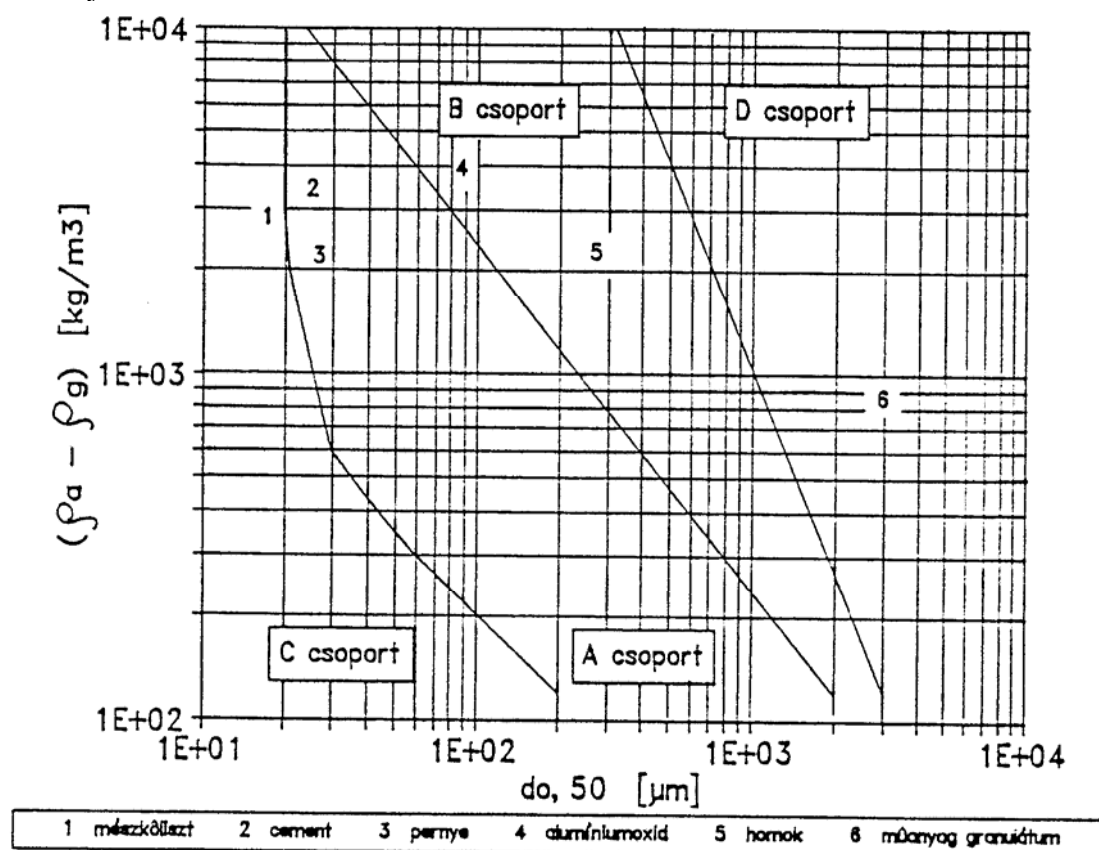


### 3. Sűrűáramú anyagszállítás

#### 3.1. Sűrűáramú pneumatikus szállítórendszerek osztályozása

A pneumatikus szállítás szakirodalmában korábban elterjedt az a nézet, hogy sűrűáramú, - a fluidizációt felhasználó – szállításra csak poros, esetleg nem túl nagyméretű ( $d_o < 5\text{mm}$ ) szemcséből álló anyag alkalmas. Igen előnyös, ha az anyag közel homogén szemcsézetű. Fluidizációs szállítás folyamán a szállítandó anyagot levegővel (vagy gázzal) keverve a folyadékhoz közelálló tulajdonságokkal rendelkező „sűrű” folyékony keveréket hozunk létre, amely zárt csővezetékben sűrített levegő segítségével tetszőleges irányban szállítható (*zárt csővezetékes sűrűáramú pneumatikus szállítás*), vagy kis esésű nyitott vályúban közel vízszintesen elfolyatható (*fluidizációs szállítóvályú, aerációs csatorna*) [28], [29], [30], [31].

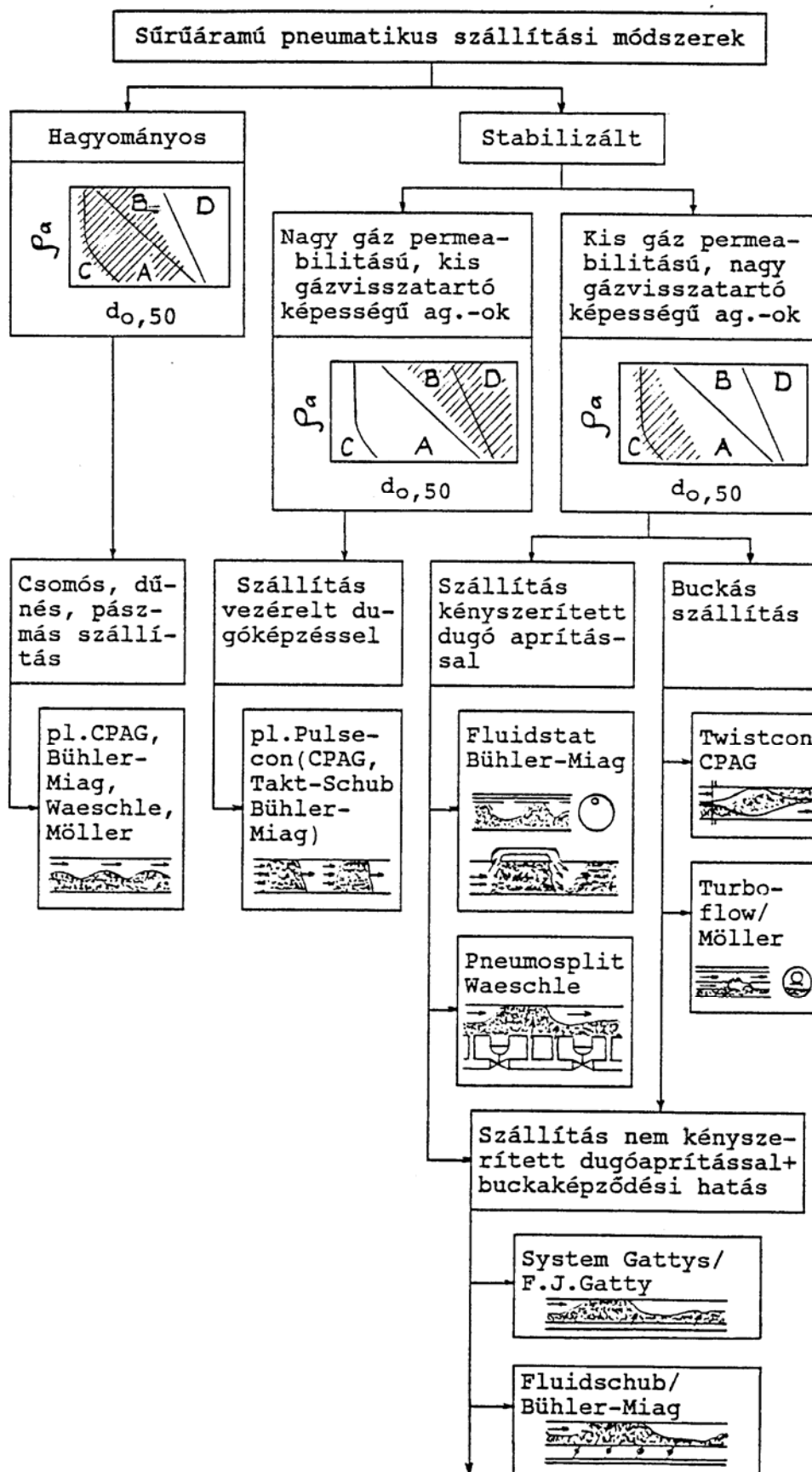
Az újabb kutatási eredmények figyelembe vételével egy másik osztályozási rend is kialakult. A fluidizált ömlesztett anyagok kedvező adagolási, szállítási tulajdonságait használja ki a *felső ürítésű nyomótartály*, míg nehezen fluidizálható darabos ill. nedves anyagok ún. *tolószállítására az alsó ürítésű nyomótartály* alkalmas. A kétféle megoldás nem csupán a szerkezeti kialakításban különbözik, de a sokszínű sűrűáramú szállítási módok, áramképek létrejöttét is eredményezi. A pneumatikus szállítás szakirodalmában fellelhető legjellemzőbb szállítási állapotok szemléletes, összefoglaló bemutatására vállalkozik Szőnyi [32] publikációjában.



3.1. ábra

Ömlesztett anyagok osztályozása. Geldart [33] diagram

A szállítóvezetékben lévő anyag viselkedését nagymértékben befolyásolják az anyag tulajdonságai. Geldart [33] az anyagféleségeket úgy osztályozza, hogy a szállítandó anyag és



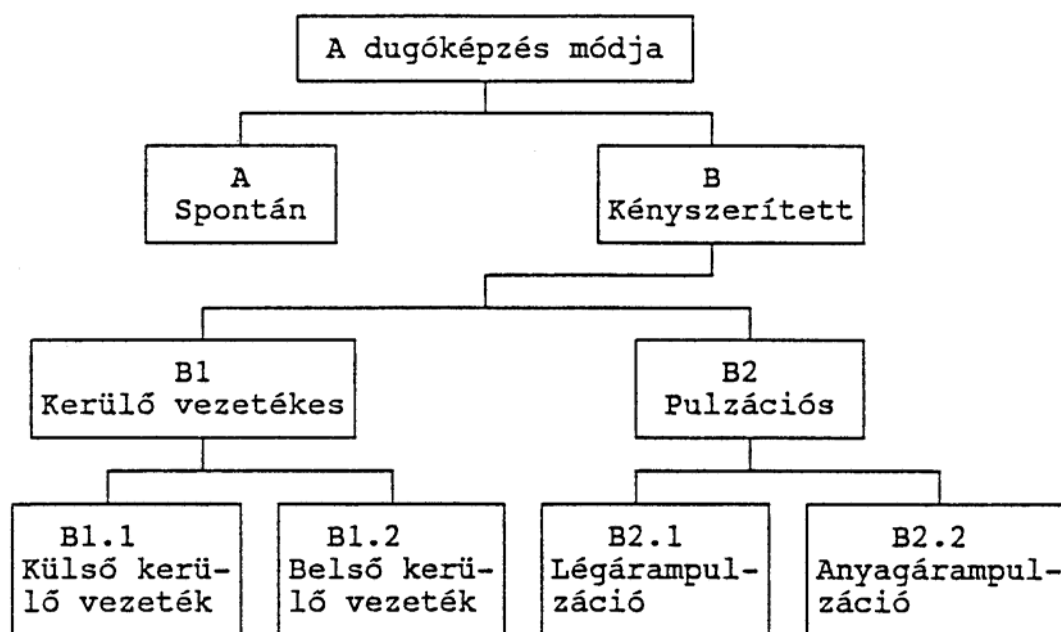
3.2. ábra

A sűrűáramú pneumatikus szállítórendszerek osztályozása. [34]

a fluidizáló közeg sűrűségkülönbségét a közepes szemcseméret függvényében ábrázolja és így különíti el a 3.1. ábrán látható négy anyagscsoportot.

A sűrűáramú pneumatikus szállítórendszerek osztályozását mutatja be Harder – Hilgraf – Zimmermann [34], [35] oly módon, hogy együttesen veszi figyelembe Geldart anyagfélésegek szerinti osztályozását és a szállítócsőben kialakuló áramképek alakját.

A sűrűáramú szállításnak kialakult egy speciális területe a dugós szállítás. A zavartalan, üzembiztos, kíméletes anyagszállítás megvalósítása és a szállítás fajlagos energiaigényének csökkentése céljából a nyomótartályból a szállítóvezetékbe adagolt anyag – levegő keverék áramképét befolyásoló alábbi dugóképzési módokkal találkozunk (lásd a 3.3. ábrán).



3.3. ábra

A dugós szállítás csoportosítása a dugóképzés módja szerint. [32]

### 3.2. Sűrűáramú nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezés

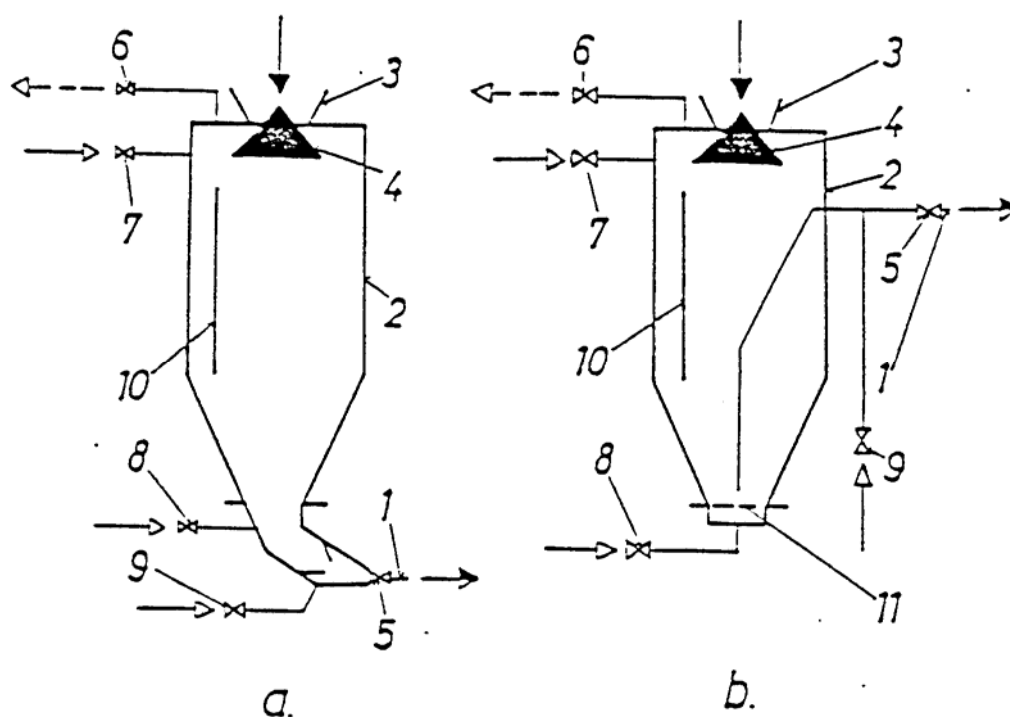
A pneumatikus szállítási szakirodalomból megállapítható, hogy világszerte egyre inkább terjed a sűrűáramú pneumatikus szállítás. Az 1980-as évektől a Budapesti Műszaki Egyetem Vízgépek Tanszékén is jelentős szerepet kapott a nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezések fejlesztését és legkedvezőbb üzemeltetési paramétereinek meghatározását célzó kutatómunka.

A nyomótartály a fluidizált poros ill. szemcsés anyagalmaz – fluidum – létrehozásához szükséges szerkezeti elem. Az anyag kiadagolása szerint kétféle kivitelben használatos. A 3.4.a. ábrán látható *alsó ürítésű nyomótartály* kisebb keverési arányt és nagyobb építési magasságot eredményez. Kísérleti tapasztalatok szerint inkább finomszemcsés, jól fluidizálható anyagok szállítására alkalmas. A 3.4.b. ábra szerinti *felső ürítésű nyomótartály* használatával pedig nagyobb keverési arány érhető el, de a tartály teljes kiürítése nem

valósítható meg (lásd [21]-ben a 290.old.). Ez a kivétel elsősorban durvaszemcsés anyagok szállítására használatos.

A pneumatikus szállítás legkedvezőbb üzemi paramétereinek beállítására az alábbi lehetőségek kínálóznak:

- A fluidizáló levegő mennyiségének változtatása
- A légáteresztő réteg ellenállásának változtatása
- A megkerülővezeték (by-pass) beépítése
- A pótlevegő mennyiségének változtatása
- Az indító szelep használata
- Az indítási nyomás változtatása
- A töltési fok változtatása
- A nyomótartály méretének változtatása



3.4. ábra  
A nyomótartály elvi vázlata. a. alsó-, b. felső ürítésű

- |                        |                           |
|------------------------|---------------------------|
| 1 – szállítócső        | 7 – felső levegő belépés  |
| 2 – nyomótartály       | 8 – lazító levegő belépés |
| 3 – anyagbetöltő csónk | 9 – pótlevegő belépés     |
| 4 – harangszelep       | 10 – szintjelző           |
| 5 – indító szelep      | 11 – légáteresztő réteg   |
| 6 – kiszellőzés        |                           |

- A fluidizáló levegő mennyiségének változtatása

Fontos szerepe van a „8” jelű vezetéken az időegység alatt beáramló, a szállítandó anyag fizikai tulajdonságaihoz igazodó lazító (fluidizáló) levegő mennyiségének, ugyanis a nyomótartály jó kiüríthetőségének alapfeltétele az anyag megfelelően fluidizált állapota.

b) A légáteresztő réteg ellenállásának változtatása

A légáteresztő réteg megfelelő megválasztásával a szállítandó anyag fluidizációs tulajdonságaihoz igazodó egyenletes lazítólevegő sebesség-eloszlás érhető el.

c) A megkerülővezeték (by-pass) beépítése

A megkerülővezeték kétféle kialakítása szokásos: Külső *megkerülővezeték*nek nevezik a nyomótartályt kikerülő vezetékét, amely ágba a légszállító géptől – rendszerint kompresszortól – közvetlenül a szállítócső elejére vezetik a pótlevegőt; belső *megkerülővezeték*nek nevezik azt a by-pass ágot, amelyben a nyomótartályból elvett levegő áramlik a szállítócső elejére.

d) A pótlevegő mennyiségének változtatása

A „9” jelű vezetéken a szállítócsőbe juttatott pótlevegő mennyiségének változtatásával a keverési arány és ezáltal a szállítócsőben kialakuló nyomás változtatására nyílik lehetőség.

e) Az indítószelep használata

A szállítócső elején lévő „5” jelű szerelvény használata indítószelepes működtetést eredményez, míg ennek állandó nyitott helyzetekor indítószelep nélküli működtetésről beszélhetünk.

f) Az indítási nyomás változtatása

A „7” jelű vezetéken az anyagréteg fölé vezetett levegő mennyiségének változtatásával a tartálynomás értéke változtatható. Ezzel a tartály üríthetősége, az anyagindítási feltételek és a keverési arány értéke befolyásolható.

g) A töltési fok változtatása

A nyomótartály anyaggal töltött térfogatának és a teljes anyaggal tölthető térnek a viszony, a töltési fok, melynek értéke kihat az üzemtani jellemzők alakulására.

h) A nyomótartály méretének változtatása

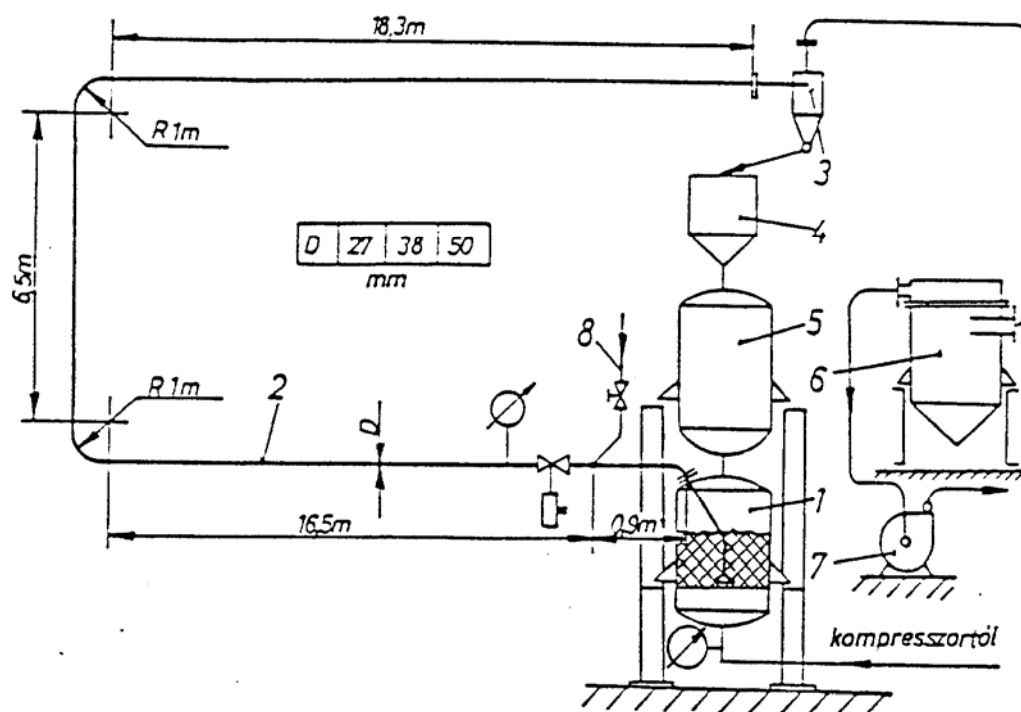
A nyomótartály méretei, illetve a hozzá kapcsolt szállítóvezeték és a nyomótartály méretviszonya jelentősen befolyásolják a szállítóberendezés energetikai viszonyait.

A „6” jelű vezetéken a nyomótartály kiszellőzése történik egyrészt a tartály anyaggal való feltöltésekor, másrészt a szakaszos szállítás végén.

Két nyomótartály megfelelő kapcsolásával – zsilip vagy iker elrendezésben – folyamatos pneumatikus szállítás valósítható meg.

A 3.5. ábrában látható a BME Vízgépek Tanszéke Kutatólaboratóriumában kialakított kísérleti nyomótartályos szállítóberendezés vázlata.

A berendezés a feltüntetett méretekből (kb. 45.3m hosszú  $D=27, 38$  ill. 50mm belső átmérőjű szállítócső) megítélhetően a szokásos modellméretnél lényegesen nagyobb és így – valamint a szállítási kísérleteknél adódó eredmények (pl. anyag tömegáramok) alapján – félüzemi berendezésnek tekinthető. Az „1” jelű indítótartályba betölthető szállítandó ömlesztett anyag térfogata 150-160 dm<sup>3</sup>, attól függően, hogy milyen a fluidizált anyag kiterjedésének mértéke, azaz a „ $h/h_o$ ” anyag rétegmagasság-viszony fluidizált ill. nyugalmi állapotban  $D_k=\text{áll.}$  készülékátmérő (nyomótartály átmérő) esetén. A „2” jelű szállítócső kezdete az indítótartály fluidizáló rétege közelében felülről van bevezetve, a cső belépő keresztmetszete a fluidizáló réteg fölött a cső belső átmérőjével kb. azonos távolságban van. A szállítócső vonalvezetése olyan, hogy a beépített ívek függőleges síkban helyezkednek el. A szállítócső végén a „3” jelű ciklon választja le az anyagot. Szakaszos szállítás esetén a szállított és leválasztott anyag összegyűjtése a mérlegre helyezett „4” jelű kiegyenlítő tartályban történik, míg folyamatos szállításakor az „5” jelű zsiliptartály működtetése szükséges. Környezetvédelmi szempontok miatt a berendezés a „6” jelű utószűrőt és a „7” jelű elszívó ventilátort is tartalmazza. A szállítócső elején pótlevegő beadagolására („8”) nyílik lehetőség



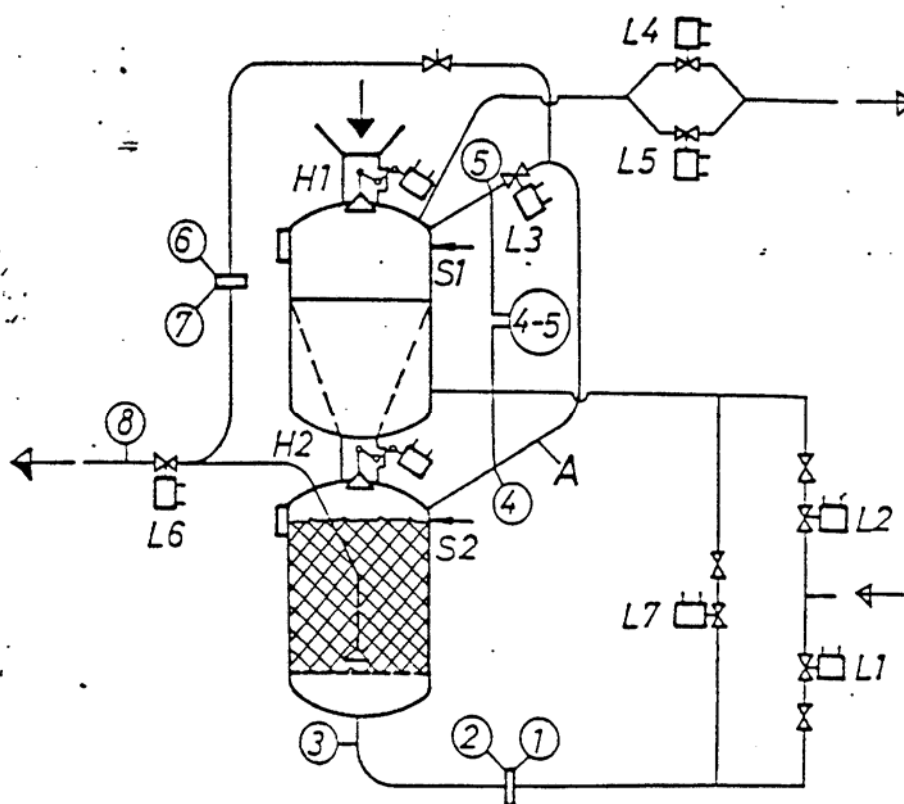
3.5. ábra

- |                         |                   |
|-------------------------|-------------------|
| 1 – indítótartály       | 5 – zsiliptartály |
| 2 – szállítócső         | 6 – utószűrő      |
| 3 – ciklon              | 7 – ventilátor    |
| 4 – kiegyenlítő tartály | 8 – pótlevegő     |

A legkedvezőbb szállítási paraméterek kísérleti úton történő meghatározásához (nyomás, szállító levegő tömegáram, szállított anyag tömegáram, keverési arány, fajlagos energiaigény, üzembiztos – dugulásmentes szállítási állapot) a következő módszer választható. Az indítótartály tetejéről (a 3.6. ábrán látható „A” jelű csövön át) elvett és a mérési sorozatban szisztematikusan változtatott levegőmennyiséget a szállítócső vízszintes szakaszának elején pótlevegőként bevezetve, az ív utáni újragyorsításhoz, a szállításhoz is felhasználhatjuk, miután az indítótartály lazítórétegén az összes levegőt átvezetve a szállítandó anyagot már lazítottuk, fluidizáltuk.

A 3.6. ábrán bemutatott „A” jelű megkerülővezeték (by-pass) tartalmazó kapcsolási sémával az irodalomkutatósi munka során Szmolciv [36] könyvében találkoztunk, de csupán a pneumatikus szállítóberendezések szerkezeti kialakításával foglalkozó fejezetben a nyomótartályt bemutató elvi vázlaton. A berendezés üzemtani paramétereinek (pl. nyomás, anyag tömegáram, levegő tömegáram, keverési arány, teljesítményszükséglet ill. fajlagos energiaigény) a fenti kapcsolási séma szerinti vizsgálata, ilyen mérési eredmények publikációja a szakirodalom tanulmányozása során a kutatómunka induló fázisában nem volt fellelhető. A kapcsolási séma előnyeinek és a BME Vízgépek Tanszékén folyó kutatómunka eredményeinek bemutatása több publikációban [37]-[39] fellelhető.

A berendezés indítószakaszának vázlatát és a folyamatos pneumatikus anyagszállítást vezérlő villamos automatika működtető elemeit a 3.6. ábrán mutatjuk be.



3.6. ábra

Felső ürítésű nyomótartályos szállítóberendezés indító szakasza

1	8	nyomás ill. nyomáskülönbség távadók
L1	L7	villamos vezérlésű, pneumatikus működtetésű szelepek
H1	H2	harangszelepek
S1	S2	szintjelzők

A keverési arány változtatásának az irodalomból [40] ismert módja az, hogy a pótlevegőt a légszállítógéptől a nyomótartály kikerülésével vezetik a szállítócső elejére. Ugyanezt a célt szolgálja a 3.6. ábra szerinti „A” jelű megkerülővezeték is, azzal a különbséggel, hogy itt a szállítócsőbe jutó pótlevegő átáramlik az indítótartály légelosztó, fluidizáló rétegén is,

elősegítve ezzel a tartályban lévő anyag fluidizálását. Ezzel a pótlevegő bevezetéssel a szállítócső elején az anyag-levegő keverék hígítható.

A levegő tömegáramának szabályozására – az anyagszállítási mérések megbízható reprodukálhatósága érdekében – cserélhető szűkítő nyílásokat (blendéket) építettünk be a lazító levegő ágba.

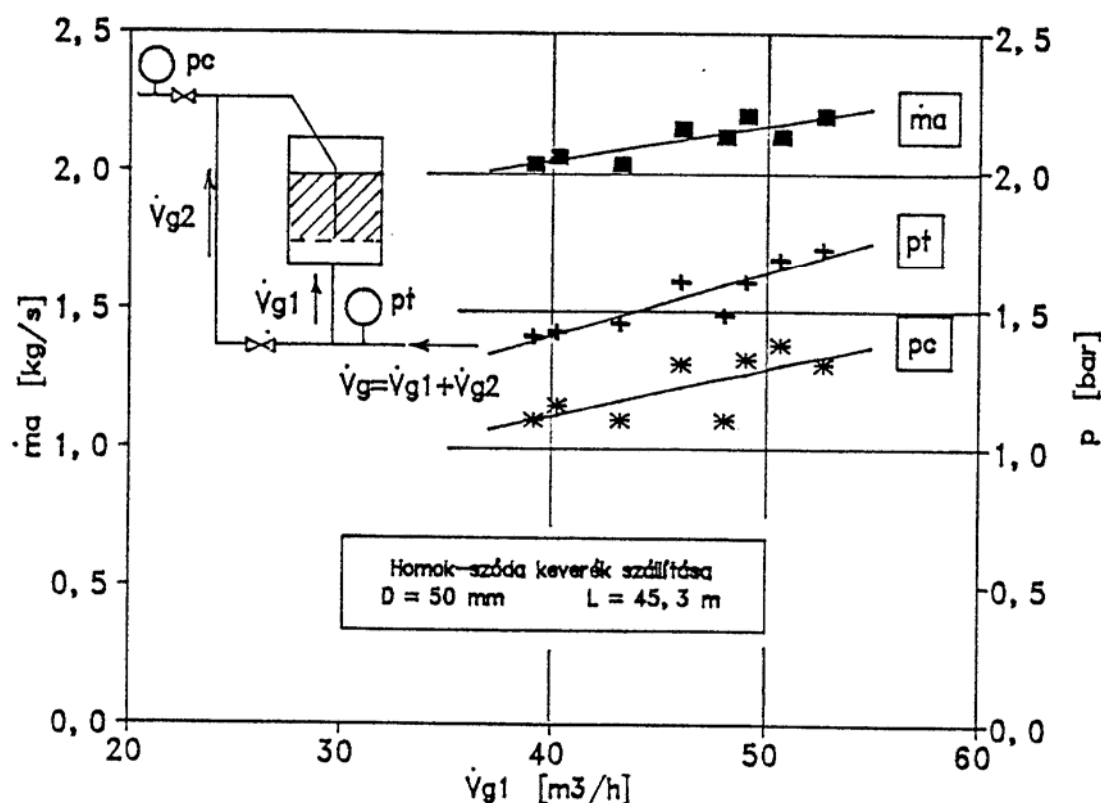
### 3.2.1. Felső ürítésű nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezés

#### 3.2.1.1. A megkerülővezeték szerepe

A megkerülővezeték kialakítása jelentősen befolyásolja a nyomótartály működését. Ennek illusztrálására felső ürítésű, kísérleti nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezésben végzett mérések eredményeinek bemutatásával térünk ki.

Üveg alapanyagát képező homok-szóda szállítási méréseit először a szakirodalomban ismert, *külső megkerülővezetékes*, hagyományos elrendezés szerint végeztük el.

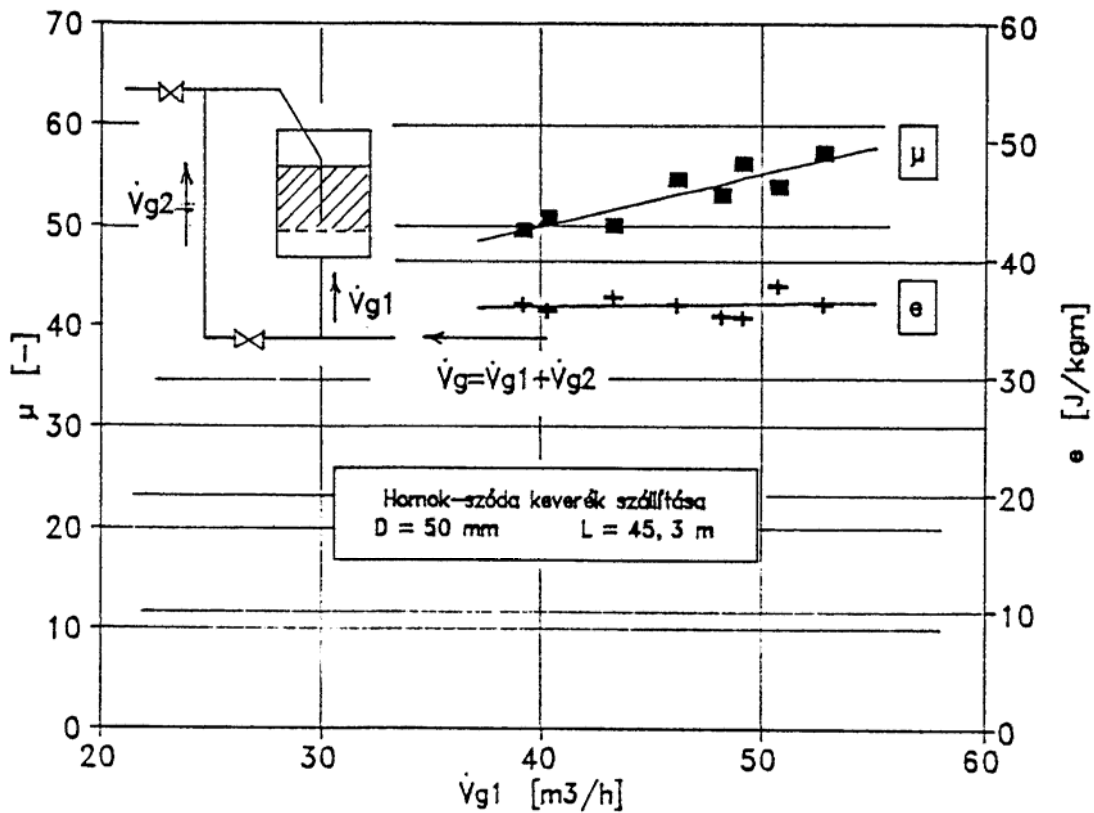
A kapcsolási vázlat és a mérési eredmények a 3.7. ábrán láthatók. A felhasznált fluidizáló levegő „ $\dot{V}_{g1}$ ” térfogatáramát fizikai normál állapotra átszámítva adtuk meg.



3.7. ábra. Külső megkerülővezetékes felső ürítésű nyomótartályos szállítóberendezés kapcsolási vázlata és fő üzemtani jellemzői



Az ábrában az indítótartály fluidizáló réteg alatt mért „ $p_t$ ” nyomása és a  $D=50\text{mm}$  belső átmérőjű szállítócső elején mért „ $p_c$ ” nyomás a kvázistacionárius szállítási szakasz átlagaként adódott.



3.8. ábra. Külső megkerülővezetékes felső ürítésű nyomótartályos szállítóberendezés kapcsolási vázlata és fő üzemtani jellemzői

A 3.8. ábrán látható „ $\mu$ ” keverési arányt a szállításhoz felhasznált összevegyő mennyiségével számítottuk, azaz

$$\mu = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_g} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{V}_g \rho_g} = \frac{\dot{m}_a}{(\dot{V}_{g1} + \dot{V}_{g2}) \rho_g} \quad (3.1)$$

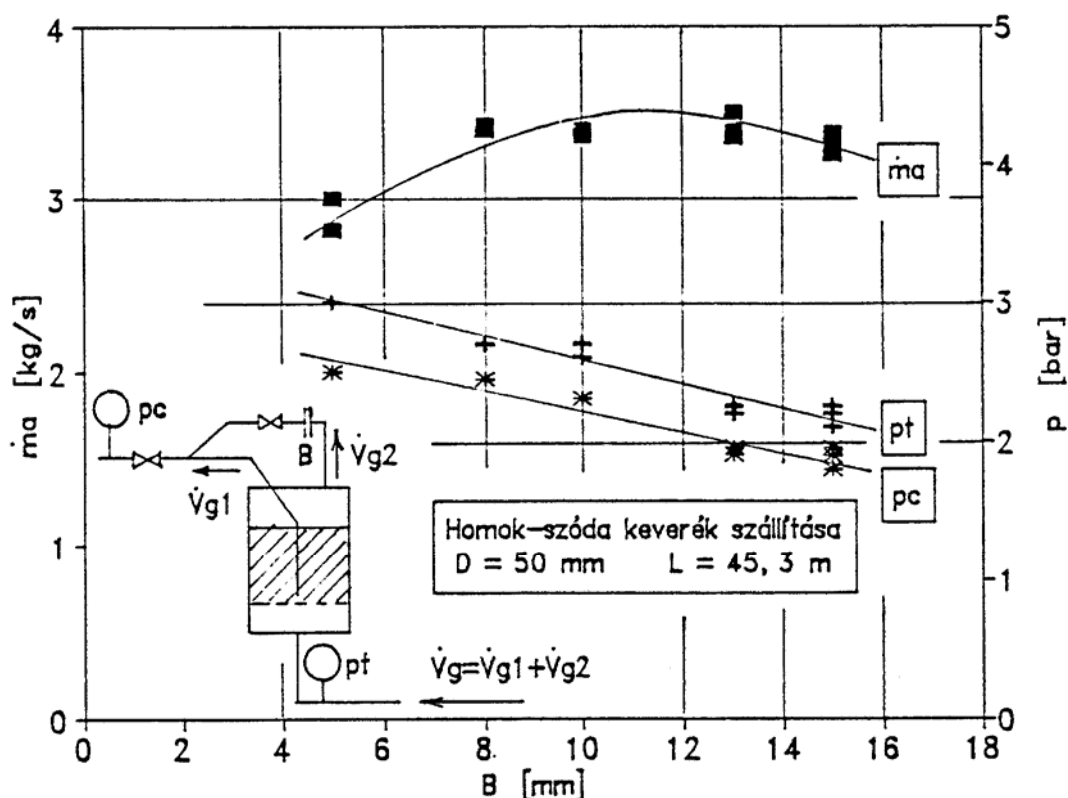
Ugyanitt szerepel a szállítás „ $e$ ” fajlagos energiaigénye is, amit az alábbi kifejezéssel definiáltunk:

$$e = \frac{\int P_{pol} dt}{m_a L} \quad (3.2)$$

Ahol a politróp teljesítmény integrálját az átszállított „ $m_a$ ” anyagadag tömegének és az „ $L$ ” hosszúságú szállítócsőnek az egységére vonatkoztattuk.

A 3.7. ábrából látható, hogy a fluidizáló levegő mennyiségének növelésével az anyag tömegáram kismértékben növelhető, miközben az összevegyő mennyiség közel állandó, így a 3.8. ábrában bemutatott keverési arány növekedése is magyarázható.

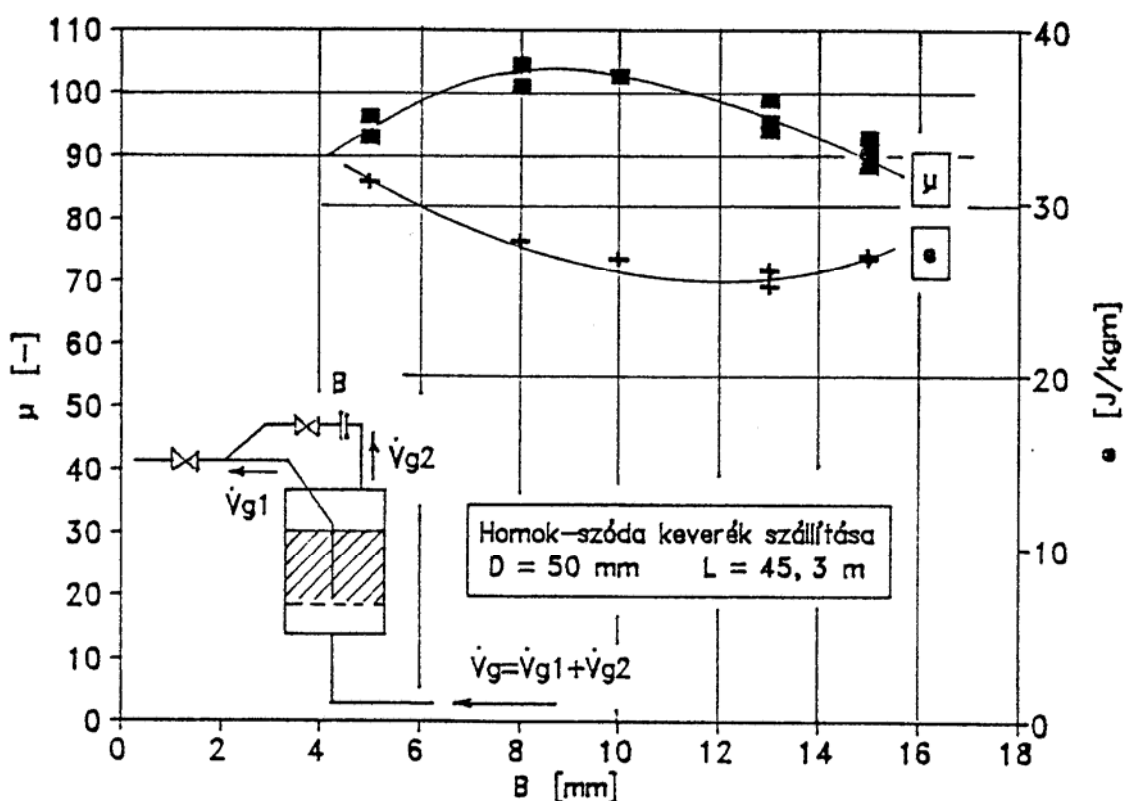
Az anyag tömegáram növelése érdekében a 3.9. ábra szerint módosítottuk a berendezést. A módosítás lényege, hogy a kompresszortól érkező teljes légmennyiséget az indítótartály alján vezettük be, a szállítócső elején a pótlevegő becsatlakozást pedig a tartály tetejéről induló megkerülővezetéken keresztül valósítottuk meg. A tartályban lévő anyag fluidizált állapotát és ezzel együtt a pótlevegő mennyiségét úgy állítottuk be, hogy a megkerülővezetékbe épített szűkítőnyílás „B”-vel jelölt (blende) furatméretét változtattuk.



3.9. ábra. Belső megkerülővezetékes felső ürítésű nyomótartályos szállítóberendezés kapcsolási vázlata és fő üzemtani jellemzői

A 3.10. ábrán a keverési arány és a fajlagos energiaigény látható. A keverési arány és az anyag tömegáram összetartozó adataiból kiolvasható, hogy a „B” furatméret növekedése esetén a szállításhoz felhasznált összlevegő mennyiség értéke is nő (a vizsgált tartományban kb. 20%-kal). A növekvő összlevegő mennyiség a 3.9. ábrán a kisebb „B” méreteknél növekvő anyag tömegáramot eredményez. A jelenség avval magyarázható, hogy ebben a tartományban javul az anyag fluidizált állapota és így az anyagnak a szállítócső belépő keresztmetszetéhez történő hozzáfolyása, azaz az anyag indítás feltétele. További levegőmennyiség növekedés hatására a rosszul fluidizálható anyagokban kráter képződik, az anyag fluidizált állapota, így a hozzáfolyás romlik és ez kisebb anyag tömegáramot eredményez. Ez azt is jelenti, hogy a szállítócsőben nagyobb a hígítás, azaz kisebb keverési arány adódik. Ugyanez a magyarázata a 3.9. ábra növekvő „B” szűkítőnyílás méretekhez tartozó csökkenő „ $p_t$ ” és „ $p_c$ ” nyomás jelleggörbéknek, hiszen az egész pneumatikus szállítóberendezés ellenállása döntően a szállítóvezeték töltöttségéből adódik.

Rosszul fluidizálható anyagokkal folytatott szállítási kísérletek azt mutatták, hogy megkerülővezeték nélkül, azaz  $B=0$  (zárt mellékág) esetén ezen anyagok egyáltalán nem, vagy csak igen nagy nyomásingadozással, egyenlőtlenül szállíthatók, ami üzemszerűen meg-



3.10. ábra. Belső megkerülővezetékes felső ürítésű nyomótartályos szállítóberendezés kapcsolási vázlata és fő üzemtani jellemzői

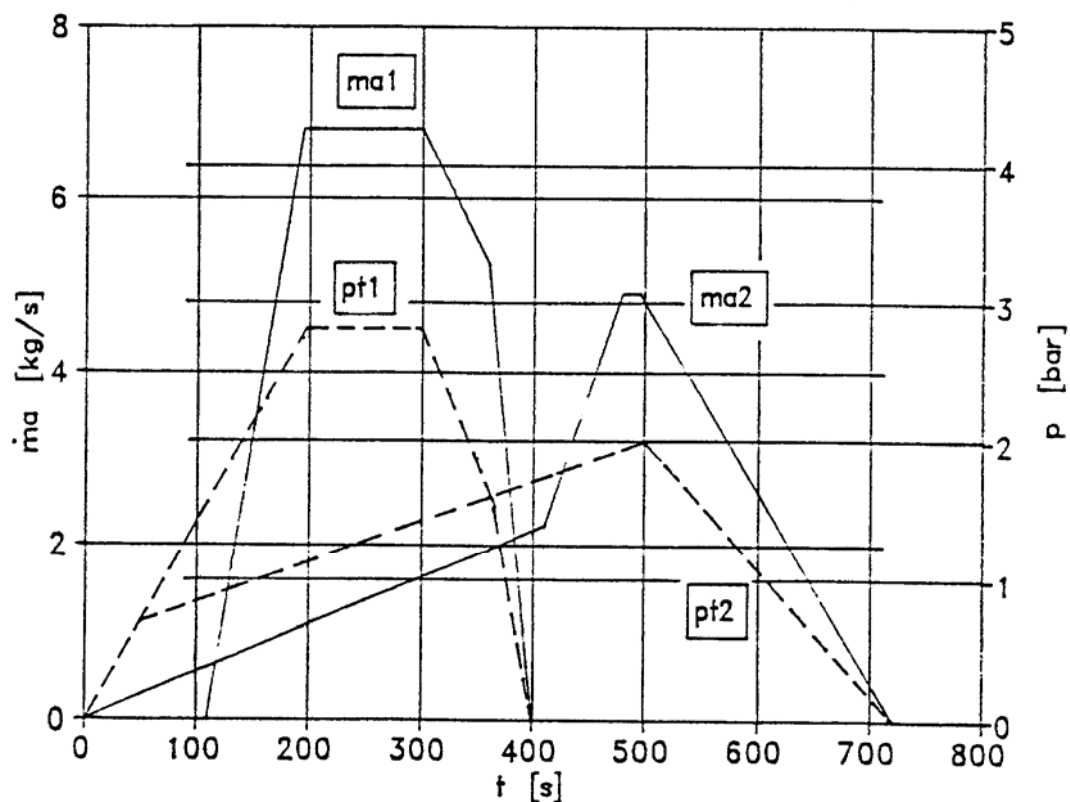
engedhetetlen állapot. A jelenség magyarázata abban rejlik, hogy ezen anyagok lazítása csak a szállítócső közvetlen közelében valósítható meg. Megkerülővezeték segítségével viszont a fluid állapot stabilabban fenntartható, így egyenletes, üzembiztos szállítás valósítható meg és kísérletekkel meghatározható az a legkedvezőbb üzemállapot, ami az adott anyagfajta és az adott berendezés esetén maximális anyag tömegáramot, illetve keverési arányt eredményez.

### 3.2.1.2. Az indítószелеp szerepe

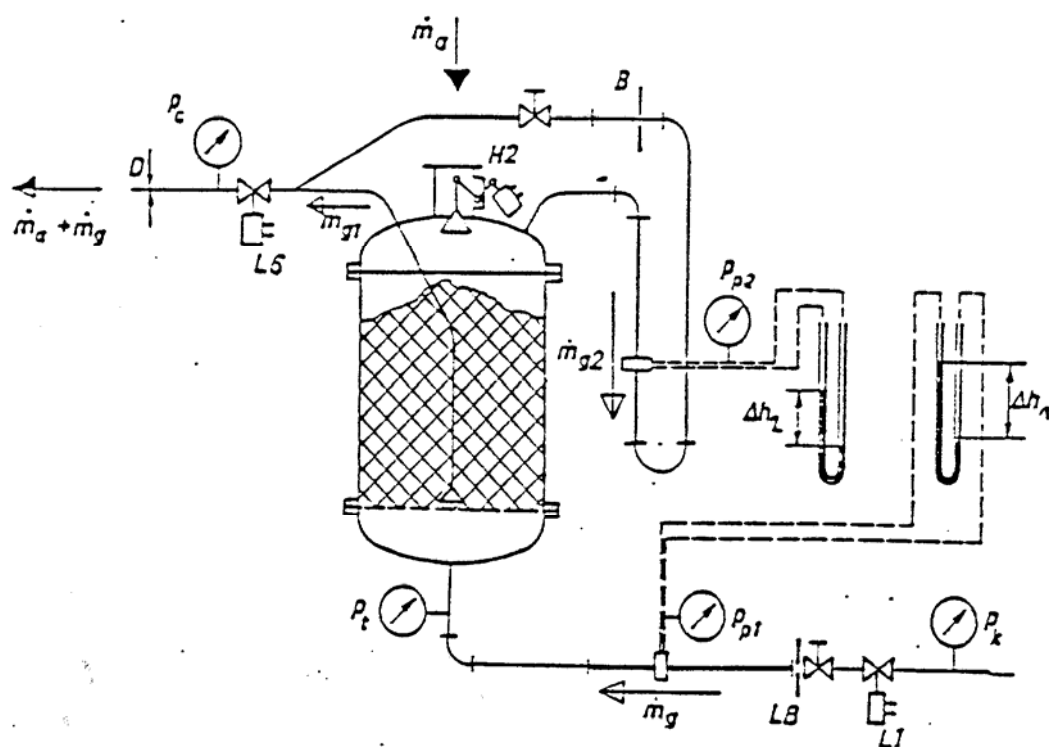
A szakaszos működésű ipari fluidizációs berendezések nyomótartályait nem mindig szokták a szállítás megindítása előtt nyomásra hozni, azaz a szállító csővezeték elején beépített (esetünkben a 3.6. ábrán az „L6” jelű) szerelvény az „L1” jelű levegő beeresztő szelep nyitásának pillanatában már nyitva van. Ennek következtében a szállított anyag tehát csupán fokozatosan és eléggé lassan tölti ki a csővezetékét, s a nyomótartályban – ezzel arányosan – a nyomás csak fokozatosan éri el az egyenletes szállítási állapothoz tartozó értéket. A teljes szállítási idő előbbi töltődési – átmeneti jellegű – szakasza elég hosszú ideig tart, míg az állandósult (stacionárius) üzemmód időszaka megrövidül, így az átlagos keverési arány – mint a teljes szállítási időre vonatkozó átlagos anyag tömegáram és levegő tömegáram aránya – és maga az átlagos anyag tömegáram is viszonylag kicsiny.

Kísérleteik első szakaszában kausztikus magnézit szállításakor Kazancev-Rivkin [41] azt vizsgálták, hogyan működik a nyomótartályos szállítóberendezés, ha nyomótartályt a szállítás

megindítása előtt a teljes üzemi nyomásra feltöltik sűrített levegővel. A szállítás így – szinte az indítás pillanatától – állandósult (kvázistacionárius) jellegű volt.



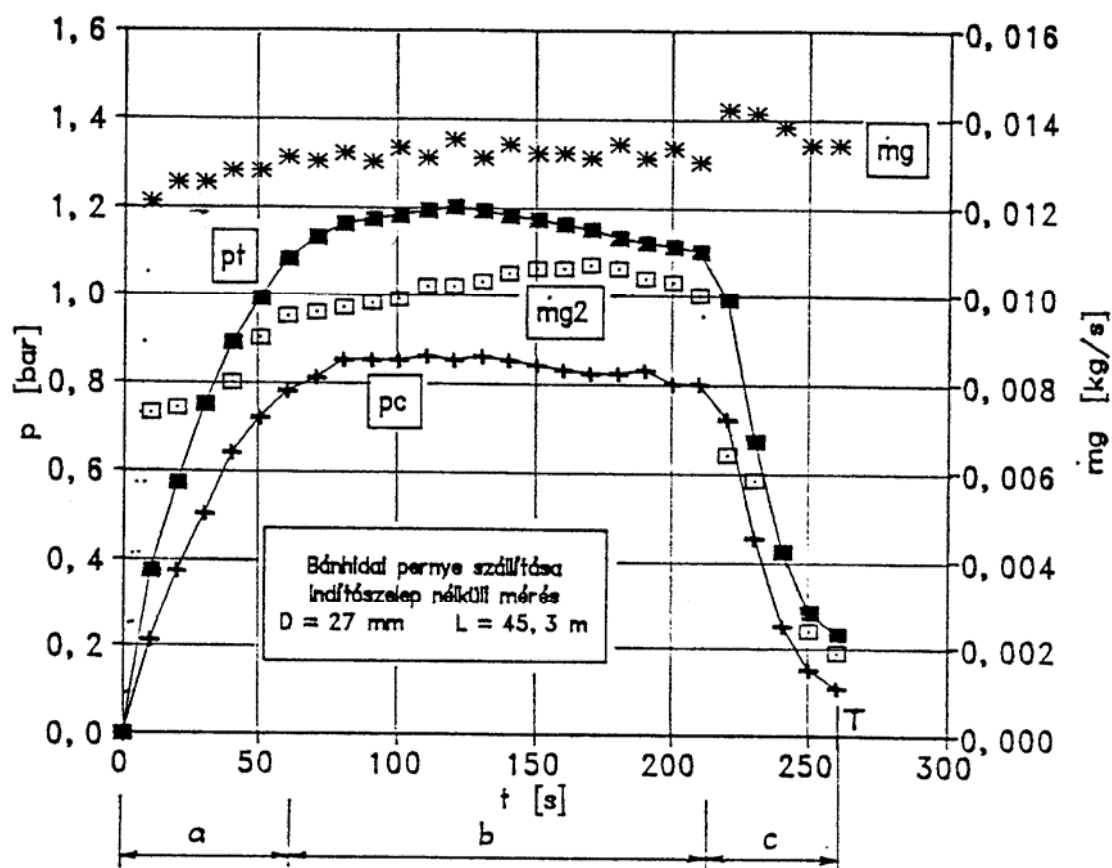
3.11. ábra. Az indítószелеp szerepe Kazancev-Rivkin [41] mérései szerint



3.12. ábra. A kísérleti nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezés indítószakaszának műszerezése

Kausztikus magnezit szállítási jellemzőit (a folytonos vonallal jelölt anyag tömegáram és a szaggatott vonallal rajzolt tartálynyomás változását az idő függvényében) kétféle üzemmódban a 3.11. ábra mutatja. A stationárius anyag tömegáram a nyomótartály előzetes nyomásra hozása esetén 1.9-2.0-szer akkora volt, mint az indítószелеp használata nélküli üzemmódban.

Indítószелеpnek nevezzük a kísérleti nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezésünkben a szállítócső elején beépített „L6” jelű villamos vezérlésű, pneumatikus működtetésű elcsípő szelepet (lásd a 3.12. ábrát). Az indítószелеp szerepének tanulmányozására bányai pernye szállítási kísérleteinek bemutatásával térünk ki. A kísérleteket a nyomótartályba töltött  $m_a=150\text{kg}$ =állandó anyagmennyiséggel,  $D=27\text{mm}$  belső átmérőjű szállítócsővön, kétféle üzemmódban végeztük. Az egyik üzemmódban az „L1” jelű levegő beeresztő szelep nyitáskor „L6” zárt helyzetben volt, így a levegő beadagolás első időszakában az indítótartály nyomásra hozása folyt, míg a szállítást a tartálynyomás szállítóberendezéshez és szállított anyagfajtaához igazodó – a teljes mérési sorozatban –  $p_H=2\text{bar}$  (túlnyomás) elérésekor indítottuk: ezen méréseket *indítószелеpes* méréseknek neveztük. A másik üzemmódban az indításkor – „L1” szelep nyitáskor – „L6” nyitott állapotban volt: ezeket pedig *indítószелеp nélküli* méréseknek neveztük.



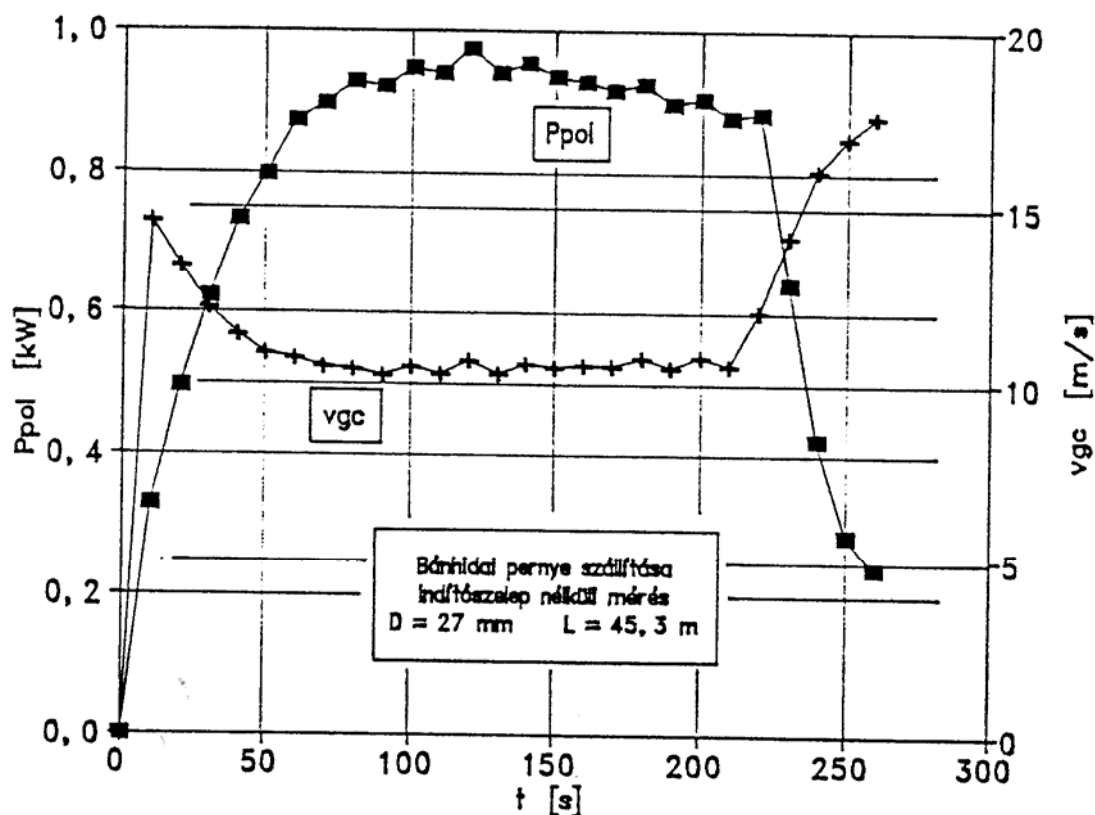
3.13. ábra. A nyomások és a levegő tömegáramok időbeli változása az indítószелеp nélküli méréseknél

A berendezés működési tartományának meghatározásához a levegő tömegáramát a lazító ágban 14 féle „LB” jelű szűkítő nyílás (lemezblende), a belső megkerülővezetékben 5 féle „B” jelű szűkítő nyílás (blende) segítségével változtattuk. A szűkítő nyílások segítségével történő szabályozást a pontos beállítás ill. a mérések jó reprodukálhatósága érdekében

választottuk. Minden blende-lemezblende párnál két indítószelipes és két indítószelép nélküli mérést végeztünk a felhasznált levegőmennyiség csökkentése irányában egészen addig haladva, amíg elértük a dugulási határt (megkerülővezeték nélküli mérések) ill. a megkerülővezeték mérések során addig a legkisebb levegő mennyiségig, ami még megindította az anyagszállítást.

A mérési sorozatból példaként a 3.13. és 3.14. ábrákon bemutatjuk egy jellemző indítószelép nélküli mérés eredményét. Amint az a 3.13. ábrából látható három jól megkülönböztethető időszakasz jelölhető ki a  $p_i=f(t)$  és a  $p_c=f(t)$  görbéken:

- a nyomótartály nyomásra hozásának ideje
- a közel egyenletes (stacionárius) szállítás ideje
- a nyomótartály és a szállítócső expanziójának ideje



3.14. ábra. A politróp teljesítmény és a szállítócső elején lévő levegő sebesség időbeli változása az indítószelép nélküli méréseknél

A lazító levegő „ $m_g$ ” tömegárama a teljes „ $T$ ” időtartam alatt közel állandónak tekinthető, míg a belső megkerülővezetékben áramló levegő „ $m_{g2}$ ” az indítási- és a szállítócső ürülési időszakában a párhuzamos ágakban jelentkező ellenállá-arány változásának megfelelően kisebb, mint a stacionárius anyagszállítás közben.

A szállítás teljesítményigényét a levegő politrópikus állapotváltozása figyelembe vételével az alábbi módon számítottuk:

$$P_{pol} = \frac{n}{n-1} p_o \frac{m_g}{\rho_{go}} \left[ \left( \frac{p_t}{p_o} \right)^{\left( \frac{n-1}{n} \right)} - 1 \right] \quad (3.3)$$

ahol  $n=1.3$  a politrópikus állapotváltozás kitevője  
a „o” index a cső végén lévő, közel légköri állapotot  
a „t” index tartálynyomáshoz tartozó állapotot jelöli.

A szállítócső vízszintes szakaszának elején, a „ $p_c$ ” nyomásmérés helyén a „ $v_{gc}$ ” levegő sebességet is számítottuk és a szállítási mérés során annak időbeli változását a 3.14. ábrában bemutatjuk.

$$v_{gc} = \frac{m_g}{A \rho_{gc}} \quad (3.4)$$

ahol  $A [m^2]$  - a szállítócső keresztmetszete  
 $\rho_{gc} [kg/m^3]$  - levegő sűrűség a szállítócső elején a „ $p_c$ ” nyomásmérés helyén

A szállítás energiaigényét az alábbiak szerint határoztuk meg:

$$E = \int_{t=0}^T P_{pol} dt \quad (3.5)$$

Az integrálást kétféle módszerrel végeztük el, egyrészt a  $P_{pol}=f(t)$  regisztrátum görbék alatti terület planimetrlásával, azaz grafikus úton, másrészt számítógép segítségével, azaz numerikus módszerrel az időlépésenkénti trapéz területek szummázásával.

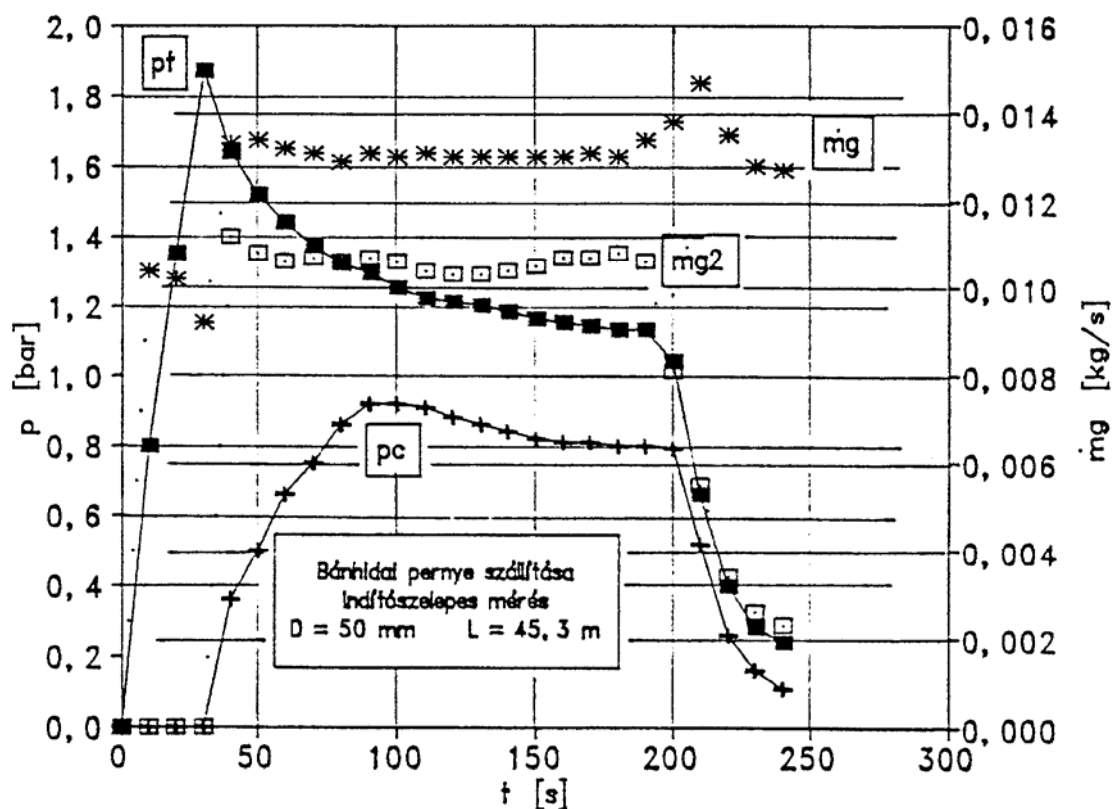
Az integrálás „ $E_n$ ” numerikus és „ $E_{gr}$ ” grafikus eredményei jól egyeznek. Ennek igazolására megadjuk a mérési sorozat 62 értékelt adatából a következő definíció szerinti szórás számértékét:

$$s = \left[ \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left( \frac{E_n - E_{gr}}{E_n} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.019 \quad (3.6)$$

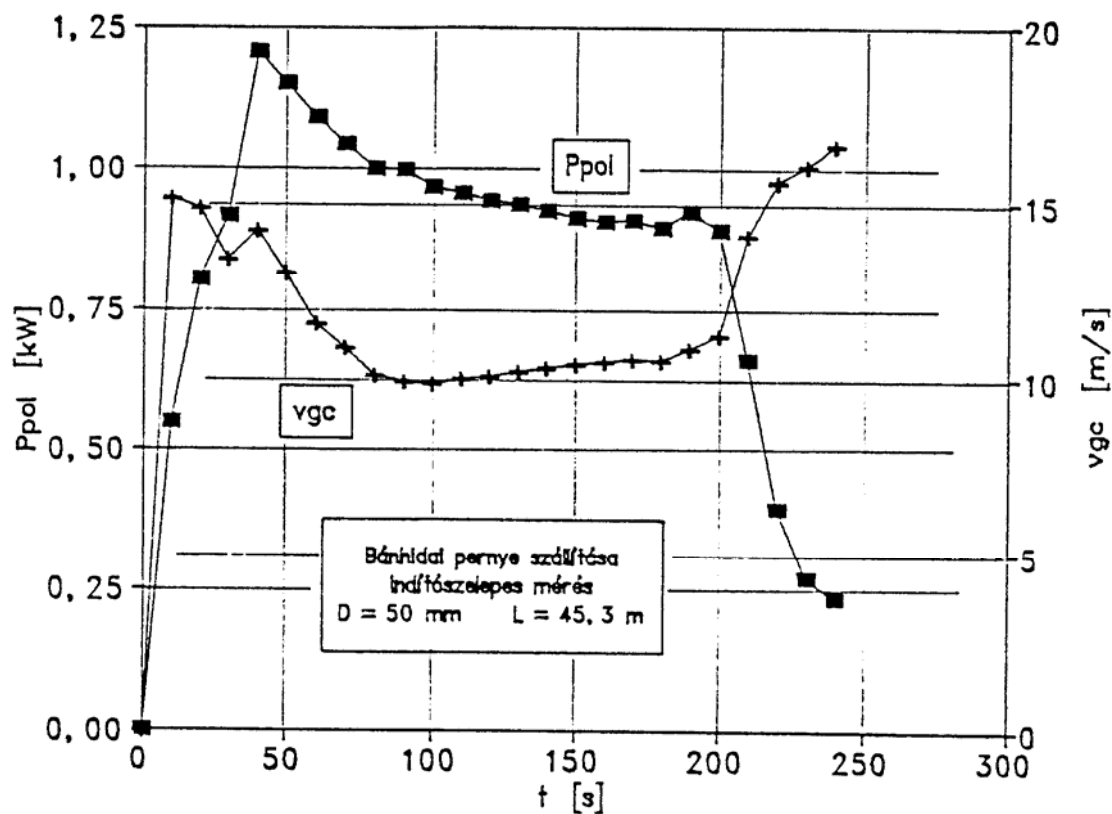
Ahol  $k=62$  az értékelt mérések száma.

Az előző – indítószелеp nélküli – mérésekkel való összehasonlítás érdekében a 3.15. és 3.16. ábrákön indítószелеpes mérések időbeli változásait mutatjuk be.

A „pt” tartálynyomás az idő függvényében az „L6” jelű zárt indítószелеp következtében meredeken emelkedve eléri az indítószелеpes mérési sorozatban állandónak tartott  $p_{ti}=2\text{bar}$  túlnyomás értékét, majd a 3.15. ábrában bemutatott mérésnél felülről tart a közel stacionárius szállítási állapothoz tartozó tartálynyomáshoz. Ez a fluidizált anyagréteg fölötti komprimált légpárna a szállítás indításakor – az „L6” szелеp nyitásakor – üzembiztos anyagindítást, határozott nagy anyag tömegáramot eredményez. A lazító levegő- és a pótlevegő-tömegárama a szállítás alatt közel állandó.



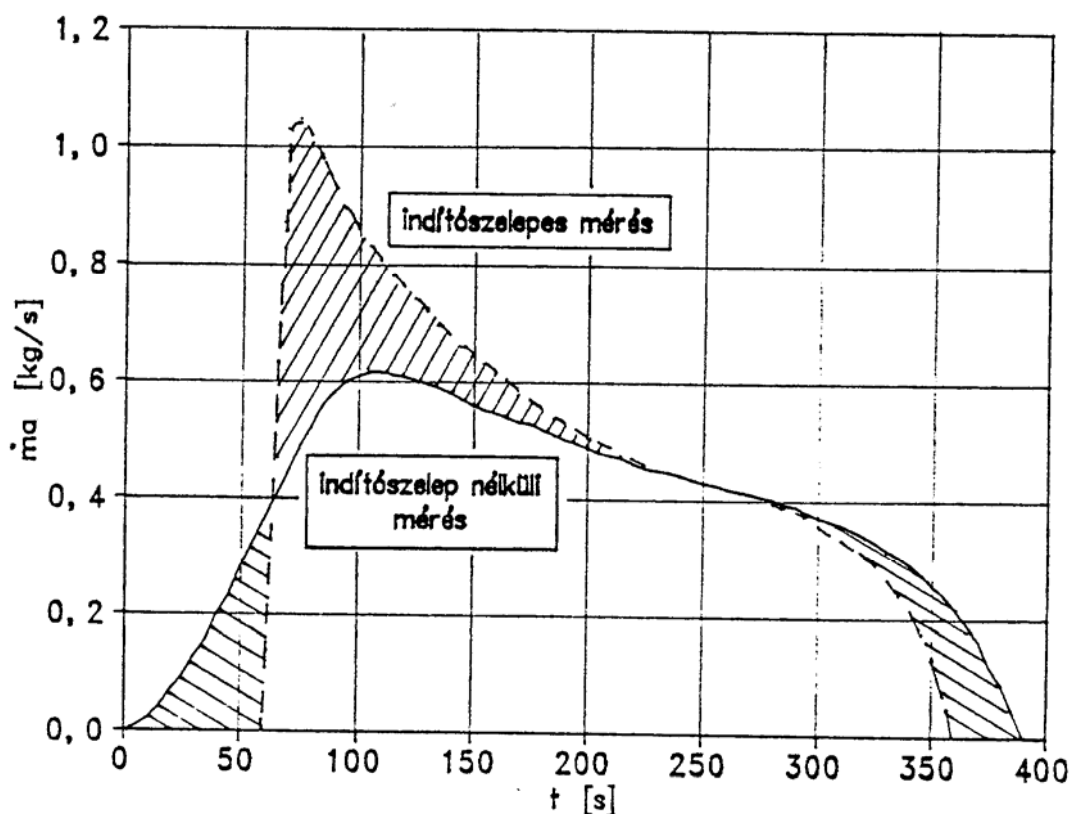
3.15. ábra. A nyomások és a levegő tömegáramok időbeli változása az indítószelvényes méréseknél



3.16. ábra. A politróp teljesítmény és a szállítócső elején lévő levegő sebesség időbeli változása az indítószelvényes méréseknél



A továbbiakban egy szállítási mérésen belül vizsgáljuk meg az anyag tömegáram időbeli változását. Látható a 3.17. ábrán folytonos vonallal jelölt görbe alakján, hogy indítószелеp nélküli méréseknél az anyag tömegáram közel egyenletesen nő a maximális értékig, majd a tartályban lévő fluidizált anyagréteg magasságának csökkenésével, azaz a tartálynyomás értékével arányosan kis mértékben csökken a tartály kiürüléséig, azaz az expanzió kezdetéig, ezt követően pedig egyre meredekebben tart a zérushoz.



3.17. ábra. Az anyag tömegáram időbeli változása indítószелеpes és indítószелеp nélküli nyomótartályos pernyeszállítás során

A 3.17. ábra folytonos görbéjének integrálátlagos, azaz az indítószелеp nélküli bemutatott szállítás átlagos anyag tömegárama  $m_a = 0.385 \text{ kg/s}$  értéket eredményezett.

A fenti beállításhoz tartozó mérést indítószелеppel megismételve (lásd a szaggatott vonallal rajzolt görbét),  $m_a = 0.417 \text{ kg/s}$  értéket kapunk, ha a nyomótartály nyomásra hozásának idejét is figyelembe vesszük, míg ennek elhagyásával  $m_a = 0.503 \text{ kg/s}$  átlagos érték adódik, ami az indítószелеp nélküli mérés átlagos anyag tömegáramának kb. 1.3-szerese.

A görbék alatti terület az elszállított anyag adag tömegével arányos, így a kétféleképpen vonalkázott mezők területe azonos kell legyen.

Következtetések:

A kísérletsorozatban vizsgált tartományban a nagyobb levegőmennyiségeknél, illetve levegő sebességeknél a két üzemmód között nem tapasztalható lényeges eltérés, azaz az összevethető szakaszos szállítási mérések „T” teljes mérési ideje (nyomásra hozás + egyenletes szállítás +

expanzió), az átlagos anyag tömegáram, ill. keverési arány közelítőleg azonos. Ennek az a magyarázata, hogy az indítási nyomás választott  $p_{ti}=2\text{bar}$  értéke ebben a tartományban közelítőleg azonos a stacionárius szállításkor kialakuló tartálynomás értékével. Ebben a tartományban a szállítócső elején a cső teljes keresztmetszetése vonatkoztatott levegő sebesség  $v_{gc}=7\text{-}14\text{m/s}$  tartományban változott a stacionárius szállítás során.

A hosszabb ideig tartó szállításoknál, azaz az egyre kisebb sebességtartományban az indítószelepes mérésekből az alábbiak állapíthatók meg:

- a tartályba töltött azonos anyag adag rövidebb *idő* alatt szállítható el, mint az összehasonlítható indítószelep nélküli méréseknél
- az állandó betöltött anyag adag miatt ez nagyobb átlagos *anyag tömegáramot* eredményez
- a fentiek egyúttal azonos levegő tömegáramok esetén nagyobb átlagos *keverési arányt* jelentenek.

A fenti eltérések a mérési sorozat  $v_{gc}=2.5\text{-}7\text{m/s}$  tartományában a kisebb levegő sebesség irányában egyre dominálóbbak. A jelenség magyarázata, hogy ebben a tartományban az indítási nyomás választott  $p_{ti}=2\text{bar}$  értéke jelentősen meghaladja a stacionárius szállításkor kialakuló tartálynomás értékét, ami sokkal intenzívebb anyagindítást eredményez.

Miután a „ $T$ ” teljes mérési idő az előző mennyiségeken túl a 3.5. összefüggés szerint szállítás energiaigényét is befolyásolja, így a kétféle üzemmód hatását e mennyiség alakulásán is lemértük. A szállítás „ $E_i$ ” indítószelepes és „ $E_{in}$ ” indítószelep nélküli energiaigényeinek összehasonlítása igen jó egyezést mutat, aminek igazolására megadjuk a mérési sorozat 62 értékelt adatából a következő definíció szerinti szórás számértékét:

$$s = \left[ \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left( \frac{E_i - E_{in}}{E_{in}} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.0307 \quad (3.7)$$

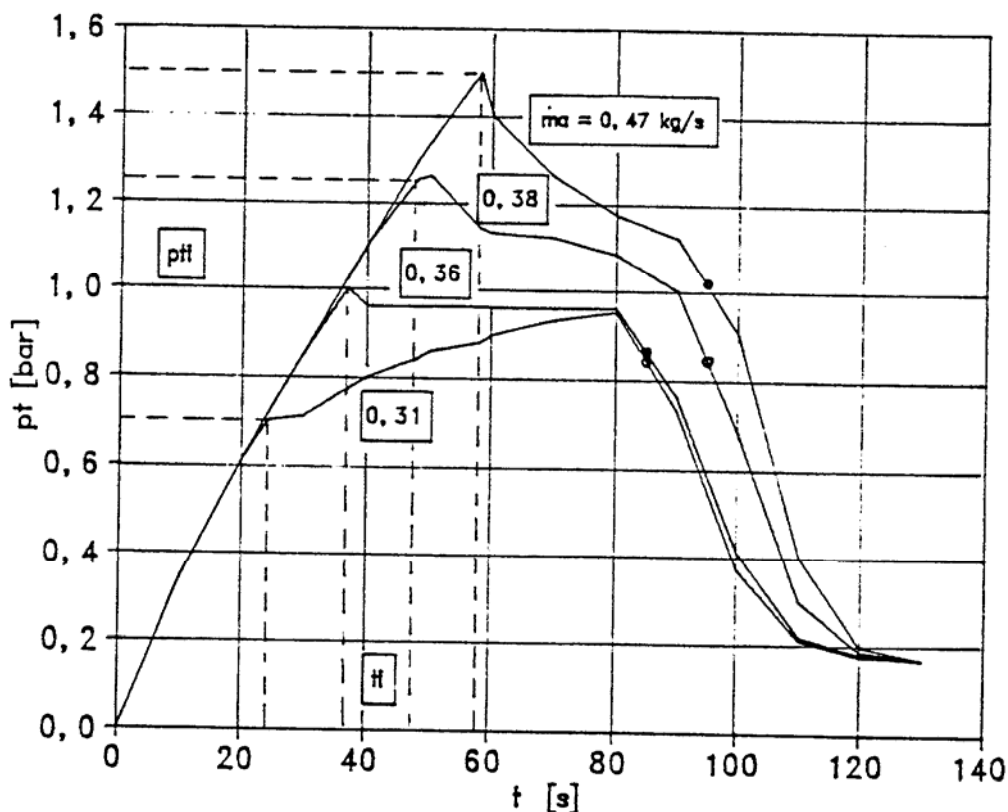
Összegezeként, valamint az indítószelepes mérésekre jellemző határozott, üzembiztos anyagindítási és egyenletes anyagszállítási üzemtani tapasztalatokat figyelembe véve, a nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezések tervezésekor, ill. kivitelezésekor a szállítócső elején az indítószelep elhelyezése indokolt.

### 3.2.1.3. Az indítási nyomás szerepe

Indítási nyomásnak nevezzük a „ $p_{ti}$ ” tartálynomás azon értékét, amelynél – az „L6” jelű szelep nyitásával – az anyagszállítást megindítjuk. Ezen definíció szerint az indítószelep nélküli méréseket  $p_{ti}=0\text{bar}$  túlnyomás jellemzi.

A 3.18. ábrán bemutatjuk, hogy a „ $p_{ti}$ ” indítási nyomás változtatása lúgpernye szállítása során hogyan befolyásolja a „ $p_t$ ” tartálynomás időbeli alakulását.

A tartálynomás változása az idő függvényében a nyomásra hozás időszakában egyszerűen számítható a következő feltételek figyelembe vételével:



3.18. ábra. Az indítási nyomás hatása a tartálynymomás időbeli alakulására lúgpernye szállításakor

- a levegő betáplálás  $\dot{m}_g = \text{áll.}$
- izotermikus állapotváltozás, azaz  $d\rho_g = \frac{\rho_{go}}{p_o} dp$

A „ $V$ ” térfogatú tartályba „ $dt$ ” idő alatt bevezetett levegő tömege:

$$(\rho_g + d\rho_g)V - \rho_g V = \dot{m}_g dt \quad (3.8)$$

ahonnan helyettesítések és integrálás után adódik:

$$p_t = p_o \left( 1 + \frac{\dot{m}_g}{\rho_{go} V} t \right) \quad (3.9)$$

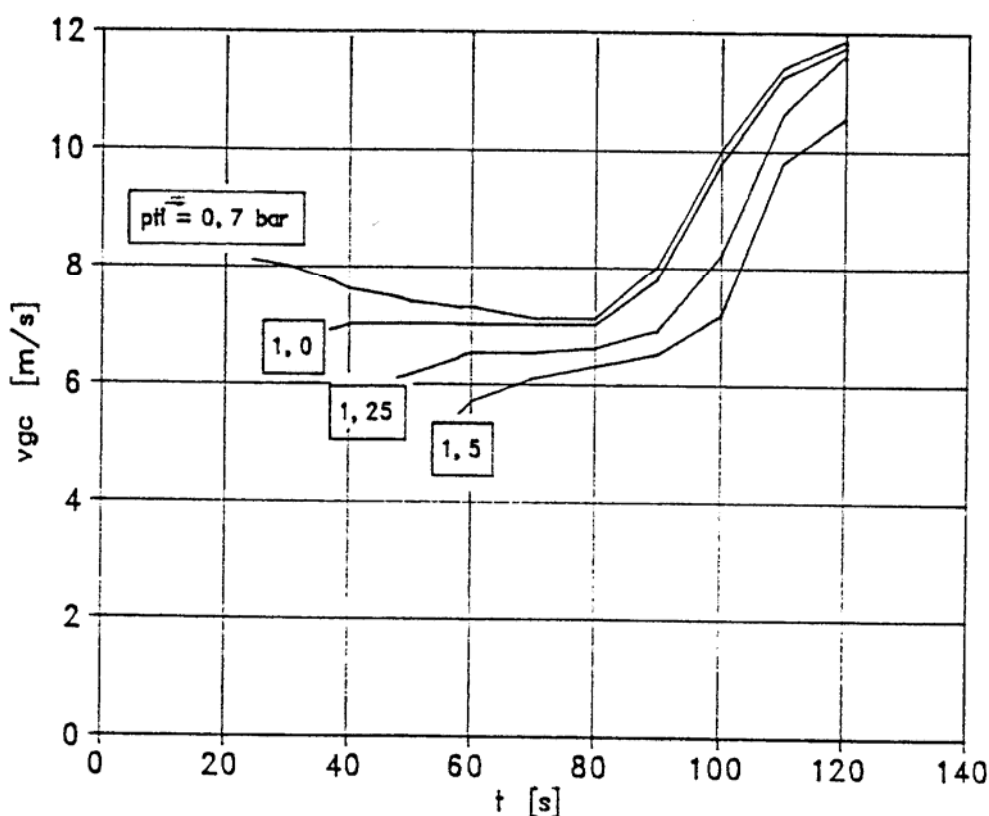
Ahol a „ $o$ ” index a légköri állapotra utal.

A lineáris összefüggést jó közelítéssel igazolják a mérési adatok is.

A 3.18. ábra alapján megállapítható, hogy az indítási nyomás növelésével az „effektív szállítási idő” csökken, így az anyag tömegáram nő. Az effektív szállítási idő – az „L6” jelű indítóselep nyitásától az indítótartály ürüléséig (lásd az ábrán karikával jelzett pontokat), tehát az expanzió kezdetéig tartó időtartam. A összmérési idő ebben a mérési sorozatban

közel állandó, mivel a nagyobb indítási nyomások esetén megnő az indítótartály nyomásra hozásának ideje és az expanszió időtartama is. Látható, hogy az indítási nyomásnak – a szállítóberendezéshez és a szállított anyagfajtaéhoz igazodó – megfelelő megválasztásával közel állandó tartálynomás és így közel egyenletes (kvázistacionárius, stacionárius) anyagszállítás valósítható meg.

Megjegyezzük, hogy a stacionárius anyagszállítási idő további növelése az adott szállítócső méret esetén az indítótartály méretének növelését tenné szükségessé, ami viszont a laboratóriumi körülményeket tekintve nem volt lehetséges. A szállítócső átmérőjének csökkentésével elérhető eredmény viszont az üzemi berendezésektől igen távoli kísérleti berendezést igényelt volna.



3.19. ábra. Levegő sebesség a szállítócső elején lúgpernye különböző indítónyomású szállításakor

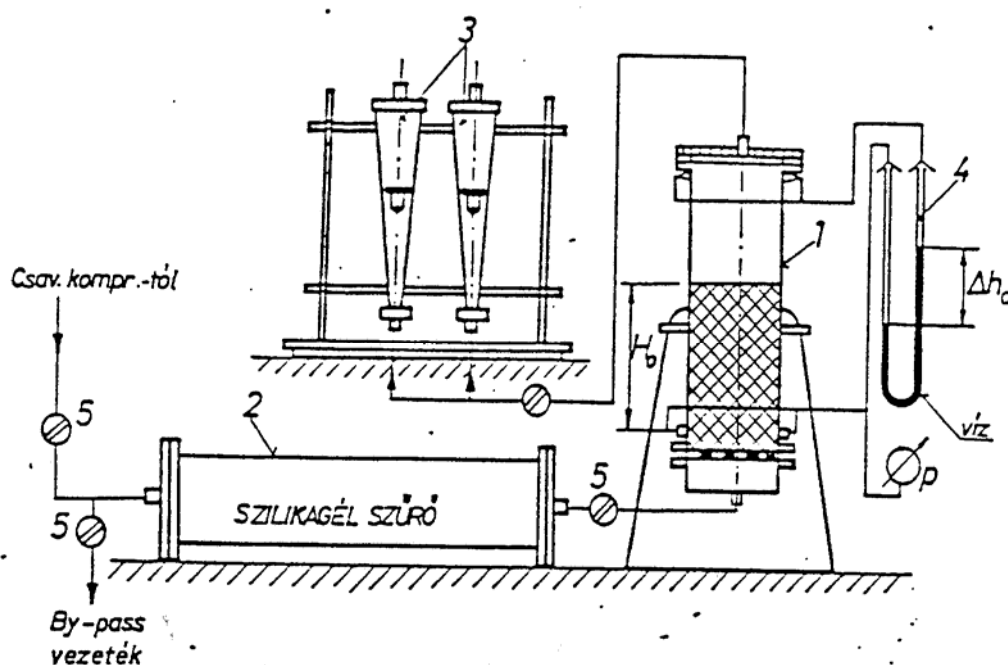
A 3.19. ábrán a szállítócső elején kialakuló „v<sub>gc</sub>” levegő sebességet ábrázoltuk az idő függvényében különböző indítási nyomások esetén, összhangban a 3.18. ábrán bemutatottakkal. A közel egyenletes anyagszállítás tartományában adódott kedvező sebesség értékek (v<sub>gc</sub> ≈ 6-8 m/s) a szállított lúgpernye tulajdonságaitól, illetve az egész szállítóberendezés méretviszonyaitól függenek. A méretviszonyok részletes vizsgálatát a későbbi fejezetek tárgyalják.

Következtetésként megállapítható, hogy az indítási nyomás megfelelő beállítása azonos geometriai paraméterek és közel azonos nyomások esetén kis mértékű anyag tömegáram növekedést eredményezett.

### 3.2.1.4. A minimális fluidizációs sebesség szerepe és függése a sűrűségtől

A nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezések tervezésekor, beszállításakor, üzemeltetésekor – különösen a felső ürítésű nyomótartályoknál – fontos paraméter a lazítósebesség, azaz a nyomótartály levegőelosztó lazítórétegén átáramló, - a szállítandó anyag tulajdonságaitól függő – gázsebesség. A nyomótartály működési állapotának kijelölésekor igen lényeges szempont az, hogy az abba betöltött szállítandó *anyag fluidizált állapotba* kerüljön. Az anyag fluidizálását elvégző, az anyagrétegen átáramló levegő nyomása a szállítási paraméterektől, valamint az indítástól eltelt időtől függően eltérő értékű lehet. Fontos szempont az, hogy a nyomótartály működésekor kialakuló minden különböző nyomásnál a szállítandó anyag fluidizált állapotban legyen.

A fenti vizsgálatokhoz kísérleti berendezést építettünk annak érdekében, hogy megvizsgáljuk, a nyomásnak milyen szerepe van az anyag fluidizálásakor

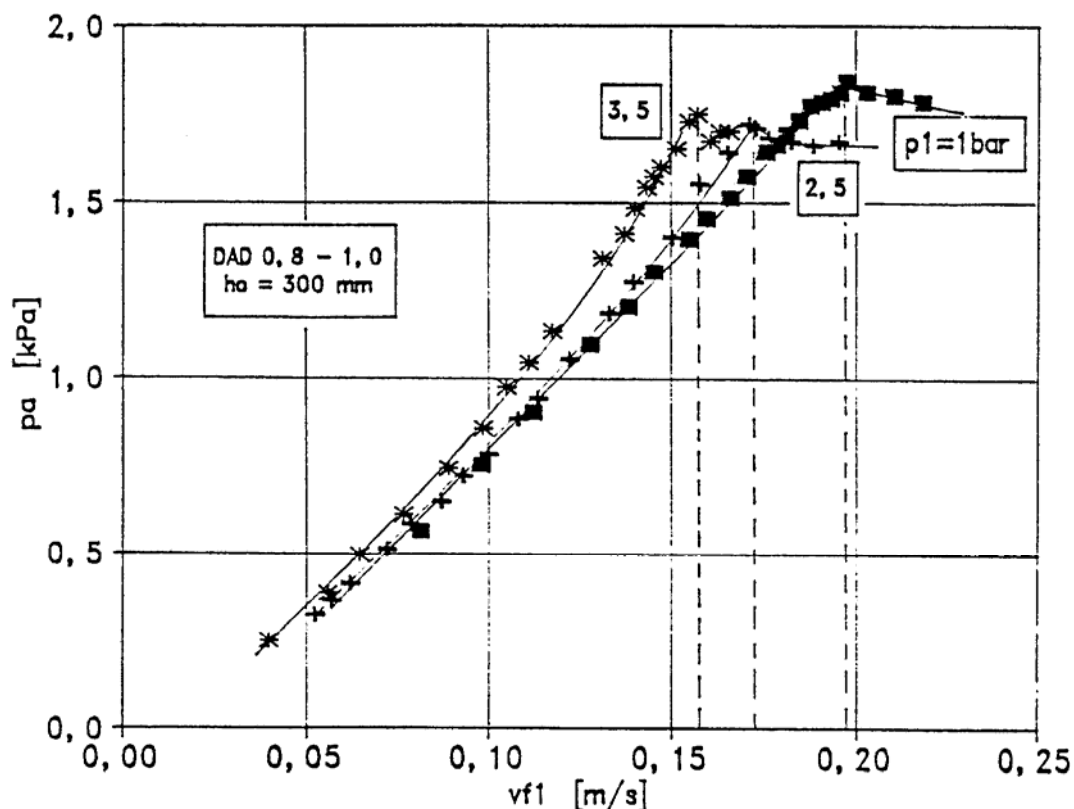


3.20. ábra. Kísérleti berendezés a fluidizációs sebesség különböző nyomáson történő meghatározására [42]

A 3.20. ábrán vázolt berendezés „1” jelű fő eleme egy NÁ150-es névleges átmérőjű  $L=1\text{m}$  hosszúságú, maximálisan 6bar nyomással terhelhető fluidizációs készülék, amelynek az alsó karimájánál a vizsgálandó anyagfajták fluidizációs jellemzőihez igazodó, egyenletes légeosztású, nagy ellenállású perlon szövet helyezkedik el. A fluidizáláshoz szükséges sűrített levegőt egy ATLAS COPCO csavarkompresszor szolgáltatja. A levegő nedvességtartalmának leválasztására a „2” jelű szilikagél szűrőágy szolgált, mivel enélkül a kísérletek eredményei a fluidizálandó anyag nedvesség miatti agglomerálódása következtében nem voltak reprodukálhatók. A levegő térfogatáram mérésére a „3” jelű párhuzamosan kapcsolt, egyenként  $2\text{--}20\text{m}^3/\text{h}$  méréshatárú rotaméter szolgált. A fluidizáló készülékbe töltött  $H_o=300\text{mm}$  nyugalmi rétegmagasságú anyagoszlop légáteresztés közben adódó ellenállását a „4” jelű víztöltésű U-csöves differenciál manométer „ $\Delta h_a$ ” szintkitérésének mérésével határoztuk meg. A fluidizációs jelleggörbéket különböző, egy-egy jelleggörbe mérése közben

állandó „ $p_1$ ” anyagréteg belépő oldali nyomás értékeknél vettük fel. A mérési pontokat az „5” jelű fojtó-szerelvények összehangolt beállításával szabályoztuk be oly módon, hogy a kompresszor minden mérési pont felvételekor stacionárius üzemben működjön.

A minimális fluidizációs sebesség sűrűségfüggésének meghatározásakor az állandó nyomáson, azaz állandó levegő sűrűsége felvett jelleggörbéknek csupán egyetlen pontjához, a töréspontoz tartozó értékek összerendelése szükséges.



3.21. ábra. Különböző nyomáson mért fluidizációs jelleggörbék;  
 $H_o$  – nyugalmi anyagréteg magasság

A 3.21. ábrán a „DAD” jelű durum asztali dara teljes fluidizációs jelleggörbéjét mutatjuk be három különböző nyomáson végzett mérés alapján.

A vizsgált anyagfajta 0.5-0.8mm és 0.8-1.0mm szemcseméret tartományba eső frakcióinak kiválasztására úgy került sor, hogy a kísérleti berendezés főelemének méretéhez, a levegő elosztó lazítóréteghez és a mérőműszerek méréshatárához igazodjunk, továbbá a fluidizációs jelleggörbéken a minimális fluidizációs sebességhez tartozó töréspont lehetőleg karakterisztikusan kiadódjon.

A 3.22. ábrán látható eredmény – összhangban a gyakorlati tapasztalattal – igazolja, hogy a minimális fluidizációs sebesség a nyomás és így a levegő sűrűség növelésekor egy anyagfajtnál csökken.

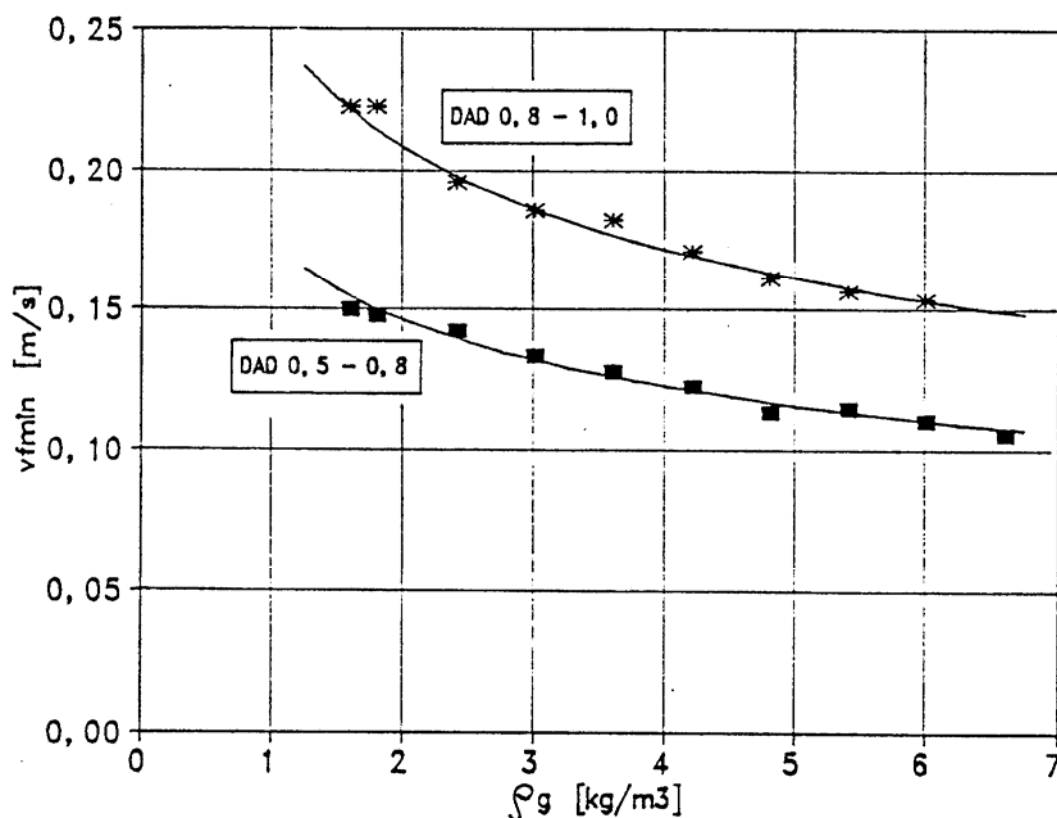
A kísérleti eredményeket

$$v_{f \min} = a \rho_g^b \quad (3.10)$$

alakú hatványfüggvénnyel közelítve „ $v_{f \min}$ ” [m/s] és „ $\rho_g$ ” [kg/m<sup>3</sup>] helyettesítéssel

a DAD 0.5-0.8 anyagra	$a=0.1741$	$b=-0.255$
a DAD 0.8-1.0 anyagra	$a=0.2514$	$b=-0.276$

értékek adódnak.



3.22. ábra. A minimális fluidizációs sebesség és a levegő sűrűség kapcsolata

Az eredmények tovább általánosíthatók, ha ismerjük a vizsgált anyag  $p_o=1$ bar nyomáson a  $\rho_{go}=1.2$ kg/m<sup>3</sup> levegő sűrűséghez tartozó „ $v_{f \min o}$ ” minimális fluidizációs sebesség értékét, mivel így

$$v_{f \min} = v_{f \min o} \left( \frac{\rho_g}{\rho_{go}} \right)^b \quad (3.11)$$

értékkel egyenlő.

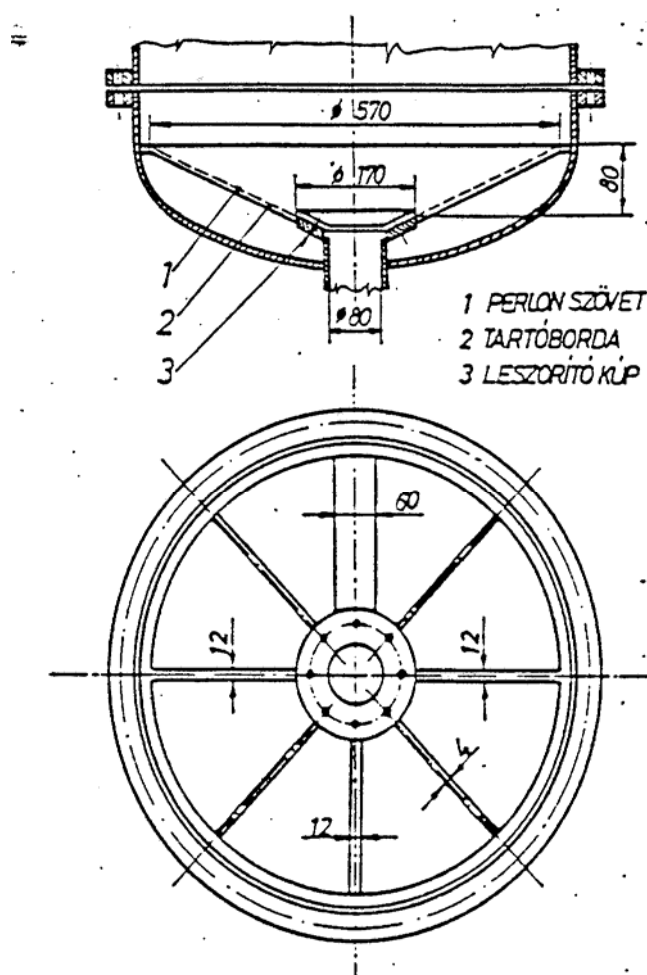
Izotermikus állapotváltozást feltételezve a 3.11. összefüggés még a következő módon is írható:

$$v_{f \min} = v_{f \min o} \left( \frac{p}{p_o} \right)^b \quad (3.12)$$

A kísérleti eredményekből még az a következtetés is levonható, hogy azonos anyagfajta azonos nyomáson történő fluidizálásakor a vizsgált szemcseméret-tartományban a nagyobb szemcsemérethez nagyobb minimális fluidizációs sebesség tartozik. A fenti összefüggés ismeretében beállítható a nyomótartályos berendezésen az anyag fluid állapotba hozásához szükséges minimális fluidizációs sebességnek megfelelő lazító sebesség, amely végső soron a tartálynymástól és az anyagfajtától függ. A szükséges legkisebb sebesség beállítása energiatakarékosság szempontjából bír nagy jelentőséggel, nem hagyható azonban figyelmen kívül az sem, hogy feleslegesen nagy fluidizációs sebesség beállítása az anyaghalmoz felületén *nagy felporzáshoz vezet, megnehezítve ezzel az anyag kiszállítását a tartályból.*

### 3.2.1.5. A nyomótartály lazítóbetét jelleggörbéje

A nyomótartályok léghelosztó lazítóbetétjének ellenállása minden esetben a szállítandó anyag fluidizációs tulajdonságainak figyelembe vételével választandó. Legtöbbször különböző vastagságú és anyagminőségű filcet használnak, de egyre inkább terjednek a műszálas, pl. perlon szövetek, sőt különleges esetekben, mint pl. nagy hőmérséklet esetén szinterbronz ill. kerámiabetétek.



3.23. ábra. Nyomótartály fenék lazítóbetét beépítési vázlata

A lazítóbetét kiválasztásakor, tervezéskor az áramlástani szemponton túl, különösen nagyobb tartályméreteknél ( $10\text{--}12\text{m}^3$ ) a felettük lévő anyagréteg súlyából adódó terheléssel is számolni kell, azaz gondoskodni kell a megfelelő alátámasztásról, a tartószerkezet kialakításáról. A



légáteresztő (szabad) keresztmetszetnek a teljes felülethez viszonyított értéke széles tartományban (0.5-0.9) változhat.

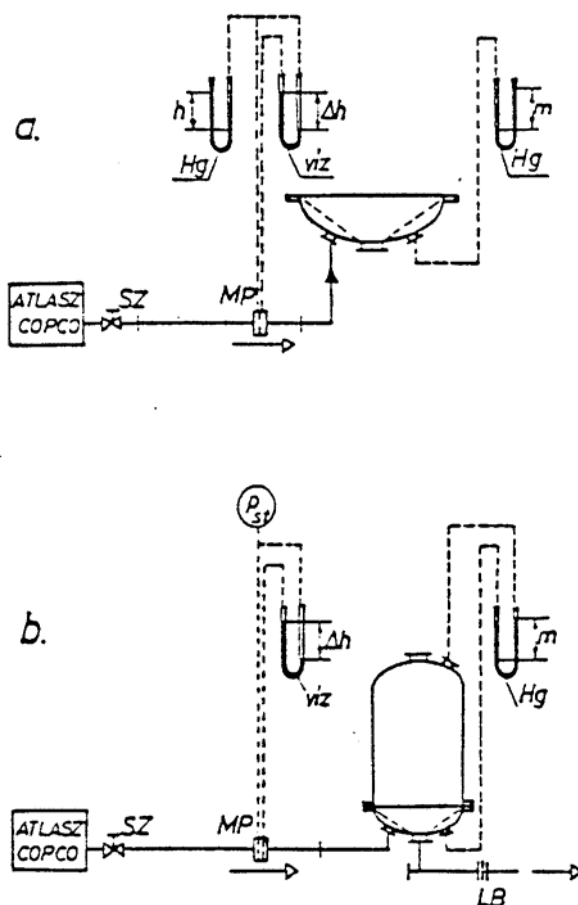
A 3.23. ábrán nyomótartály fenék beépítési vázlata látható. A tartályt eredetileg filc lazítóbetéttel tervezték, ám a laboratóriumi kísérletek tapasztalatai alapján átalakításra került és perlon szövet beépítésére került sor.

A tartóbordák méretének csökkentésével a lazítólevegő számára rendelkezésre álló légáteresztő felület teljes felülethez viszonyított értéke az alábbi:

Filc esetén	$0.16\text{m}^2/0.269\text{m}^2=0.595$
Perlon szövet esetén	$0.226\text{m}^2/0.252\text{m}^2=0.897$

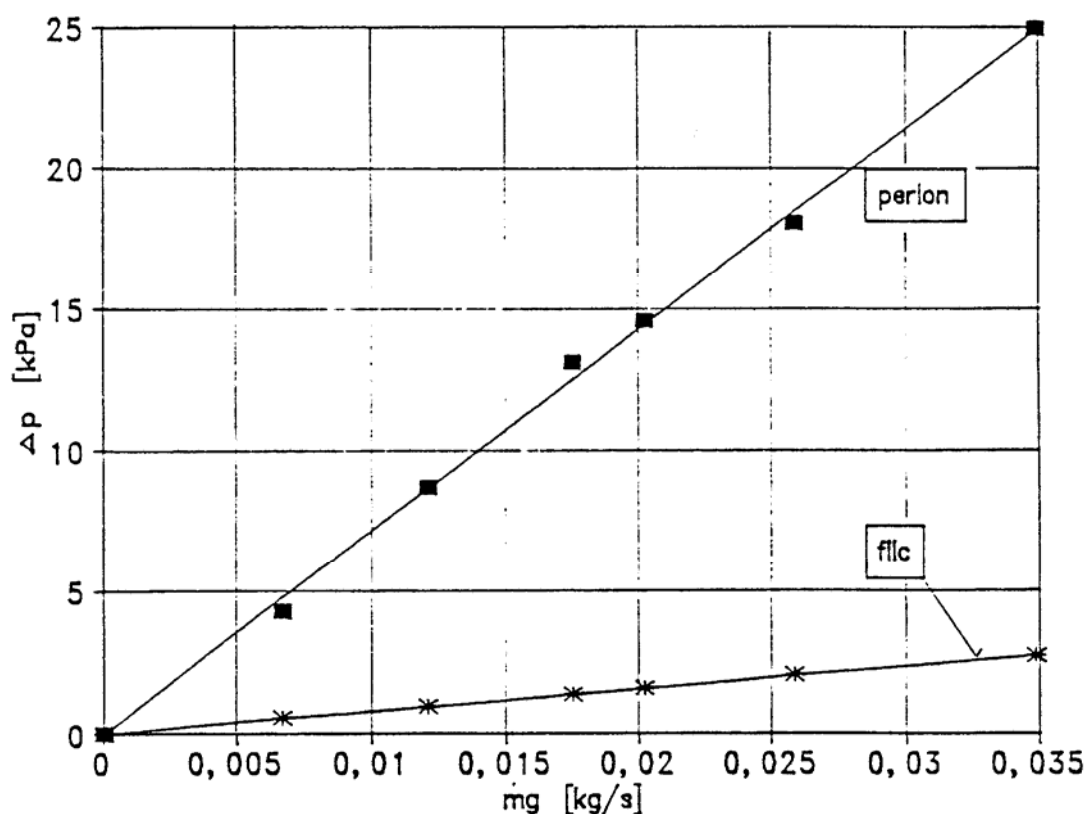
Azaz a bemutatott mintapéldában a perlon szövet esetében a légáteresztő (szabad) keresztmetszet aránya lényegesen kedvezőbb, ami az anyag egyenletesebb lazítását eredményezi.

A lazítóbetét jelleggörbe méréséhez a 3.24.a. ábra szerinti mérőberendezést használtuk. Amint az az ábrán is látható ezt a mérést szétszerelt nyomótartállyal, azaz a lazítóbetét fölött „ $p_o$ ” légköri nyomáson végeztük.



3.24. ábra. Nyomótartály lazítóbetét jelleggörbe mérőberendezés vázlata

A 3.25. ábrán bemutatjuk mindkét levegőelosztó réteg jelleggörbéjét. Az ábrából egyrészt megállapítható, hogy az eredeti célkitűzés, miszerint egy jobb levegőelosztást eredményező, nagyobb ellenállású lazítóbetétet építsünk be teljesült, ám a jelleggörbék összehasonlításakor felmerülhet a kérdés, hogy a lényegesen megváltoztatott lazítóbetét jelleggörbe, az így adódó nagyobb nyomásigény révén nem rontja-e a berendezés fajlagos energiaigényét, másrészt felmerülhet a kérdés, hogyan alakul a  $\Delta p = f(m_g)$  jelleggörbe az anyagszállításkor, azaz a légkörítől lényegesen eltérő nyomáson működő nyomótartályban.



3.25. ábra. Lazítóbetét jelleggörbe

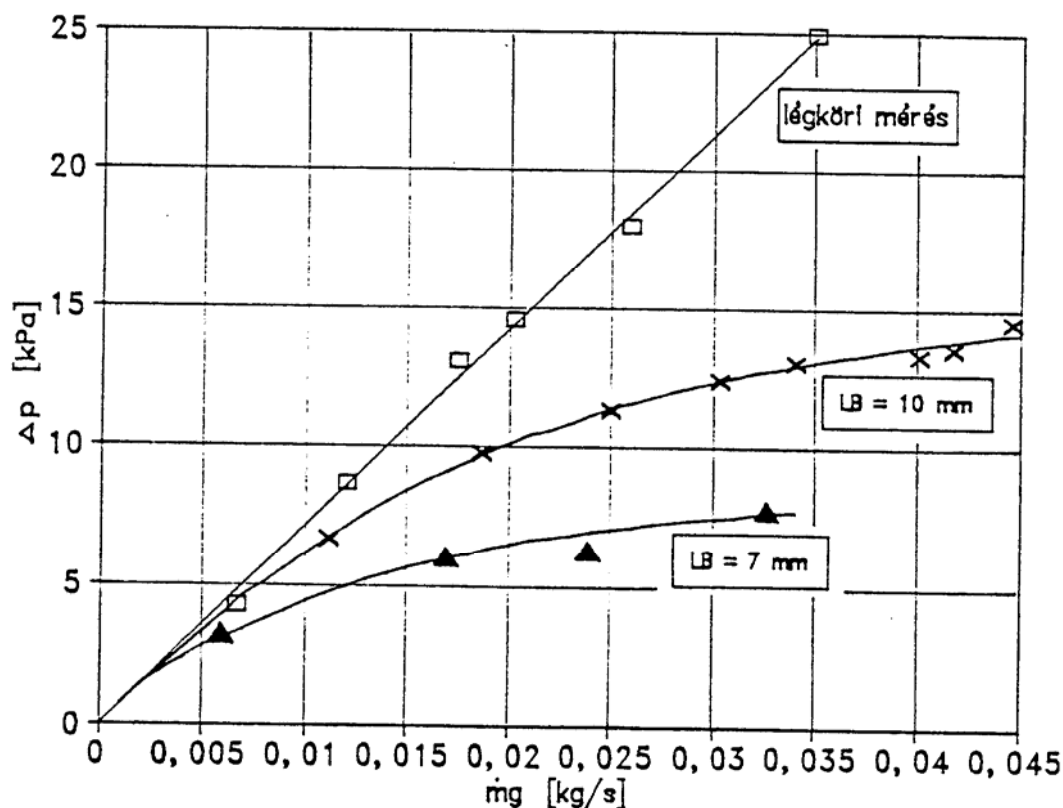
Ez utóbbi kísérleti igazolására, azaz a most már összeszerelt nyomótartályban lévő lazítóbetét jelleggörbéinek kimérésére a 3.24.b. ábra szerinti berendezést alakítottuk ki. A nyomótartály különböző - a légkörinél nagyobb nyomású – állapotát a szállítócső fojtásával, azaz egy karimás csatlakozásnál beépített „LB” jelű szűkítő nyílás (lemezblende) segítségével és a levegő tömegáram változtatásával állítottuk elő. Ezzel a módszerrel üresjárásban szimulálhatók olyan állapotok, mint amelyek anyagszállítás közben adódnak. A 3.26. ábrán bemutatjuk a különböző nyomásokon felvett jelleggörbéket.

A jellemző lazítóbetét ellenállás – légáteresztés jelleggörbe meghatározásához az alábbi mennyiségeket vezetjük be:

Reynolds szám: 
$$Re = \frac{v_{laz} d_e}{\nu_g} \quad (3.13)$$

Ahol  $v_{laz}$  [m/s] - a lazítóbetéten átáramló levegő sebessége a betét alatti  
Nyomáson

$d_e$  [m] - a lazítóbetét egyenértékű nyílásátmérője  
 $v_g$  [m<sup>2</sup>/s] - a levegő kinematikai viszkozitása a betét alatti nyomáson



3.26. ábra. Lazítóbetét jelleggörbe

A lazítóbetét dimenziótlan ellenállása:

$$\psi = \frac{\Delta p}{\rho_g v_{laz}^2} \quad (3.14)$$

ahol  $\Delta p$  [Pa] - a lazítóbetét ellenállása, azaz a betét alatti és fölötti statikus  
 Nyomások közötti különbség  
 $\rho_g$  [kg/m<sup>3</sup>] - a levegő sűrűsége a betét alatti nyomáson

A lazítósebességet az „ $\dot{m}_g$ ” levegő tömegáram és a „ $p_{ta}$ ” tartálynomás mért értékeiből az alábbiak szerint számítjuk:

$$v_{laz} = \frac{\dot{m}_g}{A_{laz} \rho_g} = \frac{\dot{m}_g}{A_{laz} \rho_{go} p_{ta} / p_o} \quad (3.15)$$

ahol  $A_{laz}$  [m<sup>2</sup>] - a lazítóbetét szövettel borított (szabad, bordák nélküli) felülete  
 $\rho_{go}=1.2\text{kg/m}^3$  - légköri levegősűrűség  
 $p_o=10^5\text{Pa}$  - légköri nyomás

Figyelembe véve, hogy  $\nu_g = \frac{\mu_g}{\rho_g}$

Az összefüggésben „ $\mu_g$ ” a nyomástól független dinamikai viszkozitás (20°C-os levegőre  $\mu_g = 18.2 \cdot 10^{-6} \text{ Pas}$ ). A 3.13. összefüggés ezek után

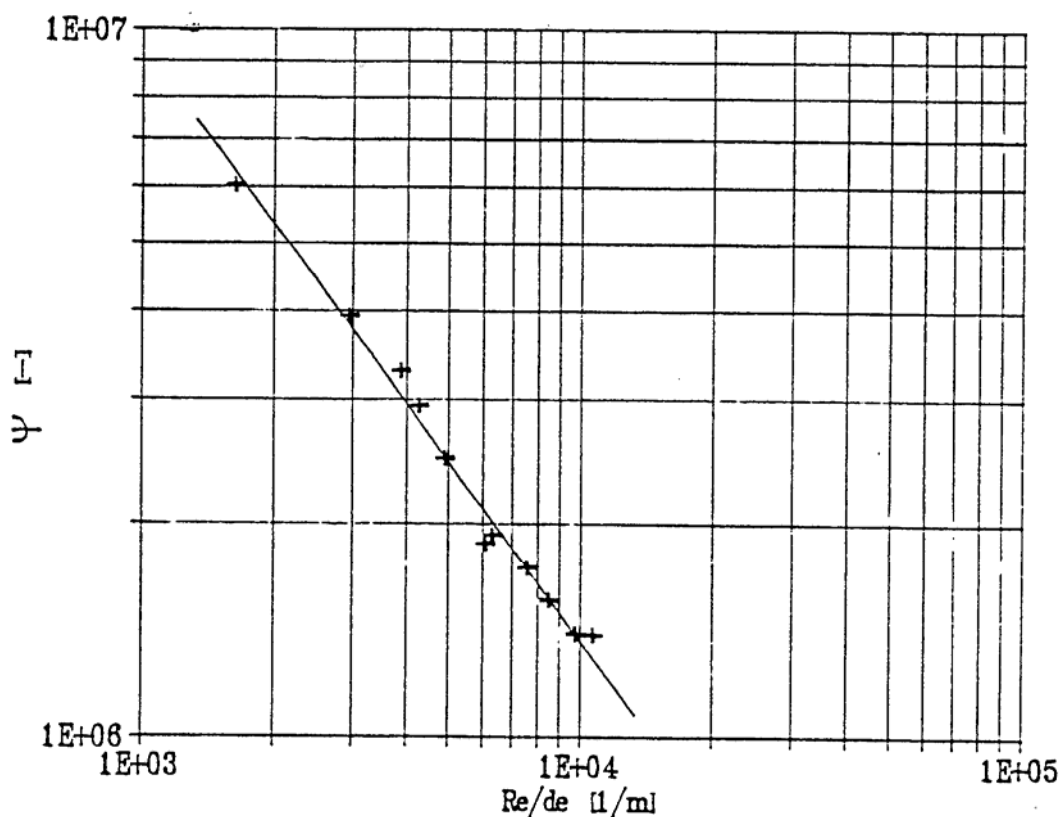
$$\text{Re} = \frac{v_{\text{laz}} d_e}{\nu_g} = \frac{v_{\text{laz}}}{\mu_g} \rho_g d_e = \frac{m_g d_e}{A_{\text{laz}} \mu_g} \quad (3.16)$$

alakban is írható.

Mivel azonban a szövet egyenértékű átmérőjét egyáltalán nem vagy csak közelítőleg lehetne meghatározni, ezért a Reynolds számmal arányos alábbi mennyiséget képeztük:

$$\frac{\text{Re}}{d_e} = \frac{m_g}{A_{\text{laz}} \mu_g} \quad (3.17)$$

A 3.27. ábra a fenti „ $\text{Re}/d_e$ ” szám függvényében mutatja a dimenziótlan ellenállás változását. Az ábrából láthatóan a mérési pontok a 3.24.a. ill. 3.24.b. ábra szerinti elrendezésben mérve egy egyenesre esnek. Ez azt jelenti, hogy a szövet pórusai között az áramlás lamináris.



3.27. ábra. Lazítóbetét dimenziótlan jelleggörbe

A lazítóbetét dimenziótlan jelleggörbe diagram használatát az alábbi számpélda segítségével mutatjuk be:

10. példa.

Határozzuk meg a kísérleti nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezés perlon szövet borítású lazítóbetétjének nyomásesés-légáteresztés adatait stacionárius szállítási állapotban és üresjáráskor az összehasonlítás érdekében azonos „ $m_g$ ” levegő tömegáramnál.

Induló adatok a 3.27. ábra felhasználásával:  $Re/d_e=5*10^3$  1/m;  $\psi=2.5*10^6$

Állandó adatok:  $A_{laz}=0.226m^2$ ;  $\mu_g=18.2*10^{-6}$  Pas

A levegő tömegáram értéke:

$$m_g = A_{laz} \mu_g \frac{Re}{d_e} = 0.226 m^2 * 18.2 * 10^{-6} Pas * 5 * 10^3 1/m = 2.057 * 10^{-2} kg/s$$

PVC por stacionárius szállításánál a kísérletek szerint a fenti levegő tömegáramnál  $p_{ta}=3.55*10^5$  Pa abszolút nyomás lép fel a nyomótartály levegőelosztó lazítóbetét alatti tiszta levegő terében, így ezzel az adattal a lazítósebesség ezen a nyomáson:

$$v_{laz} = \frac{m_g}{A_{laz} \rho_{go} p_{ta} / p_o} = \frac{2.057 * 10^{-2} kg/s}{0.226 m^2 * 1.2 kg/m^3 * 3.55 * 10^5 Pa / 1 * 10^5 Pa} = 0.0214 m/s$$

A fenti nyomáshoz tartozó levegősűrűség:

$$\rho_g = \rho_{go} \frac{p_{ta}}{p_o} = 1.2 kg/m^3 * \frac{3.55 * 10^5 Pa}{1 * 10^5 Pa} = 4.26 kg/m^3$$

A lazítóbetét nyomásesése:

$$\Delta p = \psi \rho_g v_{laz}^2 = 2.5 * 10^6 * 4.26 kg/m^3 * (0.0214 m/s)^2 = 4859 Pa = 0.049 bar$$

Ugyanez a számítás az üresjárási  $p_{ta}=1.15*10^5$  Pa nyomáson

$$v_{laz} = \frac{2.057 * 10^{-2} kg/s}{0.226 m^2 * 1.2 kg/m^3 * 1.15 * 10^5 Pa / 1 * 10^5 Pa} = 0.0659 m/s$$

$$\rho_g = 1.2 kg/m^3 * \frac{1.15 * 10^5 Pa}{1 * 10^5 Pa} = 1.38 kg/m^3$$

$$\Delta p = 2.5 * 10^6 * 1.38 kg/m^3 * (0.0659 m/s)^2 = 14983 Pa \approx 0.15 bar$$

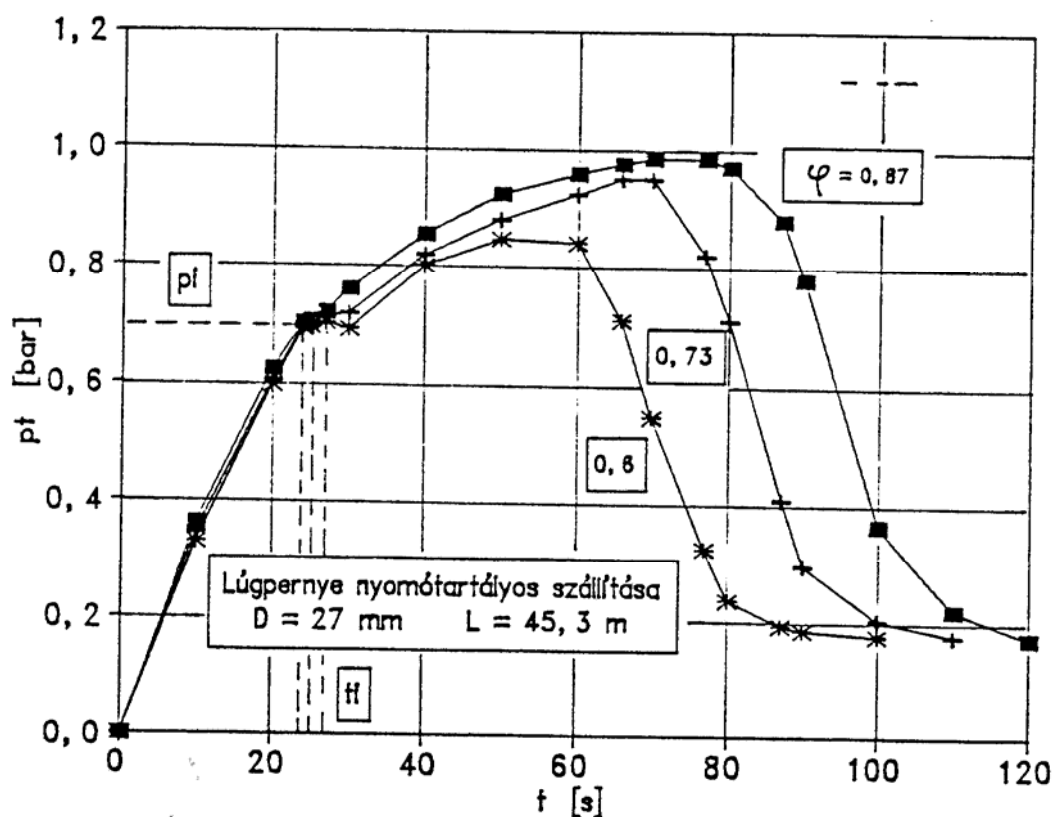
Amint az tehát a számpéldából is megállapítható a stacionárius szállítási állapothoz a levegősűrűségek arányában kisebb lazítóbetét ellenállás tartozik (a mintapéldában kb. harmada), mint üresjáráskor.

A bemutatott számítási eljárás, továbbá a korábbi fejezetben lévő minimális fluidizációs sebesség – sűrűség összefüggés ismeretében a nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezés méretezése immár pontosabban elvégezhető. A méretezés legfontosabb részét, a szállítócső hossz menti nyomáseloszlásának számítását későbbi fejezetben tárgyaljuk.

### 3.2.1.6. A töltési fok szerepe

A nyomótartály anyaggal töltött és anyaggal feltölthető legnagyobb térfogatának viszonyát töltési foknak nevezik.

A nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezések tervezésekor fontos szempont a tartály méretének és a csatlakozó szállítóvezeték vonalvezetésének, méretviszonyainak összehangolt megválasztása. Ennek részletes ismertetésére a későbbi fejezetekben kerül sor. Üzemeltetési, üzemtani szempontok miatt azonban jelentős lehet meglévő nyomótartályoknak a változó technológiai igényekhez igazodó működtetése különböző töltési fokok mellett. Ennek vizsgálatára itt térünk ki.

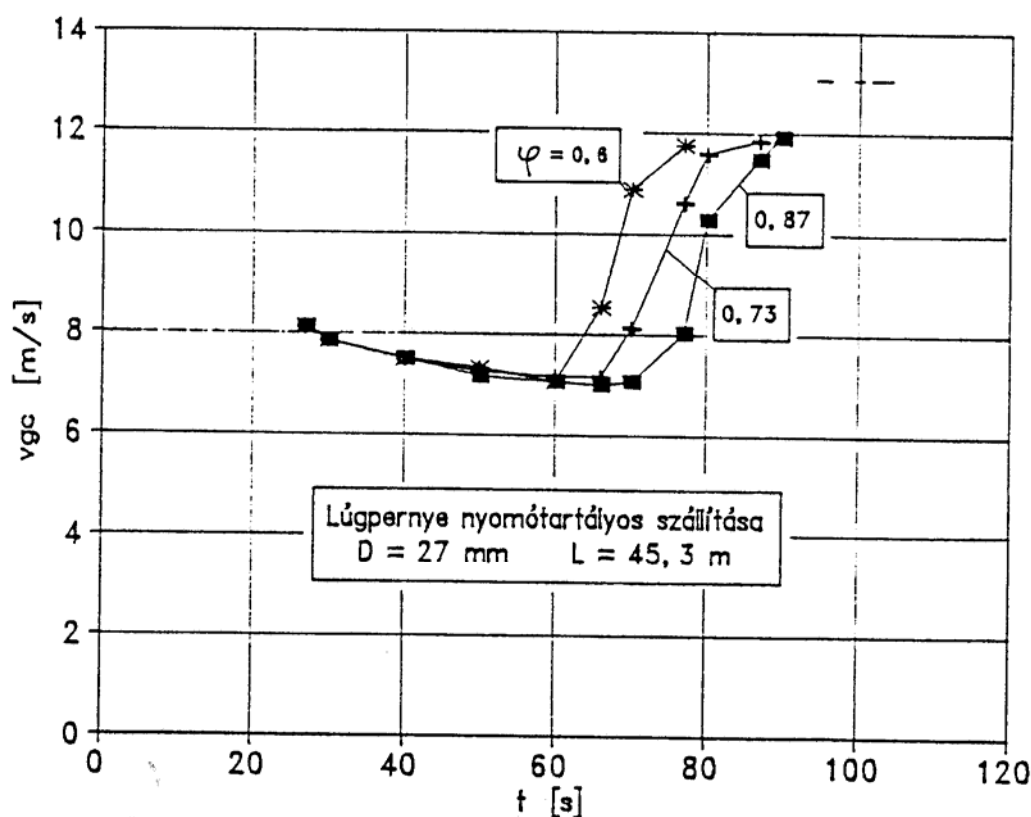


3.28. ábra. Tartálynomás változása az idő függvényében lúgpernye szakaszos szállítása esetén

A 3.28. – 3.29. ábrán feltüntetett lúgpernye szállítási kísérleteinél az „L6” jelű indítószelep segítségével az indítási nyomást  $p_n=0.7$  bar (túlnyomás) értéken állandónak tartottuk. A 3.28. ábrán a „ $p_t$ ” tartálynomás időbeli változását ábrázoltuk az indítótartályba betöltött különböző „ $m_a$ ” anyagmennyiség, azaz a nyomótartály különböző töltési foka esetén. Az ábrából megállapítható, hogy a töltési fok növelése az összmérési időt növeli olyan módon, hogy az idő növekedése a betöltött anyagadagok tömegének növekedésével közelítőleg arányos, ami

közel állandó átlagos anyag tömegáram értéket eredményez. Az indítótartályba töltött különböző anyagadagok rendre 90-110-130 dm<sup>3</sup> térfogatot foglalnak el, ami a 150 dm<sup>3</sup> névleges hasznos tartálytérfogatnál 0.6-0.73-0.87 töltési foknak felel meg. A tartálynyomás kicsiny értékei a szállított lúgpernye igen kicsiny halmazsűrűségének köszönhető. Méréseink szerint  $\rho_h \approx 140 \text{ kg/m}^3$ .

A töltési fok paraméter értékének változtatásával az is megállapítható, hogy a nyomótartályban kialakuló fluidizált anyagréteg magasság változása hogyan befolyásolja a tartálynyomás értékét.



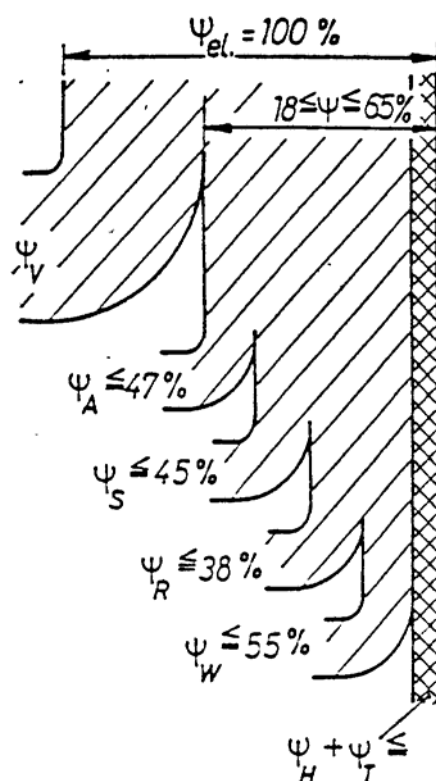
3.29. ábra. A szállítócső elején a levegősebesség változása az idő függvényében lúgpernye szakaszos szállítása esetén

A 3.29. ábrán látható „v<sub>gc</sub>” szállítócső eleji levegősebesség számításánál az anyag keresztmetszet szűkítő hatását nem vettük figyelembe. A kvázistacionárius szállítási tartományban kialakult kis levegősebesség (v<sub>gc</sub>=6-8m/s) értékek a sűrűáramú pneumatikus szállításra jellemzőek és kíméletes, energiatakarékos anyagszállítást eredményeznek.

A töltési fok változtatásának hatását a szállítólevegő mennyiségére és a szállítás fajlagos energiaigényére a folyamatos üzemi nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezés működését bemutató későbbi fejezet részletesen tárgyalja.

### 3.2.1.7. A szállítás energiaigénye

A szállítás energiaszükségletének részletes elemzését adja Buhrke [43].



3.30. ábra. Pneumatikus szállítás energiaszükséglete [43]

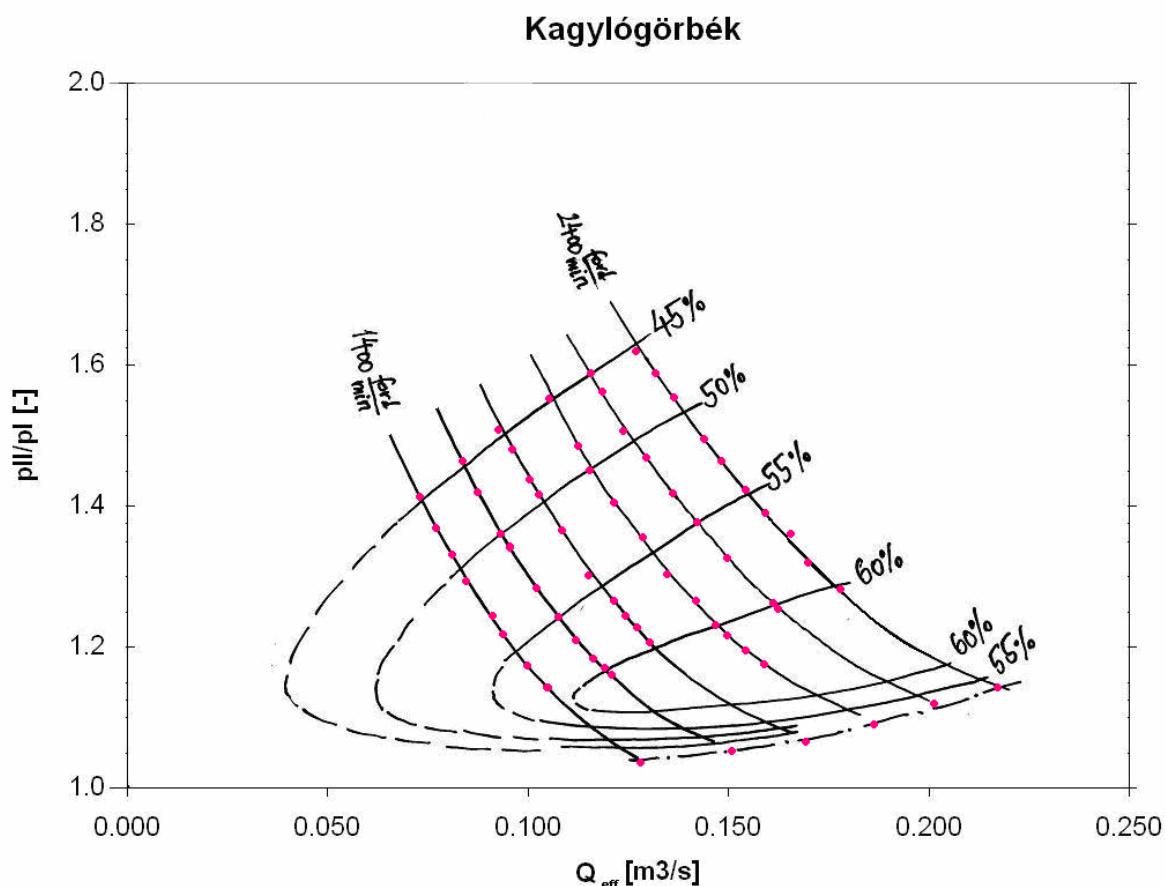
A légszállító gép hajtómotorjához vezetett elektromos energiát 100%-nak tekinti. A légszállító gépben fellépő energia átalakulás veszteségeit tapasztalat alapján 35%-ra becsüli, ami megfelel a hígáramú pneumatikus szállításnál leggyakrabban használt forgódugattyús fúvó összhatásfokának ( $\eta_o=65\%$ ). A konkrét számérték rögzítése helyett a jelleggörbék alapján az adott üzemállapothoz tartozó munkapontbeli hatásfok figyelembe vételét javasoljuk. Fentiek illusztrálására a 3.31. ábrán bemutatjuk a BME Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék laboratóriumában mért forgódugattyús fúvó jelleggörbéjét (kagylódiagramját). Az ábra az effektív térfogatáram függvényében a nyomócsonk és szívócsonk abszolút nyomásainak viszonyát ábrázolja. A különböző állandó fordulatszámokon elvégzett mérések eredményeinek felhasználásával az ábrában jelöltük az állandó hatásfok értékekhez megszerkesztett kagyló görbeseregét is.

Buhrke megállapításának megfelelően a szállítandó szilárd anyagoknak a pneumatikus szállítóvezetékbe való bevitelénél, az adagolónál az energiának egy további része ( $\psi_A$ ) megy veszendőbe a kiáramló réslevegővel, így a szállítási folyamatra csak a ( $\psi$ ) kifejezéssel arányos energiamennyiség használható fel.

A gáz gyorsítja az anyagot, azaz növeli az anyag kinetikai energiáját, továbbá emeli az anyagot, azaz növeli a potenciális energiáját ( $\psi_H + \psi_T$ ).



A gáz és a cső között létrejövő súrlódás legyőzéséhez szükséges energiárész ( $\psi_W$ ) a hígáramú pneumatikus szállításra jellemző kis keverési aránynál és nagy Froude-számnál nagy, míg sűrűáramú szállításkor és kis Froude-számnál elhanyagolhatóan kicsi.



3.31. ábra. Forgódugattyús fűvő jelleggörbe

A Froude-számot a „ $v_g$ ” levegősebesség és a „ $D$ ” csőátmérő felhasználásával Buhrke az alábbiak szerint definiálja:

$$Fr = \frac{v_g}{\sqrt{gD}} \quad (3.18)$$

Az anyag és a cső közötti súrlódás legyőzésére fordított rész ( $\psi_R$ ) az anyag mozgásának a fenntartására szolgál. Ez arányos a módosított súrlódási együtthatóval, így értéke sűrűáramú szállításnál kisebb, mint hígáramú szállításnál.

Az anyag és a gáz közötti relatív sebességkülönbségből származó veszteség ( $\psi_S$ ) az átviteli veszteség, vagy a hazai szakirodalomban elterjedt kifejezéssel „szlip”, melynek értéke hígáramú szállításnál nagyobb, mint a sűrűáramú szállításnál.

Szőnyi [32] összefoglaló irodalomkutatási munkájában hasonló adatokról tájékoztat.

Bühler [44] gyártmánykatalógusából származó adatok feldolgozása szerint a dugós szállítás fajlagos energiafogyasztása gyakran csak 1/5-e a hígáramú, vagy „pázmás” szállításénak.

Ennek az a magyarázata, hogy a hígáramú szállítás esetén a levegő sebessége 2-2.5-szer nagyobb – kellő biztonság miatt – a dugulási határsebességnél.

Muschelknautz és Krambrock [45] finomszemcsés anyagok nagy keverési arányú, kis sebességű szállítási állapotának számítására egyszerűsített módszert javasoltak. A nyomásvesztés arányosnak veszik a súlyerőből származó falsúrlódással. A szállítócső elején és végén lévő abszolút nyomások „ $p_e/p_v$ ” viszonyára exponenciális függvényt vezettek le, melynek kitevőjét az alábbiak szerint definiálták:

$$\ln \frac{p_e}{p_v} = \frac{\beta \mu g L}{RT v_a / v_g} = k \mu g L \quad (3.19)$$

alakban írva a „ $k$ ” mennyiséget energiafogyasztási tényezőnek nevezik. Vizsgálataik szerint ez elsősorban a szállított szilárd anyag minőségétől, tulajdonságaitól függ. Ilyenek: szemcseméret, fluidizálhatóság, sűrűség, a szemcsék felületi minősége, nedvességtartalom stb. A „ $\beta$ ” súrlódási tényező vízszintes csőben a legtöbb ömlesztett anyag számára  $\beta=0.4-0.8$  határok között, vagyis átlagosan  $\beta=0.6$  értékkel számítható. Működő üzemi szállítóberendezéseken végzett kísérletek tapasztalatai szerint a „ $v_a/v_g$ ” = 0.1-0.95 tartományban változott. Finomszemcsés anyagoknál nagy keverési arány esetén nagy sebességviszony adódott, azaz  $v_a \approx v_g$ . Megfontolásaik szerint a sebességviszonyt a „ $\mu$ ” keverési arány és a „ $I$ ” sűrűségviszony ( $I = \rho_g / \rho_a$ ) szorzata, az un. „ $\mu I$ ” koncentrációs szám befolyásolja elsősorban.

Scholl [46] cikkében érdekes felvetéssel találkozunk arról, hogy a pneumatikus és hidraulikus szállítóberendezéseknél a szállító közeg és a szállított anyag között jelentkező sebességkülönbség különleges energiafelhasználást eredményez. Szerinte ennek jelentősége rendkívül nagy, hisz nagysága az egyéb részösszetevőkből adódó energiaszükséglet összességével egyenlő.

A különböző szállítási módok üzemének gazdaságosságát a fajlagos energiafelhasználásukat tekintve lehet összehasonlítani. Ez az érték megmutatja, hogy a szállítóberendezés az anyag tömegegységének egységnyi távolságra szállításához mennyi energiát igényel.

$$e = \frac{P}{m_a L} \quad \left[ \frac{J}{kgm} \right] \quad (3.20)$$

A különböző légáramú szállítóberendezések és összehasonlításul néhány mechanikus szállítóberendezés fajlagos energiafogyasztását adja meg Pápai – Mihályi [47] az alábbi összefoglaló táblázatban:

Szállítóeszköz	Fajlagos energiafogyasztás
Függ. hígáramú pneu. száll.	180-290
Vízzs. hígáramú pneu. száll.	140-250
Átmeneti állapotú pneu. száll.	70-150
Sűrűáramú pneu. száll.	20-60
Aerációs csatorna	2-6

Szállítószalag	3-9
Szállítócsiga	35-75
Elevátor (függőleges)	20-45

Jól illeszkednek a táblázat adataihoz Scholl [48] nagyon kis szemcseátmérőjű szilárd anyagok tolószállításakor nyert fajlagos energiaigény értékei: (5-50 J/kgm).

### 3.2.1.8. Szállítás minimális energiafelhasználással

A BME Vízgépek Tanszékén a XX. Század utolsó két évtizedében folytatott kutatómunka fő célkitűzése a sűrűáramú pneumatikus szállítás területén a szállítás optimális üzemi paramétereinek meghatározása volt. Így konkrétan adott anyagfajta szállításakor a szállítóberendezésben elérhető *legnagyobb anyag tömegáramot, legnagyobb keverési arányt* vagy a *legkisebb fajlagos energiafelhasználást* eredményező jellemzőket kívántuk kísérleti úton meghatározni. Ez utóbbi jelentősége különösen megnőtt, hiszen a sűrűáramú szállítás fajlagos energiaigénye a berendezés megfelelő beszabályozása esetén mér összevethető a hagyományos mechanikus szállítóeszközökével.

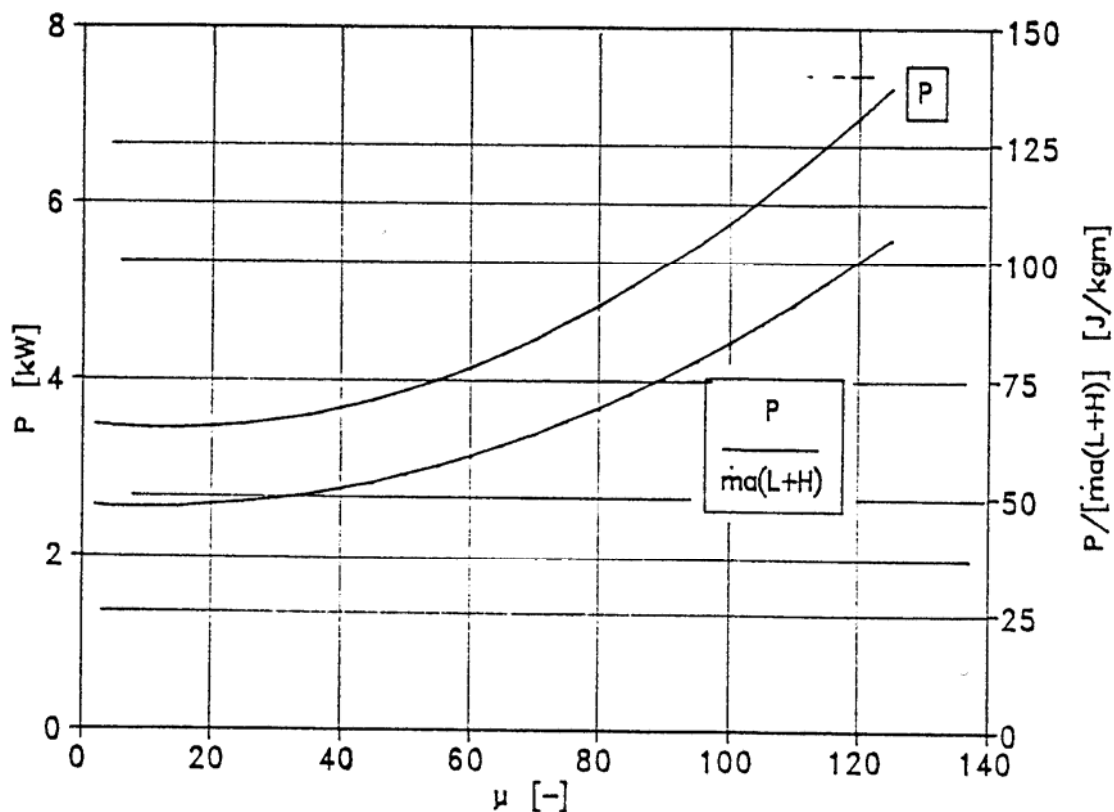
Az előzőek igazolásául néhány az irodalomban fellelhető idevágó példát mutatunk be. Rivkin-Szorocsinszkij [49] kísérleti úton megállapították, hogy sűrűáramú vízszintes pneumatikus szállításnál az anyag tömegáram a levegő sebességének növelésével egy bizonyos határig növelhető, majd elkezd csökkenni.

Hasonló célú kutatómunkáról számol be Kazancev-Rivkin [50] „A vízszintes pneumatikus szállítás optimális viszonyai sűrű fázisban” c. publikációjában. A levegősebesség függvényében kialakuló anyag tömegáram-maximum szerinte nem magyarázható a nagy koncentrációjú kétfázisú keverék áramlási mechanizmusáról napjainkban ismert elméleti fejtegetések alapján, amikor is az anyag legnagyobb része a csúsztató feszültség miatt a csővezeték alsó részén halad állandó sűrűségű „szalag” formájában, miközben a szalag struktúrája és magassága kismértékben változik az egész szakasz mentén. A szalag felső felületei mozognak, következőképpen „dombok” és „völgyek” váltakozva jelennek meg, amelyek a levegő áramlásával előre haladnak és periódikusan nyomásingadozások következnek be.

Megjegyezzük, hogy szállítási méréseink során a szállítócső mentén, a nyomásmérési helyeken mi is hasonló jelenséget észleltünk.

A hazai szakirodalomban Szekeres [51] foglalkozott az optimális keverési arány, azaz – nála – a minimális energiafelhasználáshoz tartozó keverési arány meghatározásával hígáramú és sűrűáramú pneumatikus szállításnál egyaránt. Utóbbi igazolásául liszt szállítási kísérletek eredményét közli.

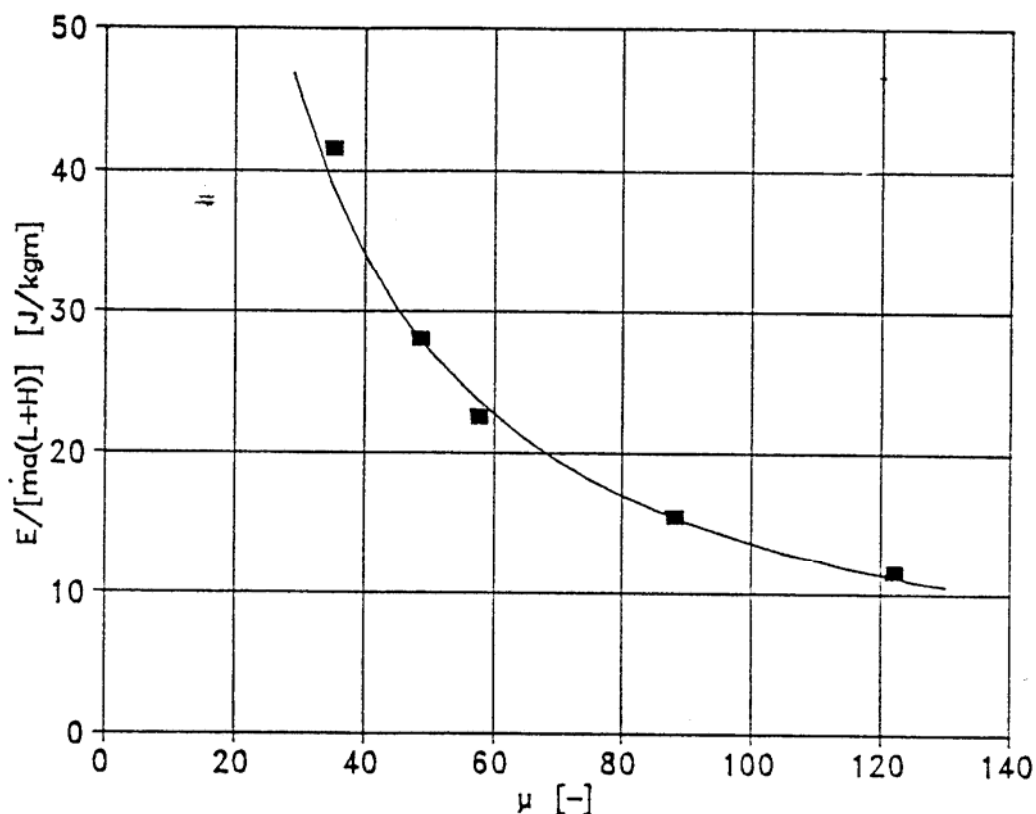
A 3.32. ábrán  $m_a = 2 \text{ kg/s}$  szállítóteljesítményű  $L=20\text{m}$  vízszintes és  $H=16\text{m}$  függőleges szállítási távolságú sűrűáramú (fluidizációs) lisztet szállító vezeték teljesítményigénye látható a keverési arány függvényében. A szállítócső átmérőjét a cikk sajnos nem tartalmazza. Nagyobb információtartalma miatt a teljesítményigény adatok helyett fajlagos energiaigény értékeket számítottunk, így az eredmény más anyagok hasonló mennyiségével nagyságrendre és jellegre összehasonlítható. A fajlagos energiaigény változását liszt szállításakor a 3.32. ábra tartalmazza.



3.32. ábra. Liszt sűrűáramú szállítása [51].  $\dot{m}_a = 2 \text{ kg/s}$ ;  $L=20\text{m}$ ;  $H=16\text{m}$

Mind a teljesítményigény, mind pedig a fajlagos energiaigény görbe jellege szokatlan, hiszen állandó anyag tömegáram esetén a keverési arány növelése csak a levegő tömegáram csökkentésével lehetséges, ami rendszerint kisebb levegősebességet és így kisebb nyomásigényt, azaz teljesítmény igényt kell jelentsen, ami egyúttal összhangban van saját mérési eredményeinkkel. A 3.32. ábrában bemutatott jelleggörbe csupán a szállítás dugulásveszélyes labilis tartományában jöhet létre, amelynek tartós üzemi megvalósítása nem javasolható.

Összehasonlításként a 3.33. ábrán bemutatjuk bánhidai pernye kísérleti nyomótartályos szállítóberendezésen végzett mérésein eredményét.



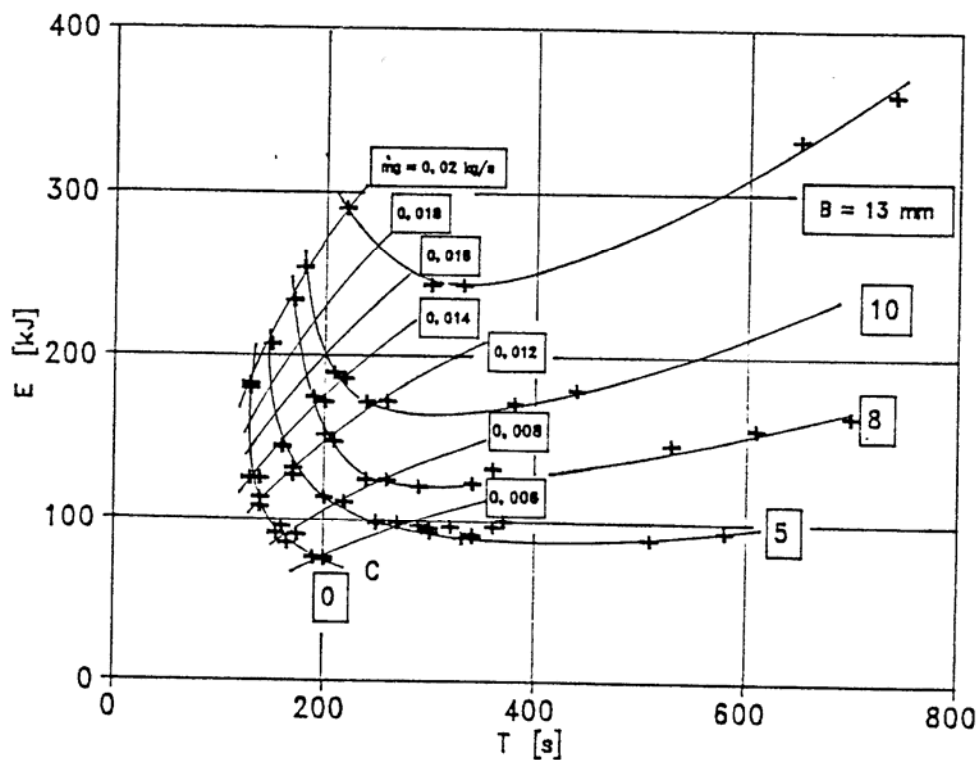
3.33. ábra. A fajlagos energiaigény változása a keverési arány függvényében bányahidai pernye sűrűáramú szállításakor.  $m_a = 0.7 \text{ kg/s}$ ;  $D=27 \text{ mm}$ ;  $L+H=45.3 \text{ m}$

Következtetésként kiemelendőnek tartjuk, hogy optimális üzemi paraméterként a lehetséges *legnagyobb keverési arány* kívánatos, ami a 3.33. ábrából láthatóan egyúttal közelítőleg *minimális energiaigényt* is eredményez.

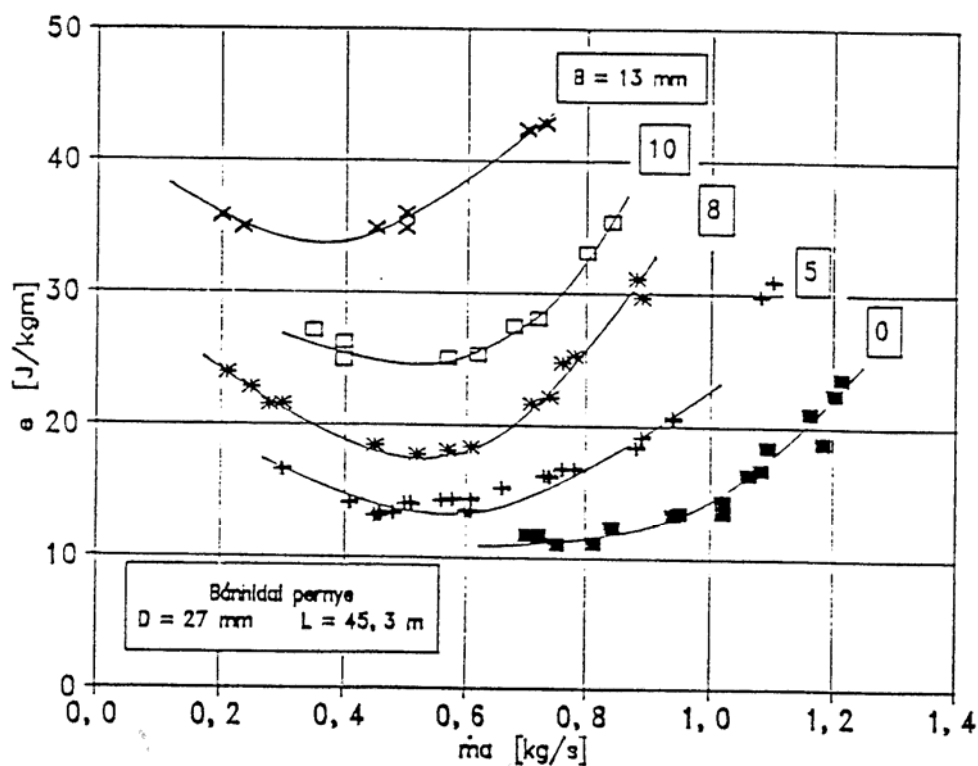
A bányahidai pernyeszállítási kísérletsorozat adatainak részletes elemzése, feldolgozása során a 3.34. ábrán látható diagramkereget szerkesztettük, ahol a független változó a sorozatban  $m_a = 150 \pm 5 \text{ kg/s} = \text{áll.}$  anyagadag elszállításához szükséges „ $T$ ” idő, a függő változó az anyagadag elszállításához szükséges „ $E$ ” energia. A görbesereg paramétere a belső megkerülővezetékbe épített szűkítőnyílás „ $B$ ” mérete, illetve a szállításhoz felhasznált összelevegő tömegáram  $\dot{m}_g = \text{áll.}$  értékek. Zárt megkerülővezetékkel ( $B=0$ ) mérve a csökkenő levegő tömegáram irányában haladva a szállítási kísérletek során, eljutottunk a szállítócső eldugulásáig (lásd a 3.34. ábrán a „ $C$ ” jelű pontot).

Üzemtani szempontból igen jelentősnek tartjuk azt a megállapítást, hogy a kialakított *belső megkerülővezetékkel végzett mérések során dugulás soha nem fordult elő*, ami nagy üzembiztonságot és egyúttal egyenletesebb anyagszállítást is jelent. A megkerülővezetékes anyagszállítási kísérletek nagyobb energiaigényűek, de kedvező mellékág geometria kialakítása esetén az energiatöbblet jelentéktelen.

A gyakorlati alkalmazás szempontjából lényeges, hogy a kísérleti berendezéssel ( $D=27 \text{ mm}$ -es szállítócsőben) milyen anyag tömegáramok valósíthatók meg és milyen „áron”, azaz milyen fajlagos energiaszükséglettel. Fentiek a 3.35. ábrán láthatók.



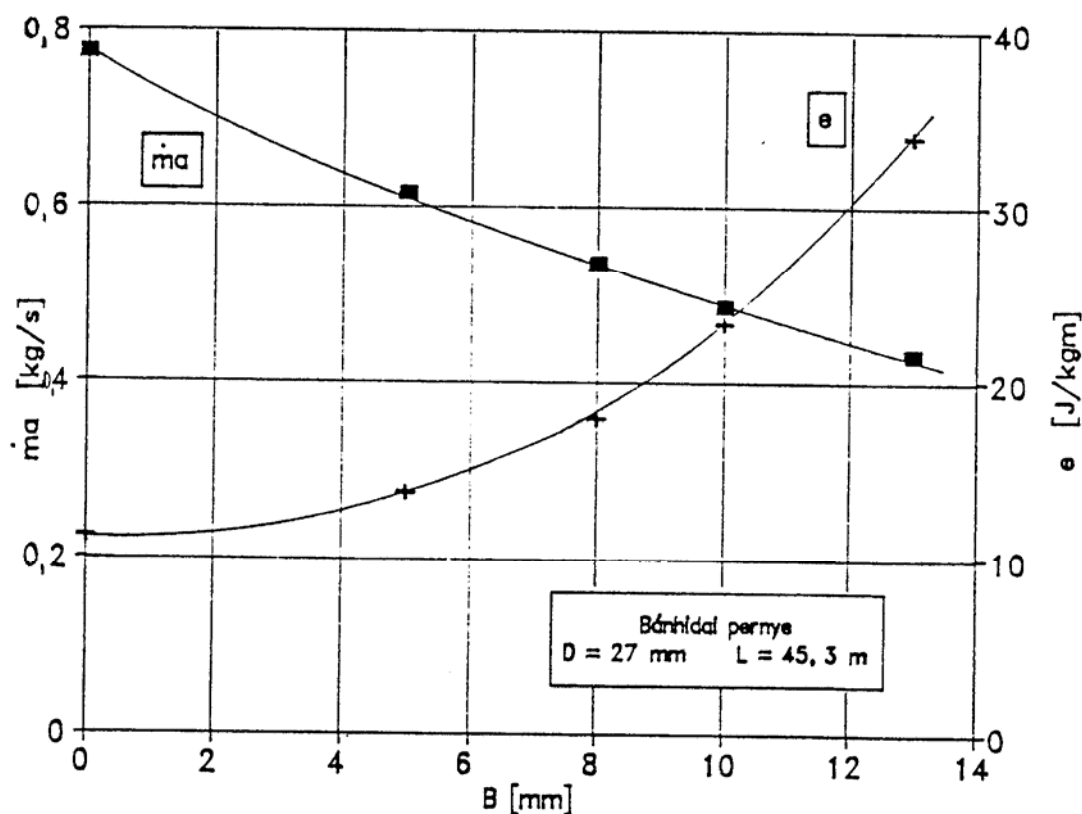
3.34. ábra. Bánhidai pernye ( $m_a = 150 \pm 5$  kg/s = áll.) szakaszos szállítása során az „ $E$ ” energiaszükséglet változása a „ $T$ ” mérési idő függvényében. Paraméter: „ $B$ ” – mellékág szűkítőnyílás méret;  $m_g$  -levegő tömegáram



3.35. ábra. Fajlagos energiaigény az anyag tömegáram függvényében

A görbesereg paramétere a megkerülővezeték „B” szűkítőnyílás mérete. Látható, hogy az adott szállítási feladat, azaz a megvalósítani kívánt anyag tömegáram beállítása többféle energiaszinten lehetséges, attól függően, hogy milyen a készülékgeometria és milyen keverési arányt állítunk be. Látható viszont az is, hogy állandó készülékgeometria esetén van olyan anyag tömegáram, ahol aállítás fajlagos energiaszükséglete minimális.

Az előző szélsőértékek alapján szerkesztett – 3.36. ábrán látható – diagram megadja, hogy a kísérleti nyomótartályos szállítóberendezésben a kívánt anyag tömegáram beállításához milyen „B” megkerülővezeték szűkítőnyílás méret szükséges úgy, hogy az adott berendezéssel a kívánt szállítási állapot minimális energiafelhasználással valósuljon meg.

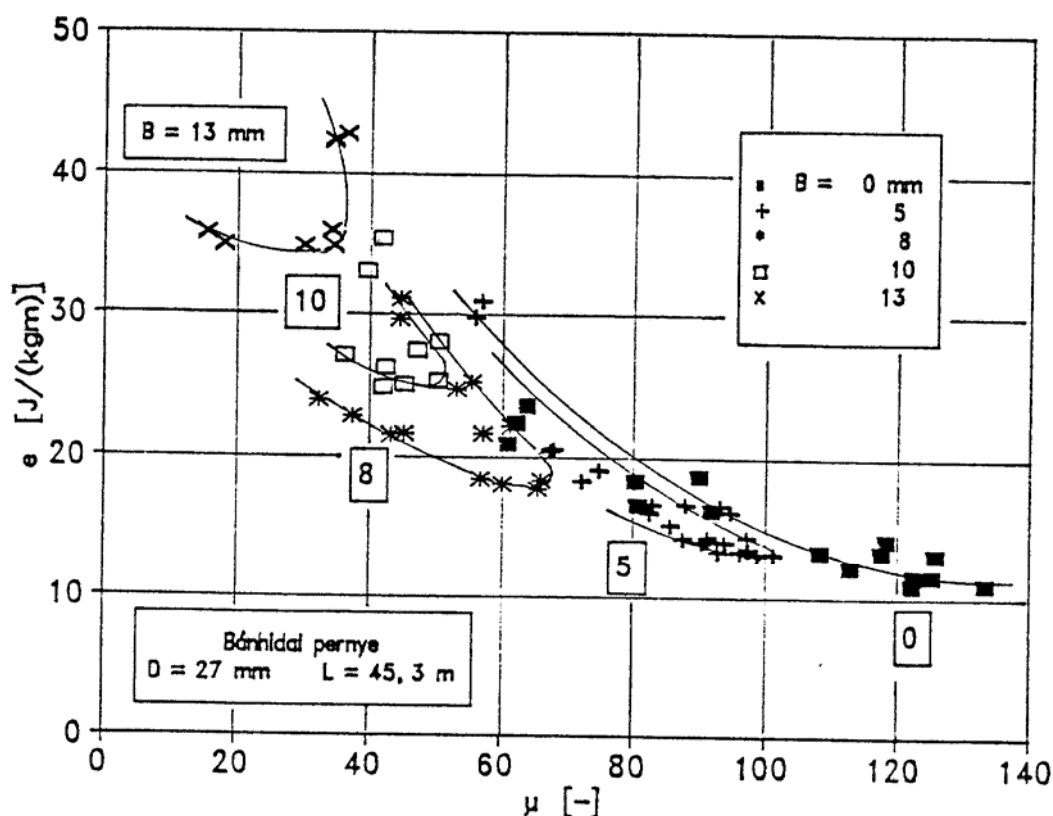


3.36. ábra.

A 3.37. ábrán – bánhidai pernye szállítási kísérletei alapján – bemutatjuk a felső üritésű kísérleti nyomótartályos szállítóberendezés fajlagos energiaszükségletének a keverési arány szerinti változását. Paraméterként itt is a berendezés geometriai jellemzőjét, az állandó megkerülővezeték szűkítőnyílás méretet ( $B=\text{áll.}$ ) tüntettük fel. Látható, hogy minden  $B=\text{áll.}$  görbén adódik egy maximális keverési aránnyal és egy minimális fajlagos energiaszükséglettel jellemezhető szállítási állapot, ami a nyomótartályos szállítóberendezés optimális üzemeltetési állapotaként jelölhető ki. Az ábra szerint a mellékágas méréseknél ( $B>0$ ) tapasztalt szélsőértékek egymáshoz eléggé közel helyezkednek el, azaz a keverési arány szerint kiválasztott optimális munkapont közelítőleg egybeesik a fajlagos energiaigény szerinti hasonlóval azonos készülékgeometria, azaz „B” méret esetén.

Ha az „ $e$ ” értékei közül a mérési tartományban adódott legkisebbet választanánk, úgy a  $B=0$  zárt megkerülővezetéknel  $\mu=125$ -ös keverési arány és  $e=11.8$  J/kgm fajlagos energiaigény adódna legkedvezőbb üzemállapotként. Ez a szállítási állapot azonban *igen közel van a*

dugulási határhoz, így üzembiztonsági okok miatt megvalósítása ipari körülmények között nem javasolható.



3.37. ábra. Nyomótartályos szállítóberendezés fajlagos energiaszükségletének keverési arány szerinti alakulása.

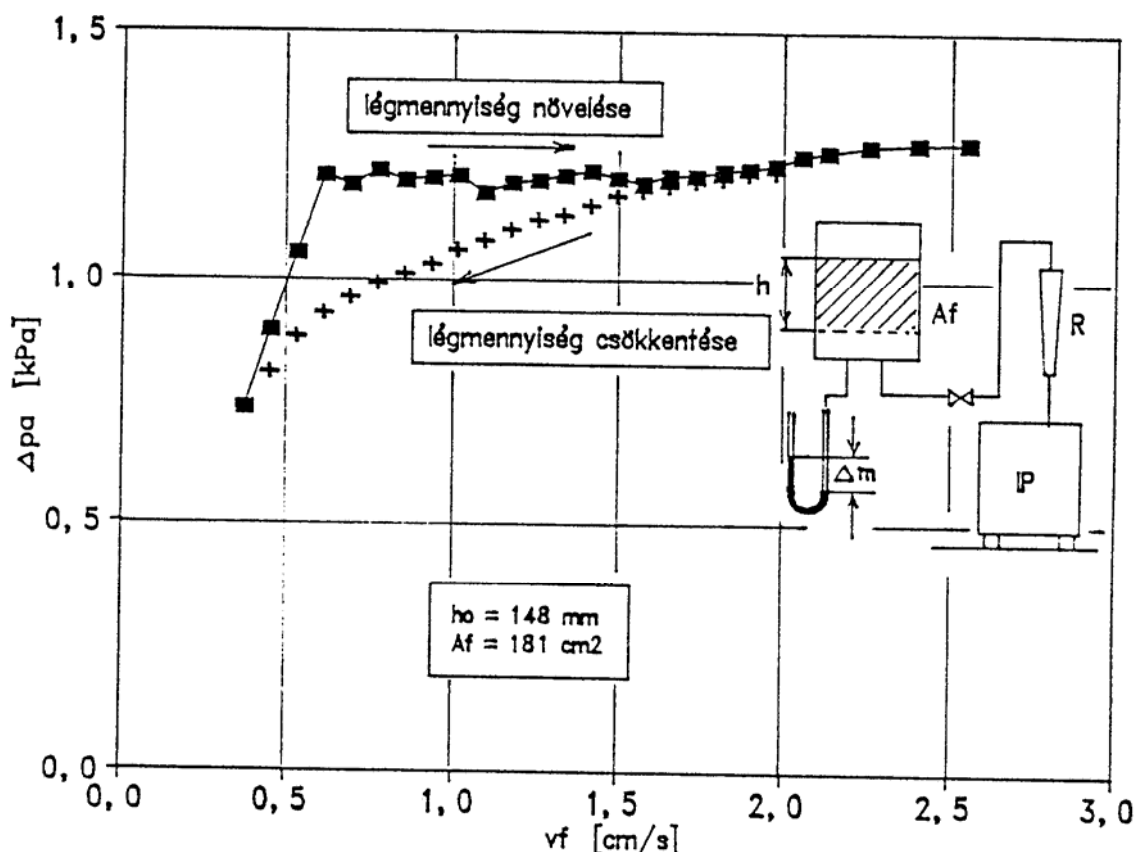
A megkerülővezetékes ( $B > 0$ ) anyagszállítási kísérletek nagyobb energiaigényűek, de kedvező mellékággeometria („ $B$ ” méret) választásával az energiatöbblet minimális, mint az a 3.36. ábra fajlagos energiatörvényének lefutásából is megállapítható.

Mindezek alapján összefoglaljuk a pernyeszállítási kísérletsorozat legkedvezőbb üzemiállapotának jellemző adatait:

$\mu=100$	Keverési arány
$m_a = 0.5 \text{ kg/s}$	Anyag tömegáram
$m_g = 0.005 \text{ kg/s}$	Levegő tömegáram
$B=5 \text{ mm}$	Megkerülővezeték szűkítőnyílás méret
$m_{g2} = 0.0025 \text{ kg/s}$	Pótlevegő tömegáram
$p_i=1.45 \text{ bar}$	Az indítótartály lazítóréteg alatt mért nyomása (túlnyomás) stacionárius anyagszállítás közben
$p_c=1.15 \text{ bar}$	A szállítócső elején mért túlnyomás stacionárius anyagszállításkor
$v_{gc}=3.4 \text{ m/s}$	Levegősebesség a szállítócső elején
$D=27 \text{ mm}$	Szállítócső belső átmérő
$L=45.3 \text{ m}$	A szállítócső teljes hossza (ebből $H=8.5 \text{ m}$ szintkülönbség)
$m_a=150 \text{ kg}$	A kísérleti sorozatban állandó anyagtöltet tömege
$E=90 \text{ kJ}$	A szállítás energiaigénye
$e=13.2 \text{ J/kgm}$	A szállítás fajlagos energiaigénye



Az optimális üzemi állapot – azaz az adott szállítóberendezésen elérhető maximális keverési arány – kialakulásának magyarázatához vissza kell tekinteni a szállítandó anyag fizikai tulajdonságainak vizsgálatához, azok közül is a szállítást döntően befolyásoló fluidizáció jelenségéhez. Ennek érdekében a 3.38. ábrán megadjuk a kísérleteknél használt bányai pernye fluidizációs jelleggörbéjét.



3.38. ábra. Bányai pernye fluidizációs jelleggörbéje

$h_o$  – nyugalmi anyagréteg magassága

$R$  – rotaméter

$A_f$  – fluidizáló réteg felülete

$IP$  – ipari porszívó

A minimális fluidizációs sebesség  $v_{f \min} = 0.6-0.7$  cm/s értékre adódott. A fluidizációs mérés során nyugvó anyagrétegből indulva a légmennyiség növelésekor a minimális fluidizációs sebesség határozottan kiolvasható a diagramból, míg visszaméréskor, azaz a légmennyiség csökkentésekor az anyagréteg fluidizált állapota kisebb sebességnél is fenntartható. A mért fluidizációs jelleggörbe a vonatkozó szakirodalom [52] szerint klasszikusan jól fluidizálható anyagra utal.

A szállítási mérések közben a nyomótartály lazítórétegének szabad felületére vonatkoztatott levegősebesség a „pt” tartálynymáshoz tartozó levegő sűrűséggel számítva a

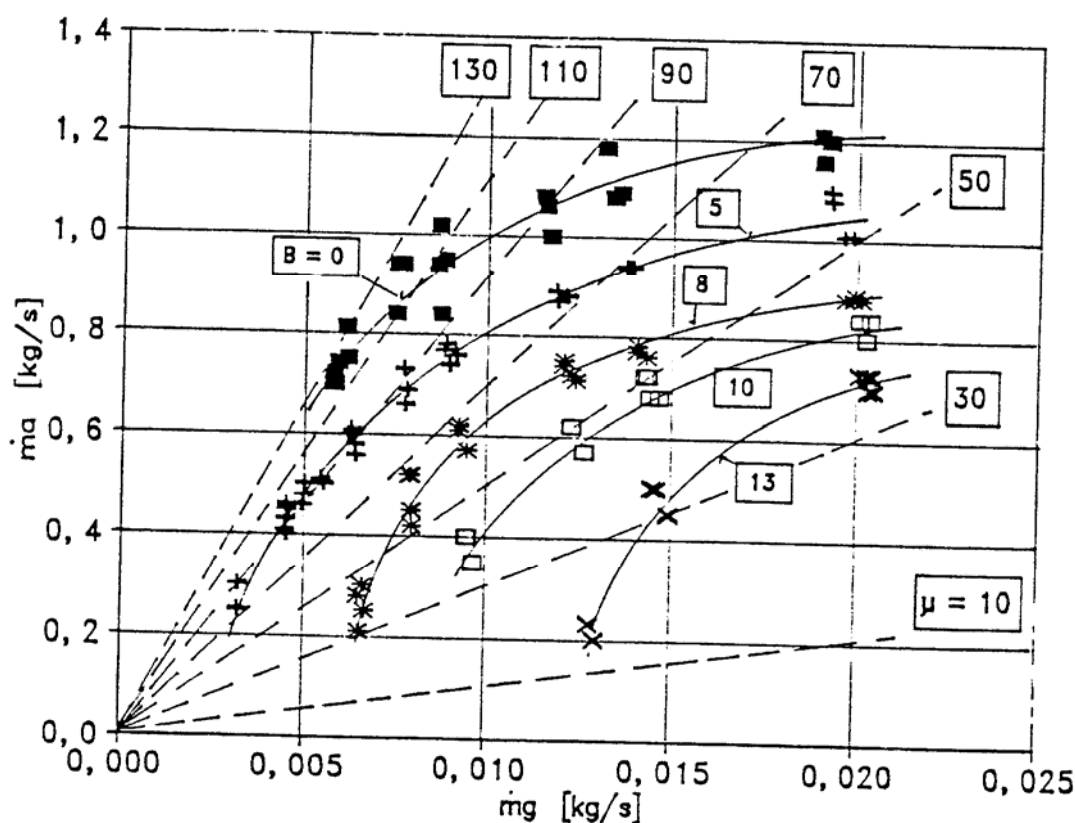
$$v_{laz} = \frac{\dot{m}_g}{\rho_{gt} A_{laz}} \quad (3.21)$$

összefüggés alapján

$$0.56 \text{ cm/s} \leq v_{laz} \leq 2.72 \text{ cm/s}$$

Tartományban változott, ami a fluidizációs jelleggörbével igen jó egyezést mutat. Jól méretezett nyomótartálynál a fluidizációs és a nyomótartálybeli lazítósebességek tartománya a lazítóbetét légáteresztő felületének helyes megválasztása következtében a korábbi nyomásfüggőség figyelembe vételével összhangban van. A nyomótartályos szállítóberendezés méretezésének ez az egyik alapfeltétele.

Mindezek alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a nyomótartályos szállítóberendezés működési tartománya a szállítandó anyag fluidizációs jelleggörbéjének előkísérletekkel történő meghatározása alapján egyértelműen kijelölhető. Ezen működési tartomány szélesítése részben nem lehetséges – mivel a minimális fluidizációs sebességnél lényegesen kisebb levegőmennyiség az anyaghalmozat nem fluidizálja, így az anyagszállítás nem indul meg – részben nem célszerű – mivel a maximális fluidizációs sebességnél lényegesen nagyobb levegőmennyiség az anyaghalmozat fluidizált állapotát, így a szállítócső belépő keresztmetszetéhez történő hozzáfolyást a nagyobb ellenáram miatt rontja és ezáltal a keverési arány csökkenése mellett feltehetően az anyag tömegáram csökkenését is eredményezi, amint erre kísérleti adatok alapján Rivkin-Szorocsinszkij [49] is rámutat.



3.39. ábra. Kísérleti nyomótartályos szállítóberendezés működési tartománya bányai pernye szállításakor

$m_a$	anyag tömegáram	$m_g$	levegő tömegáram
$B$	mellékág szűkítőnyílás méret	$\mu$	keverési arány

A keverési üzemállapot szerinti optimális üzemi állapot most már a fluidizációs jelleggörbe ismeretében a minimális fluidizációs sebesség közelében, annál kevéssel nagyobb lazítósebességnél adódik. Esetünkben ez a 3.21. összefüggés alapján

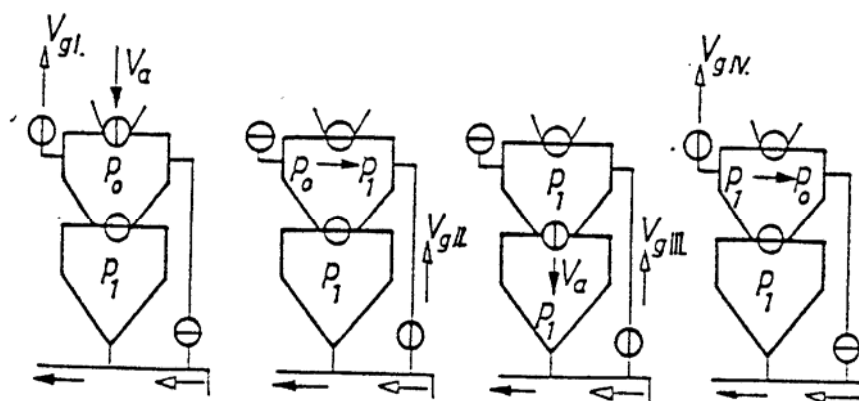
$$v_{laz} = \frac{m_g}{\rho_{gl} A_{laz}} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}}{2.94 \text{ kg/m}^3 \cdot 0.217 \text{ m}^2} = 0.00784 \text{ m/s} = 0.784 \text{ cm/s}$$

Ami  $v_{laz}/v_{fmin}=1.21$  értéket jelent.

Végezetül a kísérleti nyomótartályos szállítóberendezés teljes működési tartományát, azaz a különböző levegő tömegáramokkal szállítható anyag tömegáramok változását mutatjuk be a 3.39. ábrán, ahol paraméterként a „B” mellékág szűkítőnyílás méret szerepel. Miután az ábrán jelölt koordinátarendszerben az origóból húzott egyenesek iránytangense a keverési arány, így a tág szabályozási lehetőség illusztrálására szaggatott vonallal ezeket is berajzoltuk. A  $B=\text{áll.}$  görbékhez az origóból húzott érintők egyúttal kijelölik az adott geometriához tartozó maximális keverési arány helyeit is.

### 3.2.1.9. Nyomótartályos szállítórendszerek kialakítása

A nyomótartályos szállítóberendezés szakaszos üzemű anyagszállítása két nyomótartály megfelelő kapcsolásával folyamatossá tehető. A folyamatos szállítás elvi működési vázlata a 3.40. ábrán látható.



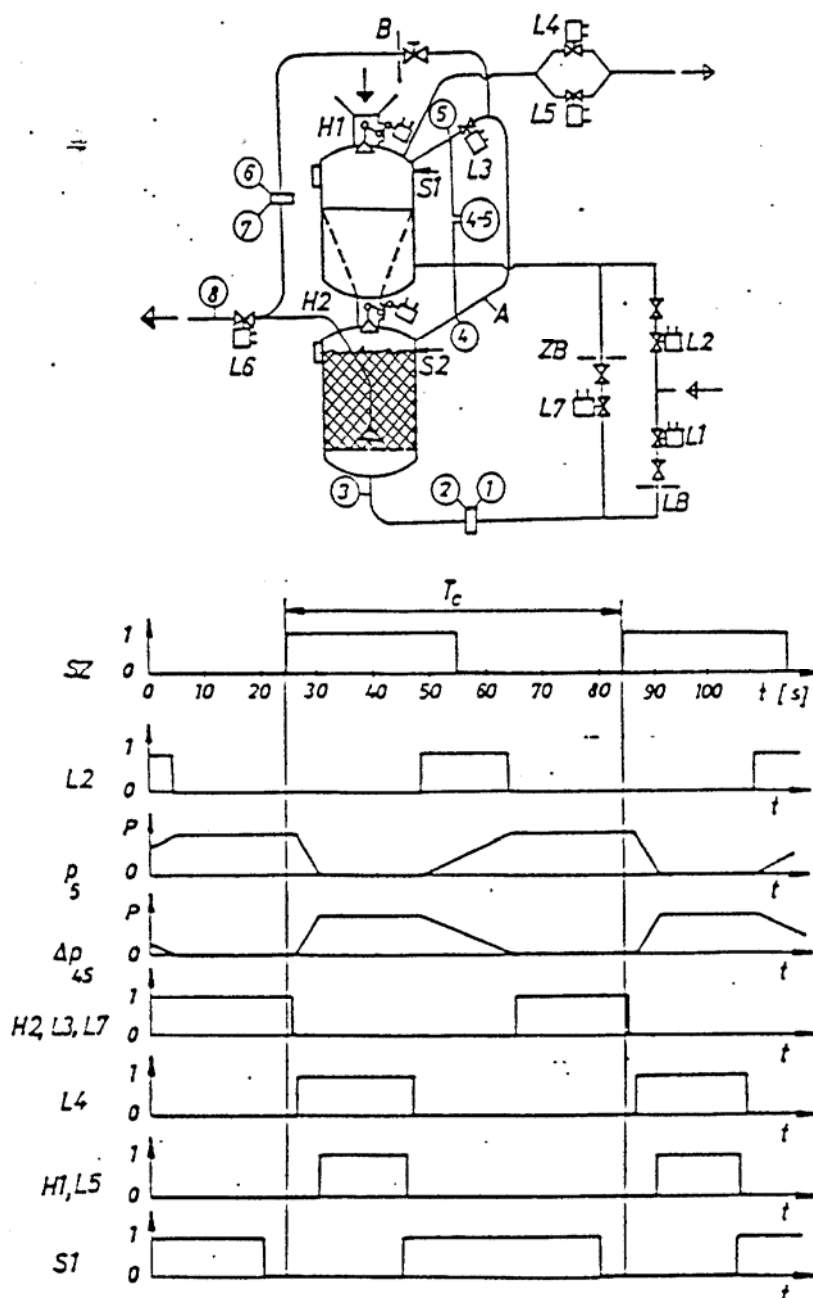
3.40. ábra. Folyamatos szállítás elvi működési vázlata

Két nyomótartály egymás fölé építésével a négy ütemű ciklus ismétlésével elérhető, hogy a szállítóvezetékben közel stacionárius anyagszállítás alakuljon ki.

Az egyes ütemek a következők:

Az *első ütemben* a felső nyitott (légköri nyomáson lévő) tartályt anyaggal töltjük – miközben az alsó tartályban lévő anyag folyamatosan a szállítócsőbe jut. A *második ütemben* a felső tartályt nyomásra hozzuk, hogy a két tartályt össze lehessen nyitni. A *harmadik ütemben* az azonos nyomású tartályok összenyitása után az anyagot a felső tartályból az alsóba eresztjük le. A *negyedik ütemben* a felső tartályt légköri nyomásra hozzuk.

Az előzőekben ismertetettek alapján a folyamatos szállításra alkalmassá tett kísérleti nyomótartályos szállítóberendezés indító szakaszának kapcsolási vázlatát és a villamos automatika vezérlési diagramjait a 3.41. ábrán mutatjuk be.



3.41. ábra. Kísérleti nyomótartályos szállítóberendezés indító szakasza és vezérlési diagramja

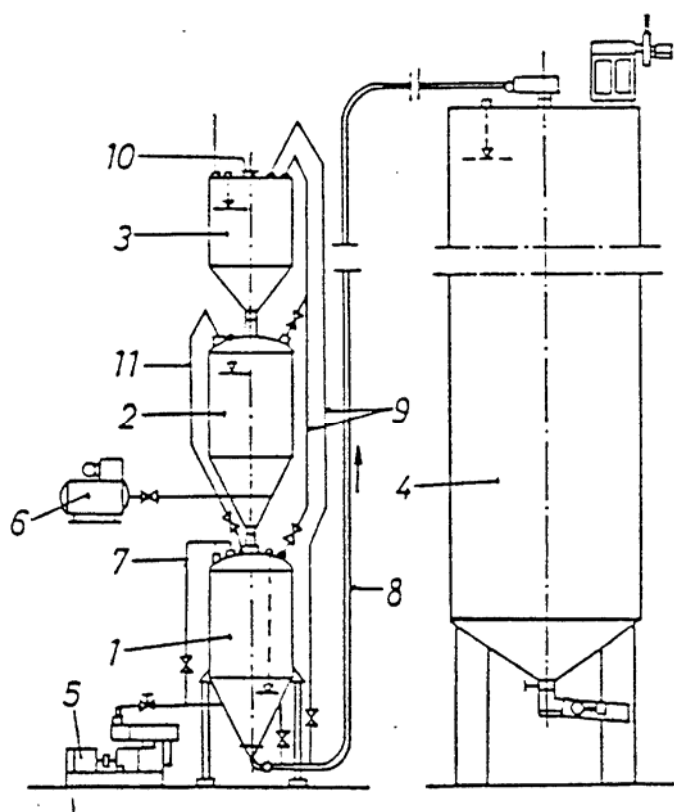
1	8	nyomás ill. nyomáskülönbség távadók
L1	L7	villamos vezérlésű pneumatikus működtetésű szelepek
H1	H2	harangszelepek
S1	S2	szintjelzők
A		szabályozó megkerülővezeték
B		blende
LB		lemezblende
ZB		zsilipblende

Az ábrán az „L1...L7” villamos vezérlésű, pneumatikus működtetésű elcsípő szelepeket, a „H1...H2” villamos vezérlésű, pneumatikus működtetésű harangszelepeket, az „S1...S2” Co-60 izotópos sugárforrásokat és Geiger-Müller csöves érzékelőket tartalmazó szintjelzőket jelöl.

A vezérlési diagramokon az „L1” és „L6” szelep nincs feltüntetve, mivel azok folyamatos szállításkor állandóan nyitott helyzetben vannak. Természetesen a berendezés indításakor ill. leállításakor működtetésükre szükség van.

Folyamatos szállítás közben a vezérlő automatika a következők szerint működik:

Induló helyzetnek azt tekintjük, amikor az alsó (indító) tartály anyaggal megtelt. Ekkor az „S2” szintjelző tele jelet ad, aminek hatására a két nyomótartályt az automatika szétválasztja, tehát a „H2” és „L3” szelepek zárnak. A „H2” harangszelep végállás kapcsolója zárt állapotban működésbe hozza az „L4” szelepet, amelyen keresztül az eddig üzemi nyomáson lévő felső (zsilip) tartály légkörre expandálása megkezdődik. A zsiliptartály nagyobb nyomástartományában az expanzió sebességét fékezi az „L4” szelep kis áteresztő képessége, azaz nagy fojtása, míg a kisebb nyomásoknál az expanzió gyorsítása a nagyobb keresztmetszetű „L5” szelep nyitásával lehetséges. A  $p_5 = p_0$  légköri nyomást a „ $p_5$ ” nyomás távadó, vagy a „ $\Delta p_{4-5}$ ” nyomáskülönbség távadó érzékeli és működtető jelet ad a „H1” harangszelep nyitására. Ezzel a zsiliptartály anyaggal való feltöltése kezdődik el, ami az „S1” tele jel érzékeléséig tart. Az „S1” tele jel zárja a „H1”, „L4” és „L5” szelepeket. A zárás befejeződésével „H1” harangszelep végállás kapcsolója „L2” szelepet nyitja, amivel az anyaggal feltöltött zsiliptartály nyomásra hozása megkezdődik.

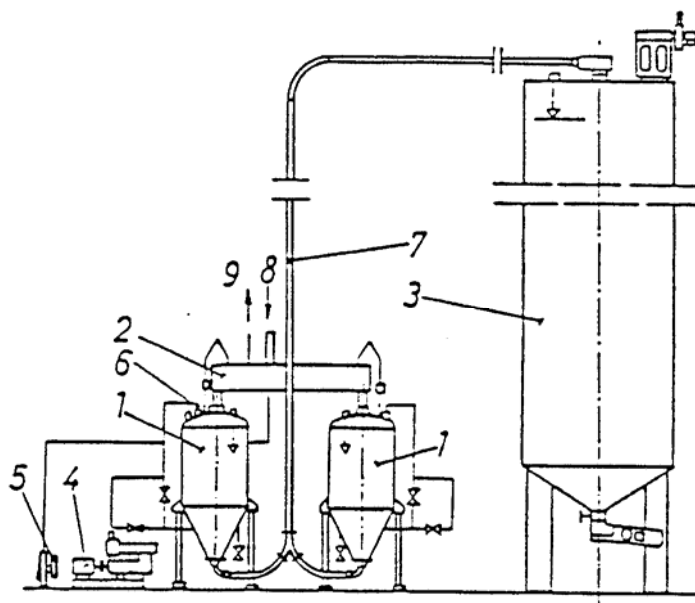


3.42. ábra. Zsiliptartályos pneumatikus szállítóberendezés

- |                                |                          |
|--------------------------------|--------------------------|
| 1 – nyomótartály               | 7 – felső levegő         |
| 2 – zsiliptartály              | 8 – szállítóvezeték      |
| 3 – előtartály                 | 9 – kiszellőzés          |
| 4 – siló                       | 10 – anyagbeadás         |
| 5 – kompresszor                | 11 – kiegyenlítő vezeték |
| 6 – vezérlő levegő kompresszor |                          |

Eközben az „S2” szintjelző üres jelre vált, mivel a leválasztott indítótartályból közben fogy az anyag az állandó szállítás miatt. Az  $S_2=0$  és  $\Delta p_{4,5}=0$  jel egyidejű teljesülésekor összenyitható a két tartály, tehát a „H2” és „L3” szelepek. Ebben a fázisban a zsiliptartályban lévő anyag lefolyásához, azt fluidizálni kell, amit a nyitott „L7” szelep ágában elhelyezett „ZB” jelű zsilip blende furatméretének megfelelő változtatásával állíthatunk be. A kívánt szállítási állapot reprodukálható beállítása érdekében – amint azt már korábban a szakaszos szállítási mérések ismertetésekor is említettük – a levegőmennyiség szabályozására az „LB” jelű szűkítő nyílást (lemez blendét), illetve az „A” jelű szabályozó megkerülővezetékbe a „B” jelű szűkítő nyílást (blendét) építettük be. Az anyag lefolyásakor az „S2” tele jel észlelésével újra az induló helyzethez jutottunk. A vezérlési diagramokon e két jel közötti időt „ $T_c$ ” ciklusidővel jelöltük.

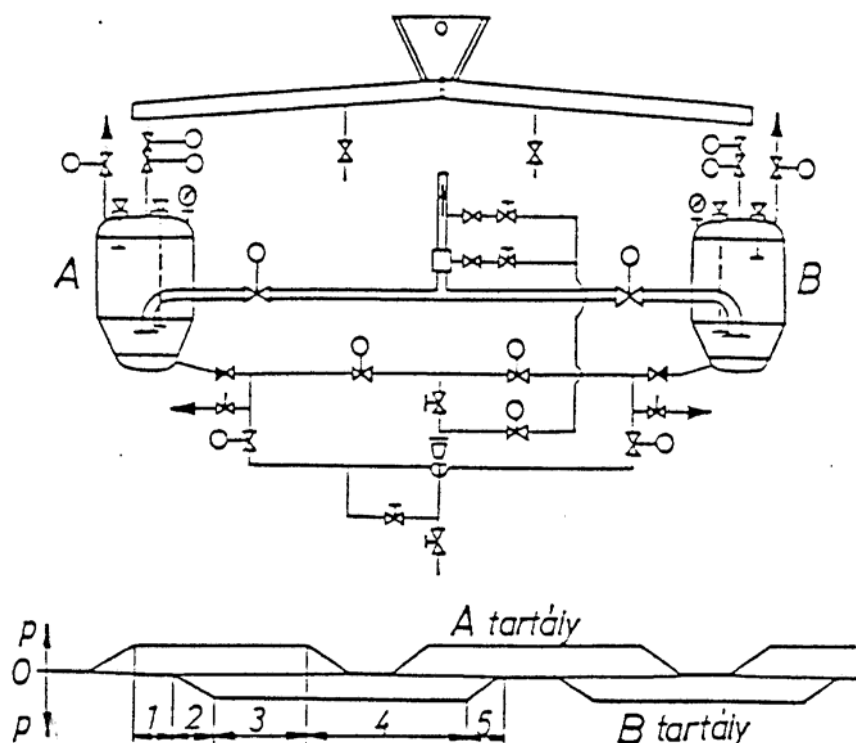
A fenti zsilipelési elven működő, folyamatos szállításra alkalmas nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezésről tájékoztat Grabler [53] – lásd a 3.42. ábrát – és ugyanitt bemutatja a folyamatos szállítás másik lehetőségeként a két párhuzamosan kapcsolt nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezést (lásd a 3.43. ábrát). A Grabler által bemutatott mindkét változat alsó üritésű nyomótartályokat tartalmaz.



3.43. ábra. Párhuzamos kapcsolású két nyomótartályos (ikertartályos) pneumatikus szállítóberendezés

- |                                |                     |
|--------------------------------|---------------------|
| 1 – nyomótartály               | 6 – szállító levegő |
| 2 – elosztó elem               | 7 – szállítóvezeték |
| 3 – siló                       | 8 – anyagbeadás     |
| 4 – kompresszor                | 9 – kiszellőzés     |
| 5 – vezérlő levegő kompresszor |                     |

Az iparban sok helyen a nyomótartályos teherautókba vagy vagonokba felső üritésű nyomótartályokat építenek. Egy ilyen Fluidstat típusú berendezést mutatunk be a 3.44. ábrán Flatt – Truniger [54] munkája nyomán, feltüntetve a kapcsolási vázlat mellett a vezérlési diagramot is.



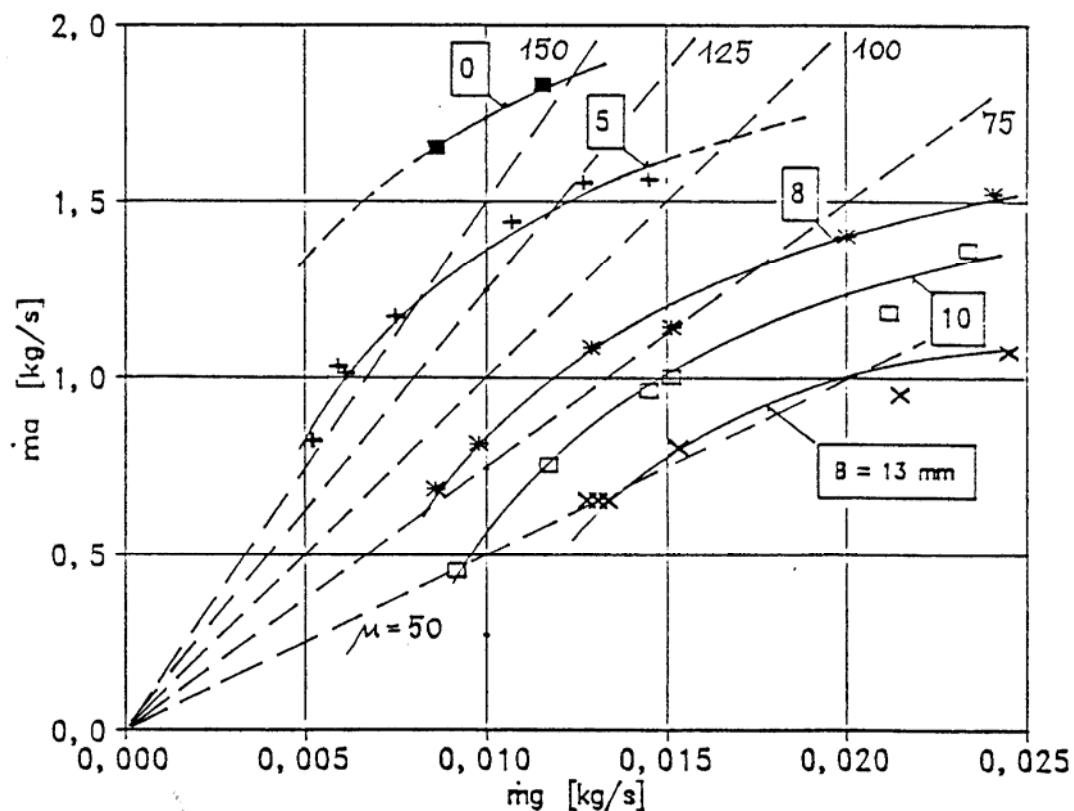
3.44. ábra. Fluidstat típusú pneumatikus szállítóberendezés és vezérlési diagramja

- |                           |                        |
|---------------------------|------------------------|
| 1 – anyagbetöltés fázisa  | 4 – szállítás fázisa   |
| 2 – nyomásra hozás fázisa | 5 – kiszellőzés fázisa |
| 3 – várakozási fázis      |                        |

### 3.2.1.10. Folyamatos pernyeszállítási kísérletek eredményei

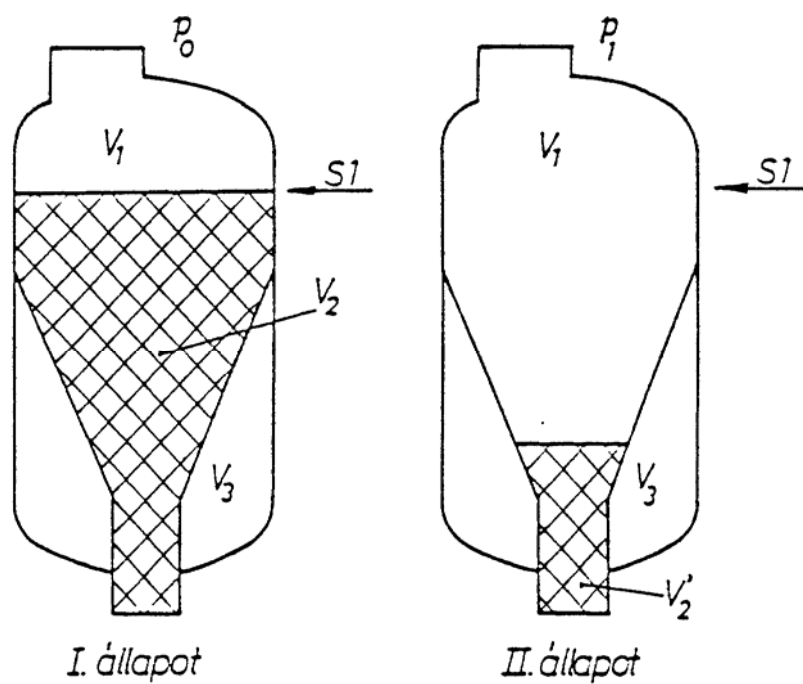
A folyamatos szállítási kísérletek során – a korábban bemutatott szakaszos pernyeszállítási kísérletekkel összhangban –  $D=27\text{mm}$  belső átmérőjű szállítócsővel dolgoztunk. A 3.45. ábrán bemutatjuk a berendezés kísérletsorozattal meghatározott működési tartományát, azaz a szállító levegő tömegáramának függvényében az anyag tömegáram változását. Paraméterként az ábrán feltüntettük a szabályozás céljára kiépített mellékág különböző „B” blendeméret adatait. A 3.39. ábrához hasonlóan itt is bejelöltük a szállítási állapotot legjobban jellemző  $\mu=\text{áll.}$  keverési arány értékeket feltüntető, origóból húzott egyeneseket, melyek alapján megállapítható, hogy a folyamatos szállítás során nagyobb keverési arány érhető el, mint szakaszos szállításkor. A jelenség magyarázata az, hogy a szakaszos szállítás során az anyag tömegáram és így a keverési arány számítása is a teljes „T” mérési időre vonatkoztatva történt. A fenti idő az indítótartály nyomásra hozásának, a szállításnak és az expanzióknak az együttes időtartama. Ezen értelmezés alapján a fenti mennyiségek a szállítóberendezésre jellemző *átlagos anyag tömegáram*, illetve *átlagos keverési arányként* kezelendők. Megjegyezzük, hogy a szakaszos szállítási mérések egyenletes szállítási időszakára vonatkoztatott anyag tömegáram integrálátlagának értéke viszont közelítőleg meg kell egyezzen az azonos geometriához tartozó folyamatos szállításakor adódott anyag tömegárammal.

A folyamatos szállítás szükségszerű velejárója a zsiliptartály kipufogásából származó, a szállításra nem hasznosítható levegőmennyiség elvesztése. E veszteség számítására a következőkben térünk ki.



3.45. ábra. Kísérleti nyomótartályos szállítóberendezés működési tartománya bányahidai pernye folyamatos szállítási mérései alapján

A zsiliptartály geometriai felépítését a 3.46. ábra mutatja, ahol a vonalkázott rész az anyaggal töltött térfogatot jelöli. A biztonságos anyagkifolyás érdekében a beépített lazító réteg kb. 60°-os csúcshöknél megfelelő kúpos kialakítású.



3.46. ábra. A zsiliptartály jellemző állapotai



A zsiliptartály anyaggal való feltöltése az ábra *I. állapot*ának megfelelően „ $p_o$ ” légköri nyomáson történik. Az anyag számára rendelkezésre álló térfogatot a készülékgeometria és az „ $SI$ ” szintjelző beépítési helye szabja meg. Ezt a térfogatot az ábrán „ $V_2$ ”-vel jelöltük. Az *I. állapot*ban a zsiliptartályban lévő levegő térfogata az alábbiak szerint írható:

$$V_{I.} = V_1 + \varepsilon V_2 + V_3 \quad (3.22)$$

A 3.22. összefüggésben „ $\varepsilon$ ” a szállítandó ömlesztett anyag hézagtérfogata. A hézagtérfogat a „ $\rho_a$ ” anyagsűrűség és a „ $\rho_h$ ” halmazsűrűség segítségével az alábbi módon írható:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_h}{\rho_a} \quad (3.23)$$

A II. állapotban - tehát a „ $T_c$ ” zsilipelési ciklus végén - a zsiliptartályban maradt anyag „ $V_2'$ ” térfogatú. Ekkor a „ $p_i = p_l$ ” üzemi tartálynymomáson leválasztott zsiliptartályban lévő levegő térfogata „ $p_o$ ” légköri nyomásra átszámítva az alábbi összefüggéssel adható meg:

$$V_{II.} = [V_1 + (V_2 - V_2') + \varepsilon V_2' + V_3] \frac{p_1}{p_o} \quad (3.24)$$

A két állapothoz tartozó levegőtérfogat különbsége és a környezeti állapotú levegő sűrűségének segítségével számítható a zsiliptartály nyomásra hozásakor és lazításakor bevezetett levegő tömege, ami egyúttal az egy zsilipelési ciklus alatt kipufogott levegő tömegével azonos, azaz:

$$m_{go} = (V_{II.} - V_{I.}) \rho_{go} \quad (3.25)$$

Figyelembe véve, hogy a szállítás stacionárius – írható, hogy

$$V_2 - V_2' = \frac{m_a T_c}{\rho_h} \quad (3.26)$$

Tehát a zsilipelési ciklus alatt kipufogott levegő tömeg:

$$m_{go} = \left[ (V_1 + \varepsilon V_2 + V_3) \left( \frac{p_1}{p_o} - 1 \right) - \frac{m_a T_c}{\rho_h} \left( \varepsilon \frac{p_1}{p_o} - 1 \right) \right] \rho_{go} \quad (3.27)$$

azaz

$$m_{go} = C_1 - C_2 T_c \quad (3.28)$$

Ahol „ $C_1$ ” és „ $C_2$ ” a készülékgeometriától, a szállított anyag tulajdonságaitól és a szállítás üzemállapotától függő állandó.

Egy zsilipelési ciklus alatt a legkisebb kipufogott levegőmennyiséget a lehetséges legnagyobb ciklusidő beállításával, tehát a zsiliptartály teljes leürítésével érhetjük el. Ez a ciklusidő az alábbi összefüggéssel számítható:

$$T_{c \max} = \frac{V_2 \rho_h}{m_a} \quad (3.29)$$

Mivel a folyamatos szállítás energetikai elemzésekor a zsilipeléskor kipufogott levegőmennyiséget is figyelembe kell venni, így a szállítás összteljesítmény igénye – a szakaszos szállítás 3.3. összefüggéséhez hasonló módon – a következőképpen számítható:

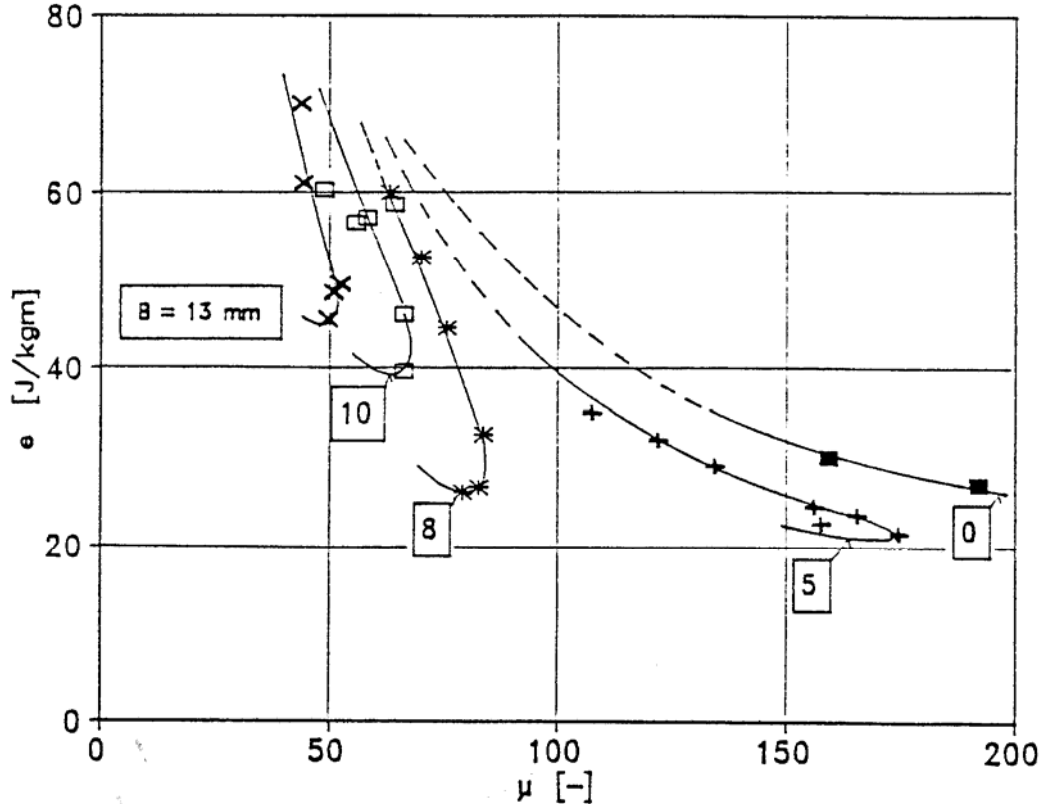
$$P_{pol. foly.} = \frac{n}{n-1} p_o \frac{m_g}{\rho_{go}} \left[ \left( \frac{p_t}{p_o} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] + \frac{n}{n-1} p_o \frac{m_{go}}{\rho_{go}} \left[ \left( \frac{p_t}{p_o} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (3.30)$$

ahol  $m_g$  - a szállítólevegő tömegárama

$m_{go}$  - a zsilipeléskor kipufogott levegő tömegárama, ami az  $m_{go} = \frac{m_{go}}{T_c}$  összefüggéssel számítható, míg a többi jelölés a korábbiakkal értelemszerűen megegyezik.

A folyamatos szállítás fajlagos energiaigényét a következő összefüggéssel definiáljuk:

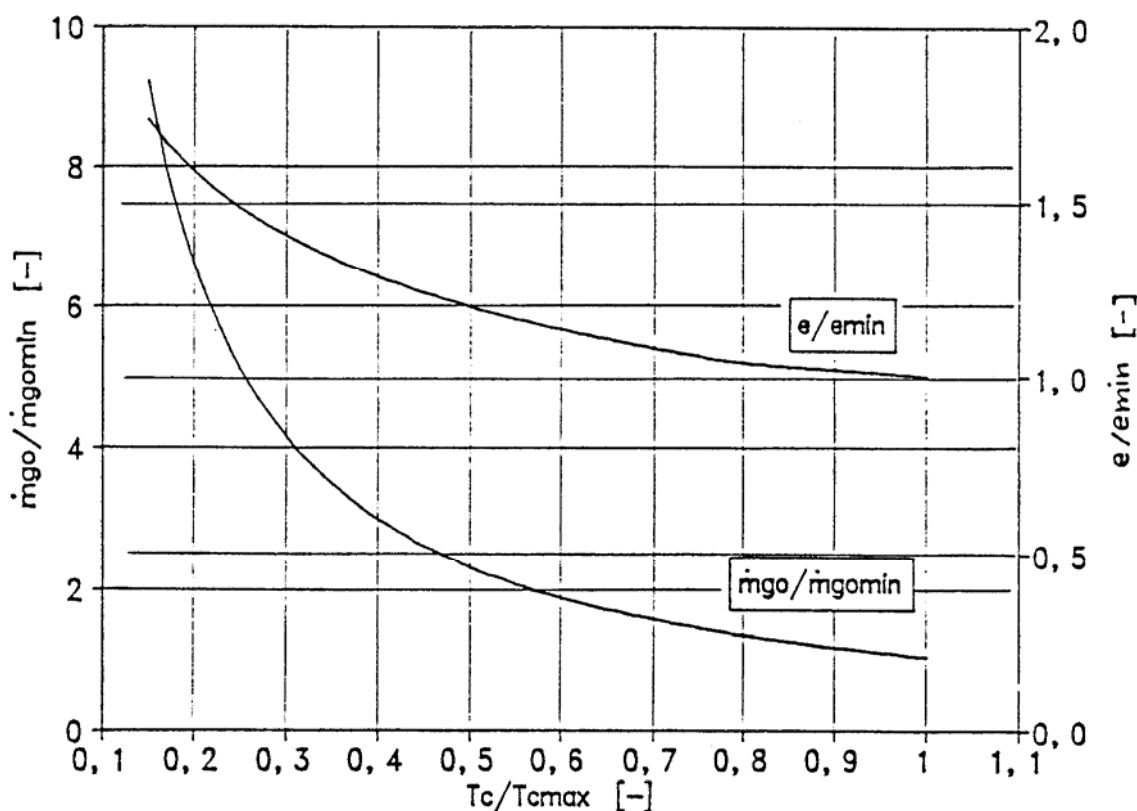
$$e = \frac{P_{pol. foly.}}{m_a L} \quad (3.31)$$



3.47. ábra. Folyamatos szállítás fajlagos energiaigénye a keverési arány függvényében bányai pernye szállításakor

A 3.47. ábrán bemutatjuk a folyamatos szállítási sorozatmérés eredményeként adódott fajlagos energiaigény görbéket a keverési arány függvényében. Paraméter a mellékág „B” blendeméret.

Mivel a zsilipelés hatása jelentős, mind a levegőfogyasztás, mind pedig az energiaigény meghatározása szempontjából, így ennek bemutatására megszerkesztettük a 3.48. ábrát, amelyen látható, hogy a folyamatos szállítás optimális üzemállapota a berendezés geometriához és a szállított anyag tulajdonságaihoz igazodó  $T_c = T_{c \max}$  lehetséges maximális zsilipelési ciklusidő beállításával valósítható meg. Az ilyen beállítással működtetett zsilipelő rendszerű, folyamatos szállítás megvalósítására alkalmas nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezés a lehetséges legkisebb levegőfogyasztást és fajlagos energiaigényt eredményez.



3.48. ábra. A zsilipelési ciklusidő változtatásának befolyása

A fenti optimális ciklusidőhöz a zsiliptartály ciklusonkénti teljes kiürülése tartozik. A folyamatos üzem biztonsága érdekében, azaz az alsó tartály kiürülésének megakadályozása céljából  $T_c = 0.8 T_{c \max}$  körüli érték beállítása javasolható, ami esetünkben  $e/e_{min} < 1.1$  értéket ad, tehát a fajlagos energiaigény-többlet nem számottevő.

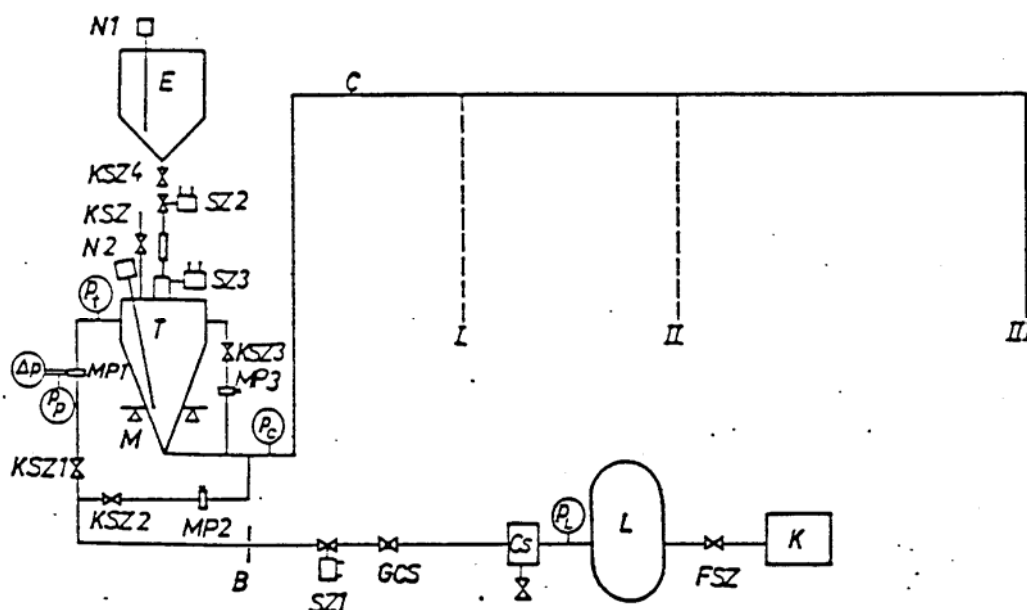
### 3.2.2. Alsó ürítésű nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezés

A 3.4.a. ábrán bemutatott alsó ürítésű nyomótartály elsősorban durvaszemcsés, darabos anyagok és esetenként nedves porok szállításakor használatos, annak ellenére, hogy eléggé elterjedt az a műszaki szemlélet, miszerint az olyan ömlesztett anyagok, amelyek nem fluidizálhatók pneumatikusan sem szállíthatók. Ez a szemlélet azonban a 80-as években folytatott hazai kutatási-fejlesztési munka eredményei alapján korrekcióra szorul. A pneumatikus szállításnál a szállítandó anyag tulajdonságait természetesen figyelembe kell venni, elsősorban mechanikai tulajdonságait (szemcseszerkezetét, szemcseméret eloszlását, tömör anyag-, illetve halmazsűrűségét, ömleszthetőségét, külső ill. belső súrlódási viszonyait), hőmérsékletét és nem utolsósorban nedvességtartalmát.

Az utóbbi évtizedekben a pneumatikus szállítás területén nagy előrehaladás tapasztalható, ám ennek ellenére az, hogy darabos szén pneumatikusan szállítható kevésbé vált ismertté. Kivételként említhető két hazai példa: Az egyik a Lyukóbányán üzembe helyezett hígáramú pneumatikus szénszállító berendezés, amely mára külföldi szakirodalom hivatkozásaiban [55] is megtalálható; a másik az Egri Finomszerelvénygyár területén felépült sűrűáramú szénszállító berendezés [56].

#### 3.2.2.1. Kísérleti berendezés darabos szén szállításához

A darabos és finomszemcsés anyagok szállítására egyaránt alkalmas berendezés kapcsolási vázlatát a 3. 49. ábrán látható.



3.49. ábra. Alsó ürítésű nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezés kapcsolási vázlatát

A szállítandó szén az „E” jelű előtétbunkerben helyezkedik el, amelynek töltési fokát automatikus üzemmódban az „N1” jelű kapacitív szintjelző szonda (NIVOCONTROL) mutatja. A szén leadagolása a „T” jelű indítótartályba a „KSZ4” jelű kézi tolozár előzetesen beállított részlegesen nyitott helyzetében az „SZ2” és „SZ3” jelű pneumatikus működtetésű zárószervek nyitott állapotában történik. Az indítótartályba adagolt szén súlyát az erőmérőcellás alátámasztásra szerelt „M” jelű digitális kijelzésű mérleg mutatta. Az „N2” jelű szintjelző szonda a tartály töltési fokát jelezte. Az anyagleadás közben a „KSZ” jelű



- $L_f$  - a függőleges egyenes csőhossz  
 $L_{iv}$  - az ívhossz  
 $n_{iv}$  - az  $R/D=1000/100$  méretű  $\alpha=90^\circ$ -os ívek száma

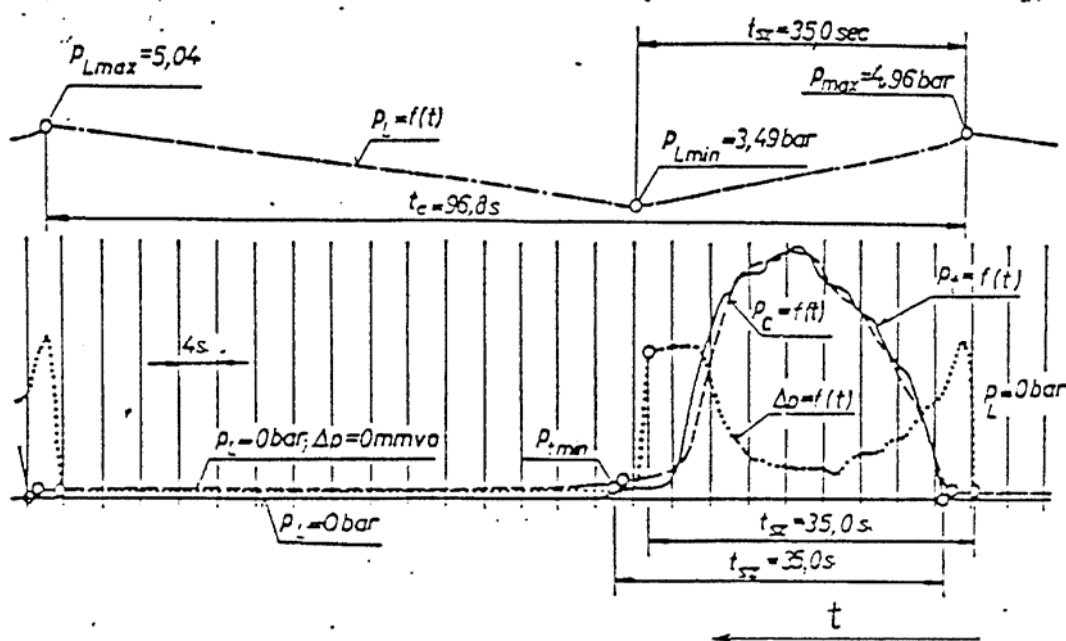
### 3.2.2.2. A kísérleti szénzállító berendezés műszerezése

A kísérleti kutatómunka tervezésekor az alábbi fő üzemtani paraméterek mérését illetve időbeli változásuk miatti regisztrálását tűztük ki célul:

$p_L$	[bar]	Légtartály nyomás
$p_p$	[bar]	Mérőperem szűkítőnyílás előtti nyomás
$\Delta p$	[mmvó]	Mérőperem mérőnyomás
$p_t$	[bar]	Indítótartály nyomás
$p_c$	[bar]	Szállítócső elején lévő nyomás
$m_a$	[kg]	Anyagtömeg az indítótartályban

A fenti mennyiségek regisztrálására egy négycsatornás KUTESZ gyártmányú vonalírót használtunk és a következők szerint jártunk el:

- az „MP1” jelű mérőperem „ $p_p$ ” nyomását és az indítótartály „ $p_t$ ” nyomását a két mérőhely kis beépítési távolsága miatt azonosnak tekintettük, így a  $p_p \approx p_t$  közelítéssel éltünk. Ezt a közelítést ellenőrző méréseink igazolták
- a vonalíró 2. csatornájának bemeneténél a „ $p_L$ ” légtartály nyomás ill. a mérlegre telepített indítótartály „ $m_a$ ” tömeg jelének gyors átkapcsolási lehetőségét alakítottuk ki és azonos szállítási paraméter értékénél a fenti jelváltással ismételt regisztrátumokat készítettünk



3.51. ábra Nyomás – idő regisztrátumok

A 3.51. ábrán bemutatunk egy anyagszállítás közben felvett teljes regisztrátumot. Az ábra felső részén eredményvonallal jelölt görbe mutatja a „ $p_L$ ” légtartály nyomásának időbeli változását. Az anyagszállítás idejét „ $t_{sz}$ ” jelöli, amely idő a légtartály nyomás csökken, mivel

ilyenkor a kompresszor kevesebb levegőt juttat a légtartályba, mint amennyit az anyagszállítás közben a berendezés „fogyaszt”. Az ábra alsó részén folytonos vonal mutatja az indítótartály nyomásának időbeli változását. A szállítás végén a „ $p_{\min}$ ” üresjárási nyomás kontaktusa ad vezérlő utasítást az automatika számára az „SZ1” szelep zárására és így a levegő fogyasztás megszüntetésére. Ezután a légtartályban nő a nyomás, egészen a beállított „ $p_{L\max}$ ” értékig. Esetünkben a 3.51. ábrán bemutatott szállításnál „ $p_L$ ” névleges értéke 5bar túlnyomás. „ $t_c$ ” a ciklusidőt jelöli. Szaggatott vonallal a „ $p_c$ ” szállítócső eleji nyomást, pontozott vonallal a „ $\Delta p$ ” mérőperem mérőnyomást jelöltük.

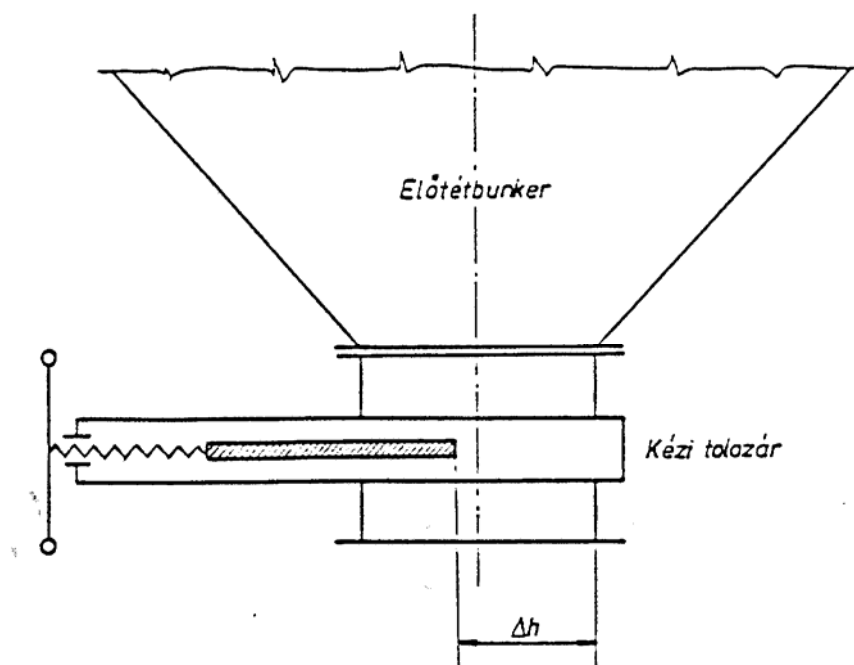
### 3.2.2.3. A kísérleti berendezés fő elemei

#### a. Az előtétbunker

Az előtétbunker a szállításra előkészített szén rövid ideig tartó tárolására szolgál. A tetején kialakított kb. 50mm nyílásméretű rács a nagyobb méretű széndarabok ill. idegen szennyező anyagok (fa, rongy, nylonzacskó stb.) szállítórendszerbe jutását hivatott megakadályozni. Az előtétbunker felső része négyzet alapú, lemezből merevítésekkel készített hasáb, alsó része gúla. A gúla két szemben lévő oldalára az anyagleadagolás javítása érdekében egy-egy vibrátor lett beépítve.

#### b. „KSZ4” jelű kézi működtetésű tolózár

A „KSZ4” jelű kézi működtetésű tolózárrel az előtétbunker anyagleadagolását tudtuk szabályozni. A 3.52. ábrán jelölt „ $\Delta h$ ” érték változtatásával különböző nyitásokat állítottunk be. Sajnos a szén anyagminőségének változása azonos anyagleadagolási időben, azonos „ $\Delta h$ ” értékhez tartozó nyitásnál is jelentős szórást mutatott.



3.52. ábra. Kézi működtetésű tolózár

c. „SZ2” jelű pneumatikus működtetésű tolózár

A tolózárakat működtető pneumatikus munkahenger nyitó illetve záró oldalára jutó levegőt vezérlő útszelepek porvédett kivitelűek voltak. A végállás kapcsolók környezetét beburkoltuk, ami a szénporoknak ill. darabos szénnek az érintkezőkhöz történő bejutását megakadályozta. Fentiek figyelembe vételével az előtétbunkerből lesurranó szén indítására ill. leállítására a pneumatikus működtetésű tolózár kézi és automatikus üzemmódban a vibrátorok egyidejű használatával a kísérletek során megfelelően működött.

d. „SZ3” jelű pneumatikus működtetésű szerelvény

A kísérleti kutatómunka tervezésekor három fajta szénbeeresztő szerelvény vizsgálatát vettük tervbe:

Harangszelep	Pneumatikus működtetéssel	NÁ100
Pillangószelep	Pneumatikus működtetéssel	NÁ200
Dómszelep	Pneumatikus működtetéssel	NÁ200

d.1. Harangszelep

Az NÁ100-as harangszelep kereskedelmi árú. Mellette szólt az a kedvező tapasztalat, amelyet a BME Vízgépek Tanszék Kutatólaboratóriumában telepített nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezés szakaszos ill. folyamatos üzemi működtetése közben többféle poros ill. aprószemcsés anyag szállításakor szereztünk.

A korábbi kedvező tapasztalatok ellenére darabos szén szállításánál a harangszelep beépítését nem javasoljuk: *egyrészt* mert az NÁ100-as átömlési keresztmetszete kicsi, a nagyobb széndarabok lesurrantása közben a harang visszatorlasztó hatása miatt elakadhatnak, *másrészt* pedig ha a záró felülethez egy-egy kemény széndarab kerül, a tömörzés nem valósítható meg és az „O” gyűrűs tömítés is könnyen megsérülhet

d.2. Pillangószelep

A kísérletek további szakaszában az NÁ200-as pillangószeleppel dolgoztunk. A rendelkezésre álló nagyobb átömlési keresztmetszet ellenére használata a nagyobb darabokat tartalmazó szén szállítása esetén nem javasolható. A lesurranó anyagot az áramlási keresztmetszet közepén álló pillangószelep-lap és annak tengelye visszatorlasztotta, aminek következtében az anyag gyakran melléhullott és az indítótartály tetején kívül felrakódott. A zárt rendszerből így kikerült szén zavarta az indítótartály mérlegelését és a közelben elhelyezett szerelvények, műszerek működését. Másik hibalehetőség, hogy a tömítő felület könnyen megsérülhet, aminek következtében a tömör zárás csak szerelés és tömítés csere után valósítható meg.

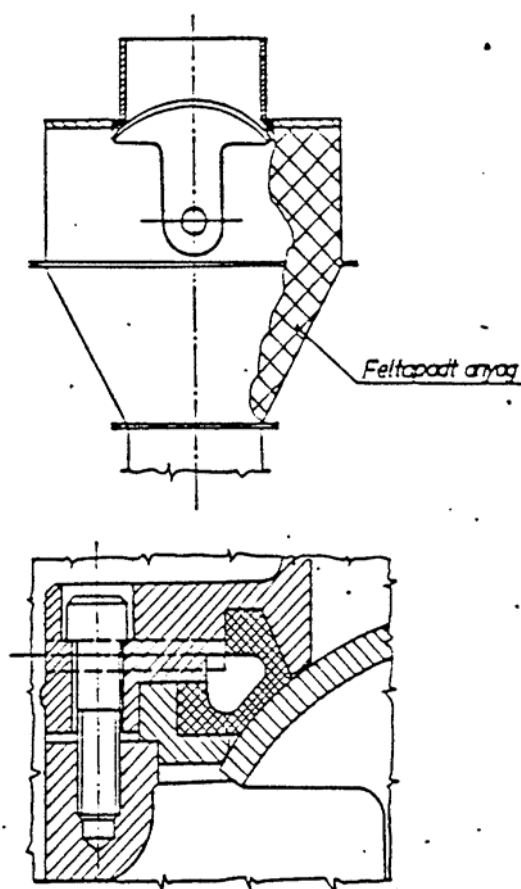
d.3. Dómszelep

A szakirodalomból ismert, hogy a kis méretű indítótartályt tartalmazó sűrűáramú, dugós szállítóberendezések gyors működésűek, ciklusidejük egy perc vagy azon belül van, a töltési idő is csak néhány másodperc. Nyugodtan állíthatjuk, hogy ezen berendezések kulcs eleme az anyagáramban zárni tudó, nyomásálló, gyors működésű, kopásálló szerkezet.

A MACAWBER cég tájékoztatása szerint dómszelepünk óránként 70 „nyit-zár” funkciót képes végezni, tömítése 500000 működési számig garantált.



A 3.53. ábrán látható dómszelep két legfontosabb eleme a vízszintes tengely körül elforgogni képes gömbhéj alakú test és a sűrített levegővel felfújható üreges profilos gumitömítés.



3.53. ábra. Gömbhéj alakú dómszelep

A beépítésnél körültekintően kell eljárni, amint azt a kísérletek kezdeti szakaszában előfordult esetek is igazolták, miszerint előfordult, hogy a szén az indítótartály falára feltapadt, ami megakadályozta a dómszelep forgórészének elfordulását (lásd a 3.53. ábra felső részét).

A dómszelep előnye még az, hogy a forgórész nyitott helyzetében a lesurranó anyagáramot nem akadályozza, mivel az a nyitáskor a beömlő sugár útjából kifordul.

#### *e. Az indítótartály*

A kísérleti berendezés egyik legfontosabb eleme az indítótartály. Az indítótartály tervezésekor az ERŐTERV gondosan tanulmányozta a szakirodalomban fellelhető adatokat. A kísérleti berendezés alsó kifolyású indítótartályának nagyságát a MACAWBER és a STURTEVANT típushoz közelítette. A tartályméreteket és a hozzátartozó szállítócső átmérőt az alábbiakra választotta:

A tartály átmérője	$D_t = 700 \text{ mm}$
A tartály térfogata	$V_t = 170 \text{ dm}^3$
A tartály tömege	$m = 600 \text{ kg}$
A csatlakozó szállítócső átmérője	$D = 100 \text{ mm}$
Méretezési nyomás	$p_m = 8.8 \text{ bar}$

Az indítótartály, valamint az alsó függőlegesből vízszintesbe forduló könyök és a szállítócsőhöz kapcsolódó konfuzor belső felületének kialakítása a dugóképzés és így az anyagszállítás szempontjából rendkívül jelentős.

Az indítótartály 3 db - membrán merevítésű - erőmérő cellára támaszkodik. Az elektronikus mérőberendezés a tömeget, illetve a tömeg változását kijelzi. A digitálisjel közvetlenül leolvasható, míg az analóg jel a már korábban említett vonalíróhoz csatolva kirajzoltatható.

A mérlegre állított indítótartály a következő lehetőségeket biztosította:

- a tartály töltése és ürítése az idő függvényében regisztrálható
- a tartályba töltött adagok tömege meghatározható
- a tartály ürítéséből megállapítható, hogy a bemért anyagadag összefüggő dugóban, vagy megszakításokkal hagyja-e el az indítótartályt

#### *f. Az indítótartály csatlakozása a szállítócsőhöz*

Az indítótartály mérlegelhetősége miatt a kísérletek kezdetén a szállítócsövet flexibilis műanyag csővel kapcsoltuk az indítótartályhoz.

Másik változatként a szállítócsövet NÁ100-as TAURUS gumi kompenzátorral kapcsoltuk az indítótartályhoz. A kompenzátor tórusz-felülete szállítás közben fokozatosan elrakódott szénnel és ez végül dugulást okozott.

A fenti kedvezőtlen kísérleti tapasztalatok után elfogadtuk azt a kompromisszumos megoldást, hogy a szállítócsövet „mrev” csatlakozással összeköttöttük az indítótartállyal. A mérleg a merev kötés ellenére kifogástalanul működött.

#### *g. Légmennyiség mérőszakaszok*

A kísérleti berendezés három NÁ50-es gyűrűkamrás mérőperemes mérőszakaszt tartalmazott (lásd a 3.49. ábrán az „MP1”, „MP2” és „MP3” jelöléseket. A kísérleti tapasztalatok alapján kiderült, hogy a szállított szénfajtáknál a szállítócső elején haladó anyagdugó hígítása nem szükséges, azaz a „KSZ2” és „KSZ3” szelepek végig zárt állapotban tarthatók. Az elmondottak alapján a „KSZ1” szelepet és „MP1” mérőszakaszt tartalmazó ág főággá vált, azaz a kompresszor – légtartály által szállított teljes levegő tömegáram itt jutott az indítótartályba illetve a szállítócsőbe.

A 3.51. ábra  $p_t=f(t)$  és  $\Delta p=f(t)$  görbéi alapján megállapítható, hogy a szállítási idő jelentős részében az áramlás instacionárius, ami elsődlegesen az indítótartály és a szállítócső térfogatviszonyának következménye.

#### **3.2.2.4. A vezérlő automatika**

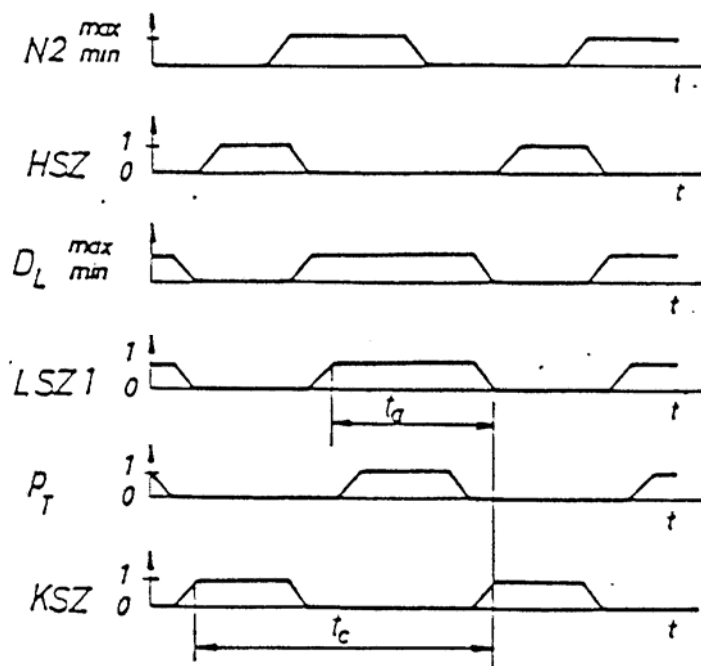
A 3.49. ábrán bemutatott kapcsolási vázlat alapján olyan villamos vezérlő automatikát kellett tervezni, amely lehetővé teszi a kísérleti sűrűáramú pneumatikus szénszállító berendezés különböző szállítóprogramok szerinti működtetését kézi illetve automatikus üzemmódban egyaránt.

A vezérlő automatikával szemben támasztott igény megfogalmazásakor a következő alapelvekből indultunk ki:

- az indítótartály töltése a szintérzékelőről vezérelt
- az indítótartály töltése a mérlegről vezérelt
- az indítótartály töltése az időrelével vezérelt
- az anyagszállítás indítása a légtartály nyomással vezérelt
- az anyagszállítás leállítása az üresjárási nyomással vezérelt

Kézi üzemmódban a szerelvények működtetéséhez semmiféle logikai feltétel, villamos reteszelés nem tartozik, azaz minden szerelvény egymástól függetlenül működtethető. Automatikus üzemmódban a biztonságos működtetéshez szükséges reteszelések „élnek”, tehát például tele szintjelző jelre további szén ráadagolás vagy nyomás alatti indítótartályba anyagbetöltés nem lehetséges.

A szerelvények részben pneumatikus, részben közvetlenül elektromos működtetésűek. A vezérlő automatika számára az információszerzés a folyamat helyes lefolyásáról a szintérzékelő távadókkal, nyomás- illetve nyomáskülönbség távadókkal, valamint a szénbeeresztő szelepek végállás kapcsoló jeleivel történik. Az érzékelőktől kapott analóg jeleket (a technológiai előírásoknak megfelelően) nyitott illetve zárt kontaktusok képviselik és tárolják.



3.54. ábra. Vezérlési diagram

A 3.54. ábrán mintaként bemutatjuk egy szállítóprogram vezérlési diagramját. A szénbeeresztő szelepet „HSZ”-szel jelöltük, de a tervek készítésekor természetesen figyelembe kellett venni, hogy a „HSZ31” jelű pneumatikus portolózár és a „HSZ32” pneumatikus működtetésű pillangószelep használatakor, nyitáskor a „HSZ31” portolózár 2-10 másodperccel később nyisson, mint a „HSZ32” pillangószelep és záráskor a „HSZ32” pillangószelep 2-10 másodperccel később zárjon, mint a „HSZ31” portolózár.

A vezérlési séma alapján látható, hogy az indítótartály anyaggal való feltöltésének feltétele a „KSZ” jelű kiszellőztető szelep nyitott helyzete, azaz az indítótartály  $p_t=0$  bar légköri nyomás értéke, továbbá az anyag fogadókésztséget mutató „N2<sub>min</sub>” üres szintérzékelő jel. Az anyagbetöltés végén – a 3.54. ábra szerinti példában – az „N2<sub>max</sub>” tele jel bezárja a „HSZ” és

„KSZ” szelepeket. Ezt követi a szállítólevegő indítása, azaz az „LSZ1” szelep nyitása, amennyiben a légtartályban szükséges „ $p_{Lmax}$ ” nyomás is megfelelő értékű. Az anyagáram megindulását, azaz a pneumatikus szállítás kezdetét a bemutatott mintapéldában indító szelep nem segíti, így a vezérlési sémában a szállítási állapotot a „ $p_t$ ” tartálynomás logikai „1” értéke jelöli. A szállítás végét a  $p_t = „0”$  (logikai nulla) jel mutatja, ami a szállítóberendezés adott üzemállapotához tartozó üresjárási nyomásának felel meg. Ezen  $p_t = „0”$  jelre az „LSZ1” szelep bezár és a légköri nyomásra expandált tartályba a „HSZ” szelep nyitásával újra tölthető anyag, azaz újra kezdődik a ciklus. Mivel az anyagszállítás közben a levegőfogyasztás nagyobb, mint a kompresszor által szolgáltatott levegőmennyiség, így a szállítás végére a „ $p_L$ ” légtartály nyomás „ $p_{Lmin}$ ” értékre csökken és a továbbiakban a kiszellőzés és anyafeltöltés ideje alatt kell a kompresszornak („LSZ1” szelep zárt állapota mellett) a légtartályt „ $p_{Lmax}$ ” nyomásra hoznia. Nagyobb kompresszor választásával a légtartály nyomásának változása kiküszöbölhető, így a ciklusidő rövidíthető, ez azonban a beruházási költségek növekedését vonja maga után.

A kísérleti tapasztalatok alapján a végleges üzemi szállítóberendezéshez Omron Sysmac-S6 típusú közepes teljesítményű, ciklikus letapogatással működő, programozható logikájú vezérlőberendezést építettünk a rendszerbe. Moduláris felépítése lehetővé tette a konkrét feladathoz pontosan alkalmazható konfiguráció létrehozását.

### 3.2.2.5. Mérési módszer a berendezés működési tartományának meghatározására

Az anyagszállítási kísérletek célja az volt, hogy meghatározzuk azt a levegő tömegáram tartományt, ahol a kiépített különböző hosszúságú szállítócsövet tartalmazó berendezésen a vizsgált szénfajták elszállíthatók, továbbá, hogy meghatározzuk a szállítási állapotokhoz tartozó fő üzemtani paramétereket.

A berendezés szabályozására és így működési tartományának kísérleti úton történő meghatározására két lehetőség kínálkozott:

- A vezérlő automatika úgy készült, hogy a 3.49. ábra „SZ1” jelű levegő beeresztő szelep nyitása a légtartály nyomás „ $p_L$ ” beállított értékénél történt, így ennek változtatásával a szállításhoz változó levegő tömegáramot lehetett beállítani, aminek következtében az anyag tömegáram és az indítótartály nyomása is változott
- Az előzőhöz hasonló hatás érhető el úgy is, hogy a „ $p_L$ ” légtartály nyomás beállított értékét nem változtatjuk, de a szállító levegő tömegáramát a „B” jelű szűkítőnyílás (lásd a 3.49. ábrán) méretének változtatásával állítjuk be

A kísérleti munka során mindkét változatot kipróbáltuk és az alábbi üzemeltetési tapasztalatokat gyűjtöttük:

A változó légtartály nyomás beállítása a berendezés bontása, szerelése nélkül lehetséges a vezérlő automatika szekrénybe épített mutatós táblaműszer határérték mutatójának segítségével, míg a „B” jelű szűkítőnyílás cseréje szerelést igényel.

A kísérletsorozathoz két ok miatt az utóbbi mellett döntöttünk:

- egyrészt a mérések jobb reprodukálhatósága miatt
- másrészt adott levegő tömegáram esetén a mérési tapasztalatok szerint így nagyobb anyag tömegáram volt elérhető

### 3.2.2.6. Számítási összefüggések a szállítási kísérletek kiértékeléséhez

Az indítótartályból kiszállított anyagadag „ $m_a$ ” tömegét a mérleg „ $m$ ” tele és „ $m_o$ ” üres adataiból számítottuk:

$$m_a = m - m_o \quad (3.32)$$

Az „ $m_a$ ” anyagtömeget a „ $t_{sz}$ ” szállítási időre vonatkoztatva kapjuk a szállításra jellemző „ $\dot{m}_a$ ” anyag tömegáramot, míg a berendezésre jellemző – a „ $T_c$ ” ciklusidő figyelembe vételével számolt – átlagos anyag tömegáramot „ $\dot{m}_{átl}$ ”-gal jelöljük:

$$\dot{m}_a = \frac{m_a}{t_{sz}} \quad (3.33)$$

$$\dot{m}_{átl} = \frac{m_a}{T_c} \quad (3.34)$$

A szállító levegő átlagos tömegáramát az

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{gk} + \frac{V(p_{L\max} - p_{L\min})\rho_{go}}{t_{sz} p_o} \quad (3.35)$$

Összefüggéssel számítottuk a „ $p_{L\max}$ ”, „ $p_{L\min}$ ” és „ $t_{sz}$ ” adatoknak a regisztrátumból (lásd a 3.51. ábrát) történt kiolvasása útján. A stacionárius állapotban a kompresszor által szolgáltatott levegő tömegáramot „ $\dot{m}_{gk}$ ” jelöli, míg „ $V$ ” a légtartály, a levegővezeték és a cseppleválasztó össztérfogata. A légköri nyomás értékét  $p_o = 10^5$  Pa értékkel, míg a légköri állapotú levegő sűrűségét a teljes sorozatmérés folyamán  $\rho_{go} = 1.2$  kg/m<sup>3</sup> értékkel számítottuk.

A levegő tömegáramból a beszívott levegő térfogatárama az alábbi módon számítható:

$$\dot{V}_g = \frac{\dot{m}_g}{\rho_{go}} \quad (3.36)$$

A keverési arány az ismert definíció szerint nem más, mint az egységnyi levegő tömegárammal elszállítható anyag tömegáram. A „ $p_{Lk\ddot{o}z}$ ” közepes légtartály nyomást a „ $p_{L\max}$ ” és „ $p_{L\min}$ ” adatok számtani középértékeként számítottuk.

A kísérleti szénszállító berendezésre jellemző „ $P_{pol\ b}$ ” teljesítményt a „ $p_{L\max}$ ” maximális légtartály nyomással  $n=1.3$  politróp hatványkitevő értékkel számítottuk:

$$P_{pol\ b} = \frac{n}{n-1} p_o \frac{\dot{m}_g}{\rho_{go}} \left[ \left( \frac{p_{L\max}}{p_o} \right)^{\left( \frac{n-1}{n} \right)} - 1 \right] \quad (3.37)$$

A kísérleti szénszállító *berendezésre jellemző* „ $e_b$ ” fajlagos energiaigényt, ami az egységnyi tömegű anyag egységnyi távolságra történő szállításához szükséges, az alábbiak szerint számítottuk:

$$e_b = \frac{P_{polb}}{m_a L} \quad (3.38)$$

A szállításra *jellemző* „ $P_{pol}$ ” politróp teljesítményt a „ $p_{tmax}$ ” maximális *indítótartály nyomással*  $n=1.3$  politróp hatványkitevő értékkel számítottuk:

$$P_{pol} = \frac{n}{n-1} p_o \frac{\dot{m}_g}{\rho_{go}} \left[ \left( \frac{p_{tmax}}{p_o} \right)^{\left( \frac{n-1}{n} \right)} - 1 \right] \quad (3.39)$$

A 3.38. összefüggéshez hasonlóan definiáltuk a szállítás „ $e$ ” fajlagos energiaigényét:

$$e = \frac{P_{pol}}{m_a L} \quad (3.40)$$

Az indítótartályba töltött anyagadag „ $t_{sz}$ ” idő alatti elszállításához felhasznált levegő tömeg az alábbiak szerint számítható:

$$m_g = \dot{m}_g t_{sz} = A_c \rho_{go} \frac{p_t}{p_o} v_{gc} t_{sz} = \rho_{go} \frac{p_t}{p_o} (V_t + V_c + \Delta V) \quad (3.41)$$

ahol  $A_c$  - a szállítócső keresztmetszete  
 $L$  - a szállítócső hossza  
 $V_c = A_c L$  - a szállítócső térfogata  
 $V_t = 0.17 \text{ m}^3$  - az indítótartály térfogata  
 $\Delta V$  - a „ $t_{sz}$ ” idő alatt az anyagdugón átáramlott levegő térfogata

A 3.41. összefüggés felhasználásával a „ $v_{gc}$ ” levegősebesség a tartályhoz kapcsolódó szállítóvezeték elején az alábbiak szerint számítható:

$$v_{gc} = \frac{\dot{m}_g}{A_c \rho_{go} \frac{p_t}{p_o}} \quad (3.42)$$

Az átlagos „ $v_a$ ” anyagebességet első közelítésben az „ $L$ ” szállítócső hossz és a „ $t_{sz}$ ” szállítási idő hányadosaként számítottuk. Feltételeztük, hogy a szállítás a légtartály nyomás csökkenésének kezdeti pillanatában elindul és befejeződik akkor, amikor az automatika a levegőfogyasztást megszünteti, azaz a légtartály nyomás nőni kezd. Írható tehát:

$$v_a = \frac{L}{t_{sz}} \quad (3.43)$$

A 3.42. és 3.43. összefüggések felhasználásával a levegő- és anyagebesség viszonyára a következő összefüggés vezethető le:

$$\frac{v_{gc}}{v_a} = 1 + \frac{V_t}{V_c} + \frac{\Delta V}{V_c} = 1 + \frac{V_t}{A_c L} + \frac{\Delta V}{A_c L} \quad (3.44)$$

A 3.44. összefüggésben megjelenik a „ $V_t/V_c$ ” indítótartály és szállítócső térfogatviszonya, ami a dugóképzés szempontjából fontos adat. Az összefüggésből az is látható, hogy a dugón átáramló  $\Delta V = \text{állandó levegőtérfigat feltételezésével}$  a „ $v_{gc}/v_a$ ” sebességviszony az „ $L$ ” szállítócső hossz növekedésével csökken.

A mérési adatok birtokában a dugón időegység alatt átáramló „ $\Delta \dot{m}_g$ ” levegő tömegáram számítható, hiszen a szállításhoz felhasznált „ $\dot{m}_g$ ” összelevegő tömegáramhoz való viszonya

$$\frac{\Delta \dot{m}_g}{\dot{m}_g} = 1 - \frac{\dot{m}_{gb}}{\dot{m}_g} \quad (3.45)$$

Csupán a berendezés geometriai méreteinek függvénye, ugyanis:

$$\dot{m}_{gb} = \frac{V_t + V_c}{t_{sz}} \left( \frac{p_t}{p_o} - 1 \right) \rho_{go} \quad (3.46)$$

A 3.46. összefüggés az indítótartály és a hozzákapcsolt szállítócső teljes térfogatának „ $\dot{m}_{gb}$ ” levegő tömegárammal „ $t_{sz}$ ” szállítási idő alatti „ $p_t$ ” nyomásra történő feltöltését jelenti, ami berendezés jellemző.

### 3.2.2.7. Szénszállítási kísérletek

A sűrűáramú pneumatikus szénszállító berendezés referencia adatainak minél szélesebb tartományban történő meghatározásához nyolcféle anyaggal végzett kísérleti munka eredményeit tartalmazó összefoglaló kutatási jelentés készült [57]. Tájékoztatásul a vizsgált anyagfajták:

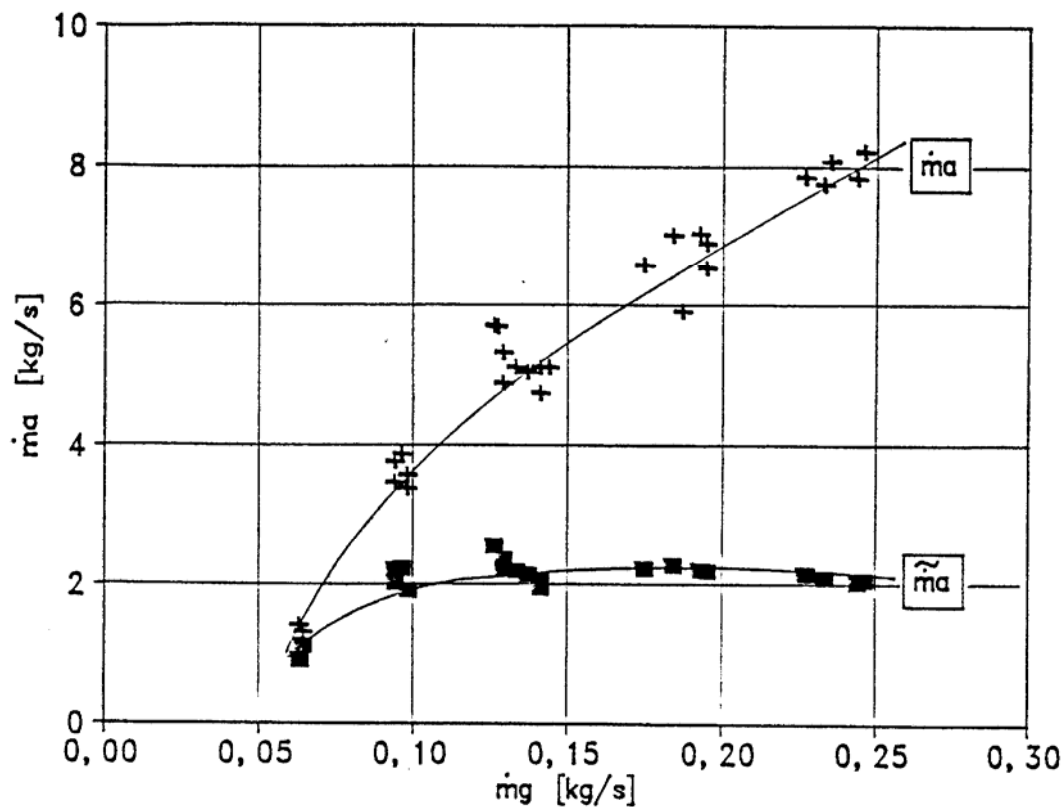
- monosbéli rostált dara
- lengyel szén
- sajómercsi dara
- dorogi rostált dara
- dorogi „A” dió
- pécsi-komló mogyoró
- orosz lányi dara
- egercsehi dara

Ebben a fejezetben csupán egy szénfajta (dorogi rostált dara) szállításakor adódott legfontosabb jellemzőket mutatjuk be.

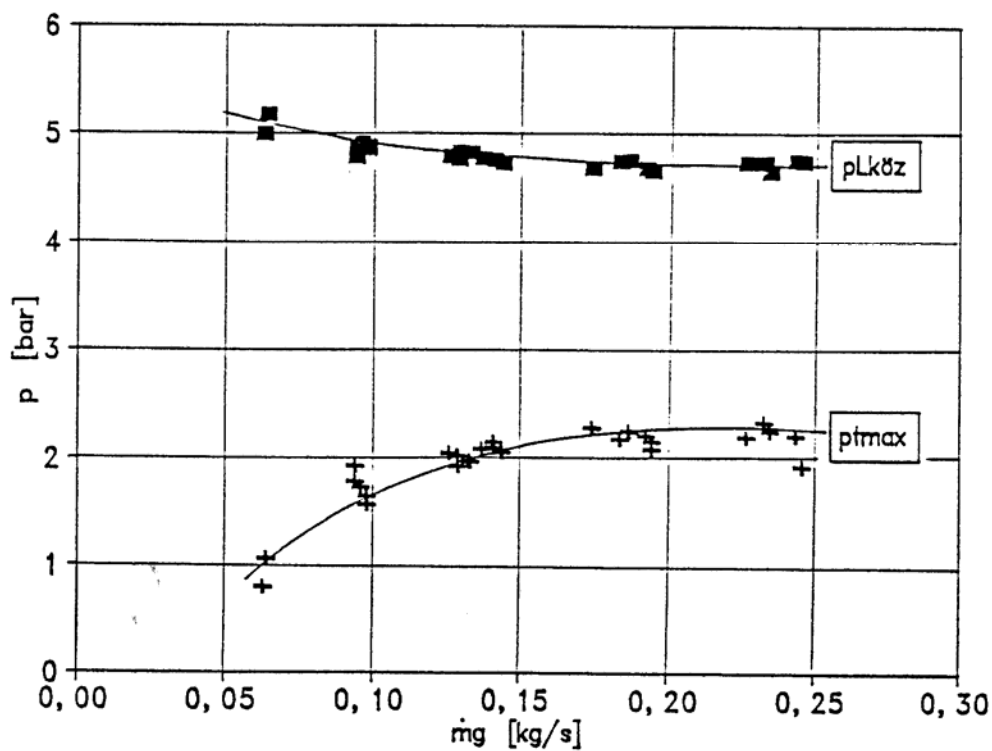
A 3.55.-3.56. ábrákon a dorogi rostált dara rövid csővezetékben ( $L=27.86\text{m}$ ;  $D=100\text{mm}$ ) történő szállításakor nyert mérési eredményeket mutatjuk be.

A 3.55. ábrán a pneumatikus szállításra jellemző 3.33. összefüggéssel definiált „ $\dot{m}_a$ ” anyag tömegáram és a 3.34. összefüggéssel számított átlagos – berendezésre jellemző – anyag

tömegáram látható a kísérletsorozatban változtatott „ $\dot{m}_g$ ” szállító levegő tömegáramának függvényében.



3.55. ábra. Anyag- és levegő tömegáram jelleggörbék. Dorogi rostált dara. ( $L=27.86\text{m}$ ;  $D=100\text{mm}$ )



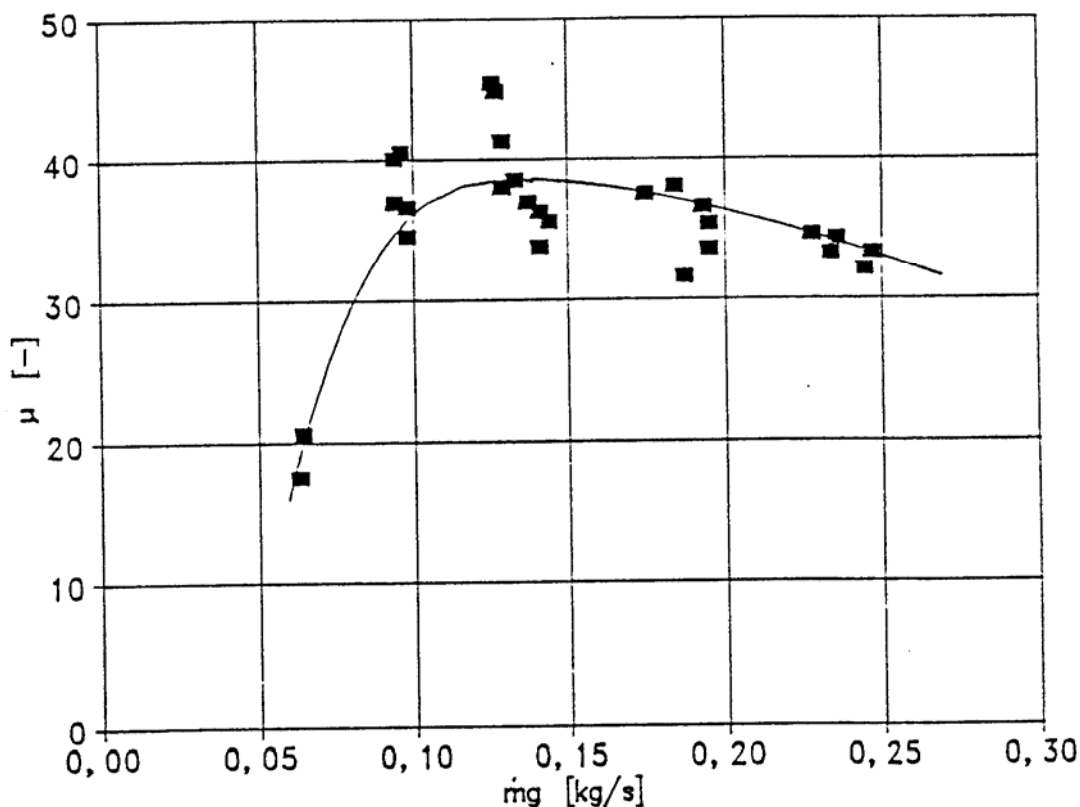
3.56. ábra. Nyomás – levegő tömegáram jelleggörbék.  
Dorogi rostált dara. ( $L=27.86\text{m}$ ;  $D=100\text{mm}$ )



Az ábra alapján megállapítható, hogy a kísérleti berendezés nagy levegő tömegáram-tartományban közel állandó anyag tömegáram elszállítására alkalmas. A dugulási határ közelében, azaz kis levegő tömegáramoknál az anyag tömegáram értékek is jelentősen lecsökkentek. A *pneumatikus szállításra jellemző*  $m_a = f(m_g)$  jelleggörbe alakja a felső ürítésű nyomótartályos szállítóberendezéseknél tapasztaltakkal megegyezik. Ezen görbéhez az origóból húzható érintő a legnagyobb keverési arányú szállítási állapot értékét adja meg.

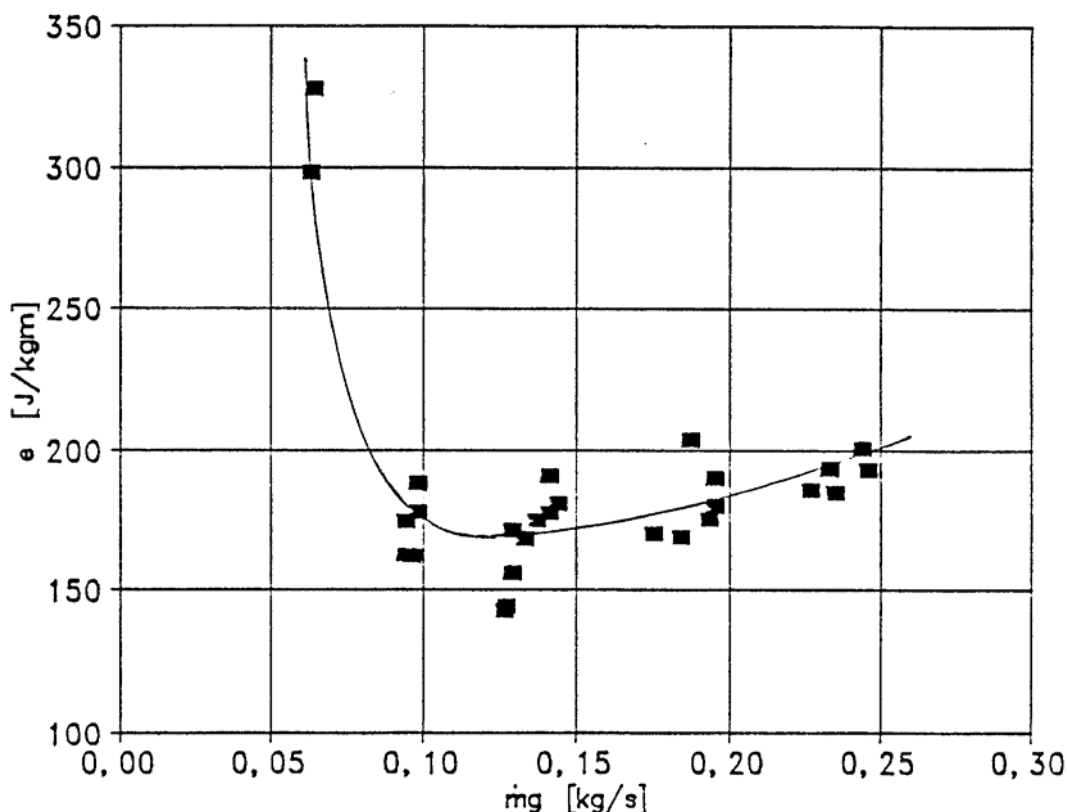
A 3.56. ábra a „ $p_{Lk\ddot{o}z}$ ” közepes légtartály-nyomás, illetve a szállítás közben kialakult „ $p_{tmax}$ ” maximális indítótartály-nyomás változását mutatja a kísérletsorozatban vizsgált működési tartományban, ami hasonló berendezés tervezéséhez, a légszállító gép választásához támpontként felhasználható.

A 3.57. ábra a keverési arány változását mutatja, míg a 3.58. ábrában a fajlagos energiaigény értékei láthatók a teljes vizsgált mérési tartományban. Mindkét görbe szélsőértéke, azaz a keverési arány maximuma, illetve a fajlagos energiaigény minimuma kijelöli azt a levegő tömegáram-értéket, amelynél a kísérleti nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezés optimálisan üzemeltethető, illetve amelynél hasonló berendezés optimális üzemállapotra tervezhető.



3.57. ábra. Keverési arány – levegő tömegáram jelleggörbe.  
Dorogi rostált dara. ( $L=27.86m$ ;  $D=100mm$ )

A kapott eredmények összhangban vannak a nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezések szabályozása [39] témakörben a korábbi kutatómunka során tapasztaltakkal.



3.58. ábra. Fajlagos energiaigény – levegő tömegáram jelleggörbe.  
Dorogi rostált dara. (L=27.86m; D=100mm)

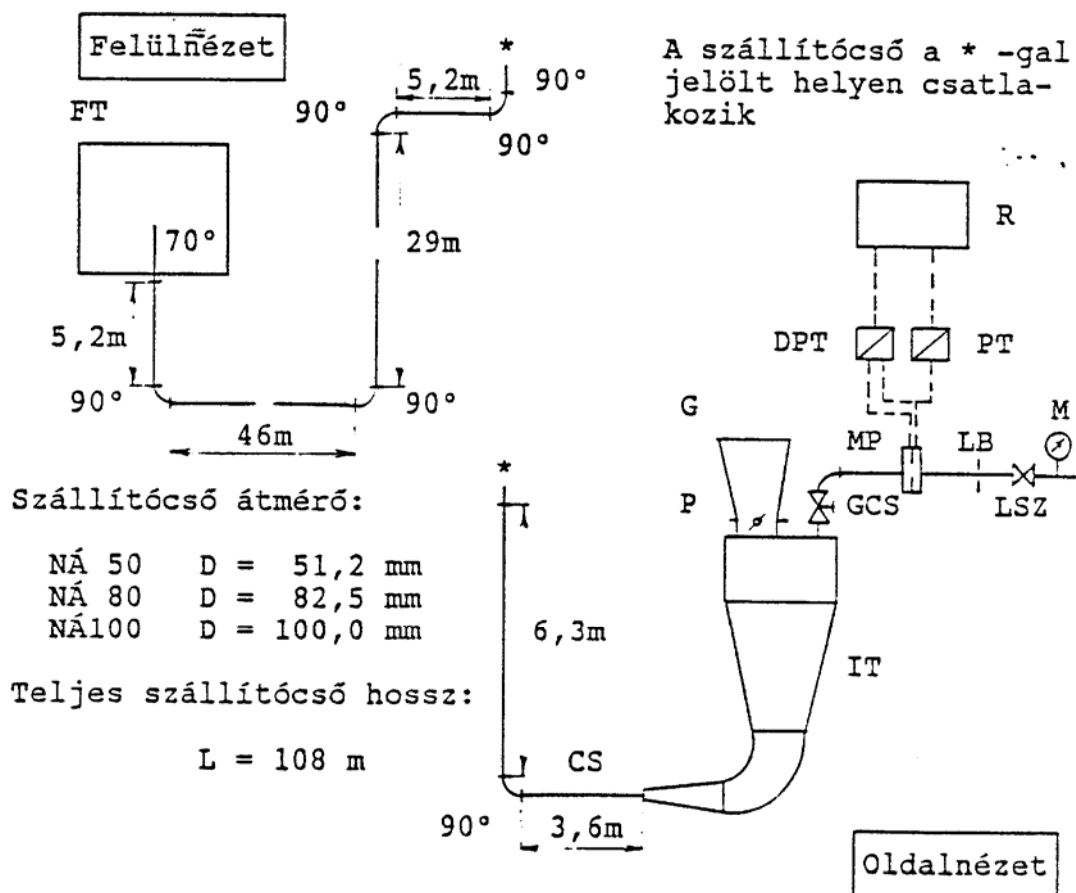
### 3.2.2.8. Nedves tüztéri salak szállítása

A szakirodalom tanulmányozása során kiderült, hogy nedves masszák pneumatikus szállításáról igen kevés publikáció számol be, azok többsége is inkább csak leíró jellegű és főként reklám célú cikk [58-61].

Az Erőmű- és Hálózattervező Vállalat és a BME Vízgépek Tanszéke közötti kutatási és fejlesztési együttműködési munka keretében az 1980-as években lehetőség nyílt nedves tüztéri salak szállítására alkalmas pneumatikus szállítóberendezés kifejlesztésére. Magyarországon erre alkalmas pneumatikus szállítóberendezés ezt megelőzően nem volt. A kutatómunka eredményeiről nemzetközi konferencián előadott, orosz nyelvű publikáció készült [62].

A kísérleti berendezés vázlata a 3.59. ábrán látható. A berendezés legfontosabb eleme az Erőmű- és Hálózattervező Vállalat által tervezett, az ábrán „IT”-vel jelölt, kúpos, alsó ürítésű indítótartály. Ez a fajta indítótartály alkalmas *szemcsés, poros anyag* (pl. különböző minőségű barna- ill. feketeszen) és egyúttal *nagy víztartalmú anyag* (nedves tüztéri salak) pneumatikus szállítóvezetékbe történő beadagolására.

A tartály felső hengeres része  $D_t=700\text{mm}$  átmérőjű, térfogata  $V_t=170\text{dm}^3$ , a csatlakozó szállítócső átmérője pedig  $D=100\text{mm}$ . Az indítótartály, valamint az alsó, függőlegesből vízszintesbe forduló könyök és azt ezt követő konfuzor belső felületének kialakítása a dugóképzés és így az anyagszállítás szempontjából jelentős.



3.59. ábra. Kísérleti berendezés nedves tűztéri salak szállítására

CS	-	szállítócső	LSZ	-	levegőszelep
DTP	-	nyomáskülönbség távadó	M	-	manométer
FT	-	fogadótartály	MP	-	mérőperem
G	-	garat	P	-	pillangószelep
GCS	-	gömbcsap	PT	-	nyomás távadó
IT	-	indítótartály	R	-	regisztráló készülék
LB	-	lemezblende			

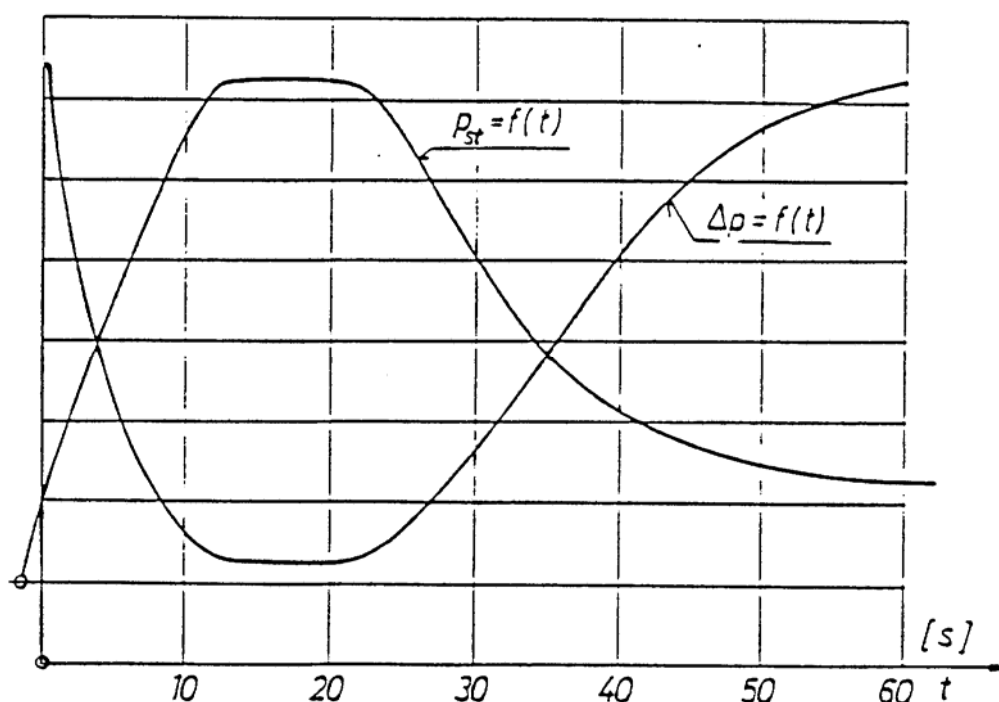
A Dorogi Hőerőmű Vállalat területén felépített, nedves tüztéri salak pneumatikus szállítására alkalmas kísérleti berendezés működtetéséhez a szállítólevegőt az „LSZ” jelű levegőszelep nyitásával indítottuk, mennyiségének változtatására a különböző nyílásméretű „LB” jelű szűkítőnyílás (lemezblende) szolgált. Az „LSZ” jelű levegőszelep zárt állapotában az „M” jelű dobozos manométer a sűrített levegő hálózat nyomását mutatja, amely nyomásadat az anyag indítás egyik feltételét adja

A szállító levegő tömegáramát az „MP” jelű szabványos mérőperemes mérőszakasz segítségével határoztuk meg. Az „IT” indítótartály viszonylag kis mérete szükségessé tette, hogy a nyomás ill. levegő tömegáram adatok időbeli lefutását regisztráljuk. Az előzőek miatt a mérőperem szűkítőnyílása előtti, primer oldali „p<sub>st</sub>” nyomást a „PT” jelű nyomás távadó, míg a mérőperem „Δp” mérőnyomását a „DTP” jelű nyomáskülönbség távadó segítségével az „R” jelű vonalíróval rögzítettük. A konfuzorhoz csatlakozó „CS” jelű szállítócső teljes hossza L=108m, míg a csőátmérőt NÁ100, NÁ80, NÁ50 értékeknek választottuk.

A szállítócső mindhárom kiépítésnél az „FT” jelű nyitott fogadótartályban egy függőleges síkú, 70°-os középponti szögű, vízszintesből lefelé hajló ívben végződik.

A „P” jelű pillangószelep nyitott helyzetében a „G” garaton keresztül az indítótartályba minden szállítás előtt ismert anyagtömeget adagoltunk. A „GCS” jelű gömbcsap dugulás esetén az „IT” indítótartály és a sűrített levegő hálózat gyors szétválasztására szolgált, míg „normál üzemben” teljesen nyitott volt.

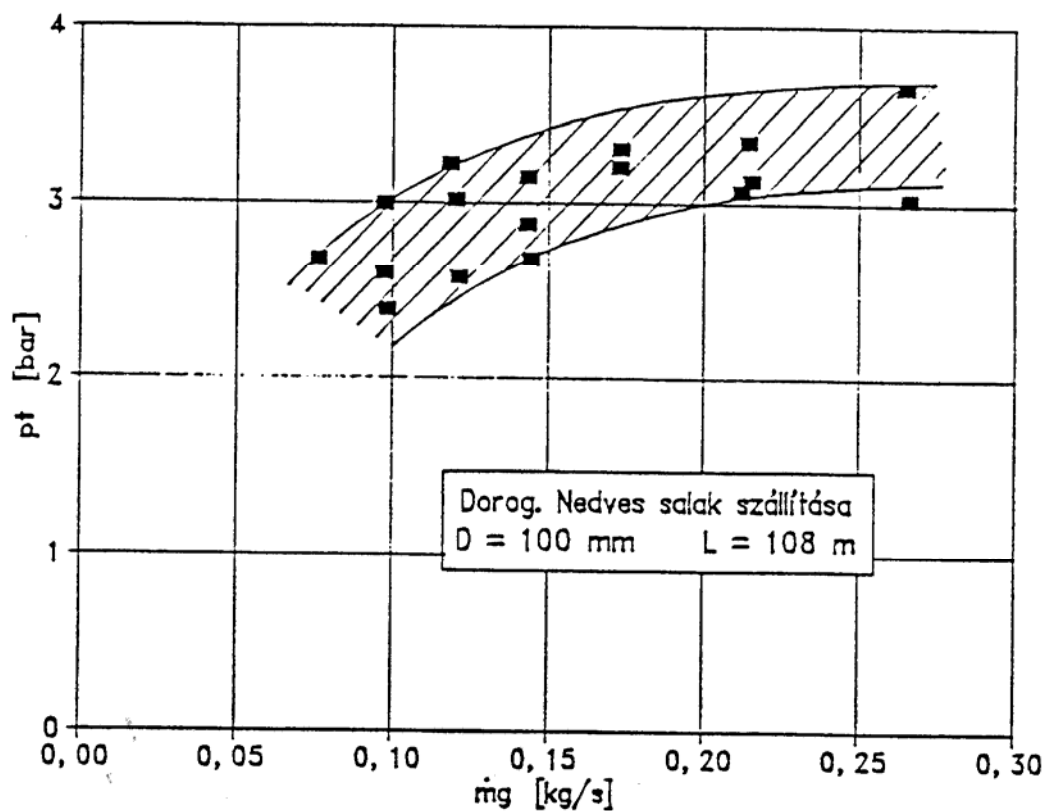
Miután a pneumatikus szállítás fő üzemtani paramétereit jelentősen függenek a szállítandó anyag jellemzőitől (jelen esetben elsősorban a nedves tüztéri salak nedvességtartalmától), így ennek meghatározása érdekében rendszeresen mintákat vettünk a szállítandó anyagból. Az anyagminták kiszárítása után a mérlegelési adatokból 44-48%-os átlagos nedvességtartalom adódott.



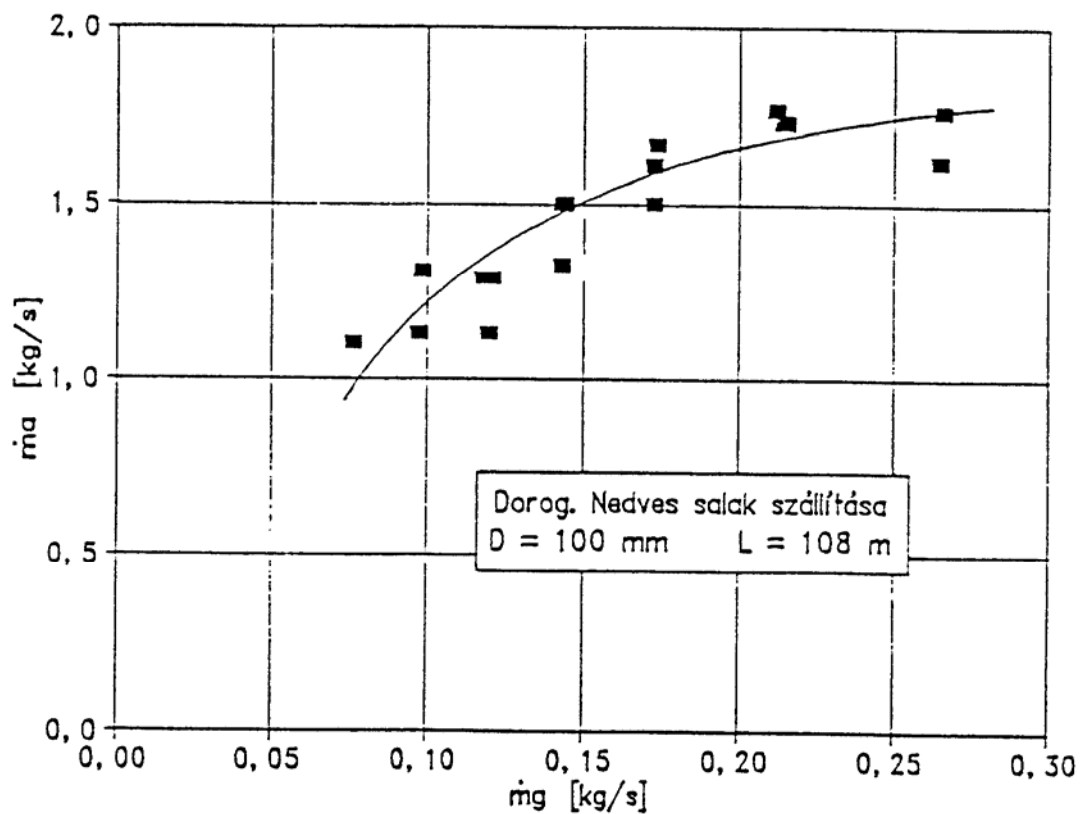
3.60. ábra. A mérőperem nyomások időbeli lefutása

A szakaszos üzemre jellemző, regisztrátumon rögzített mérőperem adatokat – azaz a primer oldali statikus nyomást és a mérőperem mérőnyomást – a jelenség időbeli lefutásának illusztrálásaként a 3.60. ábrán mutatjuk be. A regisztrátum megfelelő pontosságú kiértékeléséhez a „PT” nyomás távadó és a „DTP” nyomáskülönbség távadó jeleit különböző villamos erősítéssel változtattuk és a kívánt beállításhoz tartozó műszer kalibrálást a helyszíni mérés előtt és után egyaránt elvégeztük. A kicsiny tartálméret következtében a szakaszos szállítási mérések során nem alakult ki értékelhető stacionárius tartomány, így csupán az átlagos mennyiségek (levegő tömegáram, anyag tömegáram, keverési arány) meghatározására nyílt lehetőség.

A 3.61. ábrán látható diagramban az időben változó nyomásértékek közül (az előzőektől eltérően) a szállításra leginkább jellemző pillanatnyi legnagyobb nyomás értéket tüntettük fel, ami egyúttal magyarázza a mérési pontok jelentős szórását. A szállítási állapotra jellemző nyomásként az ábrán bevonalkázott sávot jelöltük meg, ami tendenciájában a nyomótartályos



3.61. ábra. Az indítótartály nyomása a levegő tömegáram függvényében

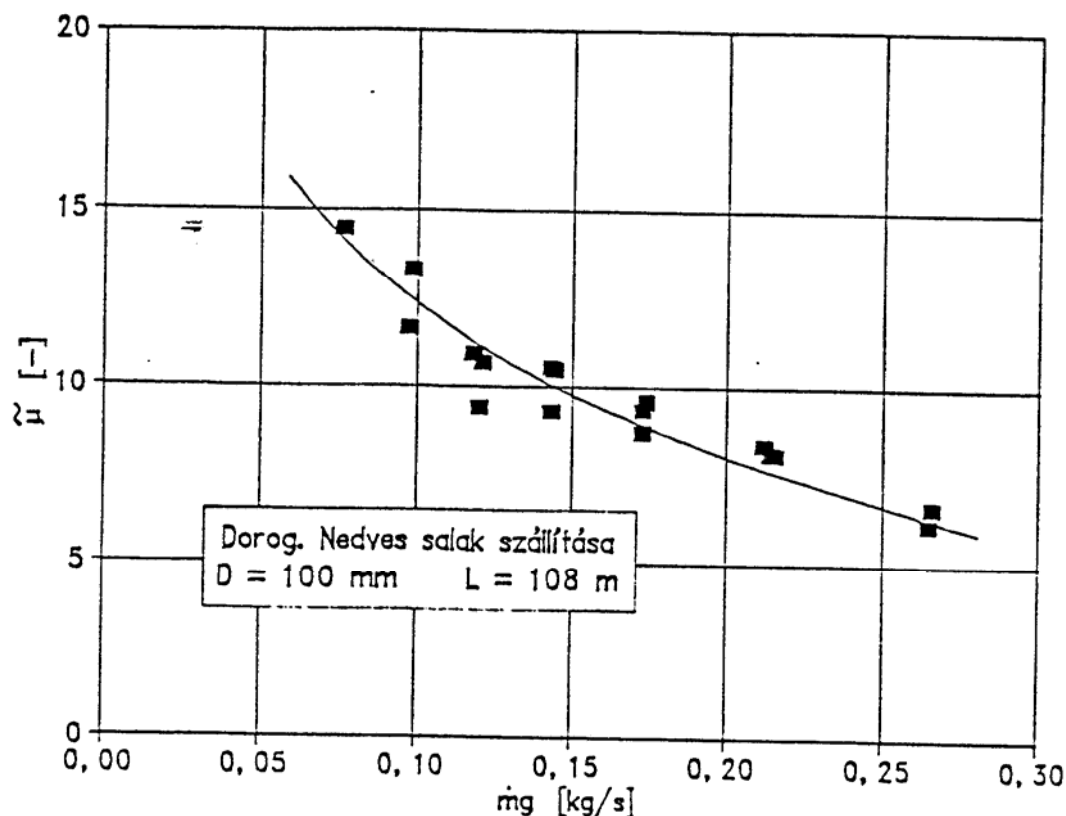


3.62. ábra. Anyag tömegáram a levegő tömegáram függvényében

pneumatikus szállítóberendezéseknél megszokottakkal megegyezik, azaz a nagyobb szállítólevegő mennyiségekhez nagyobb indítótartály nyomás tartozik.

A 3.62. ábrán az átlagos anyag tömegáram változása látható a levegő tömegáram függvényében.

A 3.63. ábra az átlagos keverési arány és a levegő tömegáram kapcsolatát mutatja



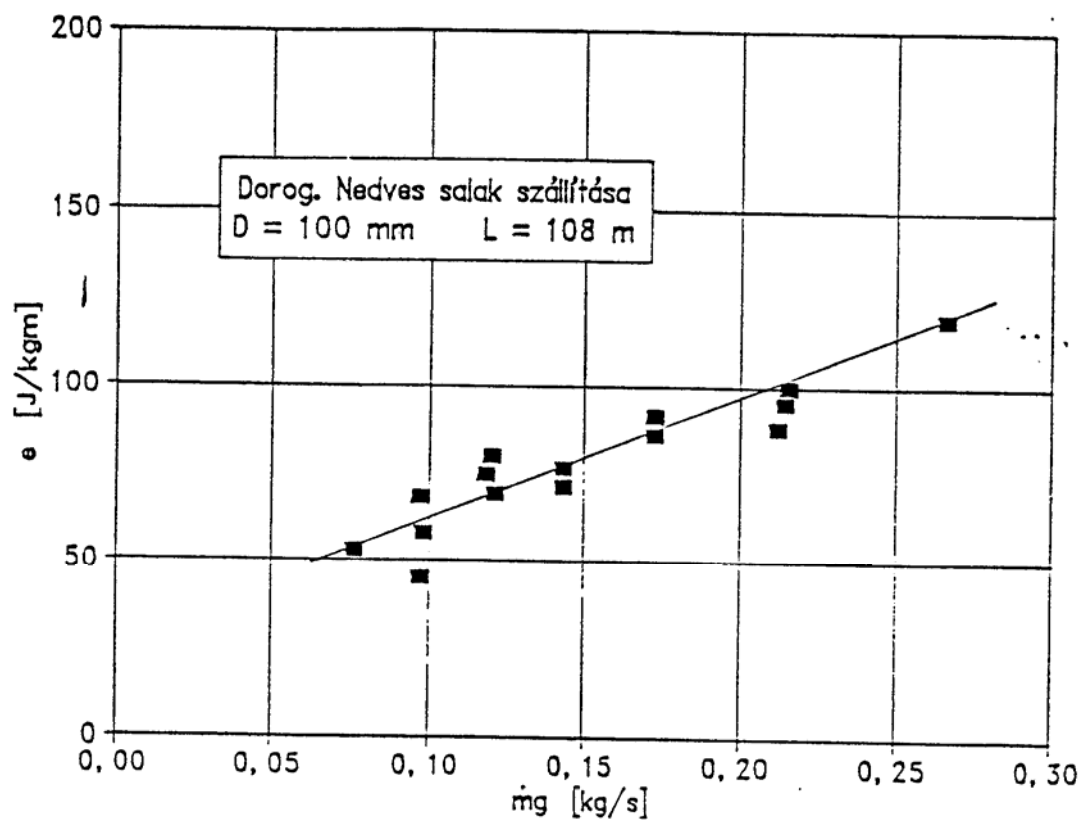
3.63. ábra. Átlagos keverési arány a levegő tömegáram függvényében

Az ábrából kiolvasható, hogy a *legnagyobb keverési arány* a mérési tartományban az üzembiztos szállítási állapothoz tartozó *legkisebb levegő tömegáram* beállításakor adódott. Már itt is felhívjuk rá a figyelmet, hogy ugyanebben a tartományban adódott a *legkisebb fajlagos energiaigény* is (lásd a 3.65. ábrát). A mérési eredményekből úgy tűnik, hogy az optimális szállítási állapot (*legkisebb levegő tömegáram, legnagyobb keverési arány, legkisebb fajlagos energiaigény*) összetartozó paraméter értékei egyidejűleg teljesülnek.

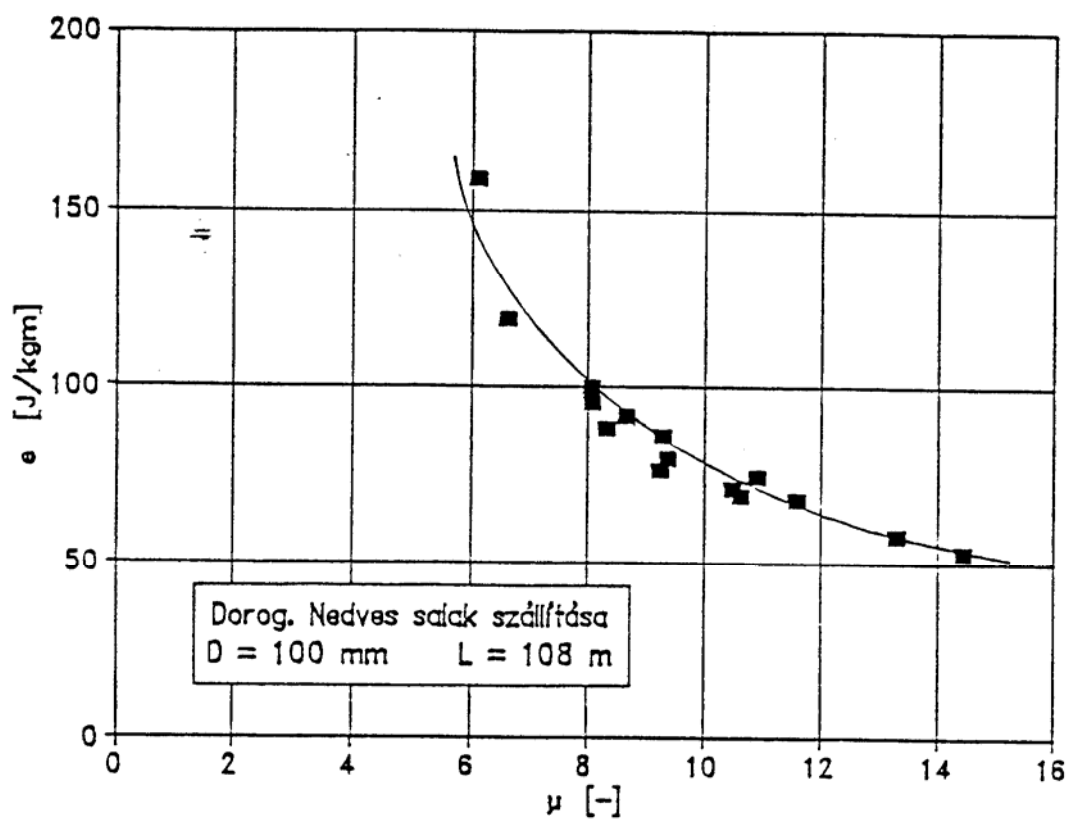
A 3.64. és 3.65. ábrák a nedves salakszállítás fajlagos energiaigényét tartalmazzák a levegő tömegáram, illetve a keverési arány függvényében.

A három különböző átmérőjű, azonos vonalvezetésű és hosszúságú szállítócsőben végzett pneumatikus szállítási kísérletek tapasztalatait az alábbiakban foglaljuk össze:

- a. A szállításra alkalmas *levegő tömegáram tartomány* mindhárom szállítócső átmérő esetén közel azonos



3.64. ábra. Fajlagos energiaigény a levegő tömegáram függvényében



3.65. ábra. Fajlagos energiaigény a keverési arány függvényében

- b. A szállítás nyomásigénye az NÁ80-as és NÁ100-as szállítócsőben végzett mérésekkor közel azonos, míg az NÁ50-es szállítócsővel az azonos levegő tömegáram paraméter értékhez tartozó összehasonlítás lényegesen nagyobb indítótartály nyomásokat mutat

A jobb áttekinthetőség érdekében a következő táblázatban összegyűjtöttük a mérési tartományok azonos levegő tömegáram paraméter értékeihez tartozó fő üzemtani adatai, majd az ezekhez rendelhető görbeseregeket a 3.66.-3.70. ábrákon is bemutatjuk.

Összesítő táblázat. Nedves tüztéri salak szállítása (L=108m). A különböző átmérőjű szállítócsővekkel nyert eredmények:

Indítótartály nyomás: $p_t$ [bar] túlnyomás				
$m_g$ [kg/s]	0.10	0.15	0.20	0.25
NÁ100	2.70	3.00	3.20	3.30
NÁ80	2.50	2.85	3.15	3.30
NÁ50	3.10	4.80	5.80	6.50
Anyag tömegáram: $m_a$ [kg/s]				
NÁ100	1.45	2.00	2.35	2.60
NÁ80	1.15	1.55	1.80	2.00
NÁ50	0.65	0.85	1.15	1.25
Átlagos keverési arány: $\tilde{\mu}$ [-]				
NÁ100	14.5	12.0	11.0	10.0
NÁ80	11.0	9.5	8.5	8.0
NÁ50	8.0	5.5	5.0	4.5
Fajlagos energiaigény: $e$ [J/kg/m]				
NÁ100	52	63	78	99
NÁ80	37	52	76	104
NÁ50		165	175	300

A 3.66. ábrán a „ $p_t$ ” indítótartály nyomás és a „D” szállítócső átmérő megszerkesztett függvénykapcsolata szerepel az „ $m_g$ ” levegő tömegáram állandó paraméter értékek feltüntetésével.

A 3.67 ábrán a  $\tilde{\mu}$  átlagos keverési arány látható.

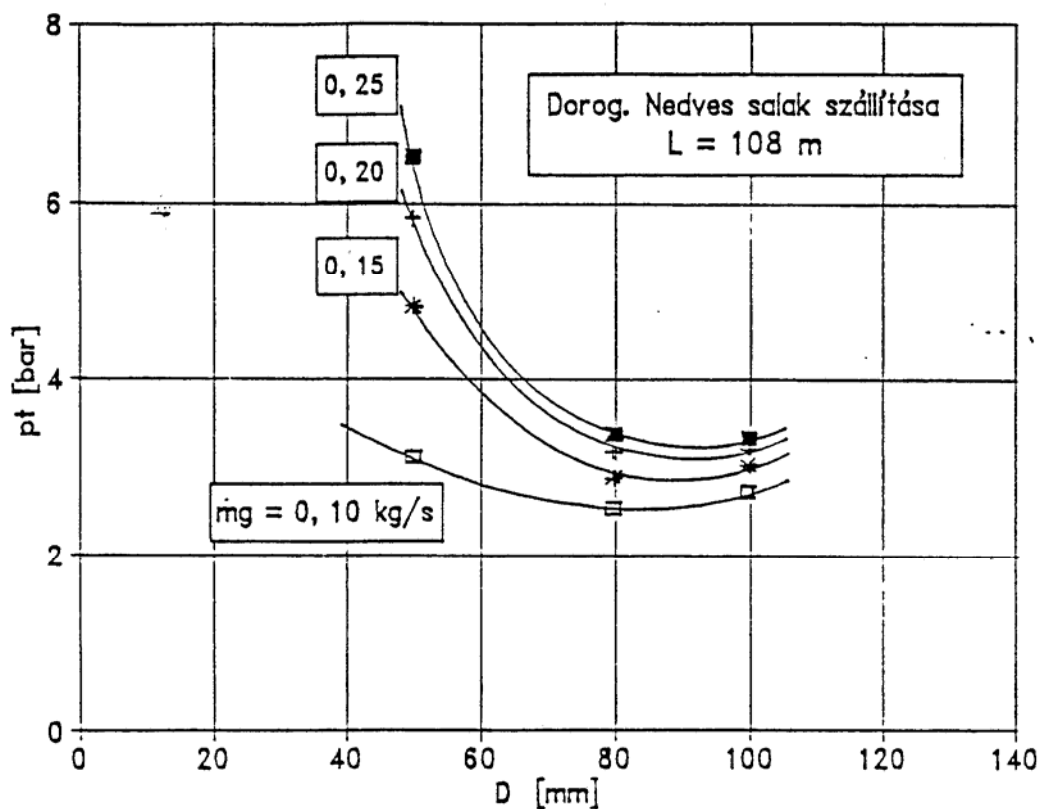
A 3.68. és 3.69. ábra az „ $\tilde{m}_a$ ” átlagos anyag tömegáramot mutatja a „D” szállítócső átmérő ill. az „A” szállítócső keresztmetszet függvényében. A görbesereg paramétere itt is az „ $m_g$ ” levegő tömegáram.

- c. Az anyag tömegáram a szállítócső átmérő növelésével nő. A növekedés mértéke a lineárisnál meredekebb. Ugyanezt a szállítócső keresztmetszete függvényében vizsgálva 1-nél kisebb hatványkitevőjű görbe adódik. Az „ $m_a$ ” anyag tömegáram a „D” csőátmérővel végül a következő alakra hozható:

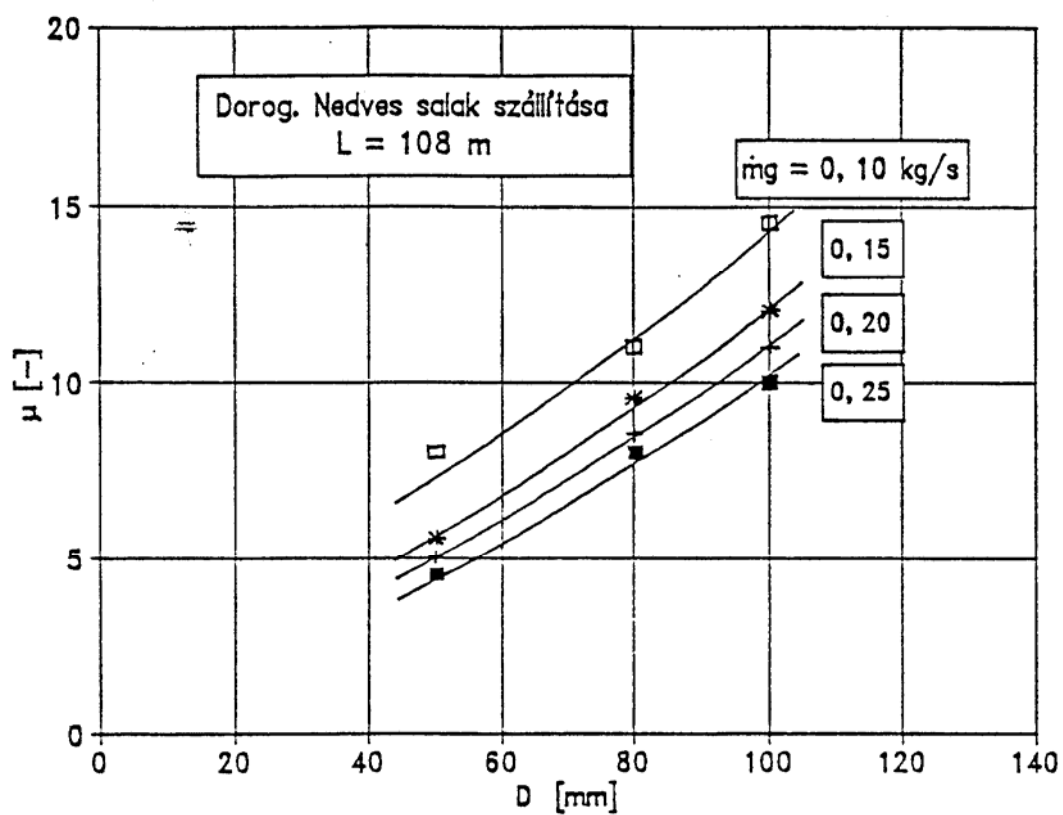
$$m_a = K D^n \quad (3.47)$$

Ahol  $1 < n < 2$

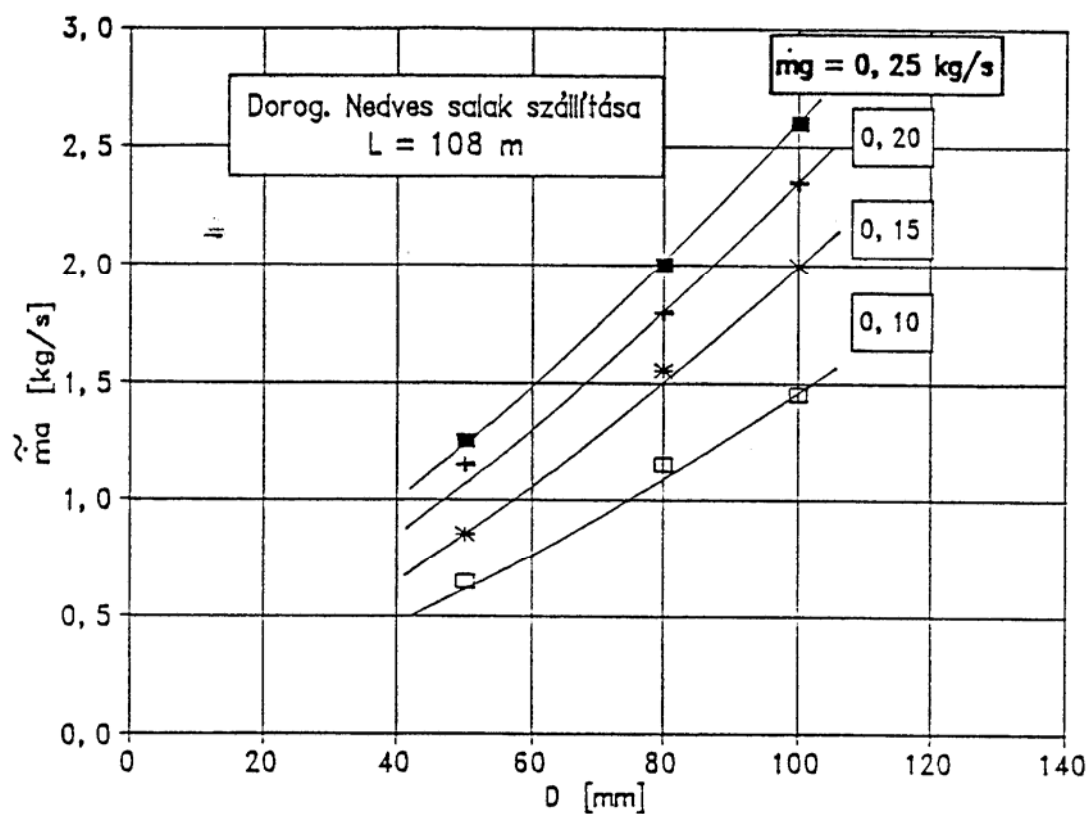




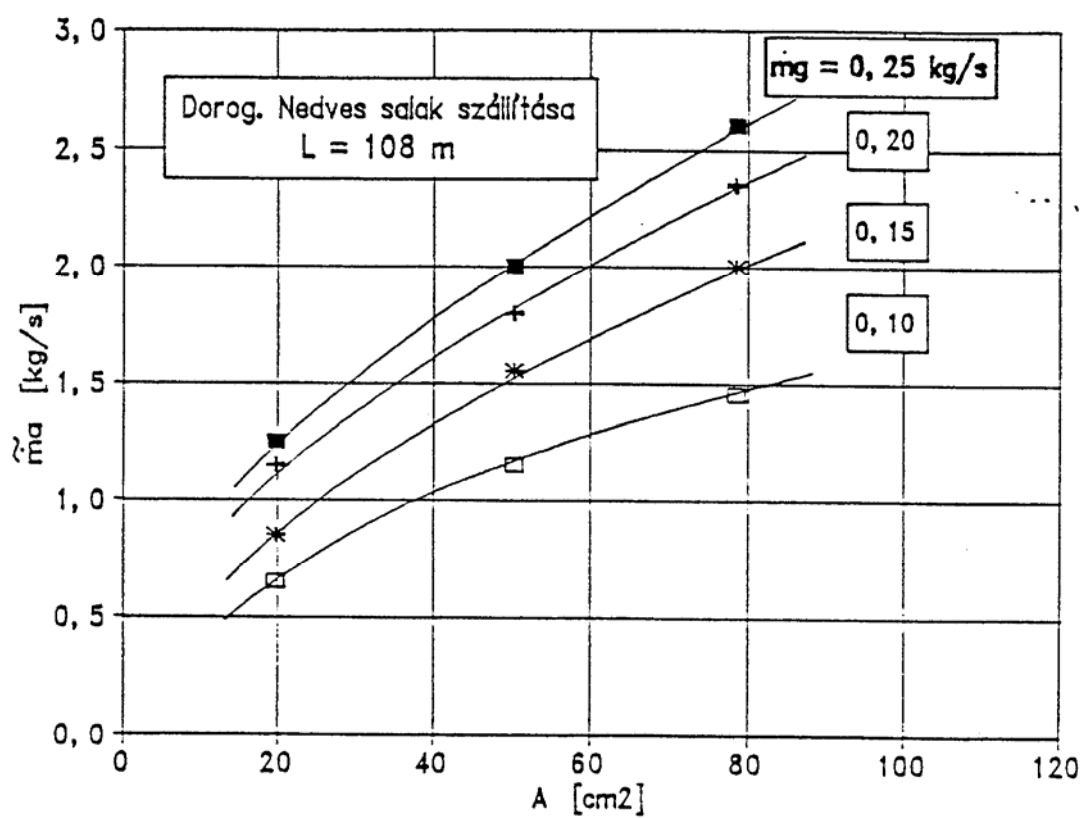
3.66. ábra. Indítótartály nyomás a szállítócső átmérő függvényében



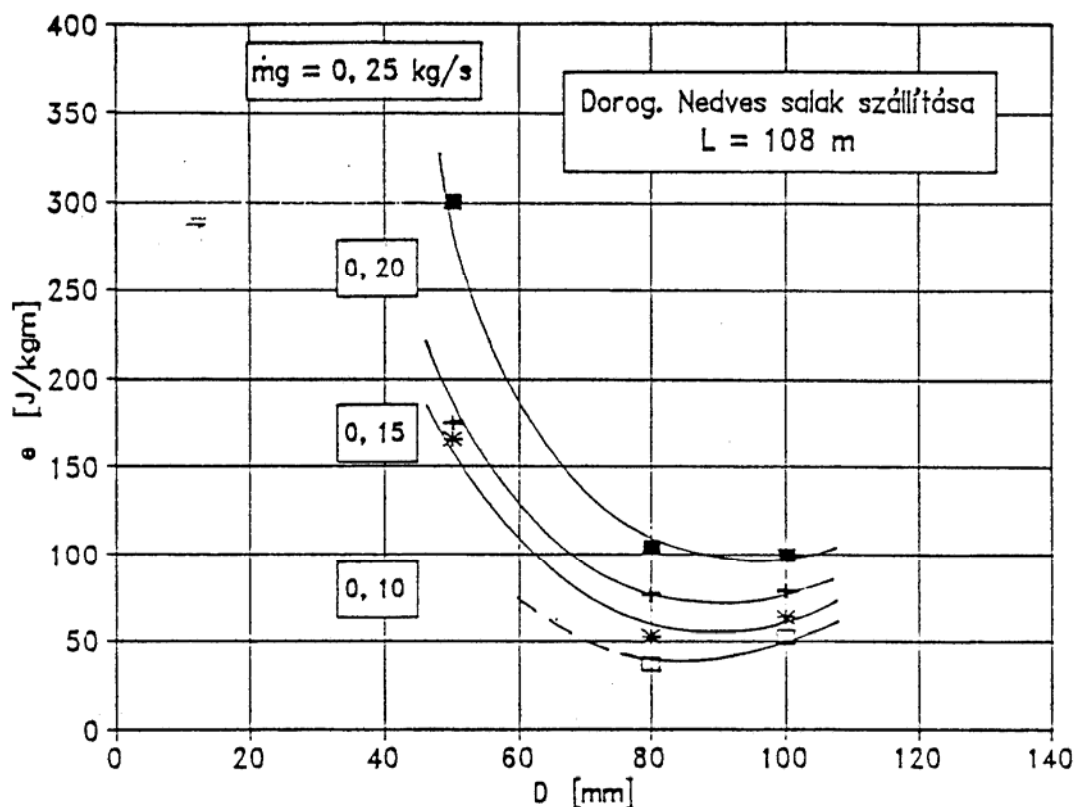
3.67. ábra. Átlagos keverési arány a szállítócső átmérő függvényében



3.68. ábra. Átlagos anyag tömegáram a szállítócső átmérő függvényében



3.69. ábra. Átlagos anyag tömegáram a szállítócső keresztmetszet függvényében



3.70. ábra. Fajlagos energiaigény a szállítócső átmérő függvényében

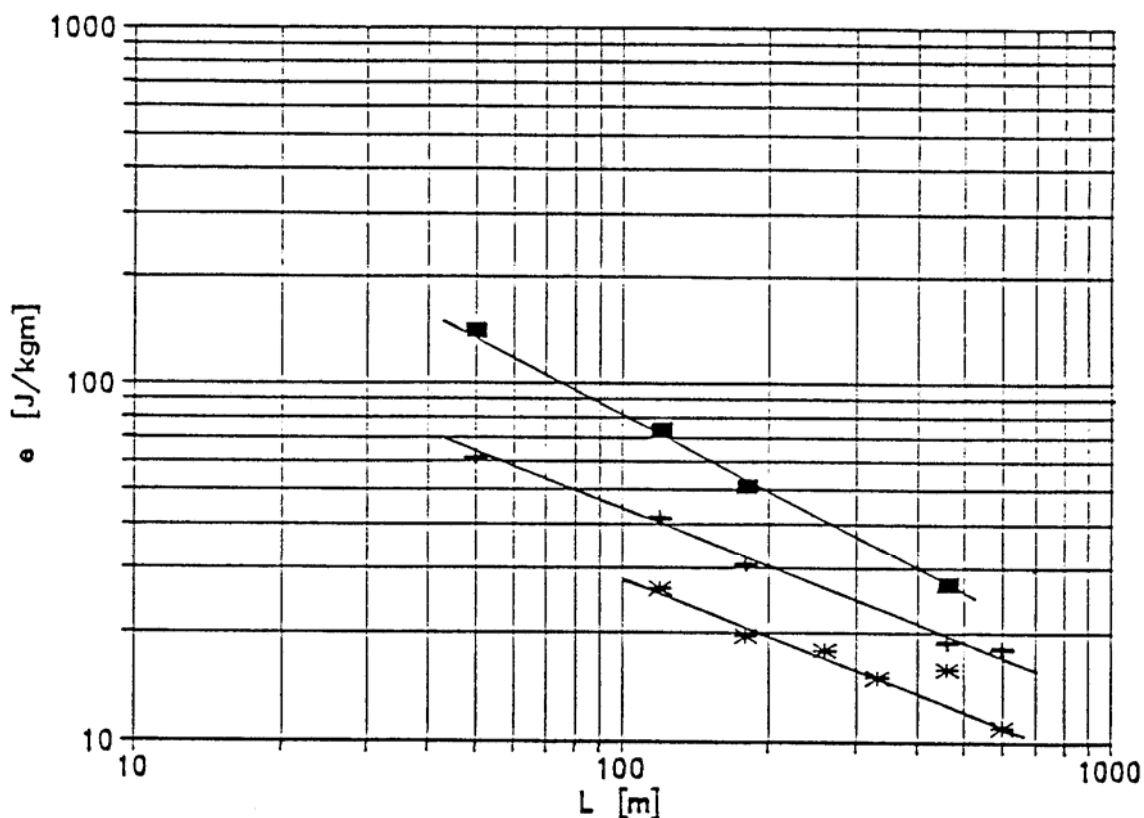
Az anyag tömegáram vizsgálatánál külön kiemelendőnek tartjuk, hogy a salak szilárdanyag tartalma a nagy nedvességtartalom miatt alig több mint a fele a bemutatottaknak, hiszen a szállításkor tulajdonképpen a szilárd salakot és a vizet körülbelül fele-fele arányban szállítottuk.

- d. Az átlagos keverési arány kicsiny értékei azt mutatják, hogy a nedves tüztéri salak pneumatikus szállítása igen nagy levegőigényű, „ $\alpha$ ” értéke az átmeneti pneumatikus szállítási tartomány alsó határa körüli. A mérési tapasztalat szerint a jelenség magyarázata a csőben áramló nedves „anyagfelhő” nagy légáteresztő képessége.
- e. A 3.70. ábrán bemutatott fajlagos energiaigény adatok – összhangban az előzőekkel – igen magas értékek, különösen az NÁ50-es szállítócső esetén, ami elsősorban a nyomás jelentős növekedésével magyarázható.

Összegezőként megállapítható, hogy a vizsgált alsó ürítésű indítótartály alkalmas nedves tüztéri salak pneumatikus szállítására. Az indítótartályhoz csatlakozó szállítócső méreteinek megfelelő megválasztásával a berendezés munkapontja tág tartományban változtatható és a kívánt értékre beállítható.

### 3.2.3. Dugós pneumatikus szállítóberendezés

Az eddig elmondottak alapján látható, hogy a felső ürítésű nyomótartályos szállítóberendezések elsősorban a jól fluidizálható – poros – anyagoknál használhatók, míg az alsó ürítésűek – a fentiekén túl – ömleszthető, szemcsés, darabos anyagok, sőt ragadós, nedves, összetapadásra hajlamos anyagok pneumatikus szállítására is alkalmasak.



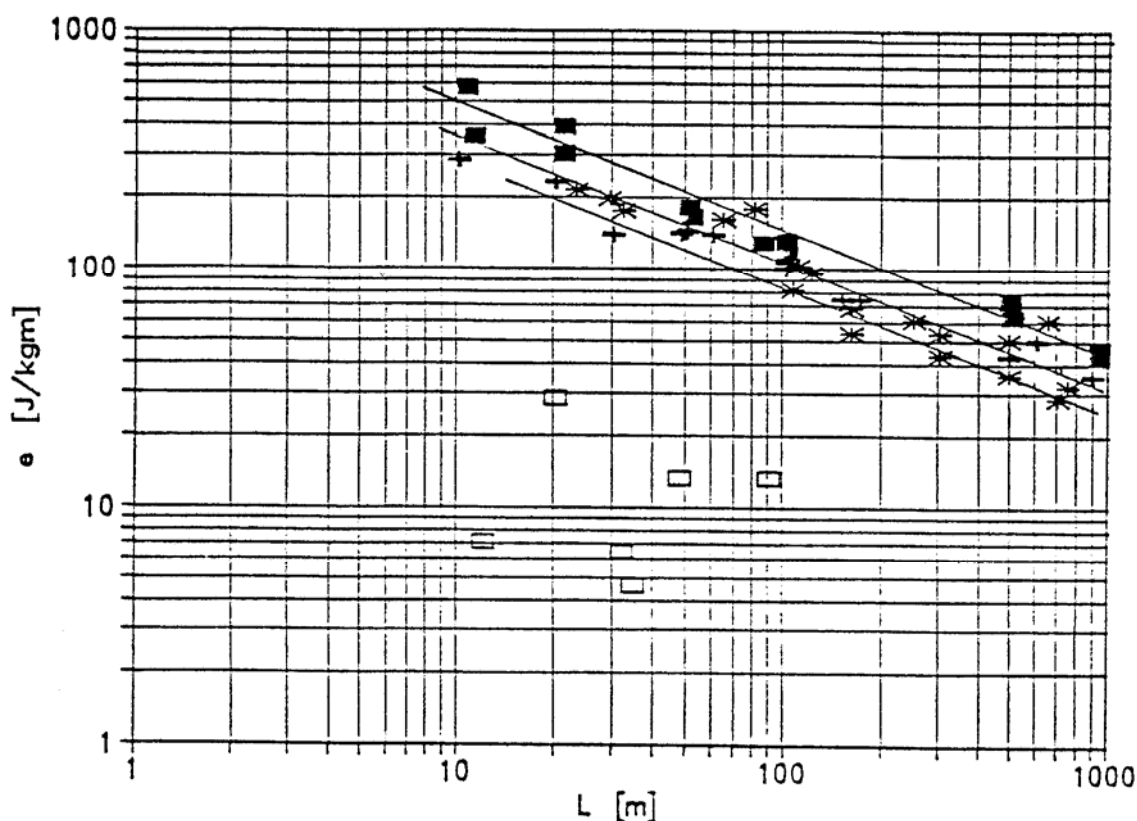
3.71. ábra. Különböző cementszállító rendszerek energiaszükségletének összehasonlítása.  
W. Flatt [63]

A kutatómunka további célkitűzése az volt, hogy egyrészt a még így sem szállítható – elsősorban nehéz és erősen kohézív – anyagok pneumatikus szállítását hogyan lehetne megoldani, másrészt hogyan lehetne további, energetikailag kedvezőbb szállítási megoldásokat keresni. Erre vonatkozó két szakirodalom [63, 64] összegző adatait az alábbiakban mutatjuk be.

A 3.71. ábra energiaszükséglet adatait a következő táblázatban összefoglalva is bemutatjuk:

		Pneumatikus cementszállító rendszerek					
		Fuller-csigás adagolóval		Hagyományos nyomótartályos		FLUIDSTST nyomótartályos	
$\dot{m}_a$	L	P	e	P	e	P	e
[t/h]	[m]	[kW]	[J/kgm]	[kW]	[J/kgm]	[kW]	[J/kgm]
100	50	196	141.0				
130	120	322	74.3			115	26.6
280	180	720	50.4			276	19.8
130	460	455	27.4			265	15.8

100	50			86	62.3		
130	120			182	14.8		
280	180			435	31.0		
130	460			315	19.1		
82	600			250	18.4	150	11.9
100	260					130	18.0
100	333					140	15.1

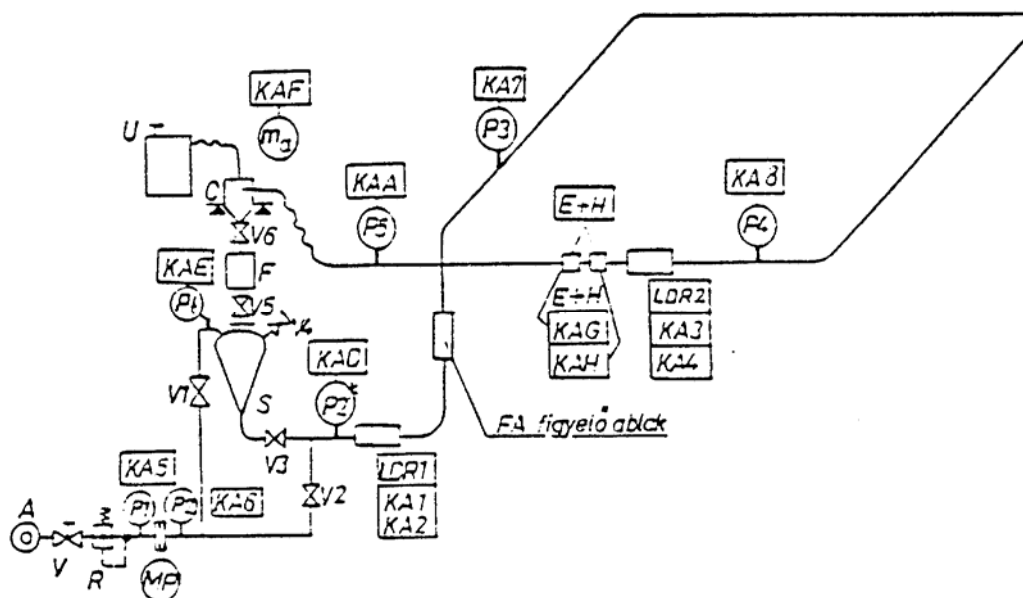


3.72. ábra. Szemcsés anyagok pneumatikus szállításának energiaszükséglete. T. Kano [64]

A fentiek érdekében a szállítócsőbe jutó anyagmennyiség méreteit és mozgásának jellemzőit kezdték vizsgálni. A szállítócsőbe beadagolandó anyag mennyiségének, a csőben kialakuló anyagdugó hosszának változtatására kétféle módszer lehetséges:

- az egyik az *adagolótartály térfogatával* szabja meg a szállítócsőbe egyszerre beadagolandó szilárd anyag mennyiségét,
- míg a másik módszer a csőbe kerülő anyagáramot „*levegőkéssel*” szabdalja fel.

Az elsőre példaként a számos gyártó cég közül a MITTELMANN cég adagolótartálya (Minisender) említhető, míg a második megoldás bemutatására a GERICKE cég Puls-Takt-Anlage elnevezésű, azaz vezérelhető levegőkéses dugós pneumatikus szállítóberendezése választható példaként. Ez utóbbi kísérleti berendezésen végzett kutatómunka eredményinek bemutatására jelen fejezet vállalkozik. A GERICKE cég Puls-Takt-Anlage elnevezésű kísérleti berendezését Karlsruheban az „Institut für Fördertechnik Abteilung Strömungsfördertechnik” laboratóriumában telepítették. A jelen fejezetben ismertetésre kerülő anyagnak rövidített német nyelvű összefoglalója is elkészült [65].



3.73. ábra. Dugós pneumatikus szállítóberendezés vázlata

A	- Sűrített levegő hálózati csatlakozás
C	- Ciklon
E+H	- ENDRESS HAUSER műszer
F	- Fogadó tartály
FA	- Figyelő ablak
KA1..8, A..H	- Adatgyűjtő csatornák
LDR1..2	- Fotocellás mérőszakaszok
MP	- Mérőperem
P1..5, t	- Nyomásmérési helyek
R	- Reduktor
S	- Adagoló tartály
U	- Utószűrő
V, V1..6	- Szelepek

A kísérleti berendezés vázlata a 3.73. ábrán látható. A dugós szállítóberendezés az ábrán „A”-val jelölt helyen csatlakozik a sűrített levegő hálózathoz. Az ábrán egy „V” jelű (Ventil) kézi szelep és egy – a változtatható nyomás beállítására szolgáló – „R” jelű reduktor van a rendszerbe beépítve. A szállításhoz felhasznált levegőmennyiség mérésére a reduktor után elhelyezett, cserélhető nyílásméretű blendesorozat tartalmazó negyedköríves belépésű „MP” jelű mérőperem szolgált. A perem előtti „P1” primer-, a perem utáni „P2” jelű szekunder nyomást HOTTINGER gyártmányú nagyfrekvenciás nyomás távadókkal mértük. A perem után a levegő két párhuzamos ágon jut a szállítóberendezésbe. Az egyik ágon a „V1” jelű mágnes szelep „t<sub>1</sub>” időtartam alatti nyitott állásában az „S” jelű adagolótartály (Senderbehälter) tetejére, míg a „V2” jelű mágnes szelep „t<sub>2</sub>” időtartam alatti nyitott helyzetében a szállítócső elejére. A két szelep felváltva működik, azaz az egyik nyitott helyzetében a másik zárt állapotban van. A kísérleti berendezés vezérlő tábláján a „t<sub>1</sub>” ill. „t<sub>2</sub>” időtartam [0.1-10.0s] intervallumban 0.1s-os lépésekben tetszőlegesen beállítható, programozható. A „V1” jelű szelep nyitott és a „V3” jelű indító szelep zárt állapotában a korábban anyaggal megtöltött adagolótartály aállítás megkezdése előtt a kívánt „pt” nyomásra (Behälterdruck) hozható. Aállítás végén, a levegő betáplálás megszüntetése után

az adagolótartály a „V4” jelű kiszellőző szelep nyitásával a mindenkori üzemi állapothoz tartozó üresjárási nyomásról légkörre nyitható a következő anyagadag lesurrantását megelőzően.

A  $D=50\text{mm}$  belső átmérőjű  $L=68.1\text{m}$  hosszúságú szállítócső hossza mentén négy helyen mértük a nyomást (az alábbi zárójelben megadott értékek a hosszkoordinátákat mutatják):

P2*	( $L=1.9\text{m}$ )	- nyomás a szállítócső elején
P3	( $L=9.5\text{m}$ )	- nyomás a függőleges szakasz után a vízszintes szakasz elején (a nyomásmegcsapolási hely megválasztása az ív utáni újragyorsítási szakasz figyelembe vételével történt)
P4	( $L=47.3\text{m}$ )	- nyomás a ciklon előtti hosszú vízszintes egyenes csőszakasz elején
P5	( $L=63.3\text{m}$ )	- nyomás a ciklon előtti hosszú vízszintes egyenes csőszakasz végén

A fenti helyeken – hasonlóan, mint a mérőperemnél – HOTTINGER nyomás távadókat használtunk.

A szállítócső két vízszintes és egy függőleges szakaszán plexi csőből készült, – az ábrán „FA” jelű – nézőablak található a kialakult dugók mozgásának megfigyelésére. Az „LDR1” ill. „LDR2” jelű szakaszok elején és végén egy-egy vízszintes fénysugár intenzitásával arányos feszültségjel mérésével a dugó mozgásjellemzőinek meghatározására nyílik lehetőség. Az „LDR2” jelű mérőszakasz után egy *Endress Hauser* (E+H) gyártmányú *GRANUCOR* megnevezésű műszer két kapacitív érzékelője volt a szállítócsőbe beépítve, amely műszer anyagebesség, anyag tömegáram ill. koncentráció mérését tette lehetővé folyamatos, egyenletes áramlás esetén.

A szállítócső végén egy ciklon ill. fogadótartály helyezkedik el az anyag-levegő keverék szétválasztására ill. az elszállított anyag gyűjtésére. A ciklon-fogadótartály együttes a flexibilis csatlakozások és a csuklós – erőmérő cellán keresztül történt – felfüggesztés révén tömegmérésre ad lehetőséget.

A *mérési módszer* ismertetésekor egyrészt beszélni kell arról, hogy a pneumatikus szállítóberendezés szabályozásához, a jelleggörbék felvételéhez milyen *paraméterek ill. független változók választása* célszerű, másrészt beszélni kell a közel egyenletes (kvázistacionárius) üzemállapot kiválasztásának szerepéről annak érdekében, hogy a kísérleti sorozat egyes mérései a jelleggörbék megrajzolásához az egymással *összevethető szállítási állapotok* adatait tartalmazzák. Szólni kell a használt *műszerek kalibrálásáról* és a számítógépes *instacionárius jelfeldolgozás* sajátosságairól.

#### *Független változók választása*

- A dugós szállítóberendezés szabályozásakor az első mérési sorozat független változójaként a reduktorral folytonosan változtatható hálózati *nyomást* ill. a mérőperem primer oldali „ $p_1$ ” nyomását választottuk.
- A második mérési sorozat független változója a  $t_1/(t_1+t_2) = t_1/T$  azaz a „ $t_1$ ” és „ $t_2$ ” levegő bevezetési időtartamokból képezett fenti arány, ami az adagolótartályba történő levegő bevezetés idejének az aránya a vezérlés periódusidejéhez, ami nem más, mint az adagolási arány. (Feststoffsenderverhältnis)
- A harmadik mérési sorozat független változója a vezérlési frekvencia, azaz az  $1/(t_1+t_2) = 1/T$  viszony, tehát a vezérlési periódusidő reciproka.

Az egyenletes üzemállapot kiválasztásának szerepe a szakaszos üzemű nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezéseknél – különösen a dugós szállítóberendezéseknél – igen jelentős, akár a tervező, akár az üzemeltető oldaláról vizsgáljuk ezt a kérdést. A fenti időintervallum kiválasztásakor természetesen le kell választani a szállítás kezdeti instacionárius szakaszát, amikor a tartály nyomásra hozása és a szállítócső anyaggal való „feltöltődése” folyik, de le kell választani a szállítás végén adódó instacionárius szakaszt is, amikor a tartály és a szállítócső kiürül ill. az üresjárási nyomásra expandál.

A fenti intervallum nagysága részben a tartály és a szállítócső térfogat-viszonyától, részben az üzemi, szállítási állapottól függ. (Nagy anyag tömegáramnál rövid *egyenletes szállítási időintervallum*, míg kicsinél hosszú adódik).

A nyomás távadókat egy  $0.02\text{kp/cm}^2$  skálaosztású, tükör hátlapos Bourdon-csöves manométerrel kalibráltuk és a kalibráláskor felvett nyomás – kimenő feszültség mérési pontjaira regresszióval a legjobban simuló egyeneseket illesztettünk, majd a kiértékelést ezekkel végeztük el. A szállítási mérési sorozat végén ellenőrző kalibrálást végeztünk. A ciklon-fogadótartály együttesben tárolt anyagtömeg kalibrálását hitelesített súlyokkal végeztük el és az ebből adódó tömeg – feszültség regressziós lineáris függvényével számoltunk.

Az érzékelőktől származó analóg jelek analóg-digitális átalakítására a 16 csatornás instacionárius jelfeldolgozó szoftver segítségével történt kiválasztás alapján 50ms-os időlépésenként került sor.

Az adatgyűjtés és jelfeldolgozás korlátjaként megemlítenő, hogy a laboratóriumba telepített IBM AT286-os számítógép memória kapacitása maximum 204s időtartam alatt volt képes a jelek tárolására, ami az 50ms-onkénti jelkiolvasással csatornánként 4080 adatot jelentett. Megjegyezzük, hogy a fenti adatgyűjtési időtartam minden esetben a szakaszos üzemű szállítás középső, kvázistacionáriusnak tekinthető szakaszára esett és a szállítási kísérletek során a fenti adatgyűjtési időszak 160-204s tartományban változott a szállítási állapot függvényében, amiből jó korreláció függvényeket nyertünk.

Az adatgyűjtés a *Ziegler* nevű szoftver segítségével történt, ami a puffer „belecsorgó” rendszerű feltöltését jelentette, azaz a 204s-on túlnyúló adatgyűjtés során a memória puffer az elejétől újraindult. Ez utóbbi jelenség különösen a mérlegelési adatok feldolgozásánál külön figyelmet igényelt.

A 3.73. ábrán látható érzékelők és az 1-8 ill. A-H csatornaosztások összerendelését a következő táblázat tartalmazza:

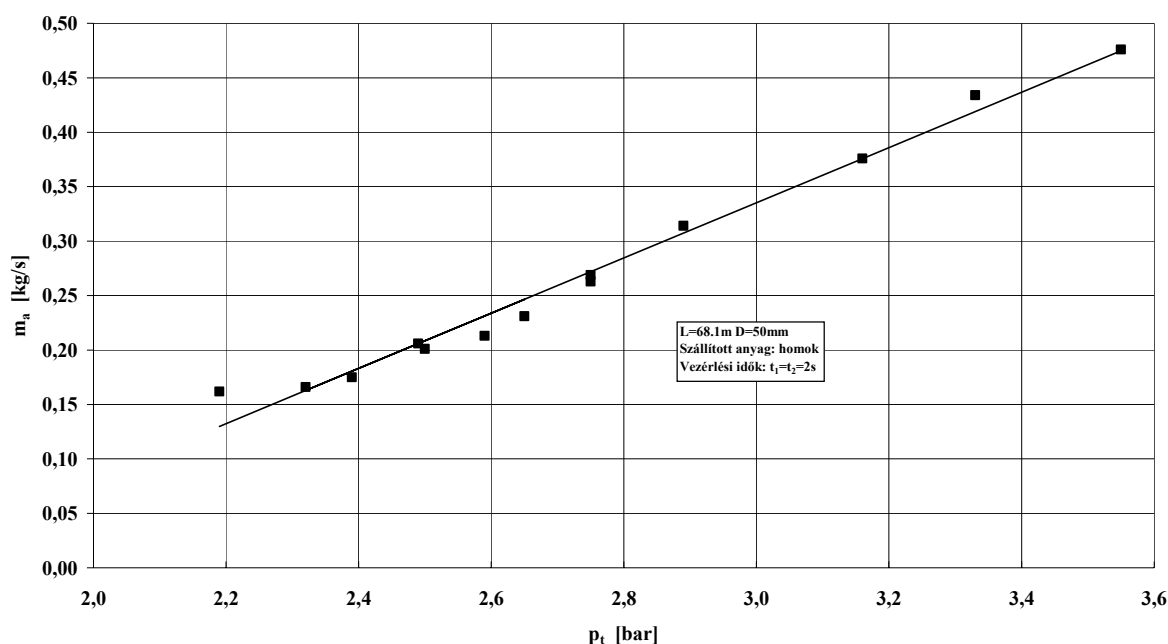
Az érzékelő		A csatorna jele
jele	megnevezése	
P1	nyomás a mérőperem előtt	KA5
P2	nyomás a mérőperem után	KA6
P2*	nyomás a szállítócső elején	KAD
P3	nyomás a szállítócső függőleges szakasza utáni vízszintes szakasz elején	KA7
P4	nyomás a szállítócső utolsó vízszintes egyenes szakaszának elején	KA8
P5	nyomás a szállítócső végén	KAA
Pt	tartálynyomás	KAE



LDR1 vorn	fénysugár a plexi mérőszakasz elején	KA1
LDR1 hinten	fénysugár a plexi mérőszakasz végén	KA2
LDR2 vorn	fénysugár a plexi mérőszakasz elején	KA3
LDR2 hinten	fénysugár a plexi mérőszakasz végén	KA4
EH1	ENDRESS HAUSER műszer eleje	KAG
EH2	ENDRESS HAUSER műszer vége	KAH
ma	anyagtömeg	KAF

A kísérleti kutatómunka áttekinthetősége érdekében a mérési sorozatok jellemzőit, állandó paramétereit az alábbiakban foglaljuk össze:

- **Első mérési sorozat:**  $t_1 = 2s$  – az adagolótartályba bevezetett levegő vezérléséhez beállított időtartam, amely alatt a „V1” jelű mágnesszelep nyitott helyzetű;  $t_2 = 2s$  – az anyagdugók megszakítása céljából a szállítócső elejéhez, a pulzátor ágban áramló levegő vezérléséhez beállított időtartam, amely alatt a „V2” jelű mágnesszelep nyitott helyzetű; a mérési sorozat változó paramétere a *nyomás*
- **Második mérési sorozat:**  $T = t_1 + t_2 = 4s = konst.$ ; a mérési sorozat változó paramétere a *„ $t_1/T$ ” anyagadagolási arány*
- **Harmadik mérési sorozat:**  $t_1/t_2 = 1 = konst.$ ; a mérési sorozat változó paramétere *„ $f=1/T$ ” a vezérlési frekvencia*



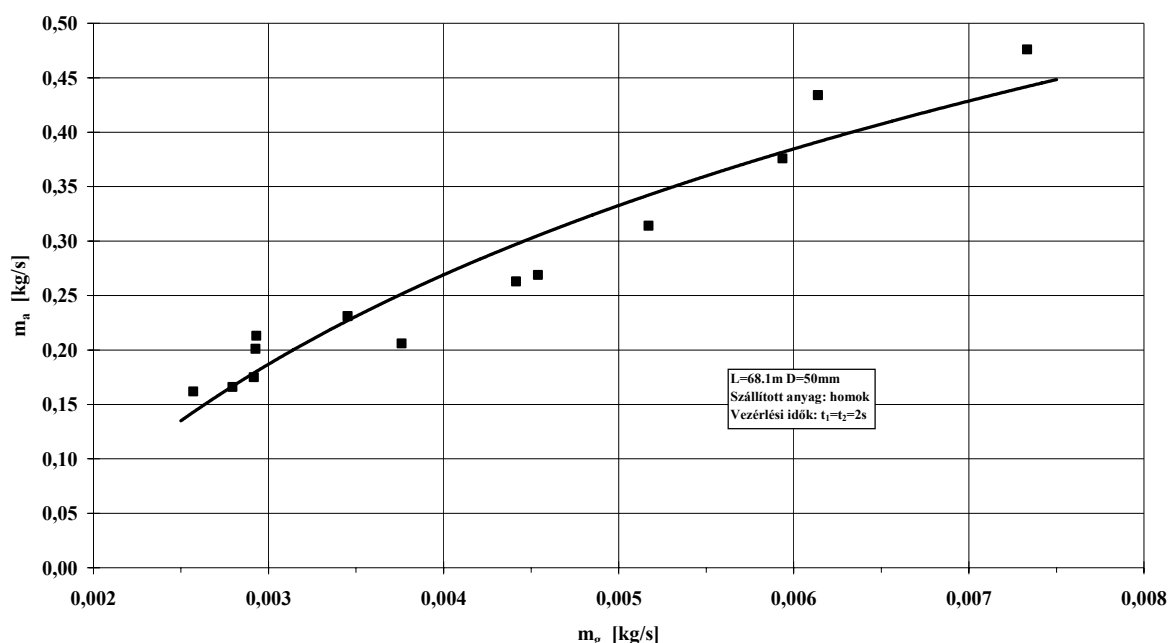
3.74. ábra. Az anyag tömegáram tartálynyomás szerinti változása

A 3.74. ábra az anyag tömegáram és a tartálynyomás közötti összefüggést mutatja és a görbe jellege összhangban van a BME Vízgépek Tanszéke Kutatólaboratóriumában telepített kísérleti nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezésen szerzett tapasztalatokkal, azaz a nagyobb nyomású adagolótartály ill. szállítóvezeték munkapontjában nagyobb anyag tömegáram adódik.

Az „ $\dot{m}_a$ ” anyag tömegáram számítása a mérlegelési jelek felhasználásával az alábbiak szerint történt:

Mivel a mérlegelésnél a fogadótartályba érkező anyagtömeg időbeni növekedése a regisztrátumból kiolvasható, így ez az állandó meredekségű szakasz az egyenletes üzemállapotra jellemző stacionárius anyag tömegáramot adja. Meg kell azonban jegyezni, hogy a dugós szállításnál – különösen a kis nyomások, kis levegő tömegáramok, kis sebességek tartományában – az anyag egymástól egyre inkább elkülönülő adagokban, kvantumokban mozog a szállítócsőben és természetesen ez a mérlegelhető fogadótartály jelen is hasonlóan érzékelhető. Lényegesnek tartjuk kiemelni, hogy a mérési sorozatban állandó vezérlési frekvencia ellenére *a dugó mozgásának méréssel meghatározott frekvenciája a vizsgált tartományban jelentősen változott*. Ezt azzal magyarázzuk, hogy a levegőkéssel létrehozott dugók a függőleges szakaszban felbomlottak és a szállítócső vonalvezetése, méretviszonyai és a szállítási állapot szerint spontán dugóképződéssel rendeződtek.

A 3.75. ábrán bemutatjuk (ugyanezen mérési sorozat egyenletes szállítási állapota során) a fenti anyag tömegáramokhoz tartozó szállítólevegő tömegáram szerinti függvénykapcsolatot, ami a vizsgált tartományban a mérések szerint a nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezéseknél bemutatottakhoz hasonló jellegű.

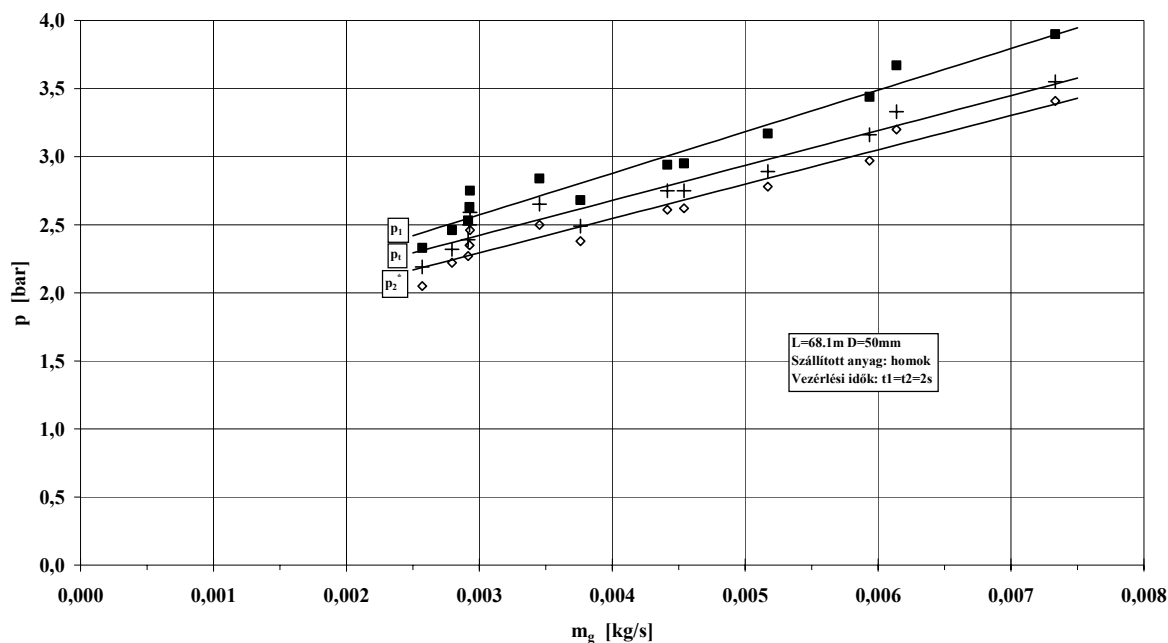


3.75. ábra. Az anyag tömegáram levegő tömegáram szerinti változása

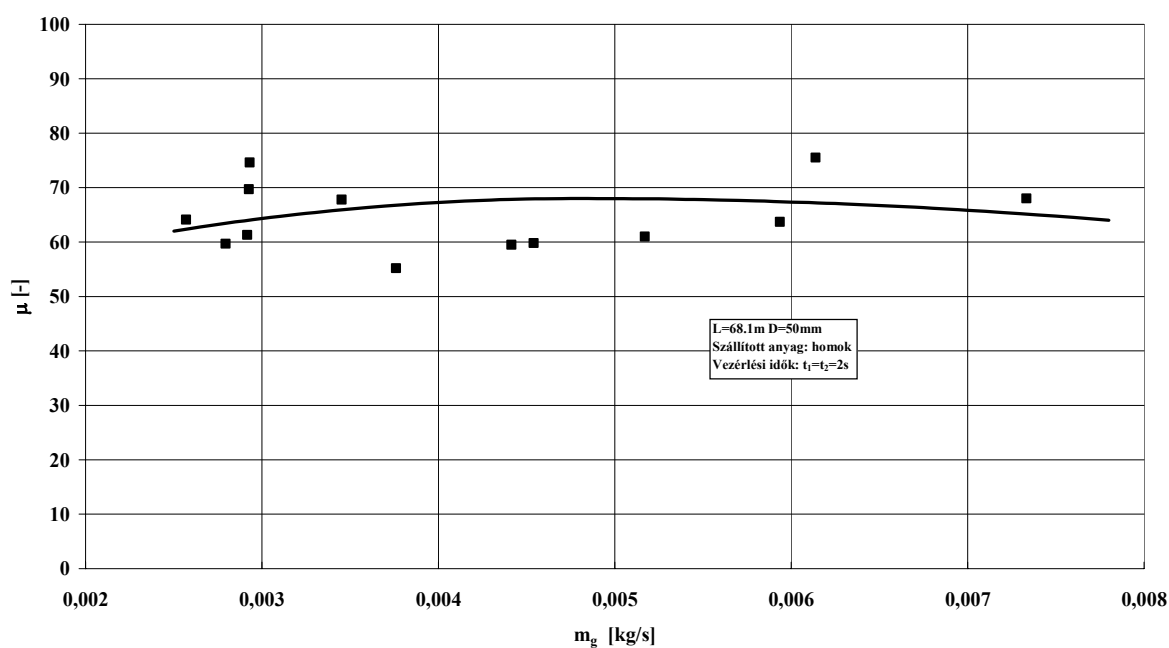
Az előző két ábra közvetve tartalmazza a tartálynyomás és a levegő tömegáram kapcsolatát is, ami a 3.76. ábra egyik görbéje is egyúttal. A 3.76. ábrán három – a berendezésre jellemző – nyomás alakulását tüntettük fel. Ezek:

- „ $p_1$ ” - a sűrített levegő hálózat nyomása
- „ $p_t$ ” - a tartálynyomás
- „ $p_2^*$ ” - a szállítócső elején lévő nyomás

Természetesen itt is, mint az összes diagramon egy-egy pontot az adott – időben változó – jelnek a teljes, memóriában tárolt, (azaz a stacionárius szállítási állapot időintervallumában rögzített) értékek integrálataként számítottuk.



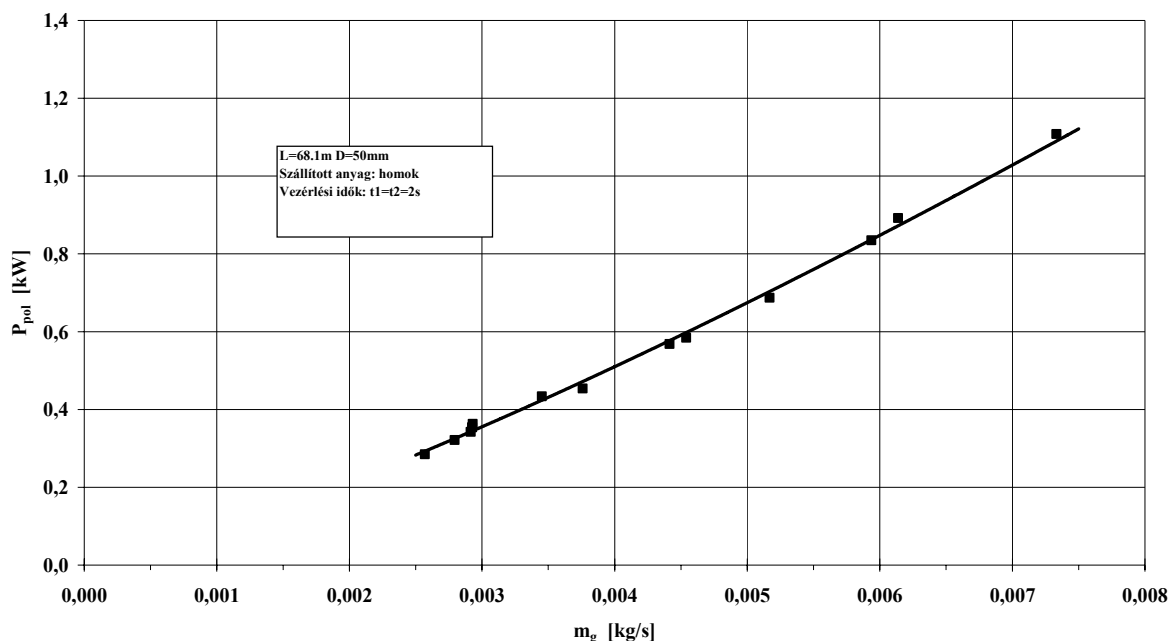
3.76. ábra. A nyomások levegő tömegáram szerinti változása



3.77. ábra. A keverési arány levegő tömegáram szerinti alakulása

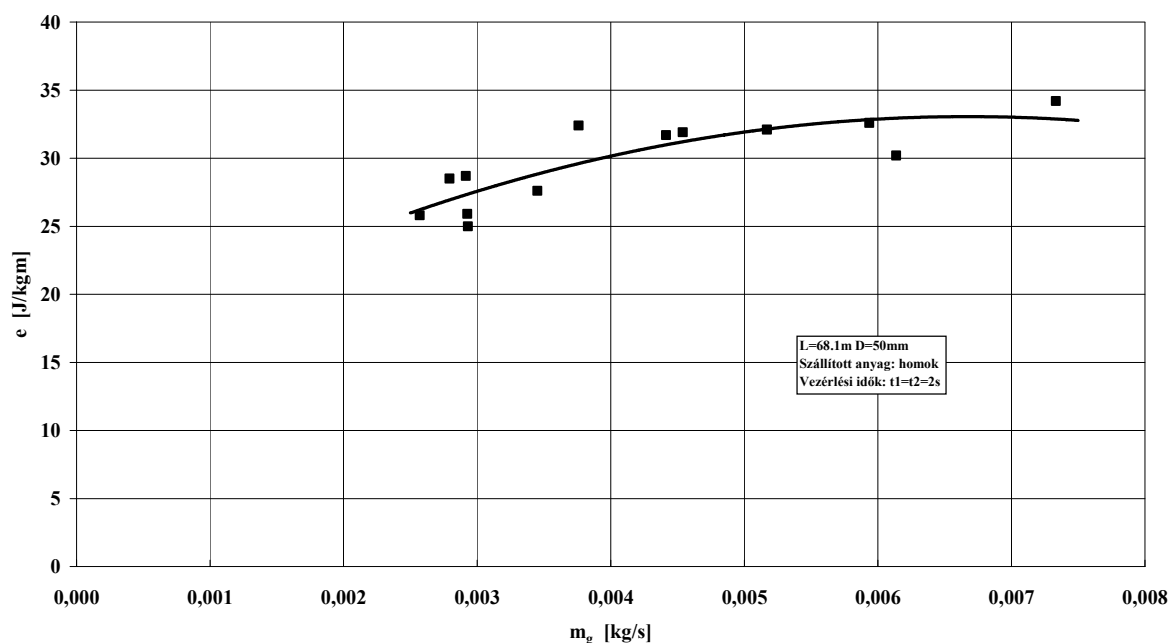
A 3.77. ábrában bemutatott keverési arány levegő tömegáram összefüggés, – eltekintve a pontok pneumatikus szállítási méréseknél szokásos viszonylag nagy szórásától – a vizsgált tartományban közel állandó. A mérési pontok közé rajzolt vonal összhangban van a 3.75. ábrán a mérési pontok közé rajzolt simított görbével.

A 3.78. ábrán a szállítás politróp teljesítményszükséglete látható a levegő tömegáram függvényében. Ebben a görbében – amint az a számítási összefüggésből is közvetlenül kiolvasható – együtt jelentkezik a nyomás és a levegő tömegáram változásának hatása.



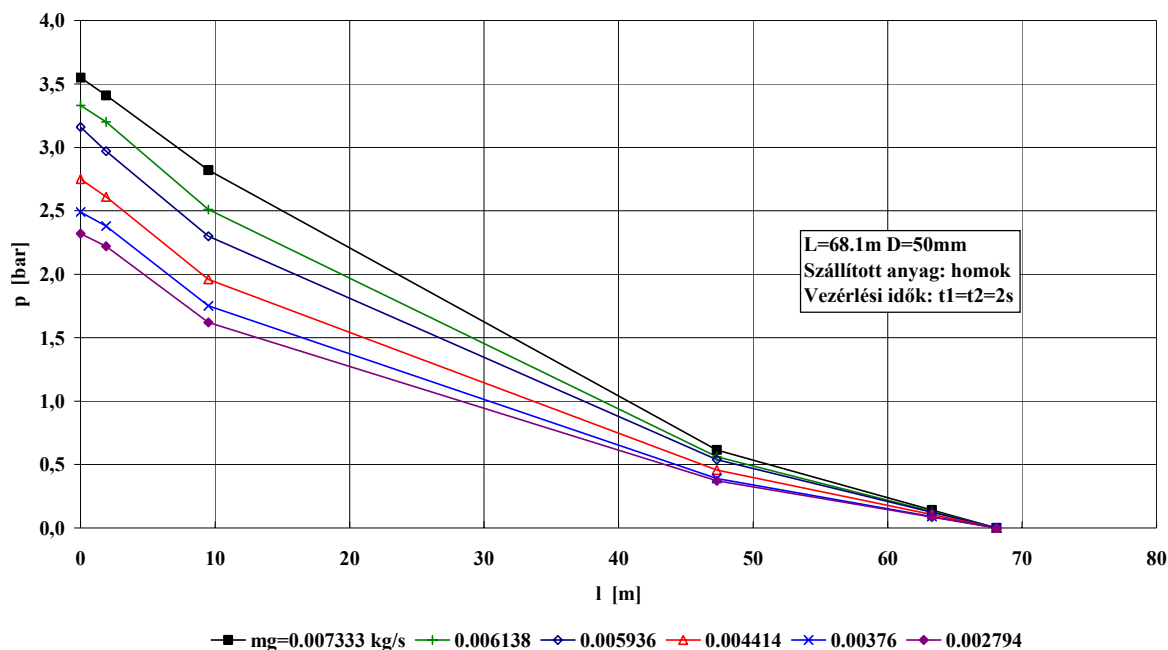
3.78. ábra. A teljesítmény levegő tömegáram szerinti alakulása

A 3.79. ábra a szállítás fajlagos energiaigényét mutatja, amely mennyiség éppen a definíciója – a szállítócső hosszegységére és az anyagtömeg egységére vonatkoztatás – alapján jó összehasonlíthatósági lehetőséget teremt különböző anyagfajták, más-más berendezésen történő szállításának energetikai minősítéséhez.



3.79. ábra. A fajlagos energiaigény levegő tömegáram szerinti alakulása

A 3.80. ábrán a mérési sorozatból néhány mérést kiragadva bemutatjuk a szállítócső hosszmenti nyomáeloszlás görbéket. Paraméter a levegő tömegáram. Az  $l=0$  helyen felrajzolt pontok a tartálynomás értékeit jelölik. A grafikus szoftver a pontokat egyenessel köti össze, de természetesen a valóságban a hosszmenti nyomáeloszlás görbék alakja – részletes feldolgozása a4. fejezetben található) – ettől eltérő és töréseket nem tartalmaz.



3.80. ábra. Szállítócső hosszmenti nyomáeloszlás

A szállítócső elején adódó nagyobb meredekség a kis sebességű mozgás, a nagy nyomáshoz tartozó nagy levegősűrűség, valamint a beépített függőleges csőszakasz és az ahhoz kapcsolódó ívek következménye.

A szállítócső három helyén beépített – a 3.73. ábrán hosszú téglalapokkal jelölt („LDR1”, „FA”, „LDR2”) – plexi csőszakaszokban a dugók mozgása vizuálisan megfigyelhető volt. A vízszintes helyzetű „LDR1” és „LDR2” jelű szakaszok elején és végén egy-egy fénysugár átbocsátásával és fotodiódás érzékelésével az ablakok a dugók mozgásának mérésére is lehetőséget nyújtottak.

A függőleges csőszakasz a levegőképes vezérléssel létrehozott dugókat minden esetben felbontotta, összetörte és átrendezte a mindenkori szállítási állapothoz tartozó fő üzemtani jellemzők értékeitől függően más és másmódon, így a függőleges szakaszban a rendezetlen áramkép, esetenként az anyag visszahullás miatt csupán vizuális megfigyelésre nyílt lehetőség.

A dugó mozgásának vizsgálata során az „LDR2” helyen a szabad szemmel történt megfigyelések alapján az alábbi megállapodások tehetők:

A dugót alkotó szemcsék egy igen jellegzetes áramkép szerint egymáshoz képest mozognak, tehát nem beszélhetünk állandó hosszúságú dugóról. Részletesen megfigyelve a részecske mozgást megállapítható egyrészt, hogy létezik a cső alsó felében lerakódott szemcséknek egy leülepedett rétege és azok a részecskék, amelyekből a dugó összetevődik váltakozva cserélődnek a lerakódott részecskékkal a dugó cső menti mozgása során. Az alsó, közelítőleg nyugalomban lévő réteg a dugó homlokfelületén szétszóródik, a mozgó homlokfelület felszed szemcséket, amely szemcsék kikerülve ebből a rétegből „felhőt” képeznek. A dugók homlokfelületén a részecskék áramlása egyfajta örvénylő mozgást mutat. A dugó hátoldalán a részecskék nyugodt, sima felületet alkotnak és egyenként lerakódva újra közel nyugalomban lévő réteget formálnak. Amikor a részecskék cserélődése a homlokfelületen és a hátoldalon ugyanolyan arányú a dugó egyenletesen mozog a cső mentén. Ilyen egyenletes mozgási fázis

során a mérési sorozatban vizsgált nagy levegő tömegáramoknál a cső alján kialakult nyugvó réteg körülbelül a csőátmérő egyharmadáig, míg kis levegő tömegáramoknál az átmérő 50-60%-áig helyezkedik el és a dugó ezen réteg felett haladó hullámként mozog, azaz a szállítócső teljes keresztmetszete nincs kihasználva.

Ugyanilyen jellegű konkrét mérésekről számol be Tsuji és Morikawa [66] 1.1 mm átlagos átmérőjű polietilén gömbszemcséket tartalmazó anyagