külső térerő hatására, de ezektől most eltekintünk. A konvektív diffúzió eredményeként kis részecskék kirakódhatnak a felületen, amely elsősorban gáztisztító berendezések működésében alapvető jelentőségű. Tipikus példa a fenti jelenségre az emberi tüdőben történő részecske lerakódás. Mivel a diffúziós állandó fordítottan arányos a mérettel, a részecskék Brown-mozgása a részecskeméret csökkenésével egyre intenzívebbé válik. Ennek eredményeként kis részecskék kirakódásának a mértéke ( $0,5\ \mu\text{m}$  részecske átmérő alatt) növekszik a méret csökkenésével. Ez az oka annak, hogy bizonyos gáztisztító berendezések hatásosabbak apróbb szennyezések eltávolítására, mint nagyobb részecskékre.

A legtöbb esetben a lerakódás sebessége levezethető adott geometriákra és áramlási képekre (rezsimekre). Ezen levezetések eredményeit a legtöbb esetben kísérletileg igazolták és

ezért alkalmasak lehetnek tervezési számítások elvégzésére. Ha nincs külső erőter, az általános egyenlet, amelyből az adott esetre a lerakódás sebessége levezethető:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D\nabla^2 n - \nabla n V \quad (3.8)$$

ahol

V - a gáz sebesség [cm/s]

n - a részecskék koncentráció [1/cm<sup>3</sup>]

t - az idő [s]

Gázáramlás esetében V-analitikusan nem számítható, hanem egyszerűen meg kell mérni. Általában feltételezik, hogy a sebesség eloszlás nem függ a részecskék koncentrációjától (n). Ez azonban csak kis aeroszol koncentrációkra igaz.

Az aeroszokok esetében előforduló szorpciós jelenségek egyik legjobb példája a falakon történő kirakódás, az ún. falhatás. Általánosan, ha két részecske a Van der Waals kölcsönhatások hatótávolságán belülre kerül, akkor összetapadnak. Ugyanez a jelenség felléphet a fal és egy részecske között is. A részecskék között ható erők és a szorpciót okozó erők természete azonban eltérő lehet. Ezeket a kölcsönhatásokat az aeroszol részecskék milyensége és a falak szerkezeti anyaga határozza meg.

Fontos még szem előtt tartanunk, hogy az áramlás következtében az aeroszol részecskék nem töltődnek-e fel, ill. eredetileg nem töltöttek-e már (pl. elektrolit ködök). A fellépő Coulomb erők ugyanis a fenti jelenségeket nagyban befolyásolják.

### **3.4.2. Aeroszokok detektálása**

#### **3.4.2.1. Fotométerek**

A fotométerekkel történő detektálás azt a jelenséget használja ki, hogy egy fókuszált fénynyaláb előtt elhaladó részecske felhőn a fény szóródik. A szórás mértéke a részecske felhő sűrűségétől, azaz az aeroszol koncentrációtól függ. Általában relatív mérésre alkalmas, ezért nincs szükség külön, a teszt-aeroszoknak megfelelő kalibrálásra. Előnyük, hogy olcsók és kicsi a szervíz igényük. Amennyiben az alkalmazott teszt-aeroszol monodiszperz, a bementi és kimeneti koncentrációk aránya nagy pontossággal mérhető, így a teszt-aeroszol jellemző méretéhez tartozó hatásfok mérésére kiválóan alkalmas.

### 3.4.2.2. Optikai részecskeszámlálók

Az optikai részecskeszámlálók képesek egy megfelelő fényel megvilágított keskeny nyíláson áthaladó részecske detektálására, hiszen a részecskén a megvilágító fénysugár szóródni fog. Ez a szórt fénysugarat érzékelő detektorban feszültségjelet indukál, amelynek intenzitása arányos a részecske méretével.

A megvilágító forrás lehet fehérfény vagy lézer. A lézeres részecskeszámlálók már képesek 0,12  $\mu\text{m}$ -es részecskék detektálására is. Amennyiben egyszerre több részecske halad át a keskeny résen, akkor a detektor azokat egyetlen nagyobb részecskéként érzékeli, ez a koincidenca hibát okoz, amely akkor nagyon valószínű, ha az aeroszol koncentráció viszonylag magas. Ezért az optikai részecskeszámlálók elsősorban kis aeroszol koncentrációk esetében (tisztaterek minősítése) az aeroszol koncentráció méret szerinti eloszlásának kimérésére alkalmasak. Szűrőrendszerek tesztelésénél, ahol a bementi aeroszol koncentráció tartománya nagyságrendekkel meghaladja a kimeneti aeroszol koncentrációt, a mintavételezést követően még további hígításra van szükség a detektáláshoz, ami további hibalehetőséget jelent a mérés szempontjából. További hátrány, hogy - nagy érzékenységük folytán - általában kicsi a jel/zaj viszony, ami a mérési bizonytalanságot tovább növeli.

Előnyként jelentkezik azonban, hogy miután ezek a berendezések méret szerinti eloszlás mérését teszik lehetővé, nincs szükség monodiszperz aeroszol alkalmazására, sőt, előnyös a polidiszperz teszt-aeroszol használata, hogy a teljes határfok görbét kimérhessük.

### 3.4.2.3. Kondenzációs részecskeszámlálók

A kondenzációs elven működő részecskeszámlálókban az aeroszol részecske detektálását azt teszi lehetővé, hogy az egy túltelített folyadék (általában butilalkohol) gőzét tartalmazó kamrán halad keresztül, ahol az alkohol részecskék kondenzálódnak az aeroszol részecskén, mint gócponton. A keletkezett nagyméretű csepp optikai részecskeszámlálóval könnyen detektálható. A csepp mérete azonban független a részecske eredeti méretétől, ezért ezek a számlálók csak összes részecskeszám detektálásra alkalmazhatók. A fotométeres elven működő detektorokhoz hasonlóan csak monodiszperz teszt-aeroszol alkalmazásával használhatók szűrők tesztelésére.

Meg kell jegyezni azonban, hogy léteznek olyan kondenzációs elven működő detektorok is, amelyek differenciális mozgékonyág analizátorral (DMA) összeszerelve alkalmasak pásztázó üzemmódban méret szerinti számlálásra. Ezek a berendezések, miután a DMA, mint szűrő funkcionál, alkalmasak nagyon nagy aeroszol koncentráció mérésére is. Ez az egyetlen típus, amely 0,1  $\mu\text{m}$  alatti mérettartományban is pontos mérést tesz lehetővé, ezért teljes határfokgörbe kimérésénél javasolt detektor típusnak tekinthetjük.

### **3.4.3. Aeroszol szűrők minősítése**

#### **3.4.3.1. Tesztmérések célja**

A tesztmérések célja attól függ, hogy a teszt a szűrőrendszer mely elemére terjed ki:

- szűrőanyag,
- szűrőegység vagy
- a teljes szűrőrendszer, illetve több szűrőegység együtt.

#### **3.4.3.2. Szűrőanyag tesztje**

A szűrőanyagok tesztje elsősorban a gyártás minőségbiztosítása, illetve a fejlesztés érdekében szükséges. Ez alapvetően a gyártó hatáskörébe tartozik.

#### **3.4.3.3. Szűrőegység tesztje**

A szűrőegység tesztje a felhasználó számára a működési paraméterek ellenőrzése és ismerete szempontjából alapvető. Az eredménye nem csak a szűrőanyag, hanem az összeszerelés, szigetelés jóságát is jellemzi. Az új szűrők esetében a gyártó végzi az ellenőrzést a minőségbiztosítás részeként. A felhasználás során felmerülő szűrőbetét cserét követően pedig ajánlatos a szűrőegység ellenőrzése megfelelően kialakított minősítő laboratóriumban.

#### **3.4.3.4. Teljes szűrőrendszer tesztje**

Ez a teljes szűrőrendszer helyszíni minősítését foglalja magában. Ezen vizsgálatok fő célja a szűrőrendszer integritásának és szűrési hatásfokának vizsgálata. Utóbbit a kiépítéstől függően lehet kisebb szűrőcsoportokra is kiterjeszteni az esetleges felmerülő hiba szűkítése érdekében. A nukleáris erőművekben üzemelő aeroszol szűrő rendszerek minősítésén a teljes rendszer ilyen típusú vizsgálatát értjük [\[3-12\]](#).

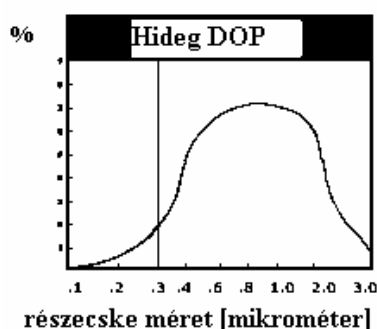
### **3.4.4. Tesztelési módszerek áttekintése**

A nukleáris iparban alkalmazott helyszíni (in-situ) tesztelési eljárások során a teljes szűrőrendszerre jellemző hatásfok értéket határozzák meg teszt-aeroszol felhasználásával. Többféle minősítő eljárás ismert, ami a szűrők hatásfokának meghatározására szolgál. Ezek közül bemutatom az egyes országokban használatos elterjedtebb módszereket a megfelelő mérésügyi szabványokra történő hivatkozásokkal együtt.

Meg kell jegyezni, hogy bár az egész világra kiterjedő egységes szabvány nem áll rendelkezésre a nagy tisztaságú szűrők (HEPA, ULPA) tesztelésére, Európában a CEN (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION) keretén belül kidolgoztak egy egységes szabványt, amely 2000-ben került befejezésre. Ezt a szabványt hazánkban jegyzékes jóváhagyó közleménnyel magyar nemzeti szabványként elfogadták 2000-ben [3-12]. Az általam a következő fejezetben ismertetett konkrét minősítő eljárás kidolgozásánál már ezt a szabványt is figyelembe vettem.

#### 3.4.4.1. Hideg DOP aeroszolos módszer

A módszert az Egyesült Államokban fejlesztették ki a második világháború során. A hideg DOP-eljárás nevét arról kapta, hogy a folyadék aeroszol részecskéket di-2-etil-hexil-ftalát olajból (DOP) az aeroszol generátor nagy nyomású levegő segítségével állítja elő, amelyek eloszlása ún. „kvázi monodiszperz”, ahogy az a 3.4. ábrán látható.



3.4. ábra

#### Hideg DOP aeroszol méret szerinti eloszlása.

A részecskék átlagos mérete 0,8  $\mu\text{m}$ , eléggé széles eloszlással. Az így előállított teszt-aeroszol felhasználható szűrőrendszerek helyszíni penetrációs vizsgálatára, és megfelelő detektálási módszer alkalmazása esetén a szűrés hatásfoknak az aeroszol részecskemérettől függő meghatározására.

A detektálás módja lehet:

- Teljes penetráció (áteresztés) meghatározás esetében az analizátor a teljes fényszórás mérése elvén működik, így részecske méret szerinti áttörés vizsgálatra nincs lehetőség.
- Lézeres részecskeszámláló berendezést alkalmazva a  $P=f(d)$  függvény kimérésére, azaz a penetráció mérettől függő meghatározása is van lehetőség.

A módszer fenti két célra történő felhasználását mind az amerikai [3-13], mind az új európai szabvány [3-12] lehetőségként megemlíti.

### *Előnyök*

A módszer előnye, hogy a szükséges eszközök (aeroszol generátor, analizátor) a kereskedelemben könnyen beszerezhetők, könnyen kezelhetőek és teljes penetrációs vizsgálat esetén a mérés egyszerűen kivitelezhető.

### *Hátrányok*

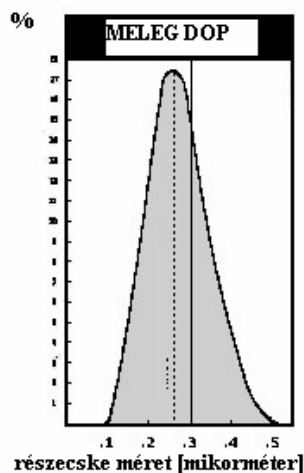
Hátrány, hogy a DOP aeroszol a szűrőben esetlegesen lévő műanyag részeket károsíthatja. Másik negatívum, hogy a teszt olajat karcinogén hatásúnak minősítették. Ez a probléma megoldható poli-alfa-olefin (PAO) felhasználásával. Ilyen PAO például a Henkel által gyártott, EMERY 3004 fantázianevű termék, amely minden előírt tulajdonság szempontjából tökéletesen helyettesíti a DOP-t, de nem karcinogén.

### *Korlátok*

A módszer nem használható nagy páratartalom (> 80%), magas hőmérséklet és savas gőzök jelenlétében.

#### **3.4.4.2. Meleg DOP aeroszolos módszer**

A módszer a hideg DOP aeroszolos módszertől az aeroszol generálás módjában különbözik, amely az előző, csak pneumatikus technikával szemben termikus-pneumatikus elven működik. Ennek köszönhetően a generált aeroszol méreteloszlása monodiszperz, ami megfelel az MSZ EN 1822 szabványban [3-12] az egyedi szűrők szűrési hatásfok mérésére előírt teszt-aeroszolnak. A meleg DOP aeroszol tipikus méret szerinti eloszlását a 3.5. ábra szemlélteti.



**3.5. ábra**  
**Meleg DOP aeroszol méret szerinti eloszlása.**

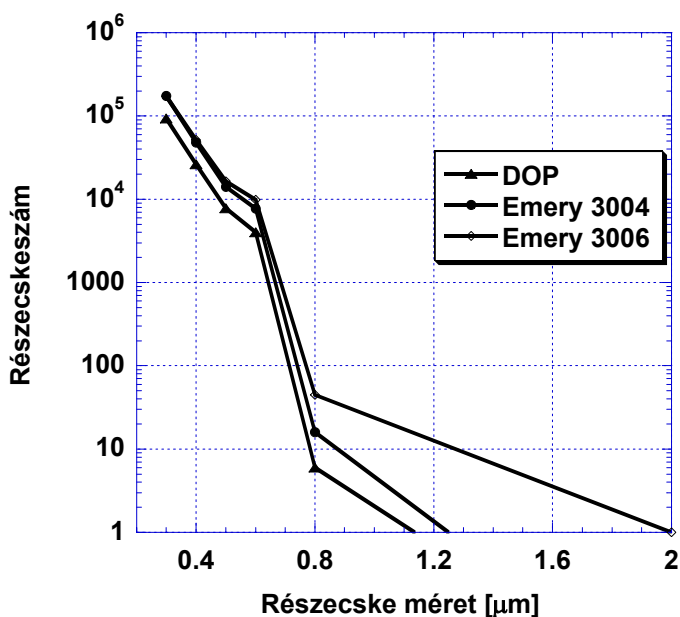


A 0,3  $\mu\text{m}$  közeli, monodiszperz meleg DOP aeroszol részecskékkel végzett helyszíni szűrési határfok meghatározás a legjobban ismert és uralkodó vizsgálati módszer a világon, ezzel is magyarázható, hogy az EN 1822-es európai szabvány is ezt vette át. Egyéb specifikációk azonosak a hideg DOP aeroszol módszernél leírtakkal.

A DOP vizsgálatokhoz szükséges berendezések a kereskedelemben könnyen beszerezhetőek. Példaképpen említhető a NUCON<sup>®</sup> International, Inc. (Columbus, USA.) által gyártott, a nukleáris és a gyógyszer iparban széles körben elterjedt F-1000 sorozatú teszt berendezés. Ezeket az eszközöket nemcsak az USA-ban, hanem több európai atomerőműben is használják aeroszol szűrő berendezések szűrési határfokának helyszíni ellenőrzésére.

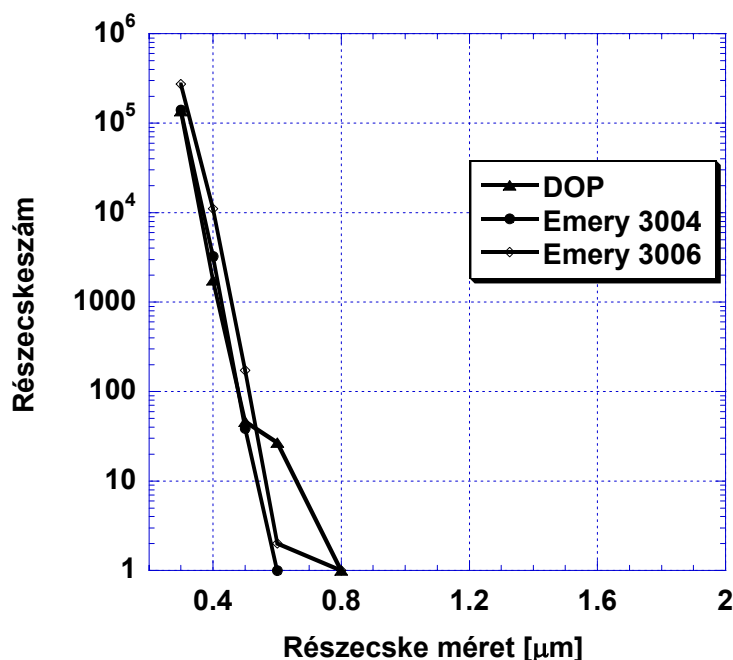
Kérdésként merülhet fel, hogy a DOP aeroszol generátorokkal előállítható PAO aeroszolok méreteloszlás szempontjából mennyire hasonlítanak a szabványok által is javasolt DOP teszt-aeroszol tulajdonságaihoz. Ezzel kapcsolatban már találkozhatunk vizsgálati eredményekkel. A Nuclear Consulting Services Inc. szakemberei vizsgálták a kereskedelemben is kapható, a DOP helyettesítésére alkalmas Emery 3004 és Emery 3006 PAO aeroszolokat [3-14]. Vizsgálták a hideg aeroszolt előállító SN-10 és a meleg aeroszol generálására alkalmas DG-F típusú generátorokkal előállított DOP, Emery-3004 és Emery-3006 teszt-aeroszolok szemcseméret eloszlását CLIMET részecskeszámláló alkalmazásával.

A vizsgálat eredményét a 3.6. és 3.7. ábrákon mutatom be.



3.6. ábra

NUCON SN10 generátorral előállított különböző hideg teszt-aeroszolok részecske-eloszlása [3-14] alapján



3.7. ábra

**NUCON DG-F termikus generátorral előállított különböző meleg teszt-aeroszolok részecske-eloszlása [3-14] alapján**

A mérések alapján látható, hogy szignifikáns különbség az egyes teszt-aeroszolok eloszlásában nem tapasztalható, sőt a meleg teszt-aeroszolok esetében a DOP eloszlása még egy kissé jobban kiszélesedik, mint az Emery típusú aeroszoloké.

A fentiek alapján látható, hogy a fentebb említett berendezések használatával a DOP helyettesítése a nem karcinogén PAO teszt-aeroszolokkal megoldható.

**3.4.4.3. Uranin aeroszolos módszer**

A módszert korábban a franciaországi AFNOR szabvány (NFX 44 011) írta elő, amit azonban már felváltott a fentebb említett EN 1822-es szabvány, tekintettel arra, hogy Franciaország is tagja a CEN-nek.

A módszer által használt teszt-aeroszol nátrium-fluoreszcínát (uranin) - majdnem tökéletesen gömb alakú szilárd részecskék -, amelyet pneumatikus technikával állítanak elő 0,2 µm átlagos szemcseméretben.

A detektálás módja lehet:

- Fluorimetria. Ebben az esetben a teljes penetráció (áteresztés) határozható meg.

- Szcintillációs részecske spektrométer, vagy differenciális mozgékonyág analizátor (DMA) alkalmazása esetén lehetőség van a  $P=f(d)$  meghatározására is.

#### *Előnyök*

Nem érzékeny a savas gőzök jelenlétére és az uranin nem toxikus.

#### *Hátrányok*

Általában az ismert generátorok kimeneti kapacitása kicsi (~30 mg/h), ezért nagyobb légforgalmú rendszerek minősítését nem teszi lehetővé annak ellenére sem, hogy az uranin kimutatási határa nagyon alacsony ( $10^{-11}$  g).

Nem teszi lehetővé az azonnali minősítést, tekintettel arra, hogy a kiértékelés a szűrőbetétekre mintavételezett uranin laboratóriumi vizsgálata alapján történik. Nagy a veszélye az uranin kontaminációnak is.

#### *Korlátok*

120 °C és 80 % relatív páratartalom felett nem használható.

### **3.4.4.4. Nátrium-klorid aeroszolos módszer**

A teszt-aeroszol NaCl köbös kristályú szilárd részecskékből áll, amelyek pneumatikus technikával állíthatók elő 0,65 µm-es közepes átmérővel. Az aeroszol részecskék detektálása Nagy-Britanniában a BS 3928 szabvány alapján, a Nátrium lángfotometriás mérése alapján történt a szűrők teljes penetrációjának vizsgálatára.

#### *Előnyök*

Kereskedelemben beszerezhetőek a vizsgálatához szükséges berendezések.

#### *Hátrányok*

Biztonságtechnikai okokból külön figyelmet követel a lángfotometriás detektáláshoz szükséges hidrogén gáz használata.

A nátrium-klorid szilárd aeroszol részecskék korrozív hatást fejthetnek ki a szűrőrendszer szerkezeti anyagára.

#### *Korlátok*

400 °C és 60 % relatív páratartalom felett a módszer nem használható.

## **3.5. Mérési módszer kidolgozása a C-500 típusú aeroszol szűrők hatásfokának helyszíni ellenőrzésére**

### **3.5.1. A módszer rövid ismertetése**

A vizsgálni kívánt rendszerbe - a műszaki tervben megadott terhelési értéknek megfelelő áramlási sebesség  $\pm 10\%$  esetén – teszt-aeroszolt adagolunk a következő pontban leírtaknak megfelelően kialakított injektálási csompon keresztül. A hatásfok ellenőrzést a szűrőcsoportok előtti és utáni, stacionárius állapotban mért teszt-aeroszol koncentrációk értékelésével állapítjuk meg a 3.5.5. pontban leírtak szerint.

### **3.5.2. Injektálási pontok kiválasztása**

A teszt-aeroszol bejuttatását lehetővé tevő injektálási pontok helyének kijelölése a tesztelni kívánt szűrő vagy szűrőcsoport előtt úgy történt, hogy a maximális keveredés biztosítva legyen. A szűrő bemenete és a befecskendezési pont közötti távolságnak legalább a levegőt szállító vezeték átmérője 5-15 szeresének kell lennie [3-15]. Az injektálási pont helyes megválasztását a 3.5.4. pontban ismertetett átlag koncentráció érték szórásával ellenőrizük. A TL02 rendszer esetében valamennyi minősítendő szűrőcsoporthoz külön injektálási pont került kialakításra a tesztek okozta szűrőterhelés csökkentése érdekében.

A fentiek figyelembe vételével tervezett injektálási pontok helye a TN02-es és TL02-es rendszerekben az alábbi:

#### **3.5.2.1. TN02 rendszer:**

Az aeroszol szűrők felállítási helyén, az aeroszol szűrők előtti kollektoron áganként C3/4” menetes csomok vannak elhelyezve, amelyeken keresztül áganként lehet beadni az aeroszol szűrők vizsgálatához szükséges teszt-aeroszolt.

Az aeroszol szűrők előtti kollektoron áganként C1/2” menetes csomok van elhelyezve, melyen keresztül a szűrők előtti koncentráció méréséhez mintát lehet venni.

Az aeroszol szűrők utáni kollektoron áganként C1/2” menetes csomok van elhelyezve, melyen keresztül a szűrők utáni koncentráció méréséhez mintát lehet venni.

Előbbiek szerint tehát az ágankénti 3 db aeroszol szűrő együttes hatásfokának ellenőrzése végezhető el, amely így rendszerenként (3 ág) 3 db mérés elvégzését jelenti a szűrők ellenőrzésekor.

### **3.5.2.2. TL02 rendszer:**

A10-es szűrőcsoportok előtti kollektorok elején C1” menetes csonkok vannak elhelyezve, amelyeken keresztül áganként lehet beadni a teszt-aeroszolt.

A 10-es szűrőcsoportok előtti kollektoron C1/2” menetes csonk van elhelyezve, melyen keresztül a szűrők előtti koncentráció méréséhez mintát lehet venni.

Az 5 db, elmenő oldalon összefogott szűrőcsoportok után C1/2” menetes csonk van elhelyezve, melyen keresztül a szűrők utáni koncentráció méréséhez mintát lehet venni.

Előbbiek szerint tehát az 5 db aeroszol szűrőből álló csoportok együttes hatásfokának ellenőrzése végezhető el, amely így rendszerenként (8 db szűrőcsoport) 8 db mérés elvégzését jelenti a szűrők ellenőrzésekor.

### **3.5.3. A vizsgálatához alkalmazott eszközök és anyagok**

#### **3.5.3.1. Teszt-aeroszol**

Az atomerőművi gyakorlatban az aeroszol szűrőket általában folyadék aeroszol felhasználásával tesztelik, mert üzemzavari helyzetben jellemzően ilyen terhelést kapnak a szűrők. Teszt-aeroszolként a dietil-hexil-szebakát (DEHS) került kiválasztásra, melynek használatát az MSZ EN 1822-2 szabvány megengedi, és könnyen hozzáférhető.

#### **3.5.3.2. Teszt-aeroszol generátor**

A teszt-aeroszolt olyan kimeneti teljesítménnyel rendelkező generátorral kell előállítani, amely lehetővé teszi a TL02 rendszer esetében az injektálási pont kialakítása miatti nagyfokú hígítás ( $5.000 \text{ m}^3/\text{h}$ ) ellenére akkora bementi aeroszol koncentráció létrehozását, hogy annál hat nagyságrenddel kisebb koncentráció érték még az alkalmazott mérőberendezés kimutatási határa felett szignifikánsan mérhető legyen.

A másik követelmény az volt, hogy a generált aeroszol méret szerinti eloszlása "kvázi monodiszperz", vagy monodiszperz legyen.

A kiválasztott eszköz a NUCON International Inc. SN-10 típusú aeroszol generátora lett, amelynek fotója a 3.8. ábrán látható.

Az SN-10 aeroszol generátor maximális kimeneti teljesítménye 3 g aeroszol/perc, amely elegendő a TL02-es rendszerben történő vizsgálatokhoz is. A generátor működtetése az üzemi 6 bar-os levegő rendszerről tömlővel biztosított.



**3.8. ábra**  
**NUCON SN-10 típusú aeroszol generátor**

### **3.5.3.3. Teszt-aeroszol mérő berendezés.**

Az alkalmazott műszer olyan lézeres részecske számlálást megvalósító eszköz, amely mérési tartománya hét nagyságrendet átfogva lineáris válaszjelet ad. Előnyös, hogy a bemeneti és kimeneti mintavételezés párhuzamosan végezhető és mérhető.

A kiválasztott eszköz a Royco Model 3313 típusú lézeres részecskeszámláló, amelynek fotója a 3.9. ábrán látható.



**3.9. ábra**  
**Royco Model 3313 típusú lézeres részecskeszámláló**

#### 3.5.3.4. Egyéb mérőeszközök.

- Nyomásmérés mérő műszer. TESTO 452 kombinált mérőműszer.
- Hőmérséklet mérő műszer. TESTO 452
- Relatív nedvességtartalom mérő műszer. TESTO 452
- Áramlási sebesség mérő műszer. TESTO 452

#### 3.5.4. Az ellenőrzés kivitelezése

- A minősíteni kívánt szűrő, vagy szűrőcsoport előtt megmérjük a levegő áramlási sebességét, hőmérsékletét és relatív páratartalmát. Szintén megmérjük a minősíteni kívánt szűrőn, vagy szűrőcsoporton a nyomásmérést. A mérési eredményeket három egymást követő olyan mérés átlagából számítjuk, amelyek szórása a használt mérőrendszer megengedett szórásán belül van, azaz a rendszer stacionárius. Az eredményeket jegyzőkönyvben rögzítjük.
- A teszt-aeroszol generátort csatlakoztatjuk az injektálási pontra, ügyelve a pontos, hermetikus illesztésre.
- Csatlakoztatjuk a teszt-aeroszol detektáló berendezés bemeneti és kimeneti mintavételi csöveit a szűrő, vagy szűrőegységek előtti, illetve utáni mintavevő csonkokra. A mintavételi csöveket úgy kell kialakítani, hogy a mintavételi csonkban mozgathatóak lehessenek a mintavételi keresztmetszet teljes átmérője mentén. További követelmény, hogy a mintavételi sebesség megfelelő szűkítők használatával állítható legyen. A mért levegő áramlási sebességnek megfelelő szűkítőt használva biztosítjuk, hogy a mintavételezés izokinetikus legyen. Az alkalmazott teszt-aeroszol detektor előnye, hogy a bementi és a kimeneti mintavételezés és mérés szimultán hajtható végre, így a mérés ideje rövidül.
- Elkezdjük a teszt-aeroszol generálását és beadagolását. Stacionárius állapotot alakítunk ki állandó sebességű generálás beállításával.
- A stacionárius állapotban lévő rendszer esetében mérjük a bementi és a kimeneti aeroszol koncentrációkat legalább 9 különböző mintavételi pozícióban a mintavételi keresztmetszet átmérője mentén. Az átlagos koncentráció értékeket az alábbi összefüggés segítségével számítjuk:

$$C_{\text{atl}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (3.9)$$

ahol

$C_{\text{atl}}$  - átlagos koncentráció érték [ $1/\text{m}^3$ ]

$C_i$ , - az  $i$ . pontban mért érték [ $1/\text{m}^3$ ]

$n$  - a mérési pontok száma, minimum 9

- Leállítjuk a generálást.
- Lecsatlakoztatjuk a rendszerről az aeroszol generátort és a bemeneti és kimeneti mintavételi csöveket.
- Ismét megmérjük a szűrőn, illetve szűrőrendszereken a nyomásesést. A nyomásesésnek a teszt-aeroszollal történt mérés során nem szabad szignifikánsan változni.
- A bementi átlagos koncentráció érték szórásának kiszámításával ellenőrizzük, hogy a beadagolási ponttól a bementi mintavételezési pontig az aeroszol keveredése megfelelő volt.

### 3.5.5. A mérési eredmények értékelése

A bementi és kimeneti átlagos aeroszol koncentráció értékekből az alábbiak alapján számítjuk a minősített szűrő, vagy szűrőegység hatásfokát a teszt-aeroszollal megfelelő részecske méretre vonatkozóan.

A penetrációt (P) és a szűrőegység hatásfokát (E) a 3.2.3.2. pontban foglaltaknak megfelelően, a (3.6) és (3.7) egyenletekkel számíthatjuk.

A C-500 szűrők előírt minimális hatásfoka 99,97 % a 0,3 µm ekvivalens átmérőjű aeroszol részecskékre vonatkozóan.

Hibaterjedés alapján a penetráció meghatározásának bizonytalansága (dP) az alábbiak szerint becsülhető:

$$dP = \left[ \frac{\left( \frac{1}{X_U} - 1 \right) * \left( \frac{1}{d_D^2} + 1 \right) + \left( \frac{1}{P} - 1 \right) + \frac{dQ^2}{d_D^2}}{d_U^2} \right]^{1/2} \quad (3.10)$$

ahol:

$X_U$  -  $Q_{inj}/Q$  - a teszt-aeroszol beadagolás térfogatárama ( $Q_{inj}$ ) és a főágban lévő térfogatáram (Q) hányadosa [-]

$dQ$  - a főágban lévő térfogatáram (Q) bizonytalansága [ $m^3/s$ ]

$d_U$  - a teszt-aeroszol injektálási pontnak a teszt-aeroszol bementi mintavételezési ponttól való távolsága a szűrő előtt [m]

$d_D$  - a teszt-aeroszol kimeneti mintavételezési pontnak a szűrőtől való távolsága a szűrő után [m]



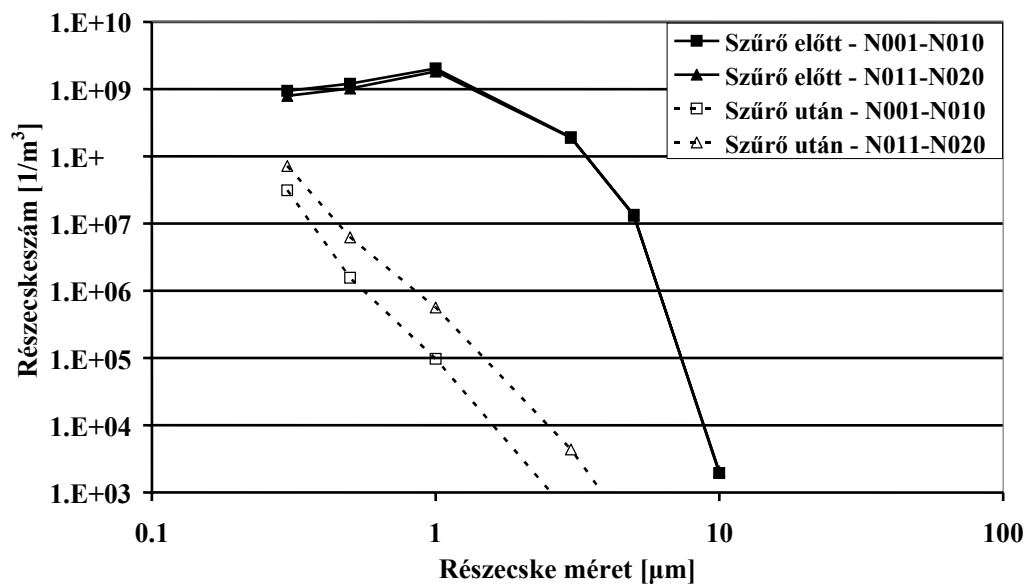
### 3.6. Összefoglalás, eredmények

A kiválasztott módszerrel történik a paksi atomerőmű TL02 és TN02 szellőző rendszereibe beépített 196 db C-500 típusú aeroszol szűrő évente elvégzett hatásfok ellenőrzése.

A végrehajtott mérések értékelését a 10TL02 rendszeren (az 1. blokki hermetikus tér recirkulációs légtisztító rendszere) elvégzett mérés bemutatásával illusztrálom.

A rendszerbe a 2.3. pontban leírtak szerint 40 db C-500 típusú aeroszol szűrő van beépítve, amelyeket 5-ös csoportokban vizsgáltam. A vizsgálat körülményei az ellenőrzésről készült Vizsgálati Jegyzőkönyvben kerülnek feltüntetésre a 3.12. ábrának megfelelően.

A szűrők előtti és utáni kollektorokban mért teszt aeroszol részecske méret eloszlást a 3.10. ábra szemlélteti. Az ábrán jól látszik, hogy a DEHS olajból generált teszt aeroszol részecske eloszlása a két független kollektorban szinte teljesen egyforma, ami kedvező a reprodukálhatóság szempontjából. Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy a hideg DEHS aeroszol szélesebb eloszlást mutat, mint a korábban már bemutatott DOP és EMERY olajok.



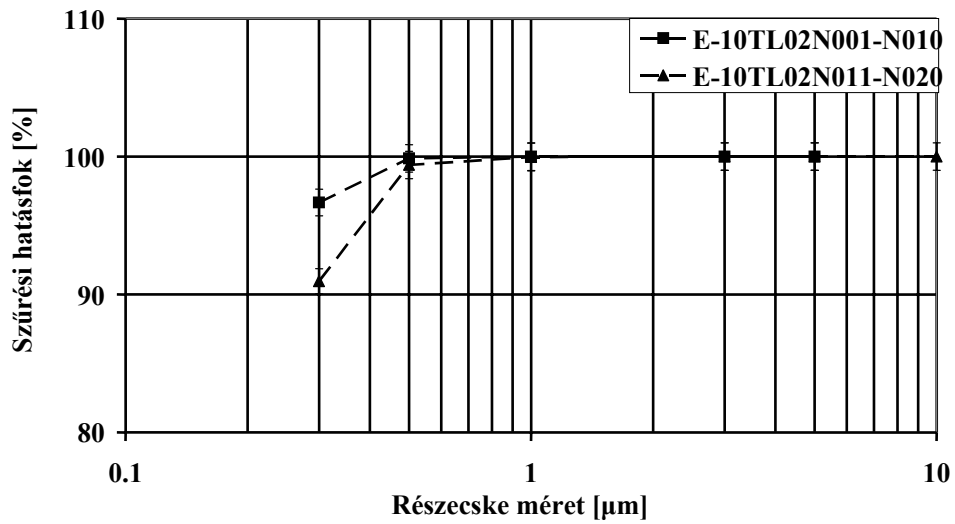
3.10. ábra

A 10TL02 rendszer aeroszol szűrőin 2006. évben elvégzett DEHS vizsgálat eredménye

A mért szűrő hatásfokokat a részecske méret függvényében a 3.11. ábra mutatja be. Az eredményekből látszik, hogy a C-500 aeroszol szűrők hatásfoka  $0,3 \mu\text{m}$  átmérőjű részecskékre szignifikánsan alacsonyabb (91-96 %) a 2.5.2. pontban bemutatott, hatásfok által elő-

írt kritériumnál (99,97 %), amely előírás megfelel a HEPA szűrőktől elvárt szokásos teljesítménynek.

A 0,5  $\mu\text{m}$  átmérőjű részecskékre vonatkozó hatásfok (99,5-99,9 %) már megközelíti az új C-500 szűrőkre megadott 99,95 %-os hatásfokot. A csökkent teljesítményt valószínűleg a szűrő anyagának öregedése okozza, ezért a következő időszakban a szűrők felújítása szükséges.



3.11. ábra

A 10TL02 rendszer aeroszol szűrőin 2006. évben mért hatásfok a részecske méret függvényében

## Vizsgálati Jegyzőkönyv

A C-500 típusú aeroszol szűrők szűrési hatásfokának megállapításáról.

**Mérés ideje:** 2006.03.10.  
**Mérés helyszíne:** 10TL02  
**Mérőrendszer:** SN10 Aeroszol generátor - NUCON®  
 Model 3313 lézeres részecskeszámláló – Royco

### Szűrőcsoport azonosítója: N001 – N005

Szűrőágon áthaladó gáz jellemzői:	A vizsgálathoz felhasznált teszt-aeroszol
<b>Fajtája:</b> Levegő	Kémiai forma: DEHS
<b>Hőmérséklet:</b>	Adagolt kémiai mennyiség: 2000 [mg/perc]
Belépő oldalon: 26.5 °C	A teszt-aeroszol beadagolás
Kilépő oldalon: 26.0 °C	térfogatárama (Q <sub>inj</sub> ): 500 [liter/perc]
<b>Relatív nedvességtartalom:</b>	Térfogatáram a főágban (Q): 1.6658*10 <sup>5</sup> [liter/perc]
Belépő oldalon: 27 %	Generálás időtartama: 10 [perc]
Kilépő oldalon: 27 %	A teszt-aeroszol injektálási pontnak a teszt-aeroszol bemeneti mintavételezési ponttól való távolsága a szűrő előtt:
<b>Áramlási sebesség:</b>	12 [m]
Belépő oldalon: 9,5 m/s	A teszt-aeroszol kimeneti mintavételezési pontnak a szűrőtől való távolsága a szűrő után:
Kilépő oldalon: 9,5 m/s	3 [m]
<b>Nyomásmérés:</b>	
vizsgálat előtt: 420 Pa	
vizsgálat után: 420 Pa	

### Mérési eredmények:

Részecske méret [µm]	Aeroszol részecskeszám [db/m <sup>3</sup> ]		Penetráció [%]	Hatásfok [%]
	Be	Ki		
0,3	9,38E+08	3,12E+07	3,328	96,672
0,5	1,20E+09	1,56E+06	0,129	99,871
1,0	2,03E+09	9,70E+04	0,005	99,995
3,0	1,92E+08	4,55E+02	0,000	100,000
5,0	1,35E+07	8,03E+01	0,000	100,000

A szűrő hatásfoka 0,3 µm átlagos átmérőjű részecskékre: **96.67 %**

A szűrő hatásfoka 0,3 µm és annál nagyobb átmérőjű részecskékre: **99.25 %**

### 3.12. ábra

#### Aeroszol szűrő ellenőrzés vizsgálati jegyzőkönyve

## 4. Gáztisztítók

A BME által 1994-ben, egy aktív szén adszorberen elvégzett retenció vizsgálat azt mutatta, hogy az adszorber állapota nem megfelelő. Az adszorberekre vonatkozó hatósági követelmények az alábbiak voltak:

Izotóp	Retenció (késleltetési) idő* [h]
Kryptonok (Kr-85m, Kr-87, Kr-88)	72
Xenonok (Xe-133, Xe-135, Xe-135m)	1.130

\* 10 Nm<sup>3</sup>/h gázterhelés és 20 °C hőmérséklet esetén.

A feladat az volt, hogy az adszorbereken évente végre kell hajtani a retenció tényezők aktuális értékét meghatározó ellenőrző mérést, illetve a mérési eredmények alapján meg kell határozni az előírt retenció kritériumok teljesíthetőségéhez szükséges beavatkozásokat.

A BME által kifejlesztett mérési módszerrel az adszorberek korlátozott üzemideje miatt - az adszorberre áramló gáz szárítását végző zeolit szűrők telítődése folytán egy szűrőág üzemideje maximum 3 hét – a xenon izotópokra vonatkozó retenció tényező nem volt meghatározható.

Előbbiek miatt szükséges volt a mérési módszer továbbfejlesztése, amely lehetővé tette a retenció tényezők teljes körű ellenőrzését.

A továbbfejlesztett módszerrel valamennyi aktív szén adszorberen elvégzett mérések eredményei alapján az adszorberek retenció teljesítménye nem érte el az előírtakat. Az adszorberekből vett aktív szén minták elemzése megmutatta, hogy az alacsony teljesítőképesség nem az aktív szén fizikai-kémiai tulajdonságainak romlása, hanem magas nedveségtartalma okozza.

Ezután került sor az adszorberek szárítási módszerének kidolgozására, a szárítás elvégzésére, illetve a retenció kritérium rendszer felülvizsgálatára.

Ebben a fejezetben áttekintést adok a nemesgázok adszorpciója, illetve a retenció befolyásoló tényezők elméleti háttéréről. Ismertetem a retenció tényezők mérési módszerét, illetve annak továbbfejlesztését. Bemutatom az adszorberek retenció tulajdonságainak vizsgálatára épített modell berendezést, a rajta elvégzett vizsgálatokat. Beszámolok a modell berendezés átépítésével elvégzett szárítási kísérletekről, a kísérletek segítségével kifejlesztett szárítási módszerről, az adszorberek szárításának eredményéről.

A fejezet végén ismertetem a retenció kritériumrendszer felülvizsgálatát, amely eredményeként az ezzel kapcsolatos hatósági követelményrendszer módosításra került.

## 4.1. Nemesgázok adszorpciója aktív szénen

A nemesgázok adszorpciójának elméletét a [4-1] irodalom alapján foglalom össze.

A nemesgázok elválasztás-technikái közül az adszorpción alapuló eljárások egyértelműen meghatározóak. Számos adszorbens közül a legalkalmasabb az aktív szén, ami nagy fajlagos felületének és a nemesgázok különböző mértékű adszorpciójának köszönhető [4-2].

A gázok adszorpció izotermáinak leírására számos egyenlet ismeretes, amelyek közül talán a legfontosabb Langmuir hiperbolikus izoterma egyenlete [4-3] és a Brunauer-Emmett-Teller (BET) egyenlet, amely az előző többréteges kiterjesztésének tekinthető. Ezek az egyenletek elméleti úton is levezethetők, és a legtöbb adszorbens-adszorptívum pár esetében jól használhatók az izotermák értelmezésére [4-4].

Az elméleti izoterma egyenletek mellett azonban ismeretesek a gyakorlatban sokszor hasznos empirikus egyenletek, amelyek közül Freundlich egyenlete a legelterjedtebb:

$$v = KP^{1/n} \quad (4.1)$$

ahol

$v$  - az adszorbeált gázmennyiség [ $m^3$ ]

$P$  - a nyomás [Pa]

$K$  - adszorpció konstans [ $m^3/Pa^{1/n}$ ]

$n$  - empirikusan meghatározandó dimenzió nélküli paraméter.

Peters és Weil [4-5] nemesgázok adszorpcióját vizsgálta aktív szénen és számította a megfelelő konstansokat. Az eredményeket a 4.1. táblázat mutatja.

**4.1. táblázat**  
**Aktív szén adszorpció jellemzői**

Nemesgáz	T [°C]	K	1/n
Argon	-80	0.500	0.95
	-18	0.0764	1.0
	0	0.0581	1.0
Kripton	-80	2.927	0.711
	-18	0.497	0.885
	0	0.340	1.0
Xenon	-80	15.99	0.574
	-18	2.458	0.692
	0	1.583	0.77

Az adatokból világosan látszik, hogy a nemesgázok atomtömegének növekedésével az adszorpciós konstans, így tehát az adszorpció mértéke nő. Természetesen a hőmérséklet (és a nyomás) a megszokott módon befolyásolja az adszorpciós egyensúlyt.

A fenti adszorpciós konstansok azonban nem univerzálisak, hiszen az egyensúlyt nagymértékben befolyásolja az alkalmazott aktív szén minősége ill. előélete [4-6], [4-7]. Ebben a kérdésben perdöntő dolog a különbözőképpen előállított aktív szén pórusrendszerének tulajdonsága, hiszen a fajlagos felület és így az adszorpciós kapacitás szempontjából a pórusrendszer meghatározó. Ezért tehát az irodalomban található konstansok csak információ jellegűek, egy adott rendszerre azokat külön ki kell mérni.

#### 4.1.1. Kromatográfiai megfontolások

A nemesgázok aktív széne történő retenciója tulajdonképpen a gázkromatográfia témakörébe tartozó probléma, hiszen a jelenség fizikai háttere a gázok áramlása közbeni, aktív széne történő adszorpciós-deszorpciós egyensúlya. A jelenséget leíró elméleti modellek attól függően változnak, hogy az adszorbeálódó gázkomponensek adszorpciós izotermái lineárisak vagy nem-lineárisak, illetve maga a folyamat ideális (termodinamikai értelemben egyensúlyi) vagy nem ideális [4-2].

Az előző fejezetben esett szó a nemesgázok adszorpciós izotermáiról. Általánosan elfogadhatjuk, hogy kis parciális nyomások esetén a különféle izotermák lineárisnak tekinthetők, vagyis az adszorbeálódó gáz mennyisége egyenesen arányos a gázelegyben lévő parciális nyomásával. A legtöbb esetben azonban ez a linearitás hiperbolikus jellegűvé válik, amit a már említett izotermaegyenletek valamelyikével jól leírhatunk [4-8], [4-9].

A levegő természetes nemesgáztartalmát a 4.2. táblázat mutatja [4-10]:

**4.2. táblázat**  
**A levegő természetes nemesgáz tartalma**

Nemesgáz	térfogat [%]
He	0.0005
Ne	0.0018
Ar	0.93
Kr	0.0001
Xe	0.000009
Rn	<10 <sup>-8</sup>

A nemesgázok parciális nyomása tehát a levegőben alacsonynak tekinthető. A maghasadás által a reaktor légterébe jutó nemesgáz izotópok aktivitáskonzentrációja 10<sup>5</sup> Bq/m<sup>3</sup> nagyságrendbe esik, ami a tömegüket tekintve a levegő természetes nemesgáztartalma mellett

kémiaileg elhanyagolható. Ezért tehát azt a következtetést vonhatjuk le, hogy esetünkben az izotermák linearitása, mint feltétel jogosan alkalmazható.

A retenció folyamatának megértéséhez a rendszer kinetikai viszonyait nem hagyhatjuk figyelmen kívül. Szemcsés és pórusos anyaggal töltött csőben az áramlási viszonyok igen bonyolultak, amit esetünkben az adszorpció-deszorpció egyensúlya még tovább bonyolít.

A csatornatér, amelyben az áramlás folyik nagymértékben szerteágazó. Ez igaz a szemcsék közötti térrészre és a szemcsék pórusrendszerére is. A gáz áramlása szempontjából a szűrőben két különböző összefüggő csatornahálózattal kell tehát számolnunk, amelyek közepes átmérője több nagyságrenddel tér el egymástól. Mivel a gázok közepes szabad úthossza nagyobb, mint a legtöbb aktív szén átlagos pórusmérete, másfelől a szemcsék közötti csatornáknál (amely összevethető az átlagos szemcsemérettel) sokkal kisebb, a szemcsék közötti csatornáknál normális (az áramlási viszonyoktól függően lamináris vagy turbulens), a pórusok belsejében diffúziós (KNUDSEN-féle) áramlással kell számolnunk. Azt a kérdést, hogy a gázok diffúziós előrehaladása a normális áramláshoz képest milyen, a gázáramlás térfogatárama és a szorbens fizikai tulajdonságainak (szemcseméret, porozitás) ismerete alapján válaszolhatjuk meg. Az egész jelenséget úgy összegezhetjük, hogy a diffúzió a pórusokban és a csatornatérben valamilyen eredőt ad, és ezért az adszorpció front vándorlásában (amely a retenció időt meghatározza) a pórusrendszer döntő mértékben részt vesz.

Az adszorpció front vándorlási sebességének leírása csak akkor kezelhető matematikailag, ha bizonyos egyszerűsítésekkel élünk, tekintettel a folyamatok összetett voltára. A valóságban az adszorpció/deszorpció front nem éles, mert a diffúzió és az egyensúly beállításának véges ideje azt elnyújtja. E két hatás egyidejű tárgyalásának matematikai nehézségei miatt általában feltételezik a szorpció egyensúly gyors beállítását. Ekkor a frontok vándorlási sebességére a következő összefüggést vezethetjük le [4-8].

Az adszorpció front vándorlási sebessége:

$$v_A^i = \frac{F}{s} \frac{1}{1+q^i} \quad (4.2)$$

ahol

$v_A^i$  - az  $i$  komponens vándorlási sebessége [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$F$  - a teljes gázbetáplálás térfogatárama [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$s$  - az aktív széntöltet által üresen hagyott, az oszlop egységnyi keresztmetszetére jutó szabadterefogat [ $\text{m}$ ]

$q^i$  - az  $i$  komponensre vonatkozó megoszlási hányados, amelyet a (4.3)

egyenlet fejez ki

$$q^i = \frac{m \cdot a^{0,i}}{s \cdot x^{0,i}} \quad [\text{dimenzió nélküli}] \quad (4.3)$$

ahol

$m$  - az aktív széntöltet tömegének az oszlop egységnyi hosszára eső része [kg/m<sup>2</sup>]

$\alpha^{0,i}$  - a szilárd fázis egységnyi tömege által egyensúlyban megkötött  $i$  komponens mennyisége a  $P$  nyomáson és  $T$  hőmérsékleten [m<sup>3</sup>/kg]

$x^{0,i}$  - az  $i$  komponens móltörtje a beáramló gázelegyenletben [dimenzió nélküli]

Ennek megfelelően az  $i$  komponens áttöréséhez szükséges idő:

$$t_r^i = \frac{L}{v_A^i} = \frac{L \cdot s}{F} (1 + q^i) \quad (4.4)$$

ahol

$L$  - az oszlop (adszorber) hossza [m]

Belátható, ha az adszorbeálódó komponensek mennyisége a gázáramban kicsi (max. 1 %), akkor az egyes komponensek a rájuk jellemző 4.3 egyenlet alapján meghatározott frontsebességgel vándorolnak végig a szorbensen.

A 4.4 egyenlet azonban csak akkor használható az áttörési idő számítására, ha a rendszerben a nyomásesés elhanyagolható. Ha nem, akkor azt a következő kifejezéssel vehetjük figyelembe:

$$t_r^{i,P} = (1 + q^i) \cdot \frac{LA}{F_L} \cdot \frac{2 \left( \frac{P_o}{P_L} \right)^3 - 1}{3 \left( \frac{P_o}{P_L} \right)^2 - 1} \quad (4.5)$$

ahol

$P_o$  - a rendszer bemeneti nyomása [Pa]

$P_L$  - a rendszer kimeneti nyomása [Pa]

$A$  - az oszlop keresztmetszete [m<sup>2</sup>]

$F_L$  - a térfogatáram az oszlop végén [m<sup>3</sup>/s]

A nemesgázok aktív szén szorbensen történő dinamikus adszorpciójának leírására és az atomreaktorban keletkező nemesgáz izotópoknak a kibocsátott levegőből való kiszűrésére



alkalmas szűrőrendszer tervezésére Browning és Ackley [4-11] kidolgozott egy elméleti modellt, amely sikeresen alkalmazható volt az ottani feladatok megoldására.

A modell feltételezi, hogy az adszorber oszlop  $N$  db un. elméleti kamrából áll, amelyekben a belépő gázelegy pillanatszerűen egyensúlyba jut a kamrában lévő aktív szén töltettel és a gázelegy összetétele egy kamrán belül egységes. Levezethető, hogy az  $i$  komponens parciális nyomásának változása (vagyis az adszorpció sebessége) a következők szerint írható le:

$$-\frac{dP_i}{dt} = \frac{FN}{k'm} \frac{P_i}{P_{STD}} \quad (4.6)$$

ahol

$P_i$  -  $i$  komponens parciális nyomása [Pa]

$P_{STD}$  - össznyomás [Pa]

$F$  - a gázelegy térfogatárama [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$N$  - elméleti tányérok száma [db]

$k'$  - statikus egyensúlyi adszorpció tényező

$m$  - adszorbens tömege [kg]

Az  $N$  db elméleti kamrára komponensekként  $N$  db differenciál-egyenlet írható fel. Ezen egyenletrendszer megoldásával megkapjuk az  $N$ -edik kamrában egy adott komponens parciális nyomásának változását az idő függvényében:

$$P_N = \frac{P_{STD} N^N A F^{N-1} t^{N-1}}{(N-1)!(km)^N} \cdot e^{-\frac{NFt}{km}} \quad (4.7)$$

ahol

$A$  - a szűrőbe belépő nemesgáz térfogata a  $P_{STD}$  nyomáson [ $\text{m}^3$ ]

$t$  - a belépéstől eltelt (retenciós) idő [s]

$k = k'P_{STD}$  - dinamikus adszorpció tényező [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]

A gyakorlatban azt lehet kísérletileg meghatározni, hogy egy adott komponens mikor jelenik meg az oszlop végén. Ezt matematikailag úgy fejezhetjük ki, mint azt az időt, amikor az adott komponens parciális nyomása az oszlop végén maximális. Ezt az időt a (4.7) egyenlet differenciálásával és a  $dP_N/dt = 0$  feltétel felhasználásával levezethetjük:

$$t_{\max.} = \frac{N-1}{N} \frac{km}{F} \quad (4.8)$$

Valós rendszerekre  $N$  értéke nagy, így:

$$t_{\max} = \frac{km}{F} \quad (4.9)$$

$t_{\max}$ , azaz a maximális retenciós idő kimérésével tehát, ismerve  $m$  és  $F$  értékét, az egyes komponensekre meghatározható a dinamikus adszorpciós tényező.

A fenti megfontolásokat összevethetjük a korábban leírt adszorpciós fronttal kapcsolatban elmondottakkal a következő módon. A (4.4) egyenletben szereplő  $q^i$ , ha az adszorbeálódó komponens mennyisége a gázfázisban kevés, sokkal nagyobb, mint egységnyi, így a zárójelben az egyes mellette elhanyagolható. Az így egyszerűsödött egyenletet összevetve (4.9)-el kapjuk, hogy

$$k^i = \frac{L \cdot s}{m} q^i \quad (4.10)$$

Az eddig említett két modell tehát hasonló kvalitatív eredményt hozott egymástól teljesen független elméleti megfontolásokból levezetve. Vagyis a Browning és Ackley által levezetett összefüggések helytállóak. A fenti azonosságban azonban impliciten benne van az a feltétel, hogy a szerzők a nyomásgradienstől eltekintettek.

Az aktív szénágyon adszorbeálódó gőzök és gázok áttörési idejének kiszámítására nagyon jól alkalmazható a Wheeler–Jonas egyenlet [4-12], amennyiben a szén egyensúlyi adszorpciós kapacitása és az adszorbeálódó komponens adszorpciós sebességi együtthatója ismert.

Az egyenlet, és paraméterei:

$$t_b = \frac{M \cdot W_e}{Q \cdot C_{BE}} - \frac{\rho_b \cdot W_e}{k_v \cdot C_{BE}} \ln \left( \frac{C_{BE} - C_{KI}}{C_{KI}} \right) \quad (4.11)$$

Ahol:

$t_b$  - a  $C_{KI}$  koncentrációhoz tartozó áttörési idő [min]

$M$  - a minta tömege [g]

$Q$  - térfogatáram [ $\text{cm}^3/\text{min}$ ]

$C_{BE}$  - bemeneti koncentráció [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

$C_{KI}$  - kimeneti koncentráció [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

$\rho_b$  - szénágy sűrűsége [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

$k_v$  - adszorpciós sebességi együttható [ $\text{min}^{-1}$ ]

$W_e$  - egyensúlyi adszorpciós kapacitás [ $\text{g}/\text{g}_{\text{szén}}$ ]

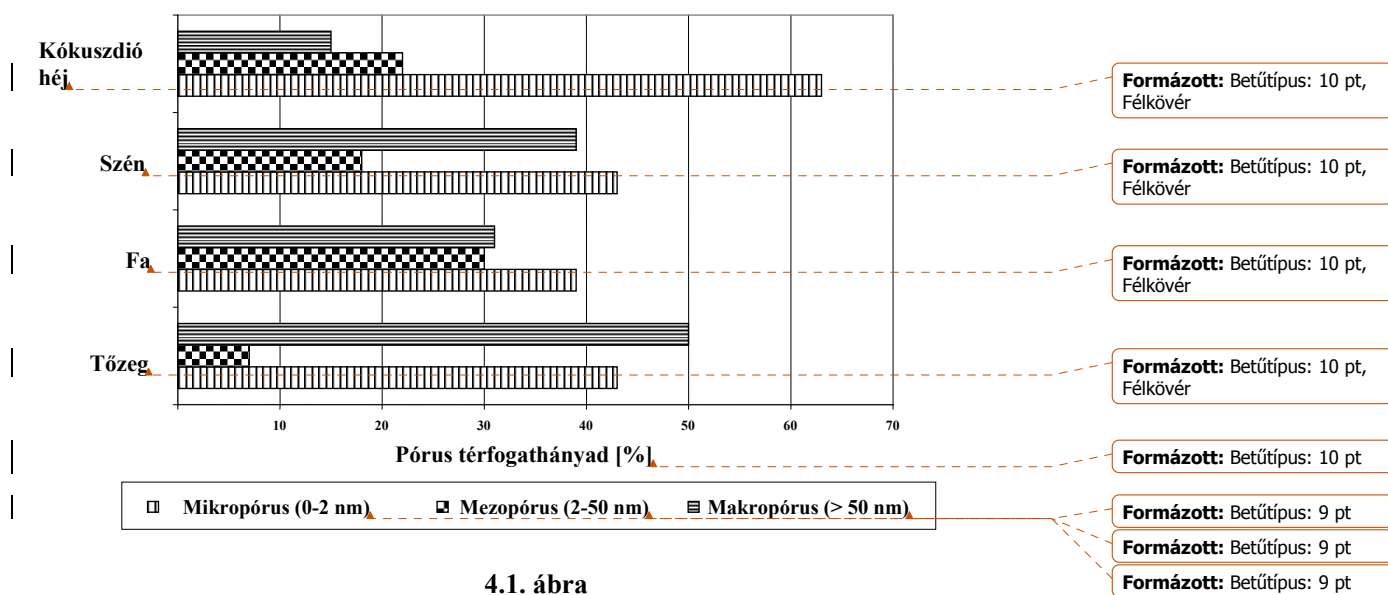
A Wheeler–Jonas egyenlet két fontos, a szénre jellemző paramétere a  $k_v$  és a  $W_e$ . Előbbi az adszorpciós reakció sebességét, míg a második a szén adszorpciós kapacitását adja meg. A kiértékelés során az adott kimeneti koncentrációhoz ( $C_{KI}$ ) tartozó áttörési időt ábrázoljuk  $\ln((C_{BE}-C_{KI})/C_{KI})$  függvényében, majd ezekre a pontokra egyenest illesztünk. Az egyenes konstansából a keresett paraméterek egyszerűen számíthatók. Az egyenlet csak az áttörési front felfutó szakaszára alkalmazható, hiszen a front teljes áthaladása után a  $C_{BE}=C_{KI}$ , ezért a logaritmus utáni tag zérussá válik.

## 4.2. A retenciót befolyásoló tényezők

Az aktív szén adszorber teljesítményét tehát a 4.1. pontban leírtak szerint a megfelelő vizsgáló anyagra vonatkozó teljesítmény tényezővel, a dinamikus adszorpciós tényezővel ( $k$ ) jellemzik, amelynek értékét számos tényező befolyásolja az alábbiak szerint [4-13, 4-14]:

### 4.2.1. Az aktív szén pórusossága

Az aktív szén nagy fajlagos felületét, ami a gázok adszorpcióját segíti elő, a gyártás során kialakított pórusos szerkezet biztosítja. A pórusok mérete - amely lehet makró (>50 nm), mezo (2-50 nm), mikro (0-2 nm) -, illetve aránya nagyban függ az aktív szén gyártásához használt alapanyagától, valamint az aktiválás módszerétől. A különböző alapú szenek póruseloszlása az irodalmi adatok alapján [4-15] a 4.1. ábrán látható.

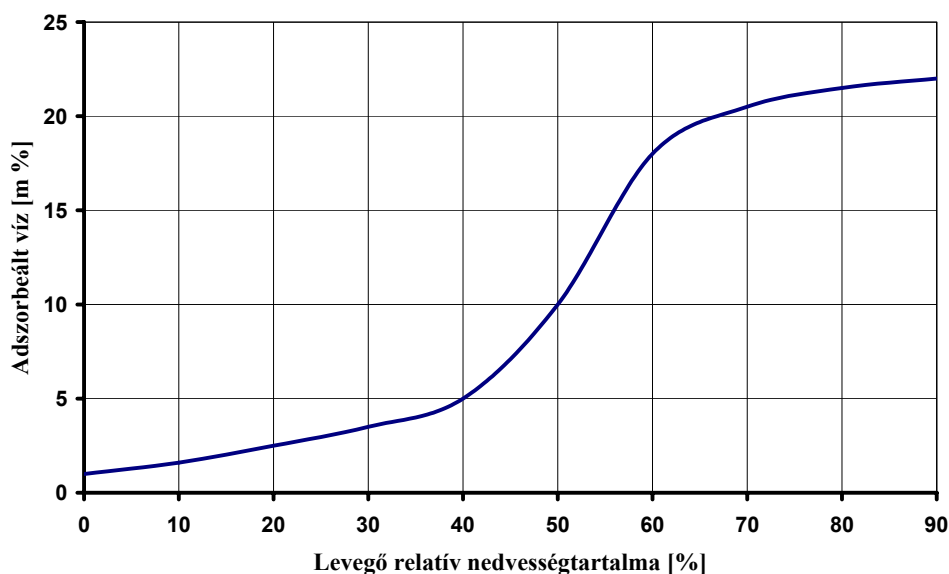


4.1. ábra  
A különböző alapú aktív szén pórus-eloszlása

A mikropórust nagy részarányban tartalmazó széntől várható el, hogy a nemesgázokat nagy hatékonysággal visszatartsa. Ugyanakkor a mikropórus hátránya, hogy a gáz aeroszol finom részecskéi, valamint a nagy relatív nedvességtartalom esetén fellépő páralecsapódás a mikropórusokat elzárva nagymértékben csökkenti a szén adszorpciós képességét, így a nemesgázok retencióját.

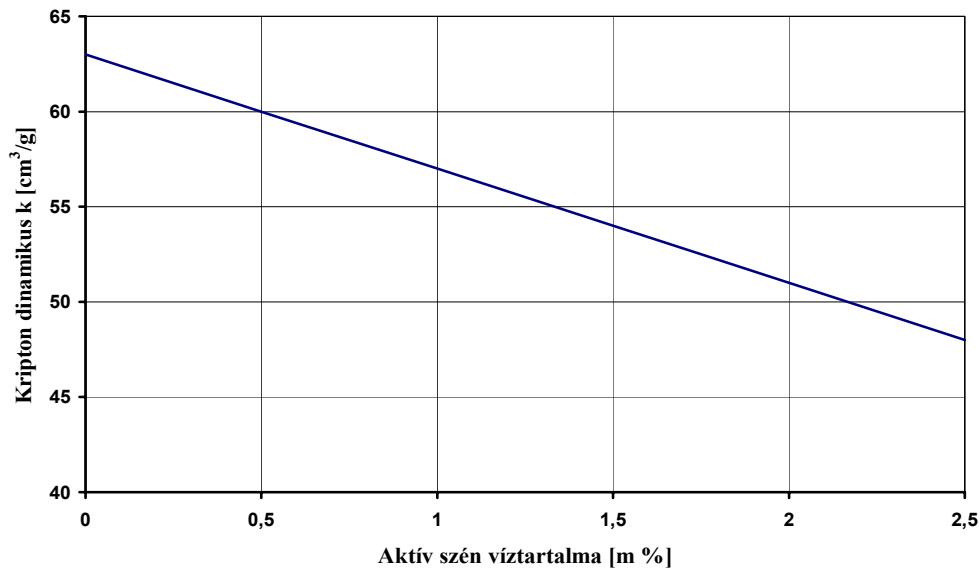
#### 4.2.2. Relatív légnedvesség tartalom

Az aktív szén nedvességtartalmának és hatásosságának összefüggését többen is vizsgálták [2-2, 4-16]. Az aktív szén nedvességtartalma a szürendő gáz relatív nedvességtartalmának függvénye [2-3]. A szén által felvett víz és a levegő relatív nedvességtartalma (RN) közötti összefüggés kis áramlási sebesség mellett (4 cm/s), egyensúlyi állapotban a 4.2. ábrán látható [4-15]. Az ábrán látható, hogy a nagyobb mértékű (>5 %) vízfelvétel 40 % relatív nedvességtartalom fölött indul meg. A nemesgázok adszorpciója érdemben csak 5 %-nál kisebb nedvességtartalmú aktív szén esetében várható. Ideális, ha a szén víztartalma kisebb 2 %-nál, azaz a szürendő gáz relatív nedvesség tartalma kisebb 20 %-nál. A Kr-ra és Xe-ra vonatkozó dinamikus adszorpciós tényező (k) és az aktív szén nedvességtartalma közötti összefüggést a 4.3. és 4.4. ábrák szemléltetik. Az ábrákon látható, hogy milyen számottevő hatással van a szén nedvességtartalma a k értékére, ezért a kis nedvességtartalmú aktív szén és kis relatív nedvességtartalmú vívőgáz (levegő) alkalmazása mellett várható a nemesgázok megfelelő retenciója.



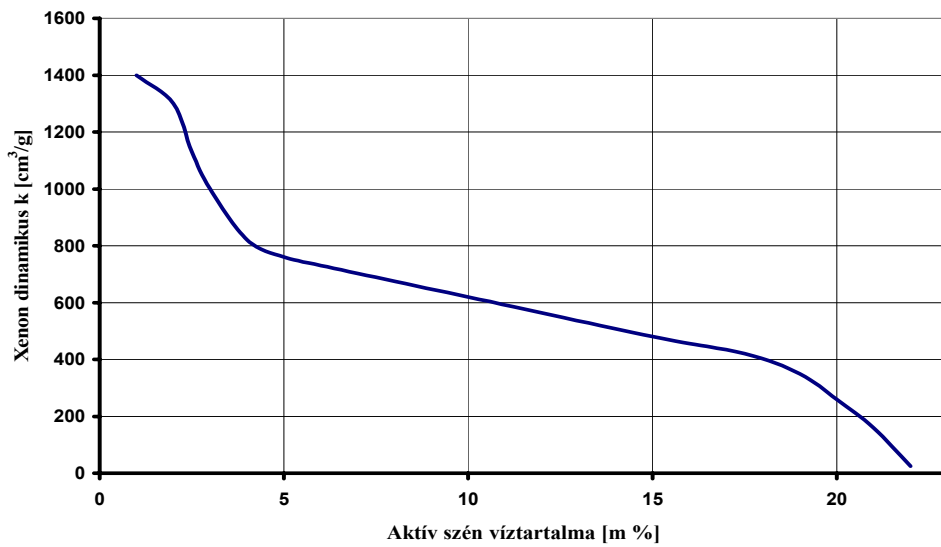
4.2. ábra

A vízgőz egyensúlyi adszorpciója aktív szénen [4-15] alapján  
(NUCON Grade G-30; áramlási sebesség: 4 cm/s; hőmérséklet: 18,3 °C)



4.3. ábra

Kryptonra vonatkozó dinamikus adszorpciós tényező függése az aktív szén víztartalmától [4-15] alapján  
(NUCON Grade G-30; vívógáz: levegő; hőmérséklet: 22 °C)



4.4. ábra

Xenonra vonatkozó dinamikus adszorpciós tényező függése az aktív szén víztartalmától [4-15] alapján  
(NUCON Grade G-30; áramlási sebesség 4 cm/s; hőmérséklet 19 °C)

4

### **4.2.3. Hőmérséklet**

Az adszorpciós folyamatra a hőmérséklet is hatással van, növekvő hőmérséklet a szén adszorpció képességét csökkenti.  $10^{\circ}\text{C}$  változás a dinamikus adszorpciós tényező (k) értékét Kr esetben kb. 10, Xe esetben mintegy 300 egységgel változtatja meg. Ezért a szűrőrendszer tervezése és minősítése során figyelembe kell venni, hogy a dinamikus adszorpciós tényező (k) értékét milyen hőmérsékletre adják meg.

### **4.2.4. A gáz áramlási sebessége**

A szürendő gáz áramlási sebességének változása az irodalmi adatok szerint 0,1-0,9 m/s tartományban a dinamikus adszorpciós tényező (k) értékét a sebesség négyzetgyökével változtatja, ha a gáz száraz. Nedves gáz esetén a hatás az ötödik gyökre csökken. A gyakorlatban az áramlási sebesség általában 0,3-0,5 m/s közötti.

### **4.2.5. Öregedés**

A vízgőz és a levegő oxigéntartalmának együttes hatása az aktív szén oxidációs öregedését okozza. Az öregedési folyamat sebességére csak kísérletek elvégzésével lehet becslést adni. A paksi atomerőműben üzemelő aktív szén adszorberékből vett mintákon elvégzett vizsgálatok szerint a mintegy 15-20 éves üzemidő alatt az impregnálatlan aktív szén öregedés miatti teljesítmény romlása minimális mértékű volt.

### **4.2.6. Halmazsűrűség**

Az aktív szénnek a szűrőben kialakult halmazsűrűsége is befolyásolja a dinamikus adszorpciós tényező (k) értékét. Állandó gázáramlási sebesség mellett, a 400-600 kg/m<sup>3</sup> sűrűség tartományban 10 % sűrűség növekedés mintegy 12 %-kal növeli a k értékét.

## **4.3. A retenció mérése**

### **4.3.1. A retenció mérésére kifejlesztett folyamatos mérőrendszer**

A BME által kifejlesztett mérési módszer lényege az adszorber bemenetén és kimenetén az egyes nemesgáz izotópok aktivitásának folyamatos monitorozása [4-17, 4-18]. Ezt félvezető detektoros gamma spektroszkópiás mérőrendszerekkel oldották meg.

Az erőmű légnemű kibocsátásában normál üzemi körülmények között jelenlévő nemesgáz izotópokat a 4.3. táblázat foglalja össze.

**4.3. táblázat**  
**Az erőmű légnemű kibocsátásában normál üzemi körülmények**  
**között jelenlévő nemesgáz izotópok**

Izotóp	Felezési idő	E <sub>γ</sub> (keV)
Ar-41	1,827 óra	1293,60
Kr-85m	4,48 óra	151,18 304,87
Kr-88	2,48 óra	196,30 834,83
Xe-133	5,24 nap	80,99
Xe-135	9,11 óra	249,79

#### 4.3.2. Az eljárás elve

Az adott adszorber ki- ill. bemenetén mért spektrumok megfelelő kiértékelésével kapjuk az egyes nemesgázizotópokhoz tartozó aktivitás értékeket, jelöljük ezt az *i* izotóp esetében  $A_{im}$  -el. A mintatartó edény térfogata legyen *V*. Egy ciklusidő alatt mért aktivitás-koncentráció az *i* izotópra nézve:

$$a_i = \frac{A_{im}}{V} \quad (4.12)$$

Ez az aktivitás-koncentráció érték megegyezik az adszorberre kerülő levegőben az *i* izotóp aktivitás-koncentrációjával, tekintettel arra, hogy a kérdéses izotópok gázok, így a mintavételezéskor esetlegesen fellépő fajtázódástól eltekinthetünk.

Az adszorberre időegység alatt jutó *i* izotóp aktivitását ( $A_i$ ) az adszorberre jutó levegő térfogatáramának ( $F_{be}$ ) ismeretében az aktivitás-koncentrációból egyszerűen számíthatjuk:

$$A_i = a_i * F_{be} \quad (4.13)$$

A térfogatáramot ( $F_{be}$ ) a kg/h egységben megadott terhelési értékek átlagából ( $F_t$ ) a következő faktor segítségével számíthatjuk át m<sup>3</sup>/h egységre (a levegő átlagos móltömegét 29 g/mol-nak vettem):

$$F_{be} = \frac{F_t \times 10^3 \times RT}{29 \times P} \quad (4.14)$$

ahol

R - a gázállandó (8,3145 J/mol K)

T - az adszorber üzemi hőmérséklete (293 K)

P - a szűrő üzemi nyomása (  $8.8 \cdot 10^4$  Pascal [4-19] alapján)

Az adszorberről időegység alatt lejövő aktivitás értéket ( $A_i^{ki}$ ) hasonlóan számíthatjuk a kimeneti spektrumok kiértékelésével.

Az irodalom [4-1] alapján az adszorbernek egy adott izotópra vonatkozó maximális retenciós ideje ( $t_{max}^i$ ) az az időtartam, ami alatt az adszorber bemenetére kerülő izotóp - szilárdgáz adszorpció/deszorpció dinamikusan egyensúlyok által visszatartva - a kimeneten megjelenik. Ha ábrázoljuk az  $A_i^{ki}$  értékét az időben, akkor elméletileg egy határértékhez simuló görbét kapunk, ha a bemeneti térfogatáram állandó. Regenerált adszorber ág esetében az indulás időpontjától e határérték eléréséig eltelt idő megadja  $t_{max}^i$  értékét. Ez az érték fordítottan arányos az ág terhelésével. A fenti egyszerű számítás csak akkor engedhető meg, ha a terhelés a vizsgálat ideje alatt gyakorlatilag állandó szinten van. Az így mérhető maximális retenciós idő,  $t_{max}^i$ , az adszorber technikai minősítése szempontjából az egyik legfontosabb paraméter. Az ideálisan működő adszorber esetében ennek az időnek akkorának kellene lenni, hogy ez alatt az  $i$  izotóp gyakorlatilag teljesen elbomoljon.

A maximális retenciós idők kimérésével meghatározhatjuk az adszorber izotópspecifikus dinamikus adszorpció tényezőjét ( $k_i$ ) az irodalmakban [4-1, 4-20] levezetett 4.9 összefüggés segítségével:

$$k_i = \frac{t_{max}^i \cdot F_{be}}{m} \quad (4.15)$$

ahol

$t_{max}^i$  - adott izotópra vonatkozó maximális retenciós idő [h]

$F_{be}$  - adszorberre jutó levegő térfogatárama [ $m^3/h$ ]

$m$  - az adszorber széntöltetének tömege [t]

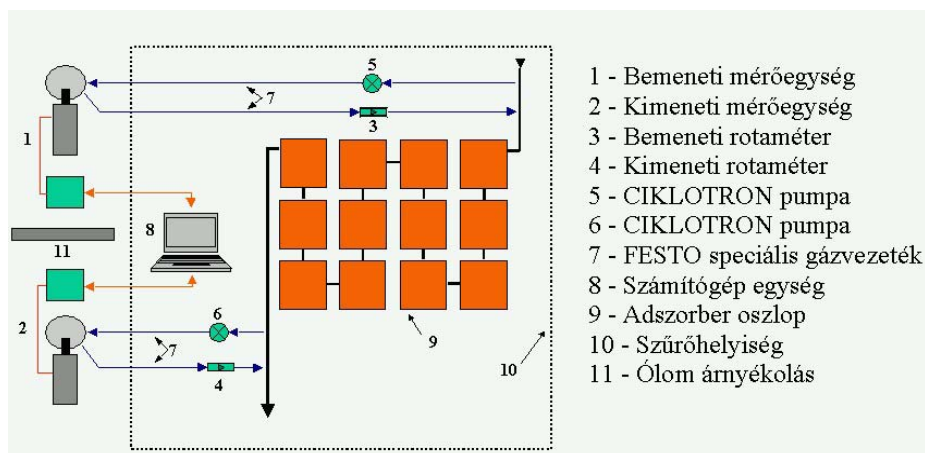
A dinamikus adszorpció tényező számértéke azt a levegő térfogatot adja meg, amelyből a szén egységnyi tömege az adott izotópot biztosan kiszűri. Használata a szén jellemzésére azért elterjedt, mert ez - a retenciós idővel ellentétben - független a terheléstől, és csak a szén típusának és pillanatnyi állapotának a függvénye. Ezt a paramétert adják meg az egyes gyártók is termékük kapacitásának jellemzésére.

### 4.3.3. A mérőrendszer telepítése

A mérési geometria kiválasztását a radioaktív hiteles anyagminták (RHA) elérhetősége nagyban befolyásolta. Mivel gáz halmazállapotú, hiteles radioaktív sugárforrás az OMH



által rendszeresített lekerekített, üreges hengerekben állt rendelkezésre, ezért a mérés megvalósításához hasonló geometriai paraméterekkel rendelkező Marinelli edényeket használtam. A retenció mérés elrendezését az eredeti mérési módszer esetében a 4.5. ábra mutatja.



4.5. ábra

#### A retenció mérés elrendezése az eredeti mérési módszer esetében

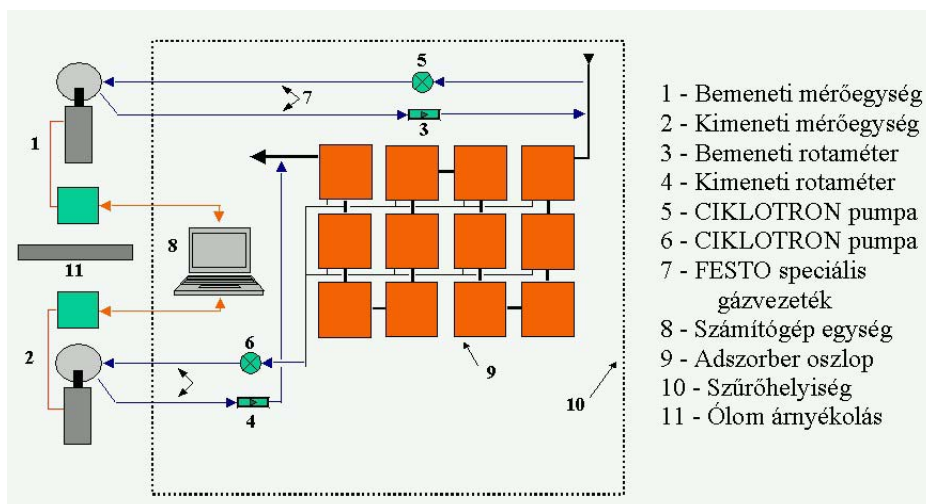
A spektrumok felvételét, kiértékelését és tárolását a CANBERRA gyártmányú, hordozható félvezető detektorral ellátott INSPECTOR rendszerekkel végeztem. Ezt az indokolta, hogy az OS/2 operációs rendszerre telepített mérőrendszer lehetőséget ad több mérőhely szimultán kezelésére egyetlen számítógép segítségével. Ehhez a mérést megfelelően irányító program megírására volt szükség a Genie-PC és az OS/2 nyújtotta támogatások felhasználásával.

#### 4.3.4. A retenció mérési módszer továbbfejlesztése

A 4.3.2. pontban ismertetett mérési eljárás az adszorberek vonatkozásában csak az Ar és a Kr izotópokra vonatkozó retenció tényező kimérését tette lehetővé. Ennek oka az volt, hogy az adszorberek előtti zeolit töltetű gázszáritók kimerülése miatt az adszorberek maximális üzemideje 2-3 hét, ami a Xe front áttörésére nem elegendő.

Szükség volt tehát olyan mérési módszer kifejlesztésére, amely lehetővé teszi a Xe izotópokra vonatkozó hatósági kritériumnak való megfelelés ellenőrzését is.

Az új módszer kifejlesztését az adszorber kialakítása tette lehetővé. Mint az már korábban ismertetésre került, az adszorber 12 db kétjáratú tartály soros kapcsolásával van kialakítva. Mindegyik tartály alsó fordító kamráján egy menetes csonk található. A csonkokon keresztül az adott tartályból gázmintát lehet venni, és így követni lehet az adszorbereken a frontok előrehaladását. Sajnos a 12 db tartály hármassával egymásra helyezve 4 oszlopban van felállítva, az alsó tartályok (azaz a 3., 4., 9., és 10.) csonkjai nem hozzáférhetőek, de ez nem befolyásolja az új módszer alkalmazhatóságát. A retenció mérés elrendezését az új mérési módszer esetében a 4.6. ábra mutatja.



4.6. ábra

### A retenció mérés elrendezése az új mérési módszer esetében

A méréshez használt berendezések teljes mértékben megegyeznek a korábbi mérési módszerrel használtakkal, a különbség a mintavételi helyekben és az értékelés módszerében van az alábbiak szerint:

Az egyes helyeken a fenti izotópokra mért aktivitás függését a mintavételi helytől (a szorbens ágy mélységétől) az egyszerű radioaktív bomlás kinetikája és a 4.9 sz. egyenlet kombinálása eredményeként a következő képlet segítségével számíthatjuk:

$$A_i = A_1 * e^{-\frac{k \cdot m_i \cdot \ln(2)}{F \cdot T_{1/2}}} \quad (4.16)$$

ahol:

$A_1$  – az első adszorberen mintavételezett gázban mérhető aktivitás [MBq]

$A_i$  – az  $i=2,5,8,11$  adszorberen mintavételezett gázban mérhető aktivitás [MBq]

$k$  – az adott izotópra jellemző dinamikus adszorpció tényező [ $m^3/t$ ]

$m_i$  – az  $i$ -k mintavételezési helyhez tartozó adszorbens tömege [t]

$F$  – az adszorber terhelése a mérés időpontjában [ $m^3/h$ ]

$T_{1/2}$  – az adott izotóp felezési ideje [h]

A kiértékelés elve a következő. Az egyes mintavételi pontokhoz tartozó adszorber tömeg ( $m_i$ ) függvényében ábrázoljuk az adott izotópra jellemző fotocsúcs alapján meghatározott nettó intenzitás, vagy megfelelő hatásfokkalibráció esetén, az aktivitásértékek természetes

alapú logaritmusát. Így ábrázolva a mért pontok egyenest kell, hogy meghatározzanak, amelynek meredeksége illesztéssel meghatározható. A meredekségből az adott izotópra jellemző dinamikus adszorpciós tényező ( $k$ ) az ágy terhelésének ismeretében ( $F$ ) számítható.

A retenciós mérések során az adszorpciós front felfutó szakaszának kimérése nem eléggé pontos ahhoz, hogy a Wheeler–Jonas egyenlet (4.11) megfelelő megbízhatósággal használható lenne, különösen igaz ez a Kr front esetében. Ezért a fenti egyenlet alkalmazásától a mérési eredmények értékelésnél eltekintettem

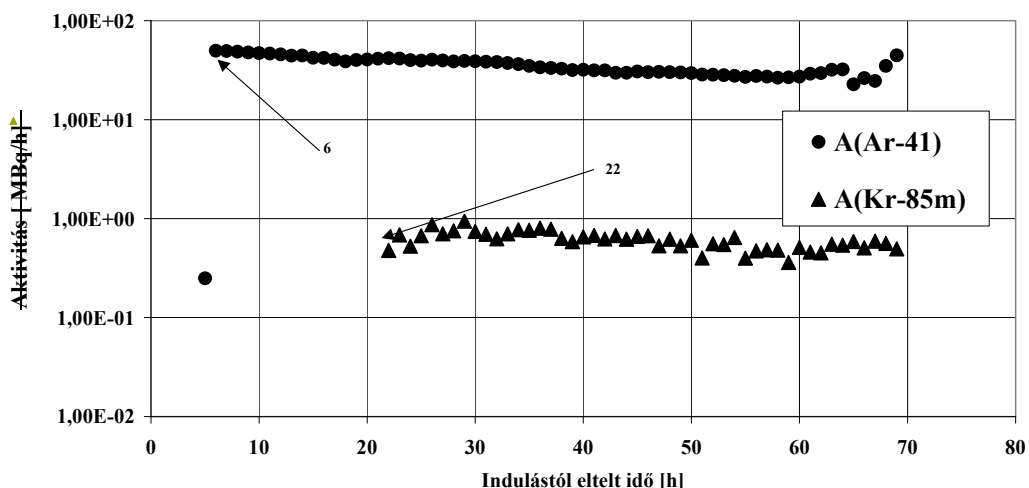
A módszer alkalmasságának bizonyítására elvégeztem a 01TS70N002 adszorber (ez az 1. és 2. ikerblokkra közös gáztisztító rendszer egyik adszorbere) vizsgálatát a régi és az új módszer segítségével is. Az eredményeket az alábbiakban mutatom be.

#### 4.3.5. A 01TS70N002 adszorber mérése az eredeti módszer szerint

A gáztisztító rendszerben végzett helyszíni minősítés időpontjában az adszorber átlagos terhelése  $21,6 \pm 1,2 \text{ m}^3/\text{h}$  volt.

##### Eredmények:

Az adszorber kimenetén időegység alatt mért aktivitás értékeket az eltelt idő függvényében a 4.7. ábra mutatja.



4.7. ábra

01TS70N002 adszorber kimenete (folyamatos mintavételezés, óránkénti mérés)

##### Kiértékelés

A kezdeti időszakban, lévén a szűrőág regenerált állapotból indult, az aktivitás értékek kimutathatósági határ alattiak voltak. Mivel a Kr-85m front felfutása az aktivitási viszo-

nyok miatt nem volt kimérhető, így az első ponthoz tartozó időt vettem a retenciós időnek ( $t = 22$  óra), amelyből a dinamikus adszorpciós tényező ( $k$ ) a 4.15 összefüggés alapján számítható:

$$k = \frac{t \cdot F}{m}$$

ahol

$F$  – a terhelés [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

$t$  – a retenciós idő [h]

$m$  – a szénagyó össztömege [t]

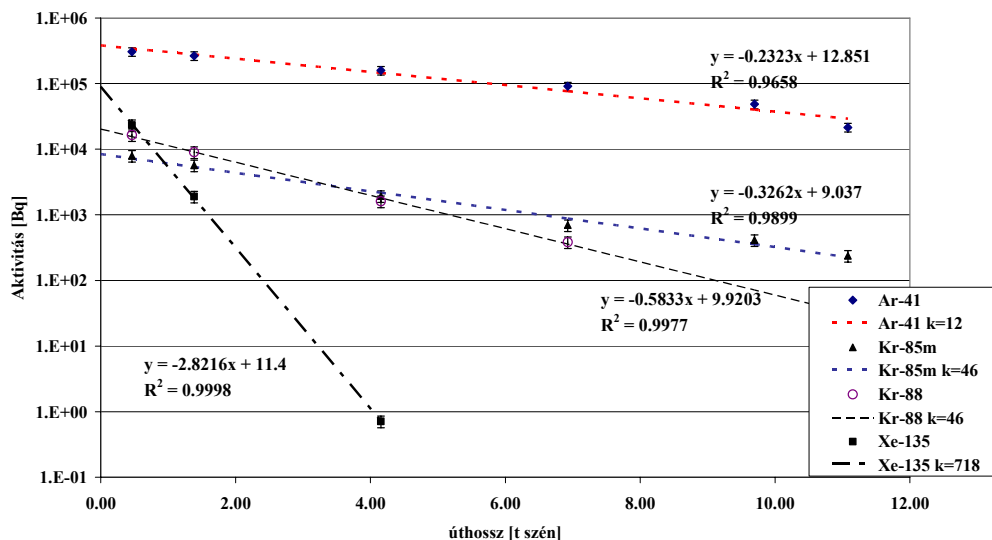
Így  $k$ -t  $\text{m}^3/\text{t}$  egységben kapjuk meg, ami megfelel a  $\text{cm}^3/\text{g}$  egységnek.

A számított dinamikus adszorpciós tényező értéke:  $k = 43 \pm 3 \text{ cm}^3/\text{g}$  ( $m=11,8$  t). A tényező hibáját ebben az esetben  $F$  és  $t$  hibájából számítjuk.

Az Ar-41 izotóp aktivitása is mérhető volt az adszorberen és így szerepel a 4.7. ábrán. Az Ar-41 izotópra nincs hatósági kritérium előírva, lévén aktivitásának nagysága csak a Kr és Xe izotópok aktivitásának alacsony értéke mellett jelent számottevő tényezőt. Előbbiek miatt a mérési eredmények értékelésénél az Ar-41 izotópra vonatkozó dinamikus adszorpciós tényező értékelésére nem került sor.

#### 4.3.6. A 01TS70N002 adszorber mérése az új módszer szerint

A Kr-85m izotóp retenciós idejének fentebb ismertetett módon történő megmérését követően, az egyes adszorber tartályokon kialakított mintavételi csonkokon keresztül megmintáztam a szűrősort az Ar-41, Kr-85m, Kr-88 és a Xe-135 izotópok mérése érdekében. A mérési eredményeket a 4.8. sz. ábra mutatja be.



4.8. ábra

01TS70N002 mérési eredményei az új módszer szerint

Az ábrán jelölt mérési pontokra a 4.16 egyenlet logaritmizálásával, lineáris regresszió alkalmazásával egyenes illeszthető, melynek a meredekségéből a dinamikus adszorpciós tényező (k) számítható. Szaggatott vonallal berajzoltam az illesztett egyeneseket, az illesztés jóságára jellemző regressziós paraméter négyzetét és az illesztés eredményeként kapott k értékeket is.

Az eredményeket a 4.4. táblázat foglalja össze.

**4.4. táblázat**  
**01TS70N002 mérési eredményei az új módszerrel**

Izotóp		Ar-41	Ar-41 k=12	Kr-85m	Kr-85m k=46	Xe-135	Xe-135 k=718	Kr-88	Kr-88 k=46
Felezési idő		$T_{1/2}=1,82$ h		$T_{1/2}=4,48$ h		$T_{1/2}=9,14$ h		$T_{1/2}=2,85$ h	
Mintavételi hely	m [t]	I Mért [cps]	I Számolt [cps]	I Mért [cps]	I Számolt [cps]	I Mért [cps]	I Számolt [cps]	I Mért [cps]	I Számolt [cps]
1. adszorber tartály	0,46	305740,0	342454,2	7930,0	7233,0	23260,0	24285,6	16409,0	15539,6
2. adszorber tartály	1,39	264830,0	276420,9	5682,2	5351,9	1897,1	1795,3	9003,4	9071,1
5. adszorber tartály	4,16	158880,0	145370,4	1932,5	2168,2	0,8	0,7	1609,8	1804,3
8. adszorber tartály	6,93	90910,0	76450,6	696,7	878,4			382,5	358,9
11. adszorber tartály	9,70	48568,0	40205,5	411,3	355,8			0,0	71,4
Kimenet	11,08	21500,0	29156,7	238,0	226,5			0,0	31,8
<b>k [cm<sup>3</sup>/g] (F=19,31 m<sup>3</sup>/h)</b>		<b>11,8±1,2</b>		<b>45,6±3,6</b>		<b>718±79</b>		<b>46,1±3,7</b>	

A mérési eredmények alapján a következők állapíthatók meg:

1. A 4.16 egyenlet helyességét jól bizonyítja, hogy a mért értékek logaritmusára illesztett egyenesek valamennyi esetben kitűnő illeszkedést mutattak ( $R^2 > 0,95$ ). Az új módszer elvi alapja tehát helyes.
2. A Kr-85m-re kapott k érték ( $45,6 \pm 3,6$  cm<sup>3</sup>/g) hibahatáron belül megegyezik az áttörési front kimérésével kapott értékkel ( $43 \pm 3$  cm<sup>3</sup>/g), amely bizonyítja, hogy az új módszer megfelelően alkalmazható.
3. Az új módszer alkalmazásával lehetőség van a rövidebb felezési idejű Kr-88 izotópra is meghatározni a k értéket, amely ha eltekintünk az izotópeffektustól, meg kell, hogy egyezzen a Kr-85m-re kapott értékkel. Ez jelen esetben kitűnő egyezést mutat ( $46,1 \pm 3,7$  cm<sup>3</sup>/g). Ez lehetőséget ad az új módszerrel kriptonra meghatározott k érték ellenőrzésére is, amely megnöveli az új módszer megbízhatóságát a régihez képest.
4. A régi módszer hátránya, mint ahogy arra jelen esetben is rámutattam, hogy ha az aktivitásviszonyok kedvezőtlenek, akkor a kripton front felfutása nem mérhető ki pontosan, amely növeli a retenciós idő mérésének bizonytalanságát. Ez az új módszer esetében nem jelentkezik.
5. A régi módszerrel nem volt a xenon front kimérhető. Az új módszerrel erre is lehetőség van, a xenonra meghatározott k érték  $718 \pm 79$  cm<sup>3</sup>/g.

## 4.4. Modell vizsgálatok

Az előzőekben ismertetett módszer segítségével elvégzett teljes körű ellenőrzés azt mutatta, hogy a 6 db üzemi adszorber egyike sem teljesíti a 4. fejezet elején ismertetett hatósági kritériumot sem Kryptonra, sem Xenonra.

A nem megfelelő teljesítőképesség okának meghatározásához további vizsgálatokat kellett végezni. Meg kellett vizsgálni, hogy az adszorberek töltete milyen állapotban van. Az adszorberekben levő aktív szén töltet vizsgálatához meg kellett teremteni a mintavételezés lehetőségét, ki kellett alakítani az ehhez szükséges berendezéseket. Szükség volt továbbá más típusú aktív szenek vizsgálatára is, hogy egy esetleges töltetcsere az adszorberekben megalapozottan lehessen végrehajtani.

Az adszorberekből kivett aktív szén minták, illetve más típusú aktív szenek retenciós tulajdonságainak vizsgálatát egy modell berendezés megépítésével lehetett végrehajtani, amely az üzemi adszorberen alapul. Berendezéseket kellett továbbá kialakítani a vizsgálni kívánt aktív szén minták megfelelő kondicionálására, azaz nedvességtartalmuk szabályozására.

### 4.4.1. Modell szűrőágy és retenciós mérés elvégzésére alkalmas mérő és vezérlő berendezés tervezése és kivitelezése.

A szorbensek vizsgálatára kialakított minősítő berendezés működésének alapja, hogy az üzemi adszorberrel azonos áramlási paraméterek mellett egy modellágyat üzemeltetünk, amit előzetesen a vizsgálandó szorbenssel töltünk fel. Mérjük az ágyra be- és kimenő radioaktív nemesgázokat tartalmazó levegő izotópszелеktív aktivitását, amelyből kiszámítható a nemesgázok visszatartására adott terhelésen jellemző retenciós idő, illetve a terheléstől független dinamikus adszorpció tényező ( $k$ ). Ennek alapján eldönthető, hogy a szorbens üzemi körülmények között milyen késleltetési időt biztosít, azaz megfelel-e a kritériumoknak.

#### 4.4.1.1. A modell szűrőágy méretezése

A modell szűrőágy méretezésénél az alábbi követelményeket kell figyelembe venni:

- A modell szűrőágyban a szénágy mélysége és a lineáris áramlási sebesség azonos legyen az üzemi szűrőével;
- a gáz be- és kiáramlási, valamint a szorbenságy keresztmetszetének aránya a modell és üzemi szűrőágyaknál azonos legyen;
- a fentiek betartása egyben biztosítja, hogy mindkét esetben azonos a tartózkodási idő (adszorpció nélkül).

Az üzemi szűrőágyban lévő adszorber fontosabb adatait a 4.5. táblázat tartalmazza.

**4.5. táblázat**  
**Az adszorber fontosabb műszaki adatai**

Névleges légforgalom	6 - 67 m <sup>3</sup> /h
Üzemi légforgalom	16 - 20 m <sup>3</sup> /h
Névleges hőmérséklet	30 °C
Névleges nyomás	69-157 kPa
Sorba kapcsolt egységek száma	12 db
Szorbenságy méretei egy egységben (hengeres, kétjáratú)	
Átmérő	1.600 mm
Magasság	2 x 830 mm
Adszorbens térfogata egy egységben	1,65 m <sup>3</sup>
Tartózkodási idő egy egységben (16 m <sup>3</sup> /h légforgalomra)	2 x 187 s
Lineáris áramlási sebesség (16 m <sup>3</sup> /h légforgalomra)	0,44 cm/s
Gáz be- és kilépő csomók átmérője	100 mm
Adszorbens típusa	SZKT-3

A fentiek figyelembevételével:

- a modell szűrőágy 12 db egységből áll
- az egyes egységekben az ágy mélysége 2 x 830 mm
- a szűrőágy választott átmérője 58,5 mm
- a lineáris gázáramlási sebesség meghatározása:

$$v = Q / F$$

ahol:

Q - légforgalom (cm<sup>3</sup>/s)

F - a szorbenságy keresztmetszete (cm<sup>2</sup>)

$$Q = 16 \text{ m}^3/\text{h} = 4,4 \times 10^3 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$F = r^2\pi/2 = 80^2 \times \pi/2 = 10.053 \text{ cm}^2 \text{ (kétjáratú)}$$

$$v = \frac{4,4 \times 10^3}{1,0053 \times 10^4} = 0,44 \text{ cm/s}$$

- a modell szűrőágy gáz be- és kilépő keresztmetszete

Üzemi szűrőágy:

$$\text{gáz be- és kilépő keresztmetszete } F = r^2\pi = 5^2 \times \pi = 78,5 \text{ cm}^2$$

$$\text{üzemi ágy keresztmetszete } F = 10.053 \text{ cm}^2$$

$$\text{arányuk: } \frac{78,5}{10053} = 7,8 \times 10^{-3}$$

Modell szűrőágy:

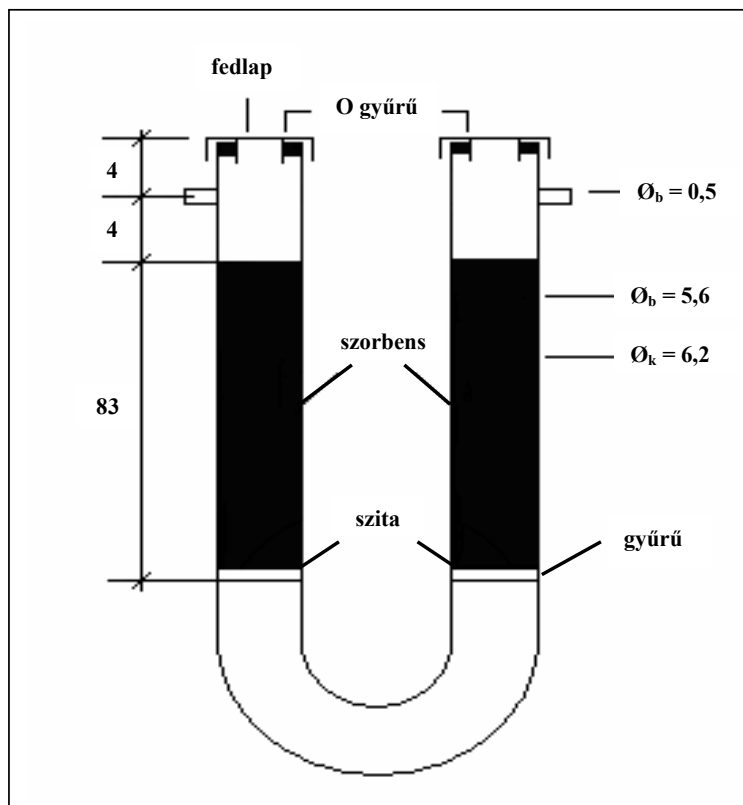
$$\text{ágy keresztmetszete } F = r^2 \pi = 2,925^2 \times \pi = 26,87 \text{ cm}^2$$

$$\text{gáz be- és kilépő keresztmetszete } F = 7,8 \times 10^{-3} \times 26,87 = 0,209 \text{ cm}^2$$

$$\text{gáz be- és kilépő vezeték átmérője } D = 0,5 \text{ cm}$$

- A modellszűrő légforgalma 0,44 cm/s homlokzati áramlási sebesség mellett  
 $Q = v \times F = 0,44 \times 26,87 = 11,8 \text{ cm}^3/\text{s}$ , azaz 43 dm<sup>3</sup>/h
- Adsorbens térfogata a modell szűrőágy egy egységében  
 $m = 2 \times 83 \times 26,87 = 4.460 \text{ cm}^3 = 4,46 \text{ dm}^3$

A modellszűrő egy egységét a 4.9. ábra szemlélteti.



4.9. ábra

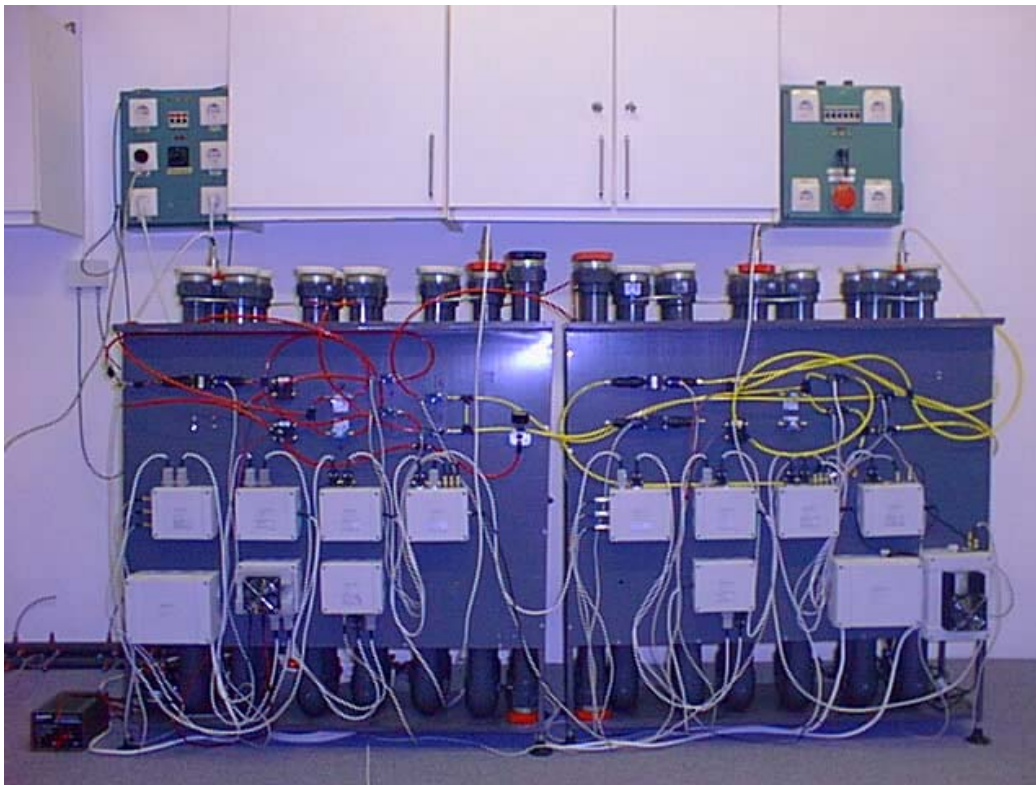
#### Modell szűrőágy egy egységének felépítése

A modell szűrőágy fényképe a 4.10. ábrán, felépítésének és kapcsolásának sémája a 4.11. ábrán látható.

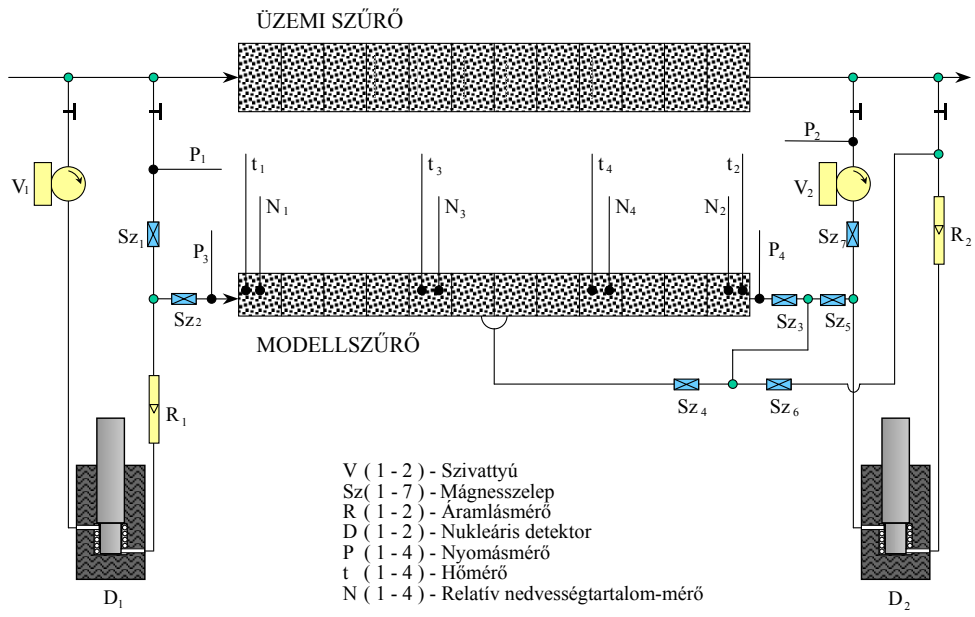


A berendezés főbb egységei:

- modell szűrőágy, amely 12 db egységből épül fel, biztosítva ezzel a 12 x 2 x 83 cm-es, azaz 19,92 m-es ágymélységet;
- a gáz áramlását biztosító membrán szivattyúk, amely szabályozó elektronikával vannak ellátva;
- az aktivitás mérésére szolgáló átáramlásos mintavevővel ellátott félvezető detektorok a mérő és vezérlő elektronikával;
- a vizsgálandó gáz áramlási útvonalát biztosító szelepek és azok vezérlését biztosító elektronika;
- a modellágyakban elhelyezett hőmérséklet és relatív nedvességmérő érzékelők a jelátalakító elektronikával; a főág és modellágy be és kimenő nyomásának mérésére alkalmas érzékelők a jelfeldolgozó elektronikával;
- a gázáramlás mérők a jelfeldolgozó elektronikával;
- az egyes szenzorok jeleit soros vonalon lekérdező PC, amely a rendszer vezérlését, és az adatok különböző szempontok szerinti feldolgozását is elvégzi.



**4.10. ábra**  
**Modell szűrőágy képe**



4.11. ábra. Modell szűrőágy kapcsolási rajza

#### 4.4.2. Adsorbens kiemelésére alkalmas berendezés

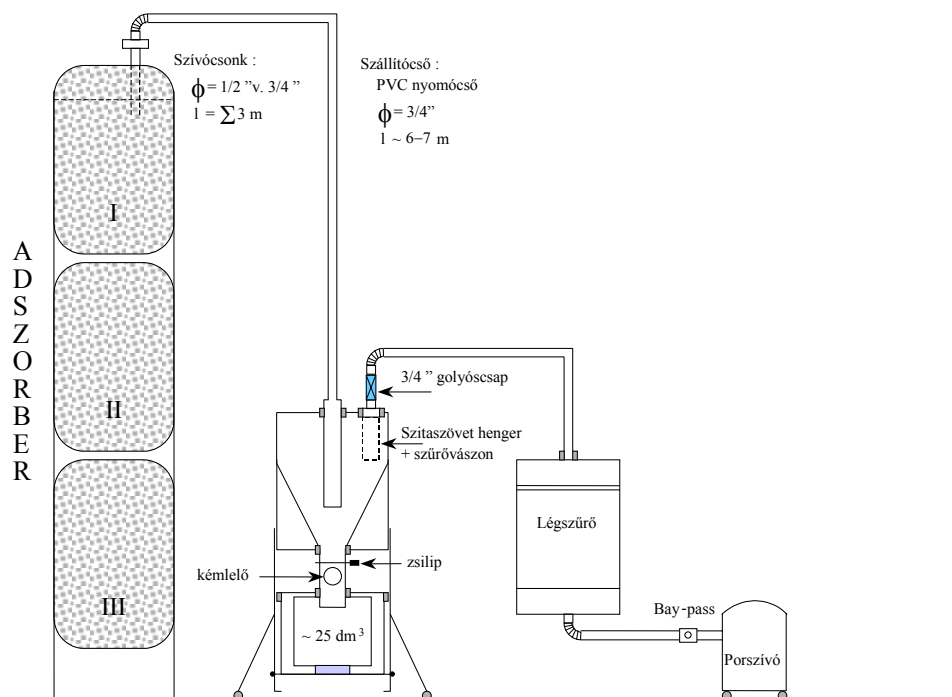
A feladat egy olyan berendezés kialakítása volt, amely alkalmas az üzemi adszorberekből - amelyeket előzetesen mintavételi csonkokkal láttak el - 20-25 dm<sup>3</sup> adszorbens kiemelésére. A mintavételi hely a padozattól számítva kb. 7-8 m magasan található a 01TS40N002 és 02TS40N002 adszorberek (a 01TS az 1. és 2., a 02TS a 3. és 4. ikerblokkra közös gáztisztító rendszer egy-egy szűrőágának adszorberei) 1., 6. és 12. tartályán. A kiemelendő szorbens fajlagos aktivitása a szűrőág használatát követő un. hűtési időtől függ.

Az adott aktivitást tartalmazó szorbens mintavételezésénél csak olyan berendezés alkalmazható, amely biztosítja, hogy a szorbens finom pora nem jut a légterbe.

A fentiek figyelembevételével a 4.12. ábrán sematikusán ábrázolt kiemelő berendezést terveztem meg és alakítottam ki.

A berendezés főbb részei:

- részecske leválasztó
- mintatartó
- légszűrő
- vákuumot biztosító porszívó



4.12. ábra  
Szorbenskiemelő berendezés

### 4.4.3. Mintavétel

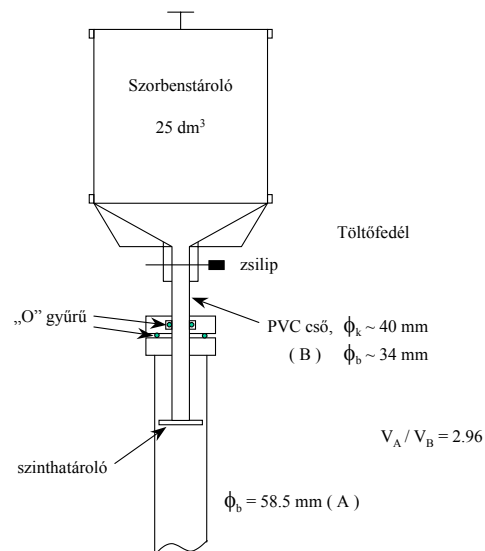
A 01TS40N002 és 02TS40N002 adszorbereken kiépített mintavételi csomkokon keresztül az 1., 6., 12. adszorber tartályból a 4.4.2. pont szerint kialakított berendezéssel 20-20 dm<sup>3</sup> szorbensmintát vettem, amit 25 dm<sup>3</sup>-es, jól zárható műanyag hordóban tároltam.

A minták azonosítója:

01TS40N002/1	02TS40N002/1
01TS40N002/6	02TS40N002/6
01TS40N002/12	02TS40N002/12

### 4.4.4. A modell szűrőágy kialakítása

A modell szűrőágy szorbens tartó csöveibe a 4.13. ábrán látható töltő berendezés segítségével töltöttem be a 4.4.3. pontban megadott adszorberekből származó, valamint a friss aktívszenet. A csövekbe töltött szenet ütögetéssel tömörítettem, és magasságát 83 cm-re állítottam be, amely megegyezik az üzemi szorbens ágy mélységével az egyes tartályokban.



4.13. ábra

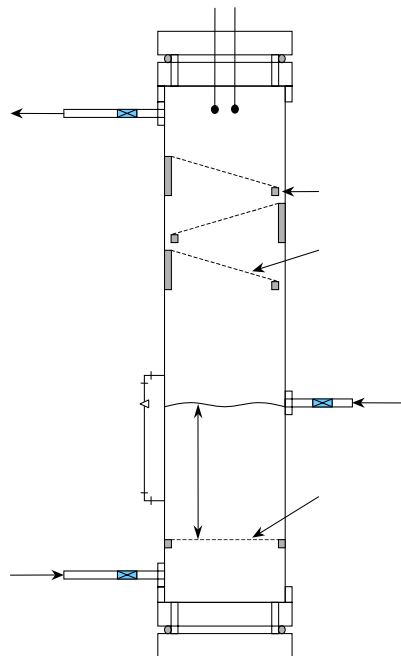
Szorbenstöltő berendezés a modell szűrőágy kialakításához

#### 4.4.5. Modellágyak kondicionálása

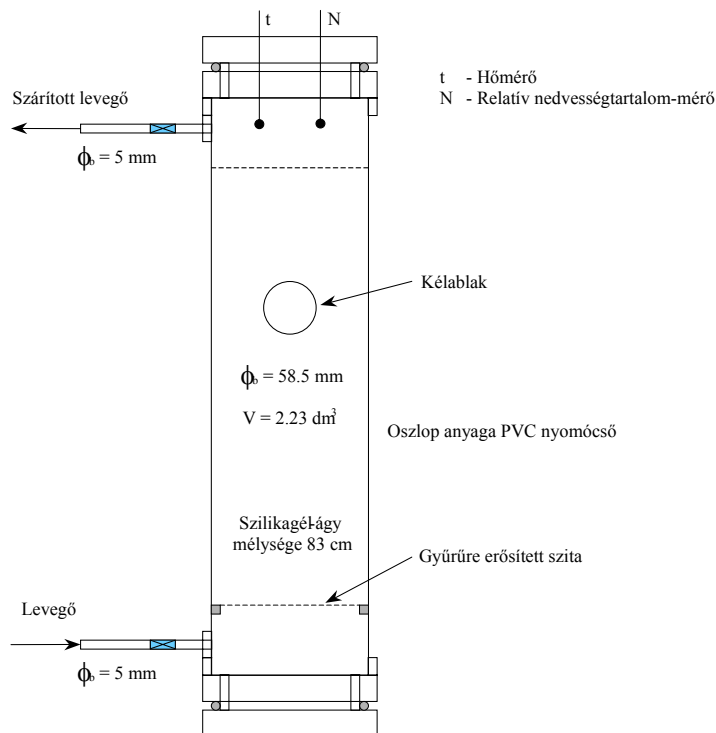
A modellágyban lévő szorbens kondicionálása adott relatív páratartalmú levegővel végezhető el.

A levegő kívánt relatív nedvességtartalmát nedvesítő és szárító berendezéssel biztosítottam. A 95-98 %-os relatív nedvességtartalmat biztosító berendezés sematikus felépítését a 4.14. ábra mutatja be. Az oszlopban lévő vizen keresztül levegőt buborékolttam át. A levegő eloszlását sűrű szövésű szita biztosította. A levegővel elragadott vízcseppeket ferdén elhelyezett szita-szövet tartotta vissza.

A levegő szárítására szilikagéllal töltött oszlopot alakítottam ki, amely alkalmas a levegő relatív nedvességtartalmának 40-50 %-ról mintegy 5 %-ra csökkentésére. A töltet kapacitása a kémlelő ablakon keresztül követhető, mivel a  $\text{CoCl}_2$ -dal impregnált szilikagél-ágy kék színből rózsaszínűre vált a nedvesség felvétele közben. A szárító oszlop sematikus felépítése az 4.15. ábrán látható.



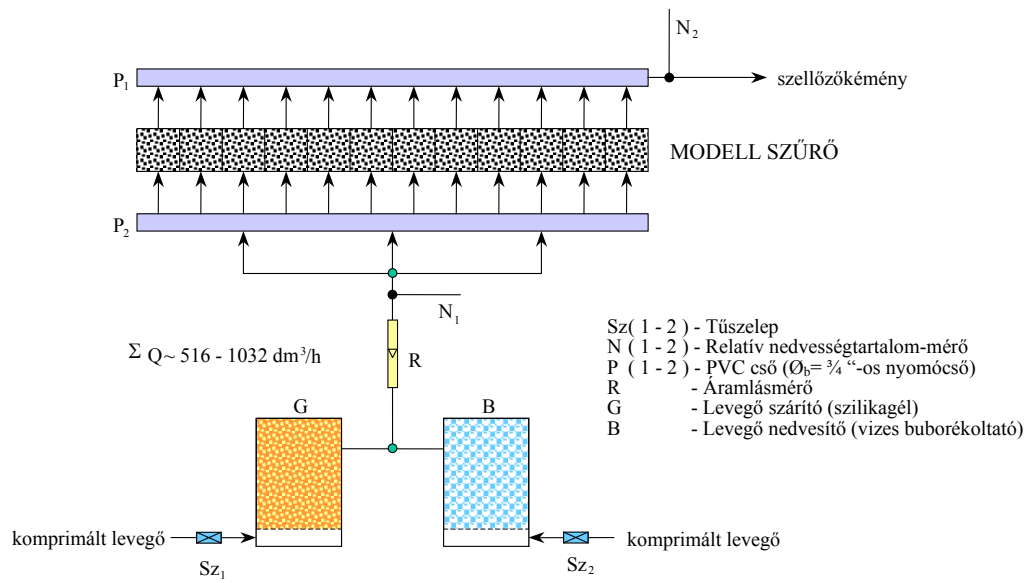
4.14. ábra  
Levegő nedvesítő berendezés



**4.15. ábra**  
**Levegő szárító berendezés**

A modell szűrőágyakban elhelyezett aktív szén szorbens víztartalma, amely számottevően befolyásolja a nemesgázokra vonatkozó retenciós tulajdonságait, a rajta áthaladó gáz relatív nedvességtartalmától függ. A szén víztartalmának beállítását, azaz kondicionálását az ismertett nedvesítő és szárító egységek segítségével végeztem el, amelyeket a 4.16. ábrának megfelelően kapcsoltam a modell szűrőágyakhoz.

A kondicionáló levegő nedvességtartalmát az ábrán feltüntetett helyen elhelyezett elektronikus relatív nedvességtartalom mérővel követtem ( $N_1$  ill.  $N_2$ ). Az adott nedvességtartalmú levegőt a modellszűrő egységeire párhuzamosan kapcsoltam, amely biztosította, hogy a szorbensen az adott légnedvesség-tartalomnak megfelelő egyensúly rövidebb időn belül alakuljon ki.



4.16. ábra. Modell szűrőágyak kondicionálásának kapcsolása

#### 4.4.5.1. A modellágy kondicionálása inaktív körülmények között.

A modellágyat feltöltöttem a Microcarb TH5 típusú aktív szénrel (gyártó: CarbonLink, UK) és 600 dm<sup>3</sup>/h légforgalom mellett két különböző nedvességtartalmú levegőt vezettem rajta keresztül. A szén eredeti nedvességtartalma méréseim szerint 4 %-nak adódott, amit egyensúlyi állapotban ~34 %-os relatív nedvességtartalmú levegő biztosít. Ezért először 20 %-os relatív nedvességtartalmú levegőt vezettem keresztül rajta addig, míg a bemenő és kimenő relatív nedvességtartalom megegyezett.

Az egyensúly rendkívül nehezen állt be, mintegy 8-10 napot igényelt, amikor a szén nedvességtartalma már kb. 2,5 %-ra csökkent. Ezt követően 35 %-os relatív nedvességtartalmú levegőt vezettem a szénágyon keresztül, melynek hatására a szén víztartalma újból 4 %-ra növekedett.

#### 4.4.6. Minősítő mérések

A minősítő méréseket a modell szűrőágy és a technológiai adszorberek párhuzamos üzemeltetésével végeztem el. A minősítés alatt az alábbi paramétereket mértem:

- technológiai adszorber és modell szűrőágy be- és kimenetén a gáz izotópszелеktív aktivitáskoncentrációja
- a technológiai adszorber bemenetén a gáz hőmérsékletét és relatív nedvességtartalma
- a modell szűrőágy be- és kimenetén a nyomása ( $\Delta P=0,01-0,02$  bar)
- A modell szűrőágy be- és kimenetén, valamint az 5. és 9. adszorber tartályban a gáz hőmérséklete és relatív nedvességtartalma

A technológiai adszorberek terhelését az üzemi rendszerek szolgáltatták.

##### 4.4.6.1. Technológiai ágak mérései

A mérési helyek megfelelő azonosíthatóságához összefoglalom a technológiai jelölések rendszerét a gáztisztítók vonatkozásában. Erre korábban már néhányszor utaltam. A jelölések első négy karaktere azonosítja a gáztisztító rendszert (a 01TS az 1. és 2., a 02TS a 3. és 4. ikerblokkra közös gáztisztító rendszer). Az ikerblokkokat szokás I. kiépítésnek (1. és 2. blokk), illetve II. kiépítésnek (3. és 4. blokk) is nevezni. A következő két karakter (40, 50, 70) az adott rendszer ágait azonosítja. A következő négy karakter (N002) a szűrőágakban üzemelő adszorbert jelöli. A 01TS40N002 jelölés tehát az 1. és 2. ikerblokkra (azaz I. kiépítés) közös gáztisztító rendszer első szűrőágában üzemelő aktív szén adszorbert jelöli.

A 4.6. sz. táblázat mutatja az adott átlagos terhelés esetén az egyes technológiai adszorbereken mért (töltet SZKT-3 aktív szén), Kr-85m-re vonatkozó retenciós időket. A mintegy egy hetes mérések során a kimeneten a Xe-izotópok frontja nem voltak érzékelhető. A szűrősorra belépő gáz átlagos relatív nedvességtartalmát és hőmérsékletét a modell szűrőágyba telepített mérőszondák mérték. A 02TS70N002 adszorber mérésekor a modell szűrőágyon mérést nem



végeztem, így ezek az adatok ott hiányoznak. A 01TS50N002 adszorberen kétszer is végeztem méréseket, így a vonatkozó adatok is kétszer szerepelnek (az adszorber azonosítója utáni /1 és /2 jelölés az ugyanazon adszorberen végrehajtott különböző méréseket jelöli).

Az üzemi mérések kg/h egységben megadott terhelési értékét a nyomás és a hőmérséklet függvényében számítottam át m<sup>3</sup>/h egységre.

Ahhoz, hogy a retenciós időket egymással és a műszaki tervben megadott kritériummal össze lehessen hasonlítani, át kell őket számítani azonos terhelésre. A táblázatban megadom a mért retenciós időknél a műszaki tervben 10 m<sup>3</sup>/h terhelésre megadott, Kr-ra előírt 72 órás retenciós időre vonatkozó százalékos értékeit (relatív retenciós idő).

**4.6. táblázat**  
**Technológiai szűrőágyak mérési eredményei**

Adszorber	Bemenő gáz rel. nedv. [%]	Bemenő gáz hőm. [°C]	Átlagos terhelés [kg/h]	Átlagos terhelés [m <sup>3</sup> /h]	Retenciós idő Kr-85m [h]	Relatív retenciós idő [%]
02TS40N002	9,58	23,0	9,31	7,95	39,4	43,5
02TS50N002	7,40	23,5	9,13	7,80	38,9	42,1
02TS70N002	-	-	9,38	8,01	39,0	43,4
01TS40N002	7,50	23,5	11,01	9,40	35,9	46,9
01TS50N002/1	7,00	23,8	12,93	11,05	31,6	48,5
01TS50N002/2	8,00	24,0	13,39	11,44	31,1	49,4
01TS70N002	7,00	24,1	15,53	13,27	33,0	60,8

#### 4.4.6.2. Modell szűrőágyak mérései

A modell berendezéssel végzett mérések eredményeit a 4.7. sz. táblázat foglalja össze.

**4.7. táblázat**  
**Modell szűrőágyak mérési eredményei**

Adszorber	Szén típus	Bemenő gáz rel. nedv. [%]	Bemenő gáz hőm. [°C]	Szén átlagos nedv. tart. [%]	Szén-ágy tömege [kg]	Terhelés [dm <sup>3</sup> /h]	Ekvivalens terhelés [m <sup>3</sup> /h]	Retenciós idő Kr-85m [h]	Relatív retenciós idő [%]	k [cm <sup>3</sup> /g]
02TS40N002	SZKT-3	9,58	23,0	4,4	21,1	29,8	11,1	33,8	52,2	47,7
01TS50N002/3	SZKT-3	8,00	24,0	5,0	21,1	30,0	11,2	37,7	58,7	53,7
01TS50N002/1	SZKT-3	7,00	23,8	2,0	21,1	29,9	11,2	36,1	56,1	51,3
01TS50N002/2	TH5	8,00	24,0	4,0	26,0	30,0	11,2	31,8	49,6	36,7
01TS40N002	TH5	7,50	23,5	4,0	26,0	30,0	11,2	36,7	57,2	42,4

A 4.7. táblázatban feltüntettem, hogy a mérés melyik adszorberre kapcsolva történt, és az adott esetben a modellágy milyen típusú szenet tartalmazott. Az SZKT-3 szén esetében megadtam a mintavételezés utáni mérésekből számítható átlagos nedvességtartalmat is. A friss Microcarb TH5 típusú aktívszén víztartalma 4 %-nak adódott a laboratóriumi mérések alapján, ami a gyártó által maximálisan megengedett 5 % értéknél kisebb.

A modellágyon átáramló gáz térfogatáramát  $30 \pm 1 \text{ dm}^3/\text{h}$  értékre szabályoztam. A táblázatban  $\text{m}^3/\text{h}$  egységekben feltüntetett, un. ekvivalens terhelés a modellágy és a valós szűrő méretarányát figyelembe véve, a modellágyon mért átlagos térfogatáramnak a valós technológiai ágon megfelelő érték.

A táblázatban megadtam még a Kr-85m izotópra mért retenciós időket, a relatív retenciós időket, valamint a dinamikus adszorpciós tényező (4.15) egyenlet alapján számított értékeit is.

#### **4.4.6.3. A mérési adatok értékelése**

A 4.6. sz. táblázat adataiból látható, hogy a 3.-4. blokkon mért adszorberrek (02TS) eredményei jó egyezést mutatnak, mind az átlagos terhelés, mind a mért retenciós idő tekintetében.

Az 1.-2. blokki adszorberreken (01TS) mért terhelési értékek és retenciós idők már jobban szórnak. Az I. kiépítésen (01TS) végzett mérések eredményei kvalitatíve azonban hasonló eredményt mutatnak a II. kiépítésen (02TS) mért értékekkel.

A mérési módszer megbízhatóságát igazolja, hogy a 01TS50N002-es ágon végzett mérések (4.6. táblázat: 01TS50N002/1 és 01TS50N002/2) eredményei hibahatáron belüli egyezést mutatnak.

A modell szűrőágy reprezentativitásának megfelelése megítélhető azon mérések összevetéséből, ahol az adszorberrel párhuzamosan az (adszorberből mintavételezett) SZKT-3 szénrel töltött modell szűrőágyon is történt mérés. A 4.6. és 4.7. táblázatban ezek a 01TS50N002/1 és 02TS40N002 adszorber jelölésekhez tartozó mérések. Az adszorberen (4.6. táblázat) és a modell szűrőágyon (4.7. táblázat) mért relatív retenciós idők alapján (43,5 % ill. 52,2 % a 02TS40N002, és 48,5 % illetve 56,1 % a 01TS50N002/1 esetében) megállapítható, hogy a modellel végzett mérési eredmények mintegy 10 %-kal magasabbak a főágon kapott eredményeknél. Ez az eltérés valószínűleg a modellágy egyenletesebb terheléséből és az alkalmazott aktív szén mintavételezés bizonytalanságából adódik. Összességében megállapítható, hogy a modell szűrő 10%-os bizonytalanságon belül reprezentálja az üzemi szűrőt, amely nagyon lényeges a továbbiakban esetlegesen felmerülő minősítési vizsgálatok szempontjából.

#### **4.4.7. Következtetések**

A modell szűrőágyban végzett mérések eredményeiből az alábbi következtetéseket lehetett levonni:

A 2 %, 4,4 % és 5 %-os nedvességtartalmú SZKT-3 aktív szén minták dinamikus adszorpciós tényezője nem tér el számottevően (51,3, 47,7 és 53,7  $\text{cm}^3/\text{g}$ ). Az irodalom [4-15] szerint ezek

az értékek egy olyan 4-5 %-os nedvességtartalmú aktív szén teljesítményének felelnek meg, amelynek dinamikus adszorpciós tényezője száraz állapotban  $k = 90 \text{ cm}^3/\text{g}$ . A  $k$  értéke a víztartalom növekedésével erősen csökken, 2 % nedvességtartalom már mintegy 20 %, 4-5 % nedvességtartalom már 50 % körüli teljesítmény csökkenést eredményez.

Ha egy olyan új szenet alkalmaznánk, amelyre szárazon a dinamikus adszorpciós tényező értéke kriptonra  $k = 90 \text{ cm}^3/\text{g}$ , xenonra  $1.400 \text{ cm}^3/\text{g}$ , akkor a rendszerbe belépő 6-8 %-os relatív nedvességtartalmú levegő azt 1-2 %-ra nedvesítené, amely hatására a  $k$  értéke kripton esetében  $75 \text{ cm}^3/\text{g}$ , xenon esetében  $1.150 \text{ cm}^3/\text{g}$  körülire csökkenne. Ha ebből kiszámoljuk a retenciós időket a kritériumban megadott  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  terhelés és  $0,5 \text{ g}/\text{cm}^3$  halmazsűrűség felhasználásával ( $m_{\text{szén}} = 10,08 \text{ t}$ ), akkor kriptonra 72 óra, xenonra 1.150 óra körüli értékeket kapunk. Véleményem szerint ezzel az okfejtéssel magyarázhatóak a műszaki tervben meghatározott kritériumok.

A tapasztalatok alapján a fenti kritériumok teljesítése csak elméletileg lenne megvalósítható teljesen száraz új szén alkalmazásával. A gyakorlatban ez nem megvalósítható, hiszen egyrészt a kereskedelemben kapható aktív szenek már eleve tartalmaznak valamekkora nedvességet, másrészt a szűrőre áramló gáz relatív nedvességtartalmát ipari körülmények között nem lehet nullára csökkenteni, így az az esetlegesen teljesen kiszáritott aktív szenet ismét nedvesíti.

A Microcarb TH5 típusú friss aktív szénre - amelynek nedvességtartalma 4 % - a dinamikus adszorpciós tényező értéke a mérések szerint  $36,7$  illetve  $42,4 \text{ cm}^3/\text{g}$ , amely gyakorlatilag megegyezik a hasonló nedvességtartalmú (4,4 %) SZKT-3 szénre mért értékkel ( $47,7 \text{ cm}^3/\text{g}$ ), és megfelel a szén nedvességtartalmából következő, a gyártó által száraz állapotra megadott dinamikus adszorpciós tényező ( $95 \text{ cm}^3/\text{g}$ ) mintegy 50 %-kal csökkentett értékének.

Az üzemi adszorberek retenciós tényezői a korábbi mérésekhez képest számottevően nem változtak, de az előírt kritériumokat teljesíteni nem tudták.

A szűrésre kerülő gáz relatív nedvességtartalma 6-8 %, amely megfelel a követelményeknek. (Az irodalmi adatok alapján ezzel 1-2 %-os nedvességtartalmú szén tart egyensúlyt).

A friss TH5 típusú aktív szén és az SZKT-3 aktív szén modellágyas vizsgálati eredményei arra utalnak, hogy a retenciós idő és a dinamikus adszorpciós tényező tekintetében teljesítményük gyakorlatilag azonosnak tekinthetők.

Előbbiek alapján a főépületi gáztisztítók adszorbereinek töltetcserejét nem volt célszerű végrehajtani, az új töltet sem biztosította volna a hatásági teljesítmény kritériumok elérését.

## **4.5. A szűrőágak helyszíni szárítási módszerének kifejlesztése**

A korábbi retenció mérések eredményei arra utaltak, hogy az üzemi szűrőágak nem teljesítik az elvárásokat. Ezt követően az adszorbereken mintavételi helyet alakítottunk ki és megmintáztam a töltetet. A töltet mérési eredményei arra utaltak, hogy az aktív szén fajlagos felülete számottevően nem változott, BET technikával mérve  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$  körülnek adódott, ezzel nem magyarázható az adszorpciós hatások számottevő csökkenése, mivel egy új szén mindössze 10-15 %-kal nagyobb felülettel rendelkezik.

Az elvégzett modell vizsgálatok bizonyították, hogy az alacsony retenciós teljesítményt elsősorban az adszorberek töltetének indokolatlanul magas nedvességtartalma okozza, amely a dinamikus adszorpciós tényező jelentős csökkenésével jár. Az aktív szén nedvességtartalma és a dinamikus adszorpciós tényező közötti összefüggést a 4.3. és 4.4. ábrák szemléltetik.

Ezt követően két lehetőség adódott az adszorberek hatásosságának növelésére:

- A jelenlegi töltet retenciós tulajdonságának javítása szárítással
- Töltetcsere végrehajtása

Az elvégzett modell kísérletek bebizonyították, hogy töltetcsere végrehajtásával nem biztosítható az adszorberek retenciós képességének növelése. A jelenlegi töltetek viszonylag alacsony hatásosságát nem öregedésük, hanem jelentős nedvességtartalmuk okozza. A töltetek hatásosságának növelését tehát elsősorban nedvességtartalmuk csökkentésével lehet elérni. Természetesen később az adszorberekre áramló gáz megfelelő szárításával el kell érni, hogy az aktív szén nedvességtartalma ne növekedjen meg ismételten.

A szárítás számba vehető lehetőségei az alábbiak voltak:

- Száraz, szobahőmérsékletű levegővel légköri nyomáson
- Száraz, szobahőmérsékletű levegővel csökkentett nyomáson
- Száraz meleg levegővel

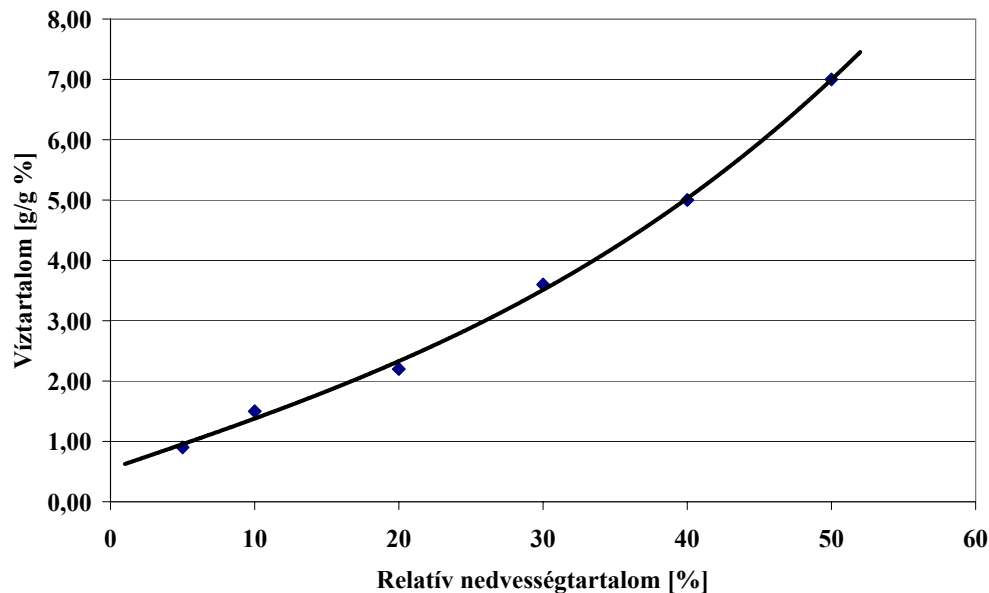
#### **4.5.1. Az aktív szén szárításának elvi alapjai és módszerei**

A különböző összetételű gázelegyek esetében az adszorpció során versengő reakciók lépnek fel [4-21]. A szűrendő gáz zömében nitrogén, de mivel a hidrogén égetése során levegő felesleget alkalmaznak, megtalálható az oxigén, valamint a levegő egyéb alkotói, így a nemesgázok is, és természetesen az égéstermék, a víz is. A „forrástágból” származó, nagy aktivitást képviselő radioaktív nemesgázok kémiai koncentrációja gyakorlatilag elhanyagolható, mivel hordozómentes állapotban keletkeznek.

A gáz víztartalmát kondenzátoron, aeroszol szűrőn és zeolit szárítón átvezetve nagyrészt kivonják, a jelenlegi technológiai előírások betartása mellett a levegő víztartalma (ha a harmatpont  $\leq -30$  °C) nem nagyobb, mint  $281 \text{ mg/m}^3$ . Ebben az esetben a szűrősor bemenetéről vett gáz relatív nedvességtartalma 23-24 °C-on kisebb, mint 10 %. Ebből a nedvesség tartalmú levegőből a szénágy maximálisan 1,5 % vizet vesz fel, illetve ha a szén nedvesebb, akkor vizet ad le. Ez egyben arra is utal, hogy az oszlopra menő levegő relatív nedvesség tartalma határozza meg a szénen megkötődött víz mennyiségét (4.17. sz. ábra). Az ábrán látható, hogy a 10 % alatti relatív nedvességtartalmú levegő dinamikus körülmények között 1,5 % alatti víztartalmú szénnel van egyensúlyban. Az egyensúlyi állapot a kis légforgalom ( $5-15 \text{ m}^3/\text{h}$ ), azaz  $0,14-0,41 \text{ cm/s}$  lineáris gázsebesség mellett a 20 m mélységű szénágyon biztosított.

Az aktív szénen a semleges gázok és a víz is felületi adszorpció útján kötődnek meg, azaz a szilárd test felületén lévő molekulákat megközelítve, azokkal gyenge kapcsolatot létesítenek (adhézió). A gáz vagy gőz molekulái az adszorbens szilárd felületéhez ütköznek, energiájukat leadják, amely az adszorbens molekuláinak gerjesztésére fordítódik. Ez a folyamat hőfejlődéssel jár, azaz exoterm. A nyomás növelése adott hőmérsékleten az adszorpció növelésével

jár, de nagyobb nyomáson a molekulák közötti kohéziós erő megnövekedése ellentétes hatást vált ki. Ha az adszorbens és adszorbeátum között kémiai kötés jön létre, kemoszorpcióról beszélünk, amely aktiválási energiát igényel, azaz spontán nem jön létre. A kemoszorpciót követően deszorpció rendszerint nem tud kialakulni, a felületet monomolekuláris réteg borítja be.



4.17. ábra

**SZKT-3 típusú aktív szén nedvességtartalmának függése a levegő relatív nedvességtartalmától.**

Az aktív szénen apoláris gőzök illetve gázok kötődnek jobban. A megkötődés mértéke természetesen egy gáz/gőz elegy esetében az alkotók koncentráció arányától is függ.

Az adszorpció és deszorpció folyamatok az ún. izotermákkal követhetők és az izoterma egyenletekkel írhatók le (Freundlich, Langumir-Polányi valamint Brunauer, Emmett és Teller). Gyakran tapasztalható, hogy az adszorpció és deszorpció értékpárjai eltérnek, az izotermákon hiszterézis alakul ki. A reverzibilis hiszterézist kapilláris kondenzációval lehet magyarázni, amely akkor alakul ki, amikor a több molekula vastagságyi réteg a szűkebb pórusokban, csatornáknak összeér, és meniszkuszt alkot. Ebben az esetben az adszorpció izotermágyon a felületi adszorpció és a kapilláris kondenzáció összhatása észlelhető, a deszorpció izotermán ennek fordítottja tapasztalható.

Az adszorbeátum négyszeres molekulaméreténél szűkebb pórusokban kondenzáció nem játszódik le. Ugyanaz a pórus a kis molekulaméretű vízgőzre a négyszeres molekulaméretnél nagyobb lehet, és a kondenzáció, így a hiszterézis létrejöhet, míg egy nagyobb molekula esetében hiszterézist nem tapasztalunk. Az aktív szén mikropórusaiban (0-2 nm) csak adszorpció lehetséges, de a mezopórusokban (2-50 nm) már vízre is bekövetkezik kapilláris kondenzáció

azaz hiszterézis. A makropórusokban (> 50 nm) már természetes a kapilláris kondenzáció, így hiszterézis is tapasztalható.

A gáztisztításra használatos aktív szén póruseloszlása széles határok között változik, ezért a víz megkötésének módja különböző lehet, azaz egyszerű adszorpció és kapilláris kondenzáció. A makrokapillárisokkal közlekedő mikrokapillárisok meniszkuszai a kapilláris nyomáskülönbségek miatt mindig a külső felületen maradnak, amíg a makrokapillárisok kiürülnek. A mikrokapillárisok felületén kialakuló gőzrésznyomás a kapillárisok jellemző méretétől függ, ezért a nagyobb méretű kapillárisokon párolgás, a kisebb méretűeknél kapilláris kondenzáció megy végbe.

A száradás folyamán a makrokapillárisok meniszkuszának behúzódásával egyidejűen a mikrokapillárisokban kapilláris kondenzáció megy végbe. Ennek értelmében a pórusos anyagban belül egyidejűleg folyadék és gőz alakban megy végbe a nedvességmozgás. A heteroporózus anyagban a nedvességmozgás termikus hatásra is létrejöhet, amikor a nedvességleadás sebessége a hőmérséklet gradienssel arányos.

A száradás folyamán a kapillárisokban lévő folyadék egyre csökken, majd a végén az adszorbens felületét vékony réteg borítja be. Ennek az adszorpciós kötésű nedvességnek a deszorpciója során, a falról a kapilláris rendszerbe kerülő molekulák diffúzió révén jutnak a külső felületre.

A gőzmolekulák felületre kerülésében, a diffúzióban nagy szerepe van a molekulák szabad úthosszának, amely csökkentett nyomáson (0,01 bar) és 50 °C-on 4,28E-4 cm, atmoszférikus nyomáson (1 bar) és 50 °C-on 4,28E-6 cm. Ez azt jelenti, hogy a molekulák mozgási sebessége vákuumban két nagyságrenddel nagyobb. A különböző kötésű nedvesség, más mechanizmus szerint mozog, azaz a felületre kerülés sebessége is különbözik.

A fentiek alapján látható, hogy a pórusos adszorbens nedvességfelvételének és leadásának mechanizmusa meglehetősen bonyolult, összetett folyamat.

#### **4.5.2. Szárításra vonatkozó modell kísérletek**

A szárítási folyamat nyomon követésére a korábban megépített modell-berendezést úgy alakítottam át, hogy a szénágyon adott áramlási sebességgel száraz levegő legyen átbocsátható, kontrolált paraméterek mellett.

Ezután kísérleteket végeztem annak megállapítására, hogy az elméletileg lehetséges szárítási eljárások közül melyik a legmegfelelőbb az adszorberek szárításának elvégzésére.

##### **4.5.2.1. Szárítás 25 °C-os száraz levegővel**

A modell szénágy méretei és a szárítás paraméterei:

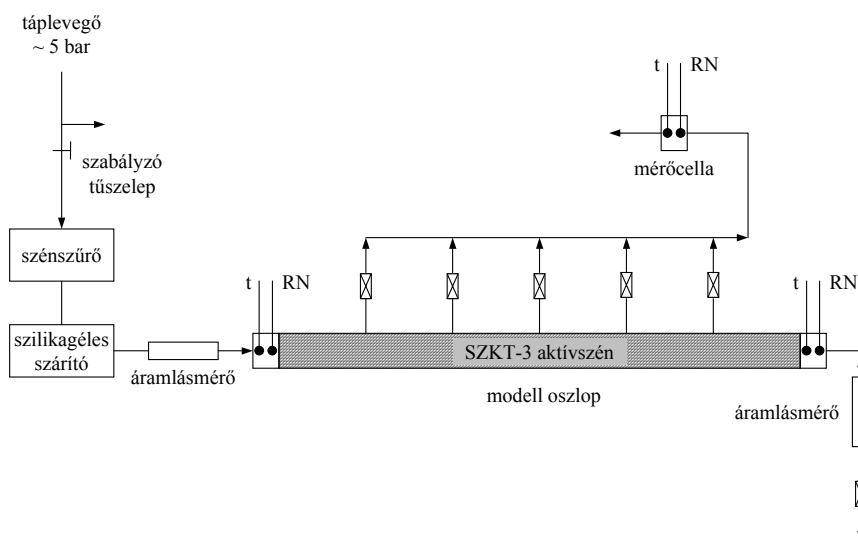
- A modellágy átmérője: 5,85 cm, azaz keresztmetszete 26,87 cm<sup>2</sup>
- Csatlakozások átmérője 0,5 cm, azaz keresztmetszete 0,209 cm<sup>2</sup>

- Légforgalom:  $\sim 75$  l/h, azaz  $\sim 20,8$  cm<sup>3</sup>/s (amely az üzemi szűrőre átszámolva 28 m<sup>3</sup>/h-nak felel meg)
- Lineáris áramlási sebesség: 0,77 cm/s
- Szénágy mélysége: 166 cm
- Szénágy megmintázása: 28 cm-enként
- Száritott levegő relatív nedvesség tartalma: 4 %; hőmérséklete: 25 °C
- Szűrőágyon kialakított nyomás: gyakorlatilag atmoszférikus

#### A száritás kivitelezése

A tápvezetékéből származó levegőt csökkentett nyomással száritott szénen és szilikagélen száritottam, majd adott áramlási sebesség mellett a szénágyon keresztülvezettem. Az átáramló levegő relatív nedvességtartalmát és hőmérsékletét mértem a szűrő be- és kimeneti oldalán, valamint az egyes részágynak után, követe ezzel az aktív szén száradási folyamatát.

A modell száritó berendezés sémája a 4.18. ábrán látható.



**4.18. ábra**

#### Modell száritás légekőri nyomáson

A levegő áramlási sebességét, hőmérsékletét és relatív nedvesség tartalmát elektromos érzékelőkkel követe, soros vonalon lekérdeve időnként a mérési adatokat, amelyeket számítógépen gyűjtöttem. A szénágy különböző mélységéből adott meghatározott időközönként levegő mintát vettem (az előzetesen beállított vezérlő program alapján), amit RN/t mérőcellába vezettem. A mintavétel idejét számítógéppel vezéreltem.

### A szénágy elkészítése

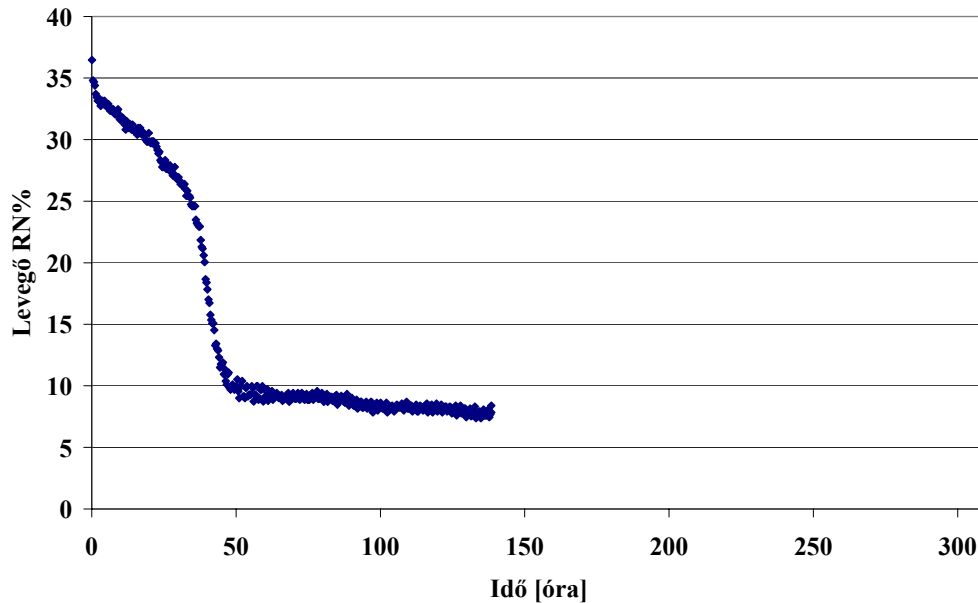
A 02TS40N002 adszorber 12. (utolsó) tartályából származó szénmintából rázott tömörítéssel készítettem el a modell szénágyat.

A betöltött szén térfogata:  $4,46 \text{ dm}^3$

Tömege:  $4,46 \times 0,47 = 2,1 \text{ kg}$

Nedvességtartalma  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ -os szárítás alapján:  $9,06 \%$ .

A modellágyról kijövő levegő relatív nedvességtartalmának időbeni változását az 1. leágazáson a 4.19. ábrán tüntettem fel.



**4.19. ábra**

#### **Szénágy száradási görbéje (1-es leágazás)**

Az első leágazás, azaz 28 cm-es szénágy után vett levegőminta relatív nedvességtartalmának változásából látható, hogy a szén száradása azonnal megindult, majd a  $\text{RN} = 25 \%$ -tól jelentősen felgyorsult. Ez minden mintavételi helyen hasonlóan játszódott le. A száradási görbe inflexiós pontja a vizsgált szénre  $\text{RN} = 17,5\%$ -nál van. Ezt a relatív nedvességtartalmú levegőt mintegy 2 %-os nedvességtartalmú szén hozza létre az áramló levegőben. Ezt követően a szén nedvesség leadásának sebessége csökken,  $\text{RN} = 10 \%$  alatt (kb. 1,5 % vizet tartalmazó szén) a nedvesség eltávolítása nagyon elhúzódik.

A szénágyat a szárítást követően megmintáztam és a szénminták nedvességtartalmát termikusan megmértem, amelynek eredményeit a 4.8. táblázat foglalja össze.



**4.8. táblázat**  
**Szénágy nedvességtartalma szárítás után**

Leágazás	Ágymélység (cm)	Szén nedvességtartalma (%)
1.	28	0,95
2.	56	0,90
3.	84	0,95
4.	112	1,14
5.	140	8,70
6.	168	8,70

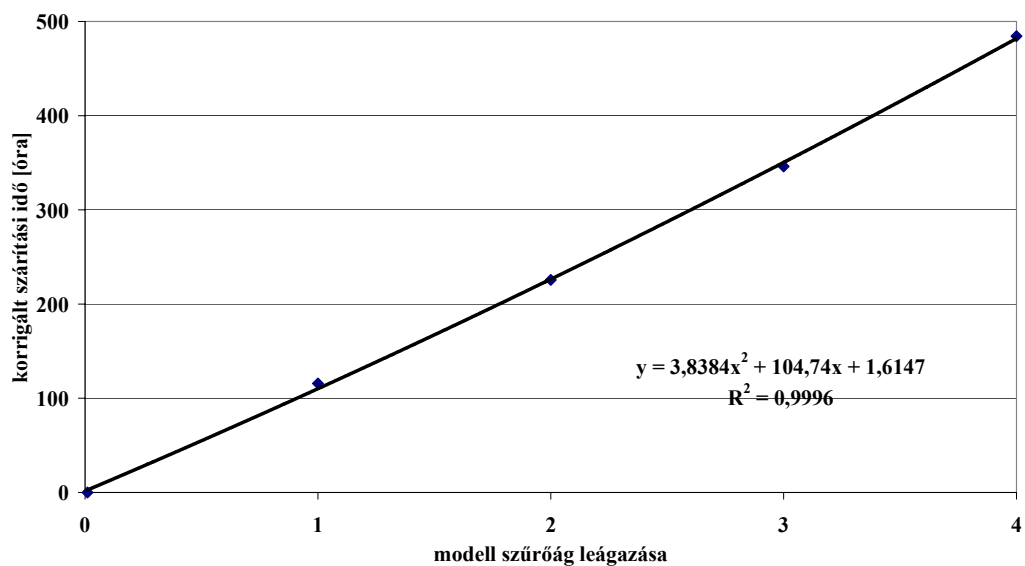
A táblázat adataiból látható, hogy 4 %-os relatív nedvességtartalmú levegővel végezve a szárítást, a 275 órás mérési idő alatt a szénágy kétharmadának (1.- 4. leágazás, 112 cm ágymélység) víztartalma 1 % körülire csökkent, és az utolsó két szakasz (5. - 6. leágazás) víztartalma az eredetihez képest nem változott.

A szárítási görbék lefutása alapján a 4.20. és 4.21. ábra ábrázolja a leágazásokhoz (ágymélység) tartozó szárítási időt az RN = 17,5 % és RN = 10 % relatív nedvességtartalmú levegőre (amellyel 2 és 1,5 % víztartalmú szén tart egyensúlyt) vonatkoztatva.

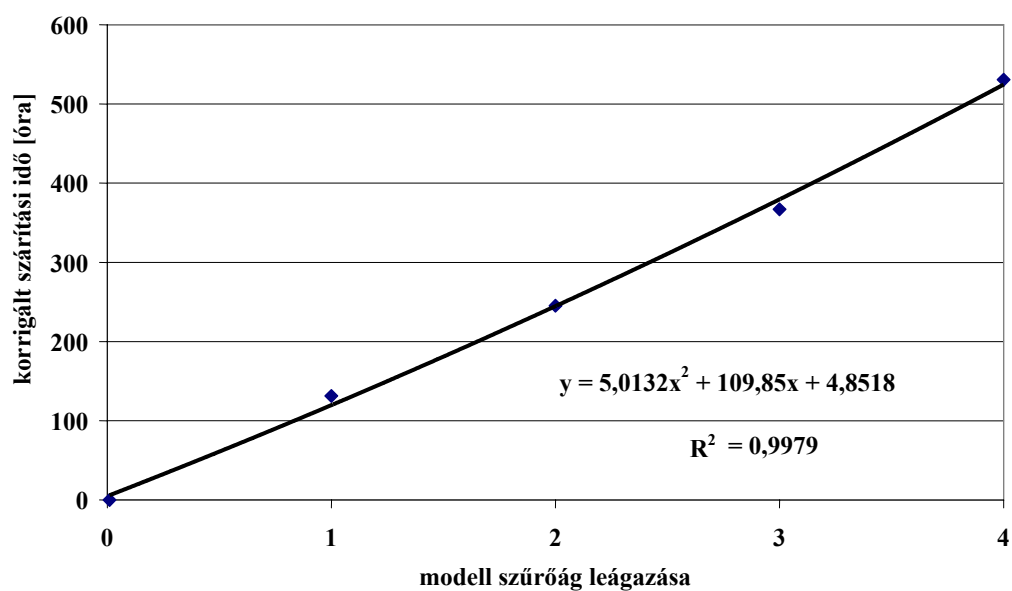
Az ábrák szerkesztéséhez felhasznált adatok a 4.9. táblázatban láthatók.

**4.9. táblázat**  
**Mért és számított szárítási idők, modell és üzemi szűrőágra.**

		Leágazás				Üzemi szűrőág
		1	2	3	4	
Ágymélység [cm]		28	56	84	112	1.992
Átlagos térfogatáram [dm <sup>3</sup> /h]		83	78	75	72	11.000
Szárítási idő [h]	RN=17,5%	41	86	138	200	-
	RN=10%	47	94	147	230	-
Korrigált szárítási idő [h]	RN=17,5%	116	226	346	484	27.441 (3,13 év)
	RN=10%	131	245	367	531	33.902 (3,87 év)



**4.20. ábra**  
**Korrigált szárítási idő a modellagy leágazásainak (mélységének)**  
**függvényében ( RN = 17,5% )**



**4.21. ábra**  
**Korrigált szárítási idő a modellagy leágazásainak (mélységének)**  
**függvényében ( RN = 10% )**

A szűrőágy mélysége, szárítási idő érték párojaira egy parabola volt illeszthető, amelyekre az ábrákon feltüntetett másodfokú egyenletek adhatók meg.

A korrigált szárítási idők alapján a másodfokú összefüggés segítségével számítottam a 17,5 % illetve 10 % relatív nedvességtartalmú levegőhöz, azaz 2 % illetve 1,5 % vizet tartalmazó szénhez tartozó szárítási időket 11 m<sup>3</sup>/h légforgalomra és a teljes adszorberre vonatkoztatva, amelyek értéke 3,13 év illetve 3,87 év.

A száraz levegős szárítás környezeti hőmérsékleten (25 °C) az alkalmazott légforgalom mellett nagyon kis sebességgel szárítja az adszorbert, ezért azokon számottevő retenció javulás nem várható. Ez a módszer tehát a nagy tömegű aktív szén szárítására nem alkalmas.

#### 4.5.2.2. Szénágy szárítása meleg levegővel

A szárítás kivitelezése a modell szűrőre aránylag egyszerű feladat. Az ágyra menő szárított levegőt kontakt elektromos kaloriferrel 150-200 °C-ra melegítettem, és 75-140 l/h (üzemi körülményekre átszámolva 28 m<sup>3</sup>/h ill. 56 m<sup>3</sup>/h) légforgalom mellett vezettem a szénágyra, amely a hőszigetelés ellenére lassan melegedett. Ezért számításokat végeztem, hogy meleg levegővel az adott légforgalom mellett mennyi idő alatt várható az üzemi adszorber mintegy 70-80 °C-ra melegedése. Az üzemi adszorber csak részben vannak szigetelve. Ha a nem szigetelt adszorber szabad felületét (mintegy 121 m<sup>2</sup>) számításba vesszük, az rendkívül nagy hűtőhatást fejt ki, gyakorlatilag a helyiséget fűtjük, amelyből a hő a szellőző rendszeren keresztül távozik.

A szénágy 25 °C-ról 75 °C-ra melegítéséhez szükséges hőmennyiség a hűtőhatástól eltekintve, az aktív szén fajhője alapján (0,2 kcal/kg/°C), 11.000 kg szorbenssel számolva:

$$11.000 \times 0,2 \times 50 = 110.000 \text{ kcal} = 460.548 \text{ kJ}$$

A levegő fajhője 0,24 kcal/kg/°C, Sűrűsége: 1,1846 kg/m<sup>3</sup>

A 110.000 kcal hőmennyiség beviteléhez szükséges 75 °C hőmérsékletű levegő:

$$\frac{110000}{0,24 \cdot 50} = 9.167 \text{ kg, azaz } 7.738 \text{ m}^3$$

Ha 10 m<sup>3</sup>/h légforgalommal számolunk, akkor 32 nap szükséges a szénágy felmelegítéséhez, ami a hőveszteség miatt gyakorlatilag kivitelezhetetlen.

A levegővel ill. nitrogénnel végzendő szénágy melegítés a technológiai rendszer jelenlegi kiépítése mellett azért sem valósítható meg, mert a zeolit szárító előtt van a kalorifer és a levegőt a szárítás után kellene felmelegíteni. Így a szárított levegő melegítése a technológiai rendszer átalakítása után lenne elvégezhető. Akkor is kétséges lenne az eredmény, hiszen csak

akkor vezethet az adszorber teljes regenerálásához, ha annak teljes tömegét sikerül felmelegíteni, mivel az ágy első szakaszáról felszabaduló vízgőz a hidegebb részekben újból lecsapódik.

Ez a szárítási eljárás a fentiek figyelembevételével, üzemi körülmények között szintén nem megvalósítható.

#### 4.5.2.3. Szénágy szárítása csökkentett nyomáson

A szénágy csökkentett nyomáson történő szárítására kialakított berendezést a 4.22. ábra mutatja.

A kísérletekhez felhasznált szén a 02TS40N002 adszorber 12. tartályából származott, amely a 150 °C-on végzett szárítás alapján 9,54 % vizet tartalmazott.

A modell ágy tömege: 2,1 kg

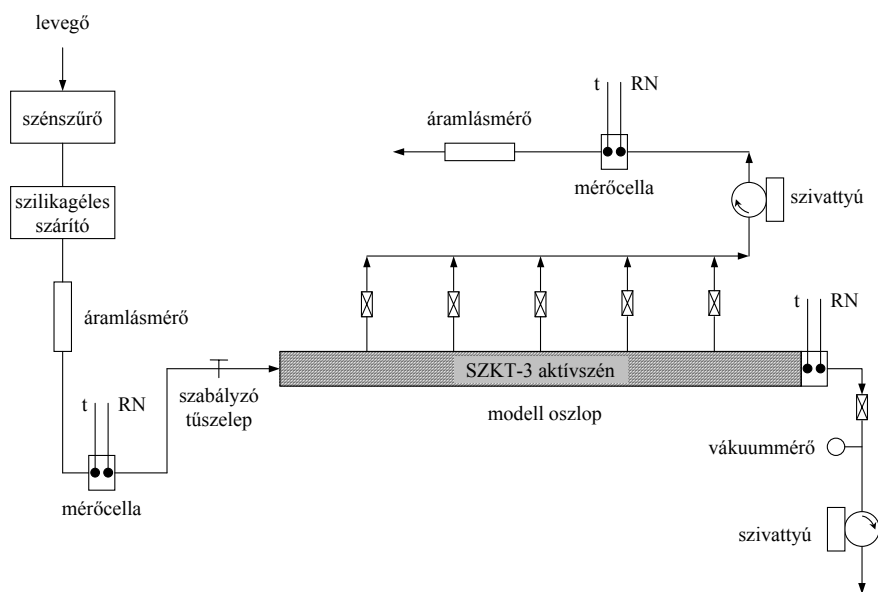
Térfogata: 4,5 dm<sup>3</sup>

Szárításnál alkalmazott nyomás: 0,1 bar (abszolút)

A szénágyra bocsátott levegő légforgalma: 30 l/h

Hőmérséklete: 25 °C

Relatív nedvesség tartalma: 3-4 %

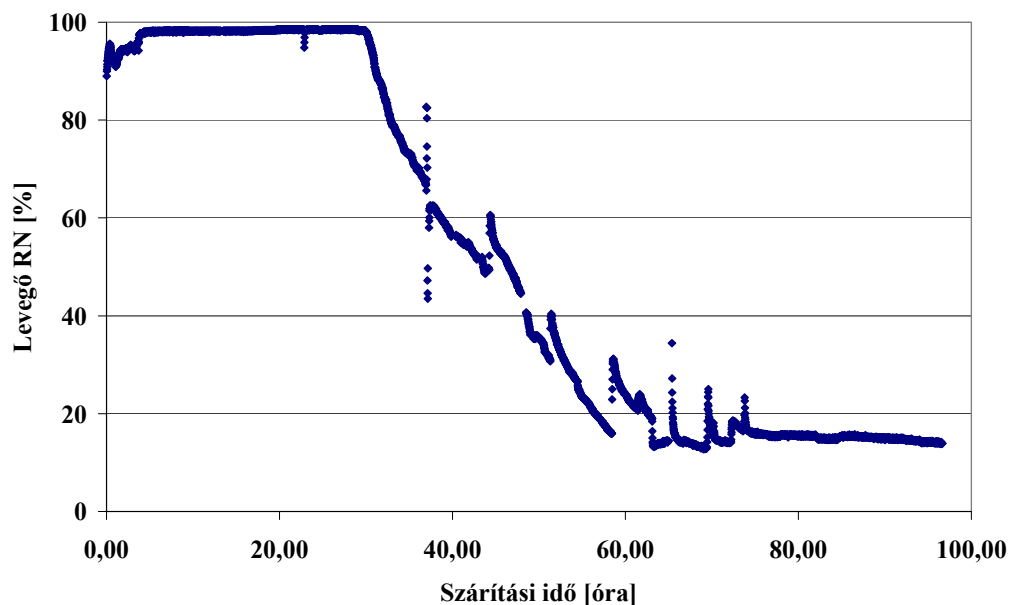


4.22. ábra

#### Modell szárítás csökkentett nyomáson

A modellágyat az 1. sz. leágazásnál megcsapoltam és időszakonként megmintáztam. A 28 cm-es ágymélységhez tartozó levegőminták relatív nedvességtartalmának mérése alapján kö-

vettem nyomon a szorbens ezen részének száradását. A szorbenságyról lejövő levegő relatív nedvességtartalmának időbeni változását a 4.23. ábra mutatja.



4.23. ábra

**Modell szárítás csökkentett nyomáson (1. sz. leágazás, ágymélység 28 cm)**

Az ábrán látható, hogy az első időszakban a szénágyról lejövő levegő relatív nedvességtartalma gyakorlatilag 100 %. A görbe ezen szakaszához 30 óra tartozik, amikor a szénen lévő víz nagyobb hányada eltávozik. A görbe további lefutása arra utal, hogy a mikrokapillárisokban lévő víz leadása itt is elhúzódik.

A modell oszlopot a szárítást követően megmintáztam és termikusan meghatároztam a szénágy nedvességtartalmát, melyet az ágymélység függvényében a 4.10. táblázat mutat be.

4.10. táblázat

**A szénágy nedvességtartalma az ágymélység függvényében**

Ágymélység (cm)	Szén víztartalma (%)
2	0,78
14	0,58
25	0,54
32	0,52
50	2,70
75	6,12

Az eredmények jól tükrözik, hogy a szénágy nemcsak az első leágazásnak megfelelő 28 cm-es mélységig száradt, hanem a további szakaszai is, azaz gyakorlatilag teljes mélységében. Az első leágazáshoz tartozó szénágy nedvességtartalma már 1 % alá csökkent, ami üzemi körülmények között nem szükséges, mivel a szénágy üzemeltetése 1,5 % víztartalmú szénnél jobbat nem igényel.

A normál nyomáson végzett szárításhoz képest, ahol 30-37 % relatív nedvességtartalmú levegő hagyta el a modellszűrőt, itt a 100 % relatív nedvességtartalmú levegő mintegy háromszor nagyobb mennyiségű vizet szállít el a szénágyról. Ha figyelembe vesszük, hogy a távozó levegő vízgőzre túltelített is lehet, ami ebben a szakaszban relatív nedvességtartalom mérésével nem észlelhető, akkor a szárítás ideje jelentősen lerövidülhet.

A száradási görbe alapján számolva a szénágy száradási ideje a kívánt mértékig ( $RN \leq 10\%$ ) mintegy 58 óra, de a vízgőz nagyobb része 30 óra alatt távozott el. Az oszlop száradását figyelembe véve az üzemi adszorber  $10\text{ m}^3/\text{h}$  légforgalommal üzemeltetve 45 nap alatt adná le a nedvesség nagy részét, és összesen 90 napot igényelne, hogy az aktív szén nedvességtartalma mintegy 1,5 %-ra csökkenjen. Az adszorberek egy részénél a széntöltet kevesebb nedvességet tartalmaz (kb. 4 %), így ezek szárítása rövidebb idő alatt elvégezhető.

#### **4.5.3. A szárítási modell kísérletekből levonható következtetések**

A modell kísérletek eredményei és a technológiai rendszer felépítésének figyelembe vételével a főépületi gáztisztító adszorbereinek szárítása érdemben csökkentett nyomáson végezhető el. A nyomás értékét a lehető legalacsonyabb értéken kell tartani, mert ezzel a szárítás határfoka növelhető, a szárításhoz szükséges időtartam csökkenthető.

## 4.6. Főépületi gáztisztító adszorberek szárítása

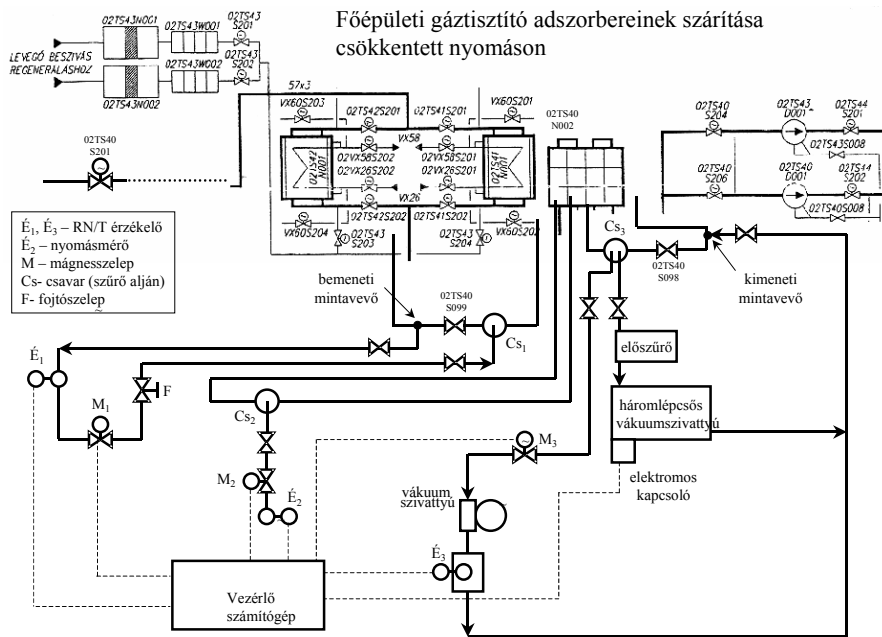
A modell kísérletek alapján kiválasztott módszerrel elvégeztem valamennyi üzemi adszorber szárítását. A tevékenység bemutatására ebben a részben a 02TS40N002 (ez a 3. és 4. ikerblokkra közös gáztisztító rendszer egyik szűrőágának adszorbere) adszorberen elvégzett szárítást és annak értékelését mutatom be.

A szárítás során alkalmazható minimális nyomás megállapítása érdekében szakértői vélemény készült, amelynek alapján az adszorberek elvben tökéletes vákuum alatt (gyakorlatban a tökéletes vákuum közelében) száríthatók, az adszorber tartályok ezt elviselik. Ennek megfelelően az aktív szén csökkentett nyomáson, száraz levegővel szárítható.

Az adszorber szárításának elvégzéséhez a technológiai rendszer egy részét használtam fel, kiegészítve egyedi berendezésekkel. A szárítás kapcsolási sémája a 4.24. ábrán látható. A programvezérlés blokksémáját a 4.25. ábra mutatja be.

Kiegészítő berendezések:

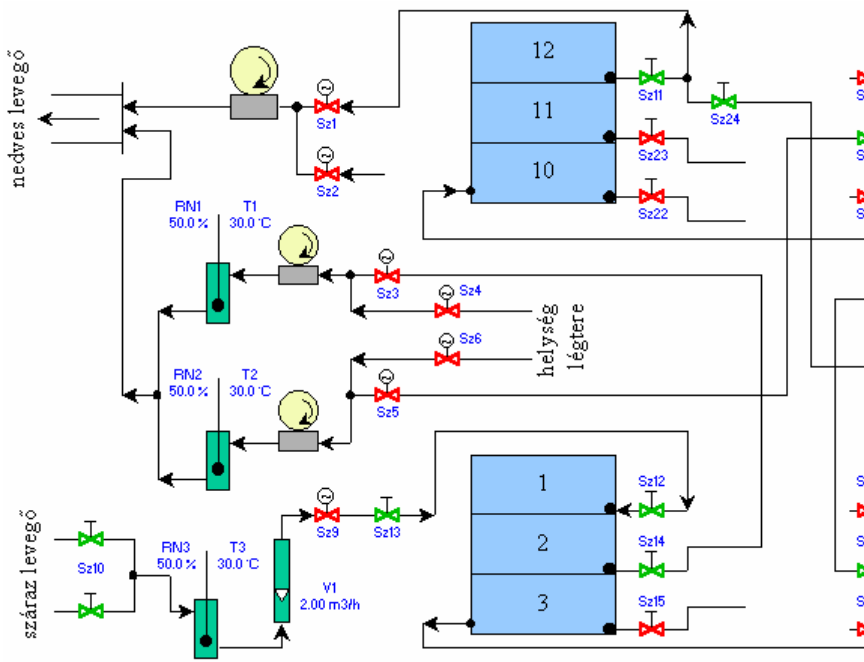
- Membránszivattyú, olajmentes, teljesítménye 9,7 m<sup>3</sup>/h, végnyomás 2 mbar (abszolút);
- Előszűrő, amely a vákuumszivattyú előtt van elhelyezve, feladata az esetlegesen előforduló részecskék leválasztása;
- Levegő mintavevő és relatívnedvesség/hőmérséklet mérőcella az adszorber bemene-ten, közbenső mintavételen és a kimeneten, amelyek feladata a szénről lejövő levegő relatív nedvesség tartalmának és hőmérsékletének nyomon követése;
- Nyomásmérők (elektromos nyomásérzékelő, alsó méréshatára 0,01 bar, a szűrőágon elhelyezve);
- Fojtószelep: mechanikus, a kívánt nyomás beállítására;
- Áramlásmérő: elektromos, méréshatára 0-5 m<sup>3</sup>/h, a beáramló száraz levegő mennyiségének mérésére;
- A szenzorok számítógépes, programozott lekérdezése.



4.24. ábra

Főépületi gáztisztító adszorber szárítása csökkentett nyomáson





4.25. ábra

A szárítás programvezérlésének blokkismája

### 4.6.1. A szárítás előtti állapot

A szárítás megkezdése előtt a zeolit szárítókat a normál üzemi előírásoknak megfelelően regenerálták.

### 4.6.2. A szárítás kivitelezése

A kiegészítő egységek csatlakozása:

A száraz levegő mintavevő csövére csatlakoztatjuk az átáramlásos RN/T mérőcellát ( $E_1$ ) és az áramlásmérőt, ami a mágnes szelepen ( $M_1$ ) és fojtószelepen (F) keresztül az első adszorber tartály csatlakozójához ( $Cs_1$ ) kapcsolódik. Ezen a rendszeren keresztül áramlik a száraz levegő az adszorberbe. Az áramlás mértékét az F fojtószeleppel szabályozzuk.

Az adszorberen kialakuló nyomást elektromos nyomásmérővel követjük, amely a szűrősor közepén elhelyezkedő adszorber tartályokon lévő  $Cs_2$  csatlakozóhoz kapcsolódik.

Az adszorber utolsó tartályán lévő  $Cs_3$  csatlakozóhoz csatlakoztatjuk az előszűrőn keresztül a vákuumszivattyút, amelynek kimenete a kimeneti csőkarimához kapcsolódik.

A relatív nedvességtartalom mérés a 2-es és 8-as adszorber tartályból vett mintában történik.

Az elektromos érzékelők lekérdezése és a szelepek vezérlése soros vonallal történik, amit a vezérlő egység fogad. A folyamatot vezérlő szoftver felügyeli.

#### *A szárítás megkezdése*

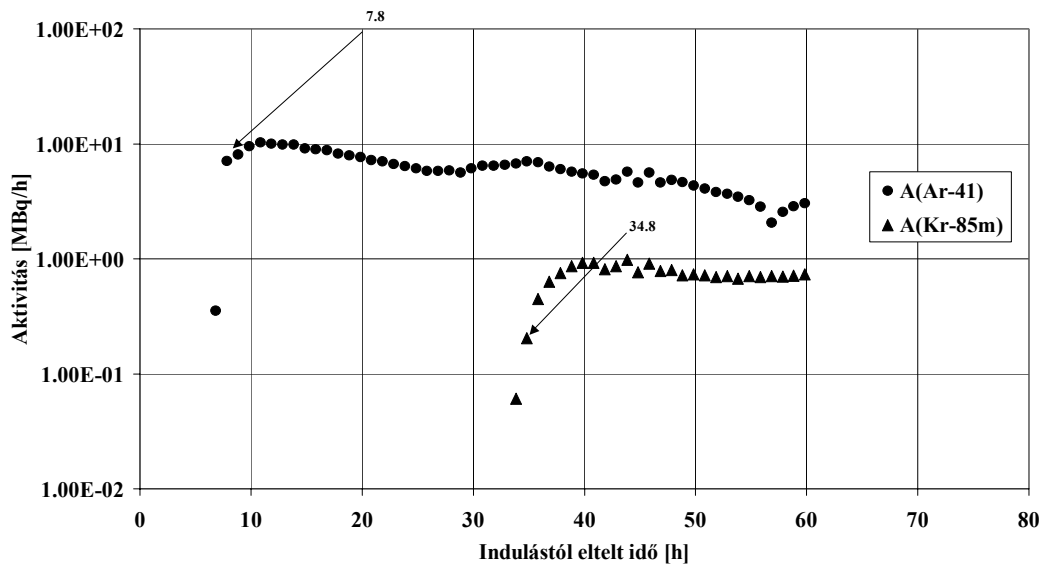
A vákuumszivattyút bekapcsoltam és a bemeneti áramlást az F fojtószeleppel a minimálisra állítottam, amely még a bemenő száraz levegő RN/T mérését lehetővé teszi ( $0,2 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Üzembe helyeztem a kimeneti mintavevőt, és folyamatosan követtem az oszlopról lejövő levegő relatív nedvesség tartalmát. A szűrősort első lépésben megkíséreltem leszívítani olyan mértékben, hogy a nyomás  $100 \text{ mbar}$  ( $10 \text{ kPa}$ ) legyen. A bemenő száraz levegő légforgalmát kb.  $0,2\text{-}0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ -ra szabályoztam, miközben a kimenő levegő relatív nedvesség tartalmát mértem. Amennyiben a relatív nedvesség értéke nem érte el a  $98\text{-}100 \%$ -ot, csökkentettem a nyomást, illetve csökkentettem a bemeneti levegő mennyiségét.

A szénágy száradása a kimeneten elhelyezett relatív nedvesség mérő adatai alapján volt követhető. Az ágy akkor mondható száraznak, amikor a levegőmintá relatív nedvességtartalma légköri nyomáson és  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ -on kisebb  $10 \%$ -nál.

### 4.6.3. Retenció mérés a szárítás előtt

A szárítás hatásosságának megállapításához a szárítás végrehajtása előtt megmértem az adszorber Ar-ra és Kr-ra vonatkozó retenciós időit.

A kimeneten időegység alatt mért aktivitás értékeket az eltelt idő függvényében a 4.26. ábra mutatja be.



4.26. ábra

#### 02TS40N002 adszorber retenció mérés eredménye a szárítás előtt

A retenció idő kriptonra  $t = 35$  óra, amelyből a dinamikus adszorpció tényező ( $k$ ) a (4.15) összefüggés alapján számítható:

$$k = \frac{t \cdot F}{m}$$

ahol

$F$  - a terhelés ( $8,2 \pm 0,6 \text{ m}^3/\text{h}$ )

$t$  - a retenció idő (35 h)

$m$  - az adszorber tömege (11,08 t)

Így  $k \cdot t \text{ m}^3/\text{t}$  egységben kapjuk meg, ami megfelel a  $\text{cm}^3/\text{g}$  egységnek.

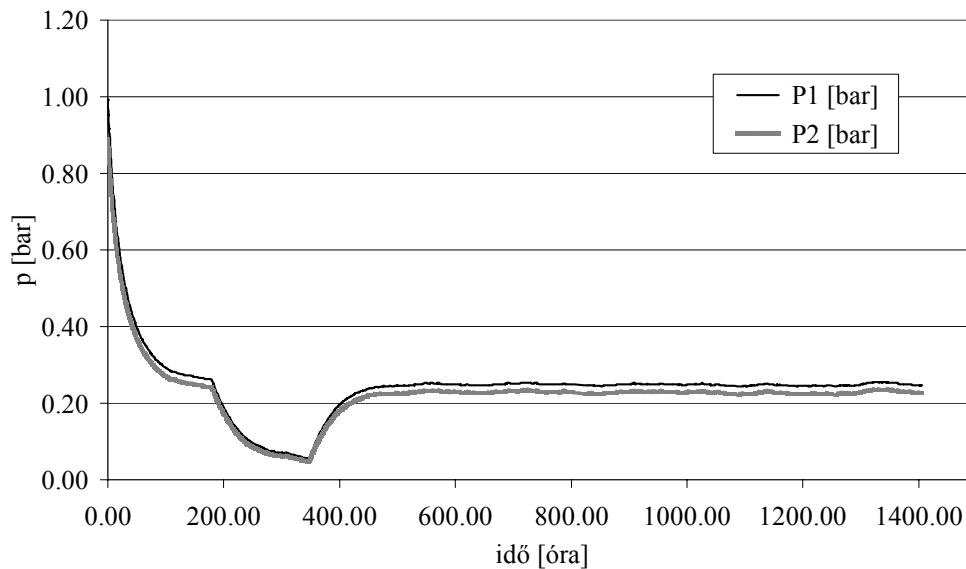
A számított dinamikus adszorpció tényező értéke Kr-ra  $k = 22 \pm 1 \text{ cm}^3/\text{g}$ . A tényező hibája ebben az esetben  $F$  és  $t$  hibájából számítható.

#### 4.6.4. A szárítás alatt mért paraméterek

Az adszorberben kialakult nyomás a szárítás megkezdését követően 200 óra után elérte a 0,25 bar-t, 340  $\text{dm}^3/\text{h}$  száraz levegő betáplálása mellett. 200 óra után a bemenő levegő relatív nedvességtartalma (4.28. ábra N3) telítésbe ment a zeolit szűrő kimerülése miatt, ezért a mosólevetőt a zeolit szűrő regenerálási idejére lezártam. Ugyanezt kellett tennem 1.200 óra után is.

A lezárt állapotban a rendszer nyomása 0,1 bar alá csökkent (4.27. ábra), és ekkor a 11-es tartályról mintavételezett levegő relatív nedvességtartalma (4.28. ábra N2) telítésbe ment.

A bemenő száraz levegő és az adszorberben lévő aktív szén felett lévő levegő relatív nedvességtartalmát a szűrőág két pontján (2-es és 8-as tartály) vett levegőmintákban mértem. A bemenő levegő relatív nedvességtartalma a 200 óránál történt zeolit szűrő regenerálás után az újabb kimerülésig 3 %-os volt, majd a második regenerálás után 12 %. A mért relatív nedvességtartalmak időbeli változását a 4.28. ábra mutatja.



**4.27. ábra**  
**Nyomás változása a szárítás alatt**

A szárítás folyamán az adszorberben mért hőmérséklet számottevően nem változott. A szárítás elején 27 °C volt, amely a folyamat végére 25 °C-ra csökkent. A hőmérséklet változását a 4.29. ábra mutatja.

**4.28. ábra**

**Relatív nedvességtartalom változása a szárítás alatt**

