



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
GÉPÉSZMÉRNÖKI SZAK

Szabó Viktor

Gépészmérnök MSc 2. évfolyam

FLUIDIZÁCIÓS SZÁRÍTÓ BERENDEZÉS TERVEZÉSE ÉS VIZSGÁLATA

Konzulens:

dr. Örvös Mária
egyetemi docens

Poós Tibor
tudományos segédmunkatárs

A dolgozat bemutatását a TÁMOP - 4.2.2.B-10/1--2010-0009 "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" című program támogatta.

Budapest, 2013. 01.09.

Tartalomjegyzék

1.	BEVEZETÉS	5
2.	A FLUIDIZÁCIÓS SZÁRÍTÓ TERVEZÉSI SZEMPONTJAI.....	6
2.1.	A szárító feladatának meghatározása	6
2.2.	A fluidizációs szárító felépítése.....	7
2.3.	Követelményjegyzék	11
3.	A SZÁRÍTÓ MÉRŐÁLLOMÁS TERVEZÉSE.....	14
3.1.	A szárítási idő meghatározása	14
3.2.	A szárítótér méretének felvétele	15
3.3.	A szállítócsiga méretezése	17
3.4.	A cellás adagoló méretezése	18
3.5.	A ciklon tervezése	19
3.6.	Anyagtároló edények	21
3.7.	Csővezetékek	21
4.	A MEGVALÓSÍTOTT MÉRŐÁLLOMÁS.....	23
4.1.	A mérőállomás ismertetése.....	23
4.2.	A mérés elindítása.....	29
4.3.	A mérés befejezése.....	29
5.	MÉRÉSI TEMATIKA	30
5.1.	A szárítólevegő térfogatáramának meghatározása	30
5.2.	Szemcsés halmaz nyomásesésének meghatározása	31
5.3.	Száradási jellemzők vizsgálata.....	34
5.3.1.	Nedvesség mérleg egyenlet	34
5.3.2.	Térfogati hőátadási tényező meghatározása	35
5.4.	Ciklon vizsgálata.....	37
6.	ÖSSZEGZÉS	39
7.	IRODALOMJEGYZÉK	40
8.	MELLÉKLETEK.....	41

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
A	felület	m^2
C	átfolyási szám	1
c	fajhő	$J/(kg \cdot ^\circ C)$
d	átmérő	m
f	súrlódási tényező	1
H	hosszúság	m
L	magasság	m
m	tömeg	kg
$\dot{m}$	tömegáram	kg/s
N	párolgási sebesség	$kg/(s \cdot m^2)$
n	darabszám (anyagra)	db
n	fordulatszám	1/s
p	nyomás	Pa
Re	Reynolds-szám	1
s	menetemelkedés	m
t	idő	s
T	hőmérséklet	$^\circ C$
v	sebesség	m/s
V	térfogat	m^3
$\dot{V}$	térfogatáram	m^3/s
x	összes anyagra vonatkoztatott nedvességtartalom	$kg_{v\acute{e}z}/$ $kg_{nedves\ anyag}$
X	száraz anyagra vonatkoztatott nedvességtartalom	$kg_{v\acute{e}z}/$ $kg_{sz\acute{a}raz\ anyag}$
z	darabszám (cellákra)	db

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
α	hőátadási tényező	$W/(m^2 \cdot K)$
β	átmérőviszony	1
ε	expanziós szám	1
ε	fajlagos hézagtérfogat	1
κ	izentrópikus kitevő	1
μ	dinamikai viszkozitás	Pa · s
ν	kinematikai viszkozitás	m^2/s
ξ	ellenállástényező	1
ϕ	töltési tényező	1
ρ	sűrűség	kg/m^3
σ	párolgási tényező	$kg/(m^2 \cdot s)$

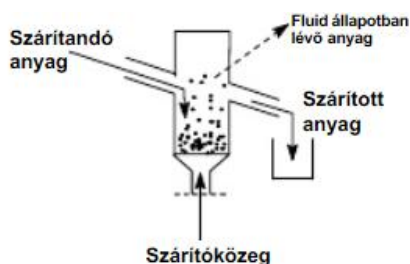
Indexek, kitévők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
<i>a</i>	ajánlott érték
<i>anyag</i>	anyagmennyiségre utaló
<i>áll</i>	állandó
<i>b</i>	belső
<i>be</i>	belépő
<i>ce</i>	cellás adagolóra utaló
<i>ci</i>	ciklonra utaló
<i>cs</i>	szállítócsigára utaló
<i>cső</i>	csőre utaló
<i>d</i>	tervezési állapotra utaló érték
<i>F</i>	szemcsefelületre utaló
<i>G</i>	gázra utaló
<i>halmaz</i>	a fluidizált halmazra utaló
<i>határ</i>	a határszemcsére utaló érték
<i>k</i>	külső
<i>ki</i>	kilépő
<i>l</i>	nedves anyagra utaló
<i>lev</i>	levegőre utaló
<i>látsz</i>	látszólagos
<i>max</i>	maximum
<i>mért</i>	mért értékre utaló
<i>min</i>	minimum
<i>r</i>	radiális
<i>s</i>	száraz anyagra utaló
<i>sz</i>	szárítási
<i>számított</i>	számított értékre utaló
<i>szárító</i>	szárítóra utaló
<i>szemcse</i>	szemcsére utaló
<i>töltet</i>	töltetre utaló
<i>ü</i>	ülepítési
<i>végző</i>	végző értékre utaló

1. Bevezetés

A szárító berendezések feladata a különböző gyártási, feldolgozási folyamatok során felhasznált anyag nedvességtartalmának csökkentése. Konvekciós szárítás alatt egyidejű hő- és anyagátadással járó szárítási folyamatot értünk, amikor hőközlés hatására a nedves anyagból kilépő gőz diffúzióval a hordozó, hőt közvetítő közegbe kerül. A szárítási folyamatok jelentős részében a nedvesítő közeg víz, a szárítógáz pedig levegő. A művelet levegő – vízgőz – víz rendszer jellemzőin keresztül vizsgálható.

Kisméretű egyforma geometriájú anyagok légárammal történő szárítására előnyösen alkalmazhatók a fluidizációs szárítók [1]. A művelet lényege, hogy a szárítandó anyag fluidizált állapotban van, amit a szárítóközeg (levegő) áramlása biztosít. A szárítóközegnek a funkciója az, hogy hőt közöljön a nedves anyaggal, mozgásban tartsa a szemcséket, majd a szükséges száradási idő elteltével magával ragadja a nedvességet, és a kiszáradt anyagot. A szárítóközeg feladata hogy magával vigye az anyagnedvességet.



1.ábra. A fluidizációs szárító elvi felépítése [2]

Az 1. ábrán egy fluidizációs szárító elvi felépítése látható. A szárítandó anyag a szárítótérbe kerül, ahol a szárítóközeg fluidizált állapotban tartja. A szárítási idő elteltével a szárított anyag eltávozik a készülékből.

A szükséges szárítási idő elteltével a kiszáradt anyag a hordozóközeggel együtt az esetek többségében egy porleválasztó ciklonban elválasztásra kerül. Ciklont az ipar számos területén (élelmiszeripar, vegyipar, környezetvédelem stb.) használnak különböző szemcsés, poros anyag levegőtől való elválasztására.

Feladatomban volt egy laboratóriumi, szemes termékek szárítására alkalmas fluidizációs szárító tervezése. A tervezés első lépéseként meghatároztam a művelet szempontjából fontos geometriai méreteket, majd elkészítettem a mérőberendezés konstrukciós terveit. Ezután javaslatot tettem a készülékkel végrehajtható hallgatói mérések tematikájára.

2. A fluidizációs szárító tervezési szempontjai

A tervezés főbb szempontjai a következők [1]:

- A szárító feladatának meghatározása
- A készülék rendszerének felépítése és típusának kiválasztása
- Technológiai adatok rögzítése az anyag- és hőmérleg felírásához
- A szárítás időszükségletének meghatározása
- A szárító fő méreteinek meghatározása
- A berendezés egyéb elemeinek méretezése, figyelembe véve a gazdaságos üzemeltetés és a szabályozás szempontjait

Ha a tervezés egyes lépéseire nincs elegendő ismeretanyagunk, akkor előzetesen laboratóriumi mérések elvégzése szükségesek. A mérés elvégzésének a célja, hogy a szárítás körülményeit megfelelően modellezzük. Egyéb jellemzők, pl. a méretnövelés kérdése már másodrendű.

2.1. A szárító feladatának meghatározása

A szárítási feladatot a szárítandó anyag jellemzői, összetétele, sajátsága, illetve a készülékbe juttatott anyag kezdeti és a tervezett végső állapota szerint kell meghatározni. A fluidizációs szárítás azonban lecsökkenti az eljárás során alkalmazható anyagok körét olyan anyagokra, amelyek szárított állapotban ömleszthetőek, illetve a szemcsék nagysága néhány tized millimétertől legfeljebb pár centiméterig terjed. Tehát a szárítandó anyag fizikai és kémiai összetétele döntő jelentőséggel bír a szárító berendezés tervezésénél, illetve a szárítási folyamat körülményeire.

A szárítótérbe bekerülő anyag legfontosabb jellemzői:

A szárítani kívánt anyag tömegárama:	$\dot{m}_{\text{anyag}}$
Az anyag kezdeti nedvességtartalma:	$x_{\text{anyag,be}}$
Egyenértékű szemcseátmérő (gömb alakot feltételezve):	d_{anyag}
A szemcsék sűrűsége:	$\rho_{\text{anyag,be}}$
Az anyag fajlagos hézagterfoglata, porozitása	ε

A szárítóból kilépő anyag tervezett végállapot jellemzői:

Az anyag végső nedvességtartalma:	$x_{\text{anyag,ki}}$
A száraz anyag halmazsűrűsége:	$\rho_{\text{anyag,ki}}$

2.2. A fluidizációs szárító felépítése

A fluidizációs szárítók olyan berendezések, amelyekben a szárítást elvégző gáz sebessége meghaladja a minimális fluidizációs sebességet, de nem haladja meg az anyag kihordásához (pneumatikus szállításhoz) szükséges maximális sebességet.

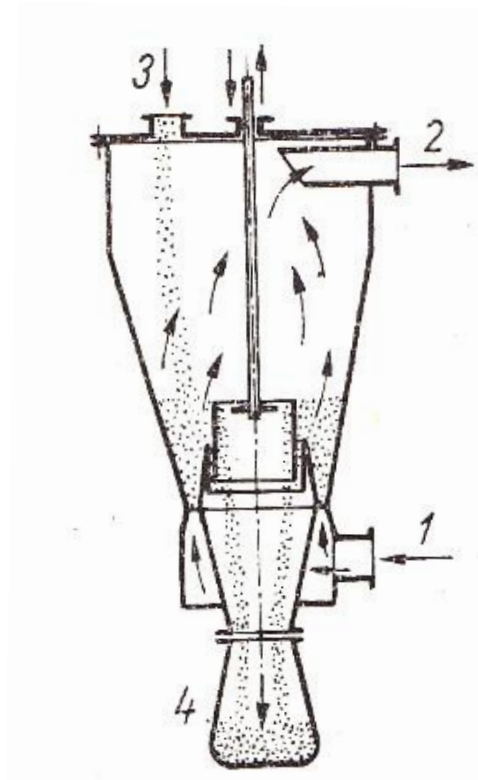
Egy nyugvó szemcsés anyagot tartalmazó anyaghalmazon keresztül levegőt áramoltatunk, a minimális fluidizációs sebesség eléréséig a nyomáskülönbség egyenesen arányos a sebességgel. A minimális fluidizáció sebességet túllépve a nyomáskülönbség közel állandó értéket vesz fel. A maximális fluidizációs légsebességnél nagyobb sebesség esetén, a nyomáskülönbség nőni fog. A nyomáskülönbség, és a fluidizációs sebesség összefüggését ideális esetben, a 2. ábra szemlélteti.



2.ábra. A nyomáskülönbség változása az üres keresztmetszetre vonatkoztatott gázsebesség függvényében.

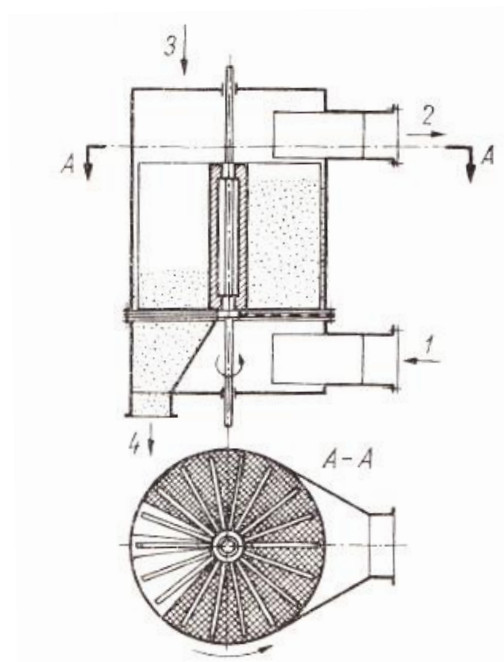
A kisméretű szemcséket, illetve szemcsetöredékeket egy bizonyos hányadát a gázáram magával ragadja, és kihordja a szárítótérből. Ez a fluidizációnak egy kísérőjelensége. Ha azonban a szemcsék döntő hányadát magával ragadja a gázáram, akkor már nem beszélhetünk fluidizációról – ilyenkor pneumatikus szállítású, vagy lebegtető szárítóról beszélünk.

A fluidizációs szárítóknak sokféle típusa ismert. A szárítás szempontjából jellemző hőközlés módja az elsődleges osztályozási elv, amelyet gyártási és gépészeti szempontok követnek. A szárítók megjelenési formája a külső kiképzés, konstrukció, üzemvitel szempontjából változatos és nagyszámú tényező variációjából tevődik össze. Az osztályozás történhet az üzemeltetés szerint (folyamatos, szakaszos üzem). A folyamatos szárítók további alcsoportokra oszthatóak a rétegkialakítás rendszere alapján (egykamrás (3.ábra) , többkamrás (4.ábra), egy- illetve többszintes (5.ábra) kialakítás).



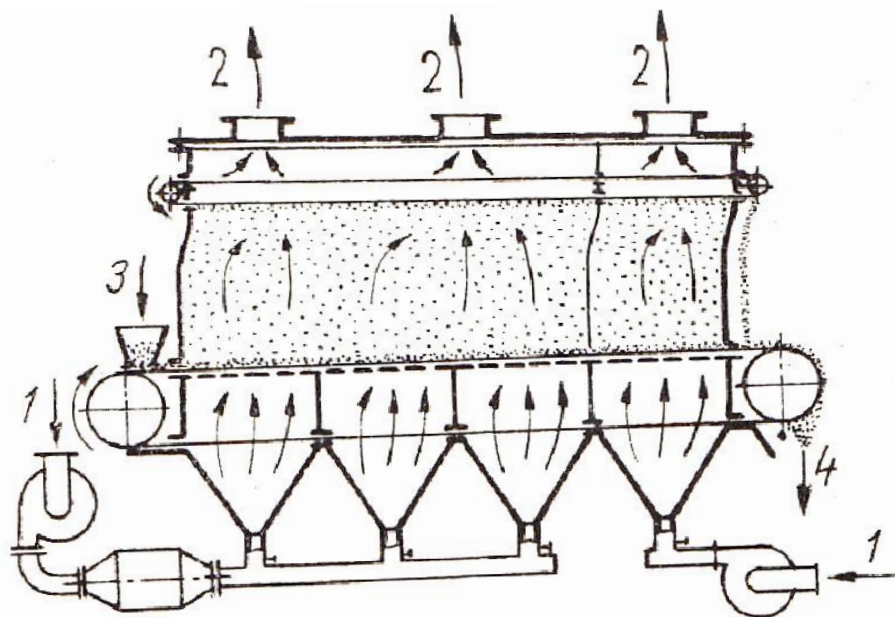
3. ábra: Egykamrás fluidizációs szárító

(1. gázbevezető nyílás, 2. gázkivezető nyílás, 3. anyag bevezető nyílás, 4. anyagtároló)



4. ábra: Többkamrás fluidizációs szárító

(1. gázbevezető nyílás, 2. gázkivezető nyílás, 3. nedves anyag bevezető nyílás, 4. szárított anyag kivezető nyílás)



5. ábra: Többszintes fluidizációs szárító

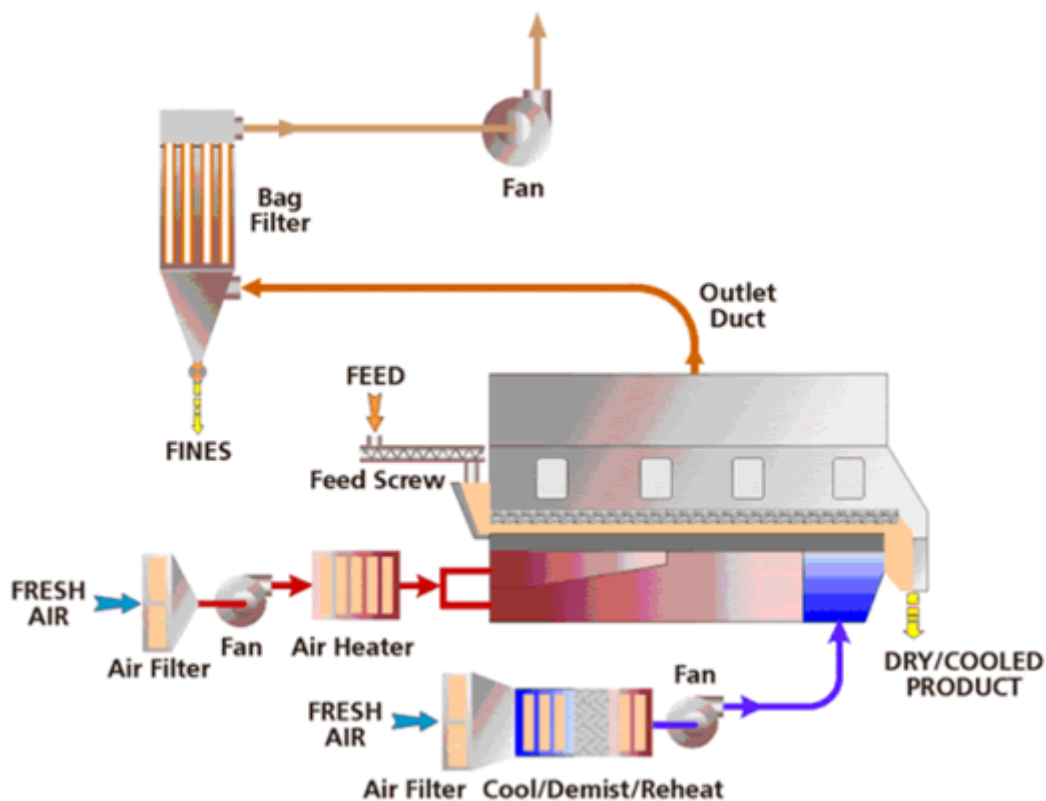
(1. gázbevezető nyílás, 2. gázkivezető nyílások, 3. anyagbevezető nyílás, 4. szárított anyag kivezető nyílás)

A fluidizációs, szakaszos üzemű szárítókat kisebb mennyiségű adagok intenzív szárítására használják az ipar számos területén. Leginkább olyan területeken használják, ahol nem nagy mennyiségű anyagokat kell szárítani, miközben a követelmény, hogy a rendszer könnyen tisztítható legyen az egyes anyagok szárítása után. További előnye ezeknek a típusoknak az egyenletes tartózkodási idő, vagyis az anyag egyenletes vég-nedvességtartalmának beállíthatósága. A szárítógáz belépési hőmérséklete és térfogatárama könnyen szabályozható.

A fluidizációs szárítók a gázáramoltatás szempontjából általában nyomó üzeműek, de léteznek, nyomó-szívó és ritka esetben csak szívó üzemű szárítók is. Nyomó üzemű rendszerben a levegőt ventilátor áramoltatja. Ha helyszükségleti, illetve biztonságtechnikai okokból a nyomóüzemű szárító használata nem megengedett, abban az esetben szívóüzemű ventilátor beépítése szükséges. Az átáramló gáz a szemcséket fluidizált állapotba hozza, ez által a statikus nyomás jelentős csökkenést mutat.

A szívó és nyomó üzem egy ventilátorral is megvalósítható, ha gazdasági szempont ezt megköveteli, vagy az egyik réteg hűtést, míg a másik szárítást igényel.

Amennyiben az szárítandó anyagunk hőre nem érzékeny és a ciklusidő minimalizálása a célunk, alkalmazható hősugárzós szárítás (6.ábra). A szemcsék által elnyelt hő a felső rétegben nem korlátozódik alacsony rétegvastagságra a szemcsék keveredése miatt. Az erőteljes hősugárzás miatt a fluidizált szemcsék gyorsan kiszáradnak a felső rétegben, ami a ciklusidő csökkenését eredményezi.



6. ábra: Hősugárzós szemcseszárító

A folyamatos üzemű szárítók jobban elterjedtek az iparban, mert azoknak nagyobb teljesítményűek, továbbá nagyobb a típusválasztékuk, mint a szakaszos üzemű szárítóknak.

Laboratóriumi gyakorlathoz szakaszos üzemű szárító típust választottam, nyomóüzemű ventilátorral, mert egyszerű szárítási folyamatot kell megvalósítani, bemutató céllal.

2.3. Követelményjegyzék

A tervezést megelőzően követelményjegyzéket (1. táblázat) állítottam fel, amelyben a tervezést megelőzően, a rendelkezésre álló információk alapján a berendezésre, illetve a folyamatra vonatkozó elvárások és követelmények táblázatos megfogalmazása található. A követelményjegyzék segít elindítani a tervezési folyamatot, a tervezés során a követelményjegyzék pontjait mindig figyelembe kell venni, de utólag módosítható is. A követelményjegyzék:

- A termékkel szemben támasztott elvárások összessége, a megvalósítás peremfeltételei;
- kiindulópont a feladat további tagolásához;
- segíti a megoldási változatok értékelési és optimalizációs szempontjainak meghatározását;
- végigkíséri a tervezési folyamatot, melynek során folyamatosan ki kell egészíteni, illetve pontosítani kell azt.

Az egyes követelmények besorolása:

K_A: Alap vagy állandó követelmény;

K_{Sz}: Minimális vagy szint követelmény;

K_O: Óhaj, kívánság.

Az alapkövetelményeknek nincs teljesítési szintje, ezeket minden körülmények között ki kell elégíteni. Azokat a megoldásokat, amelyek az állandó követelményeknek nem tesznek eleget, el kell vetni. Ebből adódóan az állandó követelmények nem lehetnek értékelési szempontok.

A szintkövetelményeknek is minden esetben teljesülnie kell, de a teljesítésnek van mértéke. Ezért, ezek már rangsorolási, értékelési szempontként is szerepelhetnek.

A óhaj kívánságokat, a tervezés során lehetőleg figyelembe kell venni. Teljesítésük a termék értékét befolyásolja, így többségük értékelési kritérium lesz.

1.táblázat. Követelményjegyzék

Kat.	Nr	Megnevezés	Minő-sítés	Leírás	Érték/ Számér-ték	Súlyozás
Anyag	1	Szárítandó anyagtípus	K _A	Szemcsés anyag átmérője	ø1-5 mm	10
	2	Szerkezeti anyagtípus	K _A	Rozsdamentes acél használata	1.4301	8
Geometria	1	Szárítótér belső átmérője	K _A		100 mm	10
	2	Megfelelő helykihasználtság	K _A	Minimális helyszükséglet	2,5x1,5x 1 m	8
	3	Csatlakozások	K _{Sz}	Szabványos csővezetékekhez csatlakozás	ø100 mm	7
	4	Anyagtárolók térfogata	K _{Sz}	Min. 20 perc mérés	min. 5 liter	7
Erő-terhelés	1	A berendezés össztömege	K _A		max 40 kg	8
	2	Ne legyenek rezgő alkatrészek	K _A			9
Kinematika	1	Folyamatos szárítás biztosítása	K _A	Folyamatos anyag hozzáadás - elvétel		9
	2	Mérőberendezés szétszerelhetősége	K _{Sz}			7
	3	Könnyű mozgathatóság	K _{Sz}	Falról könnyen eltávolítható legyen		8
	4	Levegő térfogatáram	K _A	Ventilátor levegőszállítása	250 m ³ /h	10
Energia	1	Energiafelhasználás	K _A	Elektromos áram felhasználás	max 15kW	10
	2	Megfelelő áramlástechnikai feltételek	K _{Sz}	Áramlási veszteségek minimalizálása		9
Biztonság	1	Csővezetékek megfelelő szigetelése	K _A	A forró levegő sérülést ne okozhasson	max 50 °C	8
	2	Elmozdulás-mentes rögzítések alkalmazása	K _A	A felhasznált alkatrészek biztonságos felhelyezése		9
	3	Vezetékek megfelelő elhelyezése, illetve szigetelése	K _A	Áramütés elleni védelem		10

	4	Vészleállítás	K _A	Baleset esetén azonnali üzemmegszakítás		10
Ergonómia	1	Könnyű kezelés	K _A	Egyszerű üzemeltetés		8
	2	Könnyű anyag hozzávezetés, -elvezetés	K _{Sz}			7
	3	Könnyű csatlakozás az energiaforráshoz	K _A		400 V	9
Karbantartás	1	Szénszerelhetőség, tisztíthatóság	K _A	Tiszta üzem biztosítása		9
	2	Kevés karbantartást igényel	K _A	Egyszerű üzem		10
Költség	1	Olcsó	K _{Sz}	A méretezésnek megfelelő, jó minőségű, de kevésbé költséges eszközök alkalmazása	3 millió forint	7
Ellenőrzés	1	A fizikai jellemzők mérésére alkalmas mérőeszközök megfelelő elhelyezése	K _A	Hőmérők, nyomásmérők, páramérők alkalmazása		9
Gyártás	1	Méretpontos alkatrészek, vezetékek gyártása	K _A	Illesztéseknél a méretek a tűréshatárokon belül legyenek		9
	2	Gyors gyártás	K _O	Rövid időn belül érkezzen meg minden alkatrész		5
	3	Hosszú élettartam	K _{Sz}	A számított ciklusszám biztosítása	30 év	7
Határidő	1	A konferencia előtt elkészüljön	K _A		nov. eleje	10
Újrahasznosítás	1	Újrahasznosítható anyagú alkatrészek felhasználása	K _{Sz}	Környezetvédelmi szempontból újrahasznosítható, illetve újra feldolgozható alkatrészek alkalmazása		7

3. A szárító mérőállomás tervezése

A tervezést megelőzően a berendezés főbb elemeit méreteztem. A méretezés során figyelembe vettem, hogy elsősorban gömb alakú, kis átmérőjű (1 és 5 mm között) kis sűrűségű ($500-800 \text{ kg/m}^3$), kis méretszórású és nedvesíthető mezőgazdasági szemes termékek szárítását kell megvalósítani, maximum 45 perc időn belül.

3.1. A szárítási idő meghatározása

A száradási idő meghatározásához egy korábbi hallgatói mérés adatait használtam fel. A hallgatók a Tanszék laboratóriumában konvekciós szárítóberendezésen, vízzel nedvesített anyagot szárítottak meleg levegővel. A párolgási sebességet alapul véve meghatározható a szárítás ideje.

A mérés kiértékelése alapján az állandó párolgási sebesség:

$$N_{\text{áll}} = -\frac{m_s}{A_e} \frac{dX}{dt} = 4,6 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \quad (3.1)$$

A méretezést köles szárítására végeztem el, aminek a geometriáját 2 mm átmérőjű gömbnek vettem, sűrűsége pedig 700 kg/m^3 .

Az adatok értelmében a gömb alakú szemcse felülete:

$$A_{\text{szemcse}} = d_{\text{szemcse}}^2 \cdot \pi = 0,002^2 \cdot \pi = 1,257 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (3.2)$$

Térfogata az alábbi képlettel számolható:

$$V_{\text{szemcse}} = \frac{d_{\text{szemcse}}^3 \cdot \pi}{6} = \frac{0,002^3 \cdot \pi}{6} = 4,189 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 \quad (3.3)$$

A szemcse tömege pedig:

$$m_{\text{szemcse}} = \rho_{\text{szemcse}} \cdot V_{\text{szemcse}} = 700 \cdot 4,189 \cdot 10^{-9} = 2,93 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \quad (3.4)$$

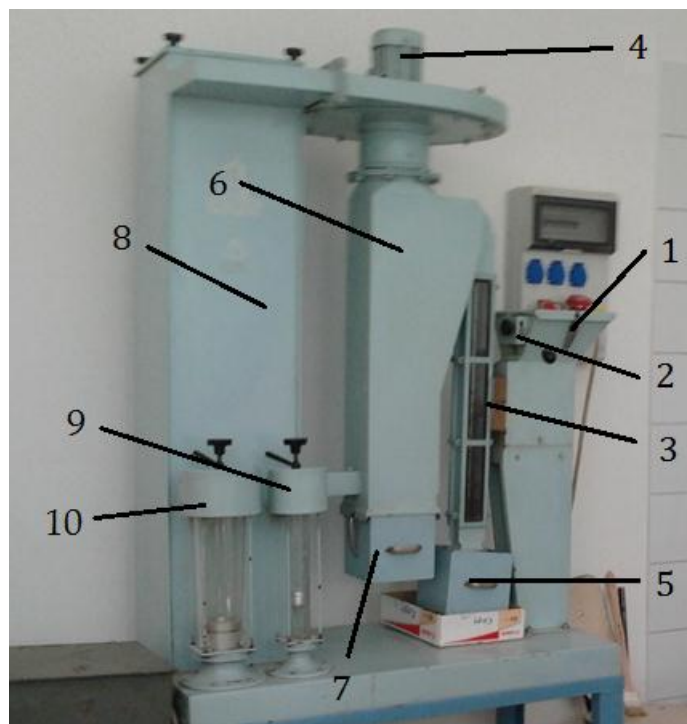
Ennek értelmében a szárítási idő:

$$dt = \frac{m_{\text{szemcse}}}{A_{\text{szemcse}}} \cdot \frac{x_{\text{be}} - x_{\text{ki}}}{N_{\text{áll}}} = \frac{2,93 \cdot 10^{-6}}{1,257 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{0,3 - 0,15}{4,6 \cdot 10^{-4}} = 76,1 \text{ s}$$

A fenti számítás eredménye alapján a feltételezett körülmények között a vizsgált anyag tartózkodási ideje a szárítótérben kb. 76 másodpercig tart.

3.2. A szárítótér méretének felvétele

A szárítótér méretének meghatározásához előzetes méréseket végeztem a Tanszék laboratóriumában található szélosztályozó berendezésen (7. ábra). A vizsgálat során megállapítottam, hogy mekkora légsebesség mellett lehet azonos frakcióméretű anyagot fluidizált állapotban tartani. A mérés során aktívszenet használtam fel, amit az 1. jelű adagolóba került beöntésre. A 2-es jelű adagolókar nyitott állapotba való mozdításával a szemcsék bekerültek a 3-as jelű, 50x50 mm alapterületű, hasáb alakú légtérbe. A levegőt az 4-es jelű ventilátor szállítja. Az aktív szén sűrűsége kb. 535 kg/m³ [8], a szemcsék hossza 3-4 mm. A légáramba kerülő szemcsék alakja, mérete, sűrűsége különbözött. Térfogatáram-intervallumot határoztam meg, a legkisebb levegő térfogatáramnál az összes szemcse a gravitációs erő hatására az 5-ös jelű gyűjtőedénybe került, maximális térfogatáramnál pedig a 6-os jelű ülepítő felé indultak meg. Az ülepítőből a szemcsék a 7-es jelű gyűjtőfiókba kerültek, a levegő pedig a 8-as jelű légszatórnán át jutott a környezetbe. A légáram fojtását, valamint a térfogatáramának a mérését a 9-es és 10-es jelű, szeleppel egybeépített rotaméterek segítségével lehetett szabályozni.



7.ábra. A laboratóriumi szélosztályozó berendezés

Mivel a szemcsék különböző átmérőjűek voltak, ezért a készülék segítségével különválasztottam az aktívszenet azok mérete szerint. A berendezésen rotaméter segítségével, fojtással lehetett állítani a szállító levegő térfogatáramát. A szemcséket

három részre választottam szét. Adott méretű aktív szén egy térfogatáram-intervallumban marad fluidizált állapotban, a minimális térfogatáram alatt a nagyobb szemcseméretű darabok a gyűjtőedénybe kerülnek, a kisebbeket pedig a levegő magával viszi. A szétválasztott szemcsék térfogatáram-tartományai a 2. táblázatban látható.

2.táblázat. Az aktív szén szétválasztása szélosztályozón

Szemcsék hossza [mm]	1-2	2-3	3-4	Véletlenszerűen kiválasztott
Minimális térfogatáram [m ³ /h]	50	55	60	50
Maximális térfogatáram [m ³ /h]	60	65	75	80

Az adatokból a legnagyobb levegősebesség az alábbi módon számolható:

$$v_{\max} = \frac{\dot{V}_{\max}}{A_{\text{szélosztályozó}}} = \frac{\frac{80}{3600}}{0,05 \cdot 0,05} = 8,89 \text{ m/s} \quad (3.5)$$

A legkisebb sebesség pedig $v_{\min} = 5,56 \text{ m/s}$.

A ventilátor levegőszállítási-képessége 250 m³/h. Ennek, és a szélosztályozóban mért minimális sebesség hányadosa megadja a fluidizációs szárítótér maximális keresztmetszetét. Ennek értelmében:

$$A_{\max} = \frac{\dot{V}}{v_{\max}} = \frac{\frac{250}{3600}}{8,89} = 7,811 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (3.6)$$

A szárítótér alapterülete kör alakú, tehát a maximális átmérő:

$$d_{\max} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{\max}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 7,811 \cdot 10^{-3}}{\pi}} = 99,7 \text{ mm} \quad (3.7)$$

A szárítótér átmérőjét 100 mm-re vettem fel.

3.3. A szállítócsiga méretezése

A szállítócsiga méreteinek meghatározása előtt a nedves anyag szállítótérbe való behordásához kiszámítottam a szükséges tömegáramot. A szárítótérben a nyugvó anyagmennyiség előzetesen kb. 50 mm magasan helyezkedik el.

Az anyagtérfogat a szárítótérben:

$$V_{\text{anyag}} = \frac{d_{\text{szárító}}^2 \cdot \pi}{4} \cdot L_{\text{anyag}} = \frac{0,1^2 \cdot \pi}{4} \cdot 0,1 = 7,85 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \quad (3.8)$$

Ebből a tömegáram pedig:

$$\dot{m} = \frac{V_{\text{anyag}}}{t_{\text{sz}}} \cdot \rho_{\text{szemcse}} = \frac{7,85 \cdot 10^{-4}}{76,1} \cdot 700 = 7,22 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} \quad (3.9)$$

Vízszintes elrendezésű szállítócsigák szállítóképességének számításához felhasznált összefüggés [3]:

$$\dot{m} = \frac{d_{\text{cs}}^2 \pi}{4} \cdot s_{\text{cs}} \cdot n_{\text{cs}} \cdot \rho_{\text{szemcse}} \cdot \Phi_{\text{cs}} \quad (3.10)$$

A töltési tényező értéke a [3] irodalom 4. táblázata alapján $\Phi_{\text{cs}} = 0,6$. A konstrukcióból adódóan, a szállítócsiga átmérője nem lehet nagyobb 50 mm-nél. A hajtómotor fordulatszám felvételénél fontos kritérium, hogy a szállítás során az anyag ne károsodjon.

A méretezés során felvett értékek:

$$d_{\text{cs}} = 43 \text{ mm}$$

$$n_{\text{cs}} = 30 \text{ 1/min}$$

A (2.10)-es összefüggést rendezve a csigaszárnny menetemelkedése:

$$s_{\text{cs}} = \frac{4 \cdot 7,22 \cdot 10^{-3}}{0,043^2 \cdot 0,5 \cdot 700 \cdot 0,6 \cdot \pi} = 23,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

A menetemelkedés az összefüggés alapján 23,7 mm-re adódott. A méretezés során a menetemelkedés értékét 24 mm-re vettem fel, gyártási okokból. A szállítócsigához egy E192-12-91-es típusú villamos motort választottam, aminek a táblázata az 1. számú Mellékletben található. A motor névleges fordulatszáma a legnagyobb nyomatékon 31/min, de a motor fordulatszáma állítható. A motor szabványos méretekkel rendelkezik, ezért a szállítócsiga tengelyének rá kell tudnia csatlakozni a motor kihajtó tengelyére.

3.4. A cellás adagoló méretezése

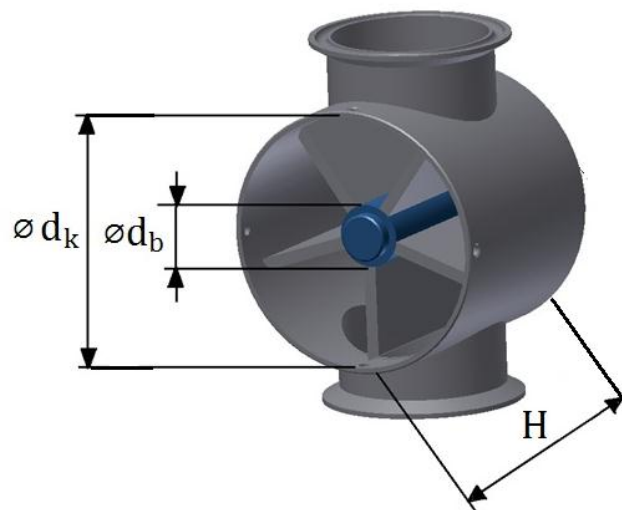
A cellás adagoló funkciója, hogy a ciklonból kijövő száraz anyagot a gyűjtőtartályba terelje, és azt közel légmentesen zárja.

A cellás adagolón áthaladó anyag tömegárama megegyezik a szállítócsiga méretezésénél számolttal. A méretezéshez felhasznált összefüggés [9]:

$$\dot{m} = z \cdot V_{\text{cella}} \cdot n_{\text{ce}} \cdot \rho_{\text{szemcse}} \cdot \Phi_{\text{ce}} \quad (3.11)$$

A cellás adagoló működtetéséhez a szállítócsigánál kisebb fordulatszámmal üzemelő villamos motort választottam, aminek a fordulatszáma viszont nem állítható. A ciklonból kilépő száraz anyagot folyamatos üzem esetében gyorsabban kell tudnia szállítania a cellás adagolónak, hogy ne következzen be eltömődés.

A cellás adagoló modellje, és a méretezés során felhasznált főbb méretei a 8. ábrán láthatóak.



8.ábra. A cellás adagoló modellje és főbb méretei

Az adagoló belső átmérője megegyezik a hosszával, tehát $D=H$. A tengely átmérője megegyezik a szállítócsiga tengelyével, mert a hajtáshoz ugyanolyan szabványos méretekkel rendelkező villamos motort választottam.

A méretezés során felvett értékek:

$$z = 5 \text{ db}$$

$$n_{\text{ce}} = 25 \text{ 1/min}$$

$$\phi_{\text{ce}} = 0,05$$

$$d_b = 20 \text{ mm}$$

A (3.11)-es képletből meghatároztam egy cella térfogatát:

$$V_{\text{cella}} = \frac{7,22 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot \frac{25}{60} \cdot 700 \cdot 0,05} = 9,9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Egy cella térfogata a 8. ábrából az alábbi módon számolható:

$$V_{\text{cella}} = \frac{(d_k^2 - d_b^2) \cdot \pi}{4} \cdot H \quad (3.12)$$

A (2.10)-es egyenlet rendezése után, felhasználva, hogy $d_k = H$ a cellás adagoló belső átmérőjére az alábbi harmadfokú egyenletet kapjuk:

$$d_k^3 - d_k \cdot d_b^2 - \frac{4 \cdot V_{\text{cella}}}{\pi} = 0 \quad (3.13)$$

A szükséges átalakítások után a cellás adagoló belső átmérője 50,2 mm. Gyártási okokból az adagoló belső átmérőjét 81 mm-re vettem fel. Az adagolóhoz egy 15,9 W teljesítményű, maximális terhelés alatt 24 1/min fordulatszámon üzemelő villamos motort választottam. A motor típusa: 192-12-125, táblázatát a 2. számú Melléklet tartalmazza.

3.5. A ciklon tervezése

A ciklonok olyan centrifugális elven működő mechanikus porleválasztó berendezések, amelyekben mozgó alkatrészek nélkül létrehozott centrifugális erő idézi elő a porszemcséknek a gázáramból történő leválasztását [4].

A ciklonba a szemcsék tangenciálisan lépnek be a légárammal együtt, majd ívelt pályán haladnak, többször körbefutva a leválasztótérben. A szemcsék a centrifugális erő hatására a ciklon hengeres fala felé vándorolnak, ahol lefékeződve kilépnek a légáramból. A kivált szemcsék nehézségi erő hatására a ciklon alsó részébe jutnak el. A légáram a ciklontestben kialakított merülőcsövön keresztül hagyja el a berendezést.

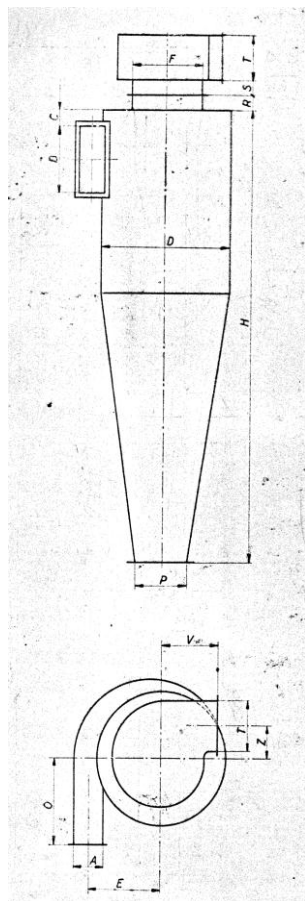
A porleválasztó ciklon méretezését a Szellőző Művek Kft. által kiadott katalógus alapján egy mérések útján összeállított tapasztalati méretezési módszer alapján végeztem el. Egy ciklon geometriája különböző szabványos méretekből tevődik össze, amelyek az 5. ábrán láthatóak. Mindegyik méret számolható a bemenő adatok függvényében.

A méretezés megkezdése előtt a kiindulási adatok a következők:

A ciklonba beáramló levegő térfogatárama:	$Q = 250 \text{ m}^3/\text{h}$
Az áramló levegő hőmérséklete:	$T = 90\text{-}100 \text{ }^\circ\text{C}$
A ciklon átmérőjét előzetesen felvettem:	$D = 150 \text{ mm}$

A ciklon átmérőjét úgy kell felvenni, hogy a hozzátartozó belépési keresztmetszetben a levegő sebessége legalább 17 m/s legyen. Jelen esetben ez az érték $D=150 \text{ mm}$ -es átmérőjű ciklonnál adódott.

A ciklon átmérőjéből az összes geometriai méret számolható, amelyek értékeit a 3. táblázat tartalmazza. A táblázat első sorában vannak a 9. ábrán feltüntetett geometriai méretek betűjelei. A harmadik sorban az adott méretek számértékei szerepelnek. A táblázat második sora ezeknek az értékeknek a kiszámításához szükséges empirikus szorzószámok (k). A harmadik sor értékeinek meghatározása úgy történik, hogy a jellemző méretet (D) módosítjuk a szorzószámmal.



9.ábra. Egy porleválasztó ciklon főbb méretei

3.táblázat. A ciklon fő méreteinek táblázata

Méret	A	B	C	D	E	F	F'	H	H'
Szorzó (k)	0,285	0,635	0,108	1	0,6	0,56	1	3,468	1,418
Érték [mm]	43	95	16	150	90	84	150	520	213
Méret	H''	O	P	R	S	T	V	Z	
Szorzó (k)	2,05	0,6	0,4	0,095	0,175	0,45	0,42	0,288	
Érték [mm]	308	90	60	14	26	68	63	43	

A geometriai méretek ismeretében a levegő belépési keresztmetszete az alábbi módon számolható:

$$A_{be} = A \cdot B = 0,043 \cdot 0,095 = 4,085 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (3.14)$$

ahol

A és B a belépő csomák méretei (ld. 4. ábra)

A ciklonba belépő levegő sebessége:

$$v_{be} = \frac{\dot{V}}{A_{be}} = \frac{\frac{250}{3600}}{4,085 \cdot 10^{-3}} = 17 \text{ m/s} \quad (3.15)$$

3.6. Anyagtároló edények

A berendezésben egyidejűleg kb. 1 liter űrtartalmú anyag van. A betápláló tartályban tároljuk a kiszárítandó szemeket. Az edény nyitható fedéllel rendelkezik, amin keresztül az anyag beönthető. Az edény egy hengeres és egy kúpos részből áll, az alján egy tolozárral lehet adagolni a szemeket a szállítócsigába. A gyűjtő edény szintén egy hengeres és kúpos részből áll. A termék kiürítése céljából ez az edény eltávolítható a rendszerből. A betápláló tartály is leválasztható, ha esetleg karbantartásra, illetve javításra szorulna a rendszer, vagy a szállítás megállításával a maradék nedves anyagot ki lehet üríteni.

Az anyagtároló tartályok térfogatát 6 literre vettem föl.

3.7. Csővezetékek

A ventilátor nyomócsomákja, illetve a fűtőegység csatlakozó csomákjainak átmérője 100 mm, ezért a berendezés különböző elemeit összekötő csővezetékek átmérőjét is $d_{cső} = 100 \text{ mm}$ -nek választottam.

A csövekben áramló levegő sebessége:

$$v_{\text{lev}} = \frac{\dot{V}}{\frac{d_{\text{cső}}^2 \cdot \pi}{4}} = \frac{\frac{250}{3600}}{\frac{0,1^2 \cdot \pi}{4}} = 8,84 \text{ m/s} \quad (3.16)$$

A szárító előtt, két csővezeték csatlakozásánál tolózárrel lehet állítani az áramló levegő térfogatáramát. A szárító előtt szabványos csőhosszak vannak biztosítva, hogy mérőperem segítségével meghatározható legyen a levegő térfogatárama.

4. A megvalósított mérőállomás

4.1. A mérőállomás ismertetése

Ahhoz, hogy a berendezésen hallgatói méréseket lehessen elvégezni, a készülékben áramló levegő fizikai tulajdonságainak mérésére alkalmas mérőeszközök vannak elhelyezve. A hallgatói mérésekhez az alábbi fizikai paraméterek mérését kell biztosítani:

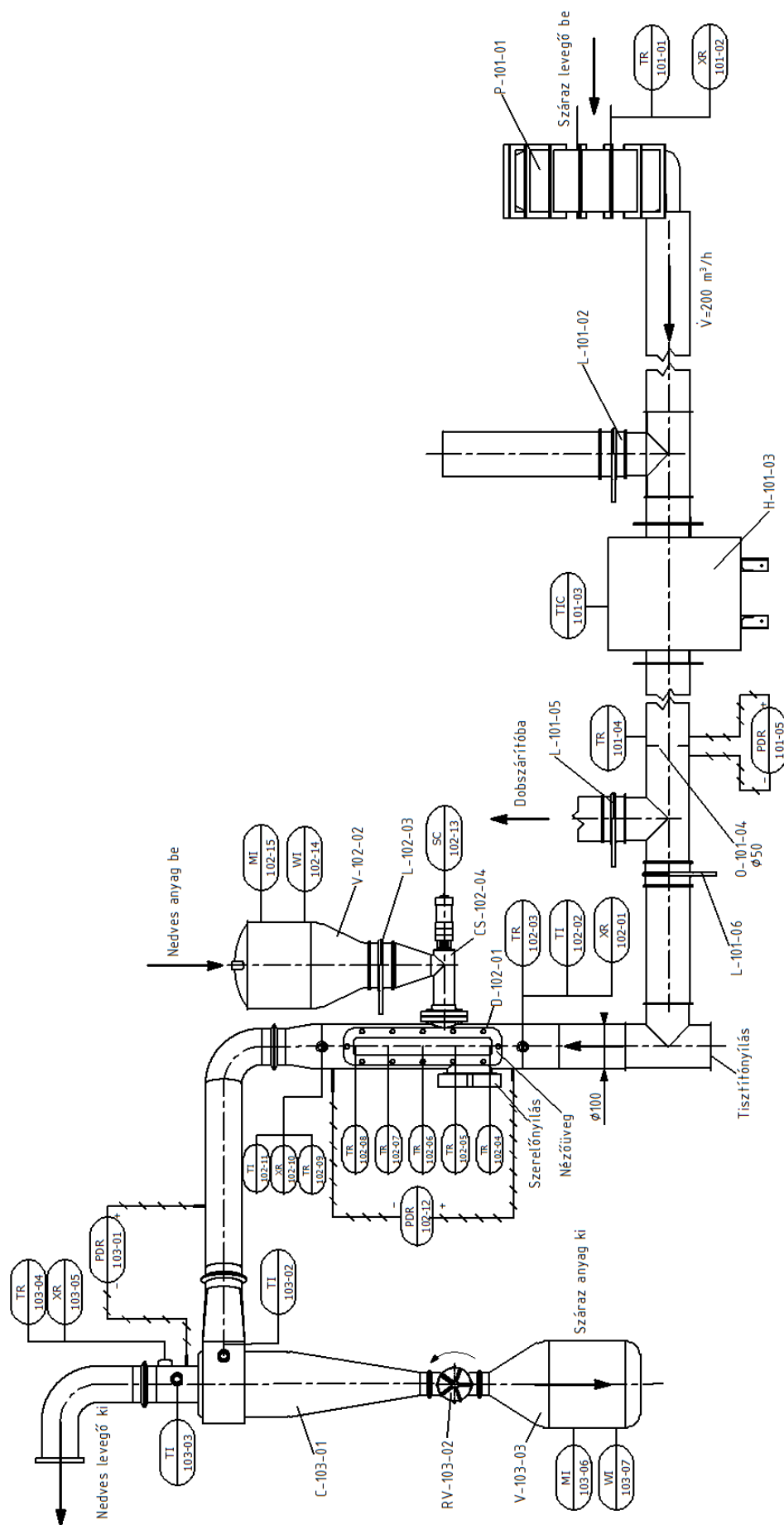
A levegő hőmérséklete a mérőperem előtt:	T_{mp}
A levegő nyomáskülönbsége a mérőperem előtt és után:	Δp_{mp}
A szárítóban áramló levegő hőmérséklete a rács előtt:	$T_{sz,be}$
A szárítóban áramló levegő páratartalma a rács előtt:	$Y_{sz,be}$
A szárítóban áramló levegő hőmérséklete a fluidizált anyaghalmoz fölött:	$T_{sz,ki}$
A szárítóban áramló levegő páratartalma a fluidizált anyaghalmoz fölött:	$Y_{sz,ki}$
A levegő nyomáskülönbsége a szárítóban:	Δp_{sz}
A levegő hőmérséklete a ciklonba való belépés előtt:	$T_{ci,be}$
A levegő hőmérséklete a ciklonból való kilépés után:	$T_{ci,ki}$
A levegő páratartalma a ciklonból való kilépés után:	$Y_{ci,ki}$
A ciklonban áramló levegő nyomáskülönbsége:	Δp_{ci}
A nedves anyag nedvességtartalma a betápláló edényben:	X_{be}
A száraz anyag nedvességtartalma a gyűjtőedényben:	X_{ki}

A mérőberendezés műszerezett folyamatábrája a 10. ábrán látható.

Az L-101-05-ös jelű tolózár zárásával, és az L-101-06-os jelű tolózár nyitásával beállítjuk a csővezetékben áramló levegő irányát. Ezután a P-101-01-es jelű ventilátor elindításával a levegő áramlása biztosítható. A környezeti levegő hőmérsékletét a TR-101-01-es jelű hőmérő, páratartalmát az XR-101-02-es jelű páramérő regisztrálja. A berendezésben a levegő térfogatáramának szabályozása az L-101-02-es jelű tolózár segítségével történik. A H-101-03-as jelű légmelegítő elindításával tudjuk szabályozni az azon átáramló levegő hőmérsékletét. Az előmelegítőben áramló levegőt a TIC-101-03-as jelű hőmérséklet-szabályzóval melegítjük fel. A levegő kívánt hőmérsékletre történő felmelegítése után adatgyűjtő segítségével rögzítjük a műszerek által mért értékeket. A csővezetékben áramló levegő sebességét mérőperem segítségével mérjük. A mérőperemen átáramló levegő nyomáskülönbségét a PDR-101-05-ös jelű nyomáskülönbség-távadó méri, a levegő hőmérsékletét a mérőperem előtt pedig a TR-101-04-es jelű hőmérő. A nedves anyag

V-102-02-es jelű tartályba töltése előtt az L-102-03-as jelű tolózár zárt állapotban van, betöltés után a tartály fedele zárt, a tolózár nyitott állapotba kerül. A betáplált nedves anyag tömegét és nedvességtartalmát előzetesen mérjük, illetve számítjuk. A nedves anyag a CS-102-04-es jelű szállítócsigába kerül, aminek a fordulatszáma az SC-102-13-as jelű fordulatszám-szabályzóval tudjuk beállítani a kívánt értékre. A szállítócsiga az anyagot a D-102-01-es jelű fluidizációs szárítóba adagolja, ahol megtörténik az anyag levegővel történő érintkeztetése, és a fluidizációs szárítás. A fluidizációs szárítóban az XR-102-01-es jelű műszer a szárítóba belépő levegő páratartalmát, hőmérsékletét a TI-102-02-es és TR-102-03-as jelű hőmérő méri. A szárítótér hossza mentén öt pontban rögzítjük a levegő hőmérsékletét, a TR-102-04-es, TR-102-05-ös, TR-102-06-os, TR-102-07-es, TR-102-08-as jelű hőmérővel. A szárítót elhagyó levegő páratartalmát az XR-102-10-es jelű mérőműszer, hőmérsékletét a TR-102-09-es és TR-102-11-es jelű hőmérő regisztrálja. A szárítóba be- és kilépő levegő nyomáskülönbségét a PDR-102-12-es jelű nyomáskülönbség-távadó méri. A szárítási idő elteltével az anyag a C-103-01-es jelű porleválasztó ciklonba áramlik, ahol az anyag leválasztásra kerül a légáramlatból. Ezután nedves levegő a laboratórium légcsatornájába távozik. A ciklonba be- és kilépő levegő nyomáskülönbségét a PDR-103-01-es jelű nyomáskülönbség-távadóval mérjük. A ciklonba belépő levegő hőmérsékletét a TI-103-02-es jelű hőmérő, a ciklonból kilépő levegő hőmérsékletét a TI-103-03-as és TR-103-04-es hőmérő, páratartalmát pedig az XR-103-05-ös jelű műszer méri. A száraz anyag a ciklonból kilépve az RV-103-02-es jelű cellás adagolón keresztül a V-103-03-as jelű száraz anyagot gyűjtő tartályba kerül. A száraz anyag tömegét és nedvességtartalmát a végén mérjük és számítjuk.

A mérőberendezésen elhelyezett mérőeszközöket a 4. táblázat tartalmazza.

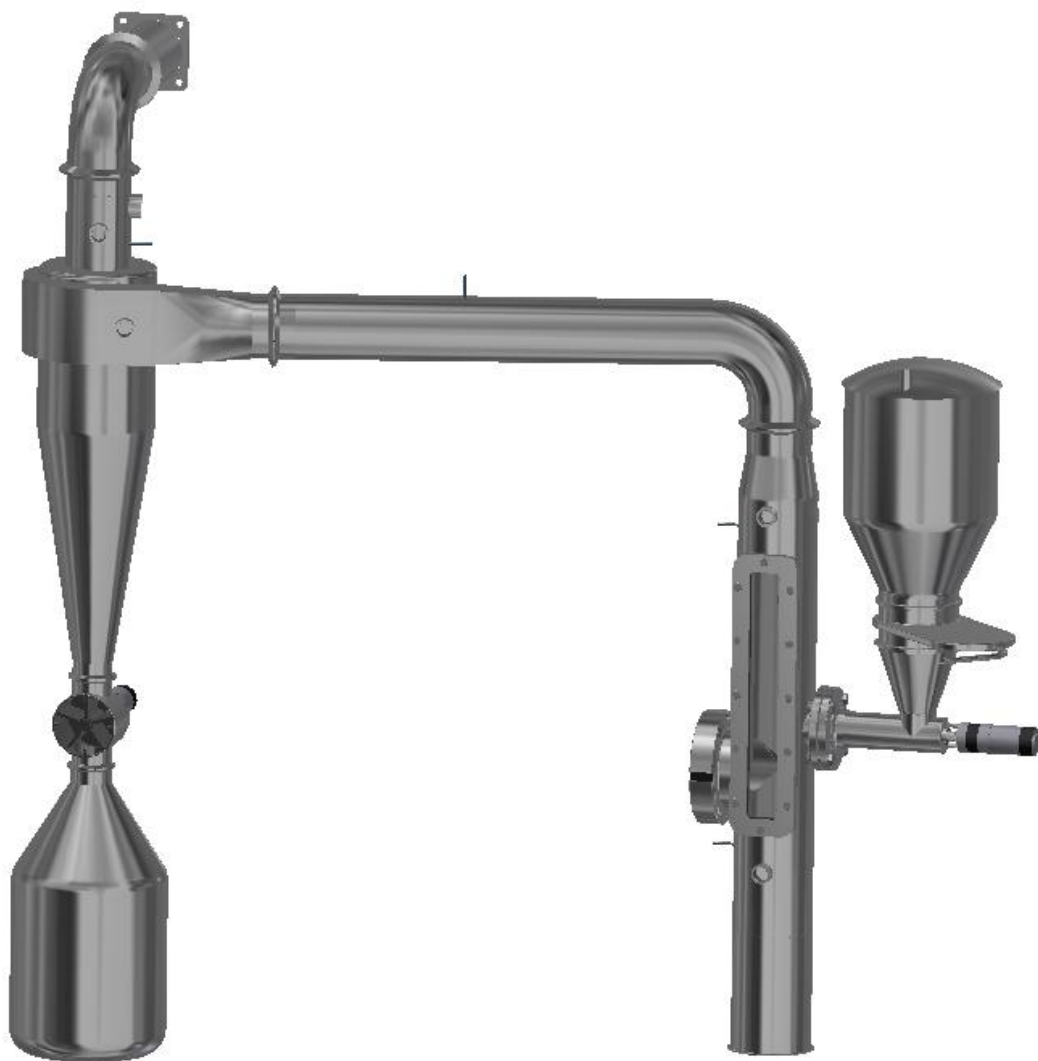


10. ábra. A mérőberendezés műszerezett rajza

4.táblázat. A mérőberendezésen elhelyezett mérőeszközök

Műszerazonosító	Műszer által mért mennyiség
TR-101-01	Ventilátorba belépő levegő hőmérséklete
XR-101-02	Ventilátorba belépő levegő páratartalma
TIC-101-03	Szárítógáz hőmérséklet szabályzása
TR-101-04	Levegő hőmérséklete a mérőperem előtt
PDR-101-05	Mérőperemen mért nyomásesés
XR-102-01	Szárítóba belépő levegő páratartalma
TI-102-02	Szárítóba belépő levegő hőmérséklete
TR-102-03	Szárítóba belépő levegő hőmérséklete
TR-102-04	Levegő hőmérséklet a szárítóban
TR-102-05	Levegő hőmérséklet a szárítóban
TR-102-06	Levegő hőmérséklet a szárítóban
TR-102-07	Levegő hőmérséklet a szárítóban
TR-102-08	Levegő hőmérséklet a szárítóban
TR-102-09	Szárítóból kilépő levegő hőmérséklete
XR-102-10	Szárítóból kilépő levegő páratartalma
TI-102-11	Szárítóból kilépő levegő hőmérséklete
PDR-102-12	Szárítóberendezés belépő és kilépő csonkja közötti nyomáskülönbség
SC-102-13	Szállítócsiga fordulatszám állítása
WI-102-14	Szárítóba belépő nedves anyag tömege
MI-102-15	Szárítóba belépő nedves anyag nedvességtartalma
PDR-103-01	Ciklonba belépő, ill. kilépő levegő közti nyomáskülönbség
TI-103-02	Ciklonba belépő levegő hőmérséklete
TI-103-03	Ciklonból kilépő levegő hőmérséklete
TR-103-04	Ciklonból kilépő levegő hőmérséklete
XR-103-05	Ciklonból kilépő levegő páratartalma
MI-103-06	Ciklonból kilépő száraz anyag nedvességtartalma
WI-103-07	Ciklonból kilépő száraz anyag tömege

A berendezés modelljének képe a 11. ábrán látható (mérőeszközök nélkül). A gyártás során néhány felhasznált törzsrajz a 3. számú Mellékletben található.



11.ábra. A berendezés 3D-s modellje

A legyártott készülék ezután beüzemelésre került a Tanszék laboratóriumában. A beüzemelésre rendelkezésünkre állt a légáramlatot biztosító ventilátor, a levegőt szállító csővezeték, az előmelegítő, a laboratórium elektromos hálózata és a berendezésnek fenntartott szabad terület. A beépítési környezet modellje és fényképe a 12. és 13. ábrákon látható.



12.ábra. A beépítési környezett modellje és fényképe



13. A beüzemelt készülék fényképe

4.2. A mérés elindítása

1. L-101-05 jelű tolózár zárása
2. L-101-06 jelű tolózár nyitása
3. P-101-01 jelű ventilátor elindítása
4. L-101-02 jelű tolózár segítségével a levegő térfogatáramának szabályozása
5. H-101-03 jelű légmelegítő beindítása, annak hőmérsékletének beállítása
6. Üzemi hőmérséklet elérése
7. Adatgyűjtő elindítása
8. Az L-102-03 jelű tolózár elzárása
9. Nedves anyag betöltése a V-102-02 jelű tartályba
10. A V-102-02 jelű tartály fedelének lezárása
11. A CS-102-04 jelű szállítócsiga fordulatszámának beállítása SC-102-13 segítségével
12. RV-103-02 jelű cellás adagoló elindítása
13. Nedves anyag beadagolása a szárítóberendezésbe az L-102-03 jelű tolózár nyitásával

4.3. A mérés befejezése

1. Az anyag kiszárítása után az adatgyűjtő leállítása, és a H-103-03 jelű légmelegítő kikapcsolása
2. Az RV-103-02 jelű cellás adagoló kikapcsolása
3. A szárítógáz hőmérsékletének lecsökkenése után a P-101-01 ventilátor kikapcsolása
4. A száraz anyag eltávolítása a V-103-03 jelű szárazanyag tartályból
5. A V-103-03 jelű száraz anyagot gyűjtő tartály visszahelyezése a mérőberendezésre
6. Főkapcsoló lekapcsolása

5. Mérési tematika

A kísérleti mérőállomás kialakítása hallgatói mérések és kutatási feladatok elvégzését teszi lehetővé. A hallgatói mérések során a mérést végzők megismerkednek a fluidizáció jelenségével, tanulmányozhatják és meghatározhatják a szárítási jellemzőket, valamint vizsgálhatják gázáramból történő szilárd anyag leválasztását ciklon segítségével. A mérés során meghatározott jellemzőket irodalmi adatokkal vethetik össze a hallgatók.

A mérések célja:

- szemcsés halmaz nyomásesésének vizsgálata a gáz áramlási sebesség függvényében
- fluidizált állapotban lévő szemcsés halmaz száradási jellemzőinek vizsgálata (anyag nedvességtartalom, gáz be- és kilépési hőmérséklet és nedvességtartalom méréssel történő meghatározása)
- párolgási sebesség méréssel történő meghatározása
- térfogati hőátadási tényező méréssel történő meghatározása
- ciklon áramlási ellenállásának és ellenállás-tényezőjének meghatározása a gáz ciklonba történő belépési sebességének függvényében

5.1. A szárítólevegő térfogatáramának meghatározása

A szárításhoz szükséges levegőt ventilátor szállítja, mennyisége az előmelegítő után elhelyezett mérőperemmel mérhető. A mérőperem sarokmegcsapolású, $d_{mp} = 50 \text{ mm}$, $d_{cső} = 100 \text{ mm}$

A levegő térfogatáramát az alábbi összefüggéssel lehet számítani [5]:

$$\dot{V} = C \cdot \varepsilon \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \frac{d_{mp}^2 \pi}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p_{mp}}{\rho_{mp}}} \quad (5.1)$$

A (4.1) egyenletben $\beta = \frac{d_{mp}}{d_{cső}}$ mérőperemre jellemző átmérőviszony a mérőperem fojtónyílása és cső belső átmérőjének hányadosa, a C-jelű konstans pedig az átfolyási szám, amelynek értékét a Stolz-féle formulával lehet kiszámítani:

$$C = 0,5959 + 0,0312 \cdot \beta^{2,1} - 0,184 \cdot \beta^8 + 0,0029 \cdot \beta^{2,5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_{mp}} \right)^{0,75} \quad (5.2)$$

Re_{mp} a mérőperem körüli áramlást jellemző Reynolds-szám:

$$Re_{mp} = \frac{v_{lev} \cdot d_{cső}}{\nu_{mp}} \quad (5.3)$$

Az átmérőviszony:

$$\beta = \frac{d_{mp}}{d_{cső}} = \frac{50}{100} = 0,5$$

Az ε expanziós szám a következő képlettel számolható:

$$\varepsilon = 1 - (0,43 + 0,35 \cdot \beta^4) \cdot \frac{\Delta p_{mp}}{\kappa \cdot \rho_{mp}} \quad (5.4)$$

5.2. Szemcsés halmaz nyomásesésének meghatározása

Nyugvó szemcsés halmaz nyomásesésének változását 2. ábra szemlélteti. A minimális fluidizációs sebességig az ágy jellemzően nyugalomban van. A minimális fluidizáció sebességet túllépve a nyomáskülönbség közel állandó értéket vesz fel. A maximális fluidizációs légsebességnél nagyobb sebesség esetén, a nyomáskülönbség nőni fog.

Az állandó nyomásesésű szakaszon a nyomáskülönbség az alábbi módon számolható [6]:

$$\Delta p = L \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_{szemcse} - \rho_{lev}) \cdot g \quad (5.5)$$

Ha nem lenne hézag a szemcsék között, a töltet által elfoglalt redukált oszlopmagasság:

$$L_0 = L \cdot (1 - \varepsilon) \quad (5.6)$$

Mivel ez az érték állandó a fluidizáció során, ezért a nyomásesést a továbbiakban a redukált töltetmagasságra vonatkoztatjuk:

$$\frac{\Delta p}{L_0} = (\rho_{szemcse} - \rho_{lev}) \cdot g \quad (5.7)$$

Az áramlási nyomáscsökkenés a töltött oszlopok hidrodinamikai ellenállására levezetett képlet alapján is számítható:

$$\frac{\Delta p}{L_0} = 4 \cdot f_m \cdot \frac{1}{d_{\text{szemcse}}} \cdot \frac{v_{\text{lev}}^2 \cdot \rho_{\text{lev}}}{2} \quad (5.8)$$

Az ismert térfogatú szemcsés anyag tömegét lemérve kiszámítható a töltet fajlagos hézagtérfogata:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{töltet}} - \frac{m_{\text{töltet}}}{\rho_{\text{szemcse}}}}{V_{\text{töltet}}} = 1 - \frac{\rho_{\text{halmaz}}}{\rho_{\text{szemcse}}} \quad (5.9)$$

A halmazsűrűség számítása:

$$\rho_{\text{halmaz}} = \frac{m_{\text{anyag}}}{\frac{d_{\text{száritó}}^2 \cdot \pi}{4} \cdot L} \quad (5.10)$$

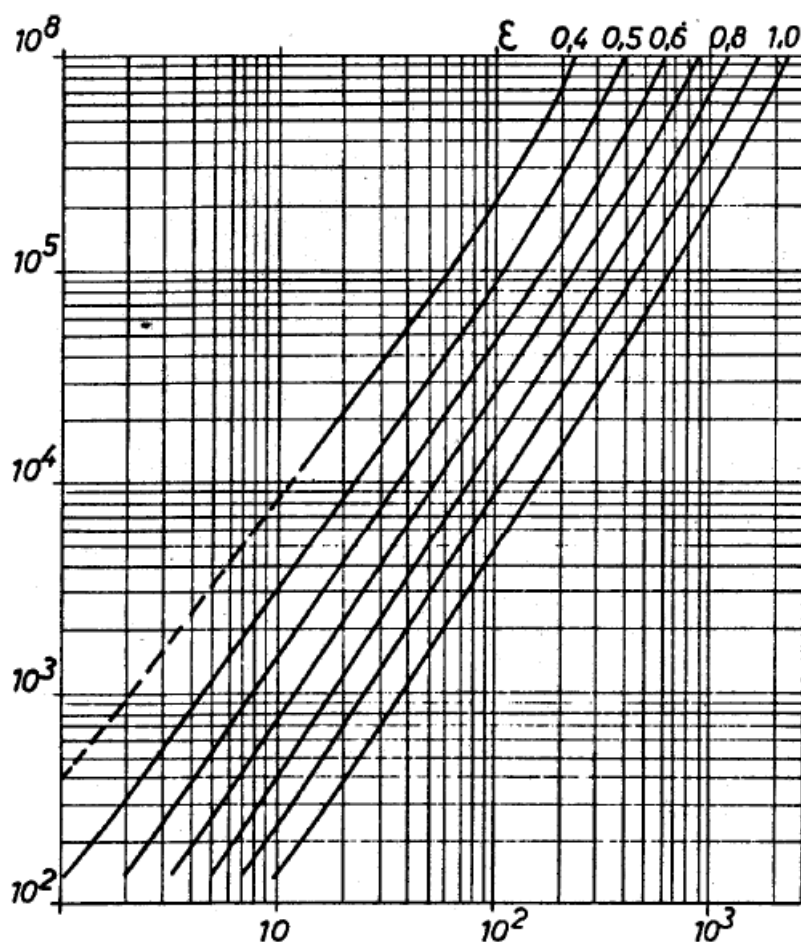
A mérés során össze kell vetni a töltet súlyát a fluidizált állapotban a töltetben létrejövő nyomáscsökkenésből származó nyomóerővel:

$$\frac{d_{\text{száritó}}^2 \cdot \pi}{4} L \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_{\text{szemcse}} - \rho_{\text{lev}}) \cdot g = \frac{d_{\text{száritó}}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \Delta p \quad (5.11)$$

Mivel a szemcsék különböző méretűek, ezért a részecskék átmérőjének meghatározása úgy történik, hogy ismert mennyiségű szemcsének a tömegét mérleggel lemérjük. Ebből a részecskék átlagos átmérője:

$$\bar{d} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot m_{\text{töltet}}}{n_{\text{szemcse}} \cdot \pi \cdot \rho_{\text{szemcse}}}} \quad (5.12)$$

A nyomáskülönbség kiszámításához a (5.8)-as képletben található f_m súrlódási tényező értékét a 14. ábrán található diagram segítségével lehet meghatározni. A diagram vízszintes tengelyén a Re_m értékei szerepelnek, a függőleges tengelyen pedig az $f_m \cdot Re_m^2$.



14. ábra. $f_m \cdot Re_m^2 - Re_m$ diagram [6]

Reynolds-szám meghatározása:

$$Re_m = \frac{v_{lev} \cdot d_{szemcse}}{v_{száritó}} \quad (5.13)$$

A 7. ábrán a függőleges tengelyen szereplő $f_m \cdot Re_m^2$ szorzat értékének meghatározása, a (4.8)-as egyenlet segítségével az alábbi módon történik:

$$f_m \cdot Re_m^2 = \frac{(\rho_{szemcse} - \rho_{lev}) \cdot g \cdot \rho_{lev} \cdot d_{szemcse}^3}{2 \cdot \mu_{lev}^2} \quad (5.14)$$

A vizsgált töltet fajlagos hézagterfogata, és az $f_m \cdot Re_m^2$ érték ismeretében a diagramból leolvasható a Reynolds szám, melyből meghatározható a szemcsés ágy nyomásesése.

5.3. Száradási jellemzők vizsgálata

5.3.1. Nedvesség mérleg egyenlet

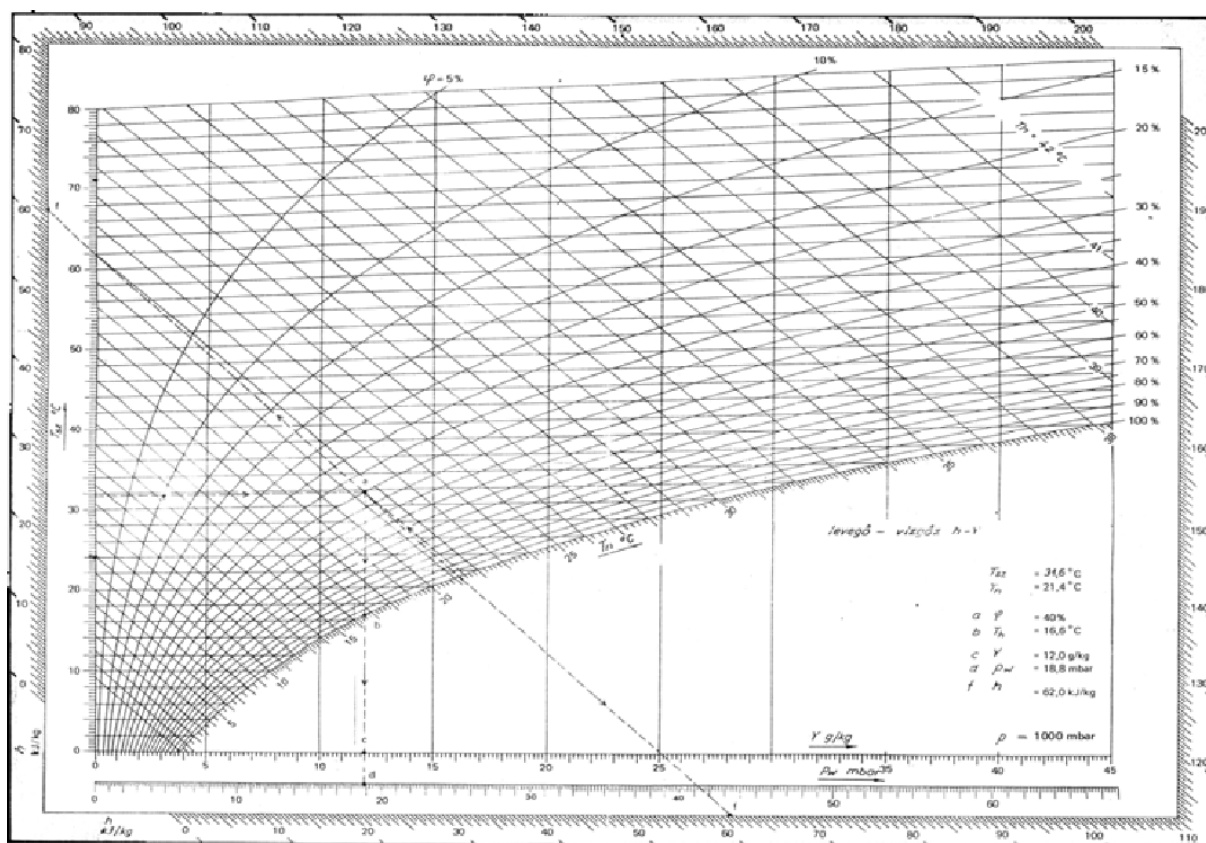
A szárító kialakítása és műszerezése lehetőséget nyújt a száradás előtti és a száradás utáni anyag nedvességtartalmának tömegméréssel történő meghatározására. A szárítótérbe belépő és az azt elhagyó levegő hőmérsékletét és nedvességtartalmát a szárítási idő függvényében adatgyűjtő regisztrálja. Ezekkel az értékekkel a nedvesség mérleg [11]:

$$\dot{m}_G = \int_{t=0}^{t=t_{\text{végso}}} (Y_{be} - Y_{ki}) \cdot dt = m_S \cdot (X_{be} - X_{ki})$$

Az abszolút nedvességtartalom definíciója:

$$Y = \frac{m_V}{m_G} \quad (5.15)$$

Az abszolút nedvességtartalom és hőmérséklet ismeretében Mollier diagram felhasználásával meghatározható a gáz fajlagos entalpiája (15.ábra).



15.ábra. Nedves levegő entalpia-koncentráció diagram

A párolgási sebesség értéke az alábbi összefüggéssel számolható:

$$N = \frac{\Delta m_{\text{na}}}{A_{\epsilon} \cdot \Delta t} \quad (5.16)$$

5.3.2. Térfogati hőátadási tényező meghatározása

A hőátviteli viszonyokat egy fluidizált rétegben három vonatkoztatásban lehet vizsgálni [8]:

- hőátvitel a gáz és szemcsék között
- hőátvitel a szemcsék és a készülékfal között
- hővezetés a szemcsék között

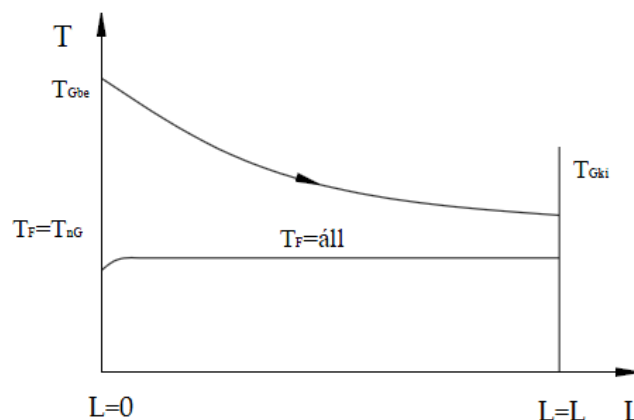
Mivel a fluidizáció során fellépő hőátvitel teljes körű vizsgálata meghaladná a laboratóriumi mérés időkereteit, ezért mérés során a térfogati hőátadási tényezőt kell meghatározni. A konvektív hőközlésű szárításkor a fluidizációt fenntartó, valamint a hőközlést biztosító gáz és a száradó szemcse közötti átvitt hőáram az alábbi módon számolható [7]:

$$\dot{m}_G \cdot c_{nG} \cdot dT_G = \alpha \cdot (T_G - T_F) \cdot dA_{\epsilon} = \alpha \cdot (T_G - T_F) \cdot a \cdot A_{\text{szárító}} \cdot dL \quad (5.17)$$

a fajlagos érintkező felület:

$$a = \frac{dA_{\epsilon}}{dV_{\text{szárító}}} = \frac{dA_{\epsilon}}{A_{\text{szárító}} \cdot dL} \quad (5.18)$$

A szárítógáz és a száradó anyag hőmérsékletének alakulása a szárító hossza mentén, a felületi nedvesség párolgási szakaszában a 16. ábrán látható:



16.ábra. Hőmérsékletek alakulása a szárító hossza mentén

Az ágy magassága a hőmérséklet hajtóerővel:

$$dL = \frac{\dot{m}_G \cdot c_{nG}}{A_{\text{szárító}} \cdot \alpha \cdot a} \cdot \frac{dT_G}{T_G - T_F}$$

Integrálva és felhasználva a felületi nedvességtartalom szakaszán $T_F = \text{állandó}$ értéket:

$$L = \frac{\dot{m}_G \cdot c_{nG}}{A_{\text{szárító}} \cdot \alpha \cdot a} \cdot \ln \frac{T_{G,be} - T_F}{T_{G,ki} - T_F}$$

Ebből a térfogati hőátadási tényező a geometriai adatok, valamint a mért hőmérséklet adatok felhasználásával:

$$a \cdot \alpha = \frac{\dot{m}_G \cdot c_{nG}}{A_{\text{szárító}} \cdot L} \cdot \ln \frac{T_{G,be} - T_F}{T_{G,ki} - T_F} \quad (5.19)$$

A mérés menete:

A mérések kezdete előtt meghatározható a kiindulási anyag tömege és térfogata. Az anyag nedvességtartalma a kisminta szárítókamrában történő teljes kiszáritását követően számítható.

A P-101-01-es jelű ventilátor által áramoltatott levegő térfogatáramát az L-101-02-es jelű tolózárrel szabályozzuk, annak hőmérsékletét pedig a H-101-03-as jelű előmelegítő segítségével. Az MI-102-15-ös jelű tartályba bejuttatott nedves anyagot a CS-102-04-es jelű szállítócsiga juttatja a D-102-01-es jelű fluidizációs szárítóba. A művelet során a szárító hossza mentén több pontban mérjük a levegő hőmérsékletét és páratartalmát, valamint a szárítóba be- és kilépő levegő nyomáskülönbségét a PDR-102-12-es jelű nyomáskülönbség-távadóval. A szárítóból eltávozó szemcsék a C-103-01-es jelű ciklonból az RV-103-02-es jelű cellás adagolón keresztül az MI-103-06-os jelű gyűjtőedénybe kerülnek. A végtermék tömege és nedvességtartalma ezután mérhető és számítható.

Az adatok ismeretében mérhető és számítható a fluidizációs szárító nyomásesése, valamint számítható a párolgási sebesség és a térfogati hőátadási tényező értéke a művelet során.

Az adatok ismeretében a szárító jelleggörbéit diagramokon kell ábrázolni:

- a szemcsés anyagalmaz mért és számított nyomásesésének összehasonlítása a belépési sebesség függvényében:

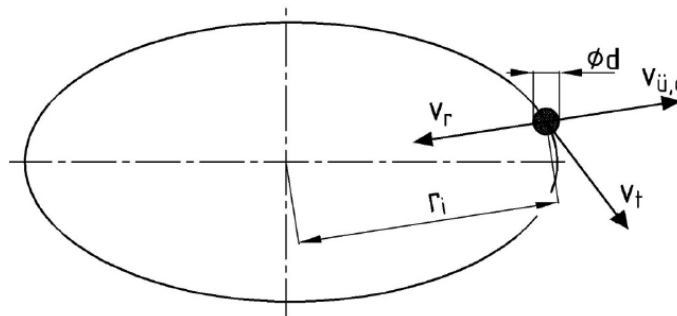
$$\Delta p_{\text{mért}} = f(v_{\text{be}}), \Delta p_{\text{számított}} = f(v_{\text{be}})$$

- a szárítóba belépő levegő hőmérséklete az idő függvényében:
 $T_{\text{sz,be}} = f(t)$
- a szárítóba belépő levegő nedvességtartalma az idő függvényében:
 $Y_{\text{sz,be}} = f(t)$
- a szárítót elhagyó levegő hőmérséklete az idő függvényében:
 $T_{\text{sz,ki}} = f(t)$
- a szárítót elhagyó levegő nedvességtartalma az idő függvényében:
 $Y_{\text{sz,ki}} = f(t)$

5.4. Ciklon vizsgálata

A mérés során változó ciklon belépési sebesség mellett meg kell határozni a nyomásesést, valamint ellenállás-tényezőt.

A ciklonban mozgó szemcse sebességkomponensei a 17. ábrán látható.



17. ábra. Sebességábra a ciklonban

A ciklonok nyomásesése a ξ ellenállás-tényezővel jellemezhető. Ennek értelmében egy porleválasztó ciklon nyomásesése anyagszállítás esetén:

$$\Delta p_c = \xi \cdot \frac{\rho_{\text{lev,be}}}{2} \cdot v_{\text{be}}^2 \quad (5.20)$$

Ebből a ciklon ellenállás-tényezője:

$$\xi = \frac{\Delta p_c}{\frac{\rho_{\text{lev,be}}}{2} \cdot v_{\text{be}}^2} \quad (5.21)$$

Az ellenállás-tényező is diagramban ábrázolható különböző belépési sebességek függvényében. Tehát a mérés során ábrázolandó a $\xi = f(v_{be})$ függvény, továbbá a ciklon nyomásesése:

- anyagszállítás-mentes esetben: $\Delta p_{c0} = f(v_{be})$
- anyagszállítás esetében: $\Delta p_c = f(v_{be})$.

A mérés menete:

A mérési feladatok megkezdése előtt a H-101-03-as jelű előmelegítő előtt elhelyezett L-101-02-es tolózár segítségével a légsebesség értékét be lehet állítani egy kívánt értékre, és a mérés során a tolózárral ezt az értéket változtatjuk. A C-103-01-es jelű ciklonba belépő és kilépő levegő hőmérséklete leolvasható, ennek függvényében a levegő fizikai tulajdonságai meghatározhatóak. A nyomáskülönbség értékeit a ciklonon elhelyezett PDR-103-01-es jelű nyomáskülönbség-távadó segítségével folyamatosan regisztráljuk.

Ezen adatok ismeretében a porleválasztó ciklon jelleggörbéi ábrázolhatóak.

6. Összegzés

Az előzetes irodalmi kutatások és más hasonló gyártmányok vizsgálata után a tervezési és a gyártási szempontok figyelembe vételével megterveztem egy kísérleti fluidizációs szárító berendezést. Elkészítettem a berendezés gyártásához szükséges dokumentációt, valamint a beépítéshez szükséges 3D-s modellt. A berendezés megfelel a tervezés során felállított fő szempontoknak és követelményeknek. A készülék legyártása után részt vettem a berendezés összeszerelésében és beüzemeltetésében.

A fluidizációs szárítóberendezés hallgatói kísérletek, valamint tudományos kutatáshoz szükséges mérések végrehajtására is alkalmas.

Elkészítettem a hallgatói mérések lebonyolításához szükséges mérési tematikát, mely során vizsgálható a szárítás anyagmérlege, a térfogati hőátadási tényező, valamint a ciklon ellenállása és ellenállás tényezője.

A méréssel meghatározott jellemzők irodalmakból származó összefüggésekkel is összevethetők.

Összességében egy korszerű, a mai elvárásoknak megfelelő mérőrendszer került megtervezésre és kialakításra.

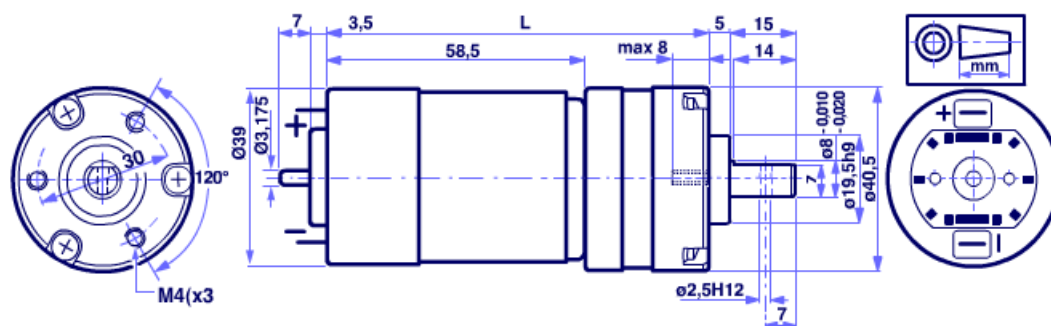
7. Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Imre László, *Szárítási kézikönyv*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974. 483-494. oldal
- [2] Cséfalvay Edit, Mika László Tamás, *Vegyipari művelettan jegyzet*, ELTE Kémiai Intézet, Budapest, 2008. <http://www.scribd.com/doc/90008308/75/SZARITAS>
- [3] Dr Benkő János, Nagy Zita, *Szállítócsigák tervezési segédlet*, Gödöllő, 2010. http://www1.gek.szie.hu/kori/Letoltes/Szallitocsigna_tervezes.pdf
- [4] Dr. Örvös Mária: *Levegőtisztaság-védelem*, Budapest, 2010. Oktatási segédlet
- [5] Magyar Szabványügyi Hivatal: Folyadékáram-mérés nyomáskülönbség elvén működő eszközökkel, MSZ-ISO-5167-1
- [6] http://vm2.kkft.bme.hu/praktikum/Prakt63_fluid.pdf
- [7] Csirmaz Antal: *Vegyipari műveleti gyakorlatok, II/14. évfolyam*, Observans Kft. Budapest, 2009.
- [8] <http://fikesz.hu/shop/aktivszen-granulum-por-es-paplan/161-aktivszen-acm-20-4.html>
- [9] Csizmazia Zoltán, *Műszaki ismeretek*, 2011
http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0010_1A_Book_06_Muszaki_ismeretek/ch10s07.html
- [10] Dr. Házkötő István: *Műszaki 2D-s Ábrázolás*, Műegyetemi Kiadó, 2008.
- [11] Dr. Örvös Mária: *Diffúziós eljárások és berendezések, 1.rész (Száritás)* Budapest, 2008.

8. Mellékletek

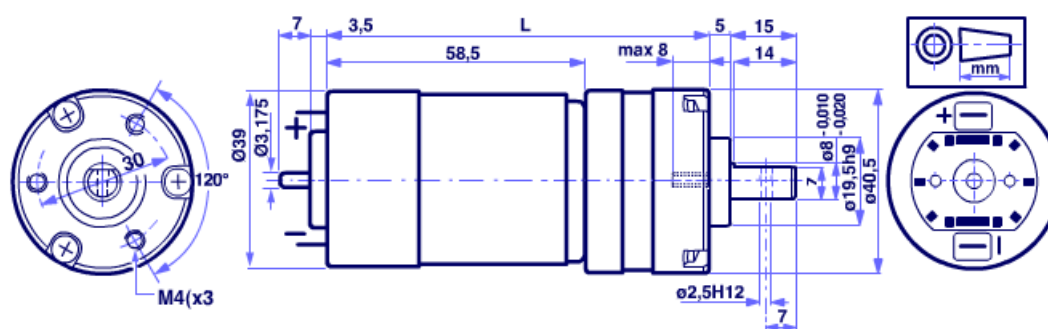
1.sz. Melléklet: A szállítócsigához választott villamos motor adatai

TIPO TYPE			TENSIONE NOMINALE	L	RAPPORTO :1	COPPIA MASSIMA	VELOCITA' SPEED		CORRENTE CURRENT		POTENZA ASSORBITA
							SENZA CARICO	CON MAX COPPIA	SENZA CARICO	CON MAX COPPIA	CON MAX COPPIA
			NOMINAL VOLTAGE	mm	RATIO TO:1	MAXIMUM TORQUE	NO LOAD	AT MAX TORQUE	NO LOAD	AT MAX TORQUE	INPUT POWER AT MAX TORQUE
			v			Ncm	rpm	A		W	
E 192	12 24	3	12 24	86	3,66	15	1100 1100	700 770	<0,4 <0,2	1,70 0,96	20,4 23
E 192	12 24	5	12 24	86	5	20	800 830	510 575	<0,4 <0,2	1,75 0,95	21 22,8
E 192	12 24	13	12 24	93	13,44	45	300 300	200 225	<0,4 <0,2	1,65 0,85	19,8 20,4
E 192	12 24	18	12 24	93	18,33	60	218 226	155 170	<0,4 <0,2	1,65 0,84	19,8 20,2
E 192	12 24	25	12 24	93	25	90	160 166	105 118	<0,4 <0,2	1,75 0,88	21 21,1
E 192	12 24	49	12 24	100	49,29	160	82 82	58 60	<0,4 <0,2	1,60 0,85	19,2 20,4
E 192	12 24	67	12 24	100	67,22	220	59,5 61,5	40 45	<0,4 <0,2	1,80 0,88	21,6 21,1
E 192	12 24	91	12 24	100	91,66	270	43,6 45	31 34	<0,4 <0,2	1,70 0,85	20,4 20,4
E 192	12 24	125	12 24	100	125	300	32 33	24 26	<0,4 <0,2	1,32 0,64	15,9 15,4
E 192	12 24	180	12 24	107	180,75	220	22 22	20 20	<0,4 <0,2	0,75 0,42	9 10,1
E 192	12 24	246	12 24	107	246,48	300	15,2 16,8	14,5 15	<0,4 <0,2	0,87 0,43	10,5 10,3
E 192	12 24	336	12 24	107	336,11	300	11,9 12,3	11 11,5	<0,4 <0,2	0,69 0,34	8,3 8,2
E 192	12 24	458	12 24	107	458,33	300	9 9,5	8,5 9	<0,4 <0,2	0,54 0,28	6,5 6,7
E 192	12 24	625	12 24	107	625	300	6,4 6,6	6 6,2	<0,4 <0,2	0,46 0,23	5,5 5,5



2.sz. Melléklet: A cellás adagolóhoz választott villamos motor adatai

TIPO TYPE			TENSIONE NOMINALE		L	RAPPORTO :1 RATIO TO:1		COPPIA MASSIMA MAXIMUM TORQUE		VELOCITA' SPEED		CORRENTE CURRENT		POTENZA ASSORBITA CON MAX COPPIA	
										SENZA CARICO	CON MAX COPPIA	SENZA CARICO	CON MAX COPPIA	INPUT POWER AT MAX TORQUE	
			NO LOAD	AT MAX TORQUE		NO LOAD	AT MAX TORQUE								
			v	mm		Ncm	rpm	A		W					
E 192	12 24	3	12 24	86	3,66	15	1100 1100	700 770	<0,4 <0,2	1,70 0,96	20,4 23				
E 192	12 24	5	12 24	86	5	20	800 830	510 575	<0,4 <0,2	1,75 0,95	21 22,8				
E 192	12 24	13	12 24	93	13,44	45	300 300	200 225	<0,4 <0,2	1,65 0,85	19,8 20,4				
E 192	12 24	18	12 24	93	18,33	60	218 226	155 170	<0,4 <0,2	1,65 0,84	19,8 20,2				
E 192	12 24	25	12 24	93	25	90	160 166	105 118	<0,4 <0,2	1,75 0,88	21 21,1				
E 192	12 24	49	12 24	100	49,29	160	82 82	58 60	<0,4 <0,2	1,60 0,85	19,2 20,4				
E 192	12 24	67	12 24	100	67,22	220	59,5 61,5	40 45	<0,4 <0,2	1,80 0,88	21,6 21,1				
E 192	12 24	91	12 24	100	91,66	270	43,6 45	31 34	<0,4 <0,2	1,70 0,85	20,4 20,4				
E 192	12 24	125	12 24	100	125	300	32 33	24 26	<0,4 <0,2	1,32 0,64	15,9 15,4				
E 192	12 24	180	12 24	107	180,75	220	22 22	20 20	<0,4 <0,2	0,75 0,42	9 10,1				
E 192	12 24	246	12 24	107	246,48	300	15,2 16,8	14,5 15	<0,4 <0,2	0,87 0,43	10,5 10,3				
E 192	12 24	336	12 24	107	336,11	300	11,9 12,3	11 11,5	<0,4 <0,2	0,69 0,34	8,3 8,2				
E 192	12 24	458	12 24	107	458,33	300	9 9,5	8,5 9	<0,4 <0,2	0,54 0,28	6,5 6,7				
E 192	12 24	625	12 24	107	625	300	6,4 6,6	6 6,2	<0,4 <0,2	0,46 0,23	5,5 5,5				



3.sz. Melléklet: A berendezés törzsrajzai a gyártáshoz

- Rajz a készülékről

Rajszám: 12-FC-000

- Szállítócsiga

Rajszám: 12-FC-020

- Fluidizációs szárító

Rajszám: 12-FC-030

- Ciklon

Rajszám: 12-FC-050

- Cellás adagoló

Rajszám: 12-FC-060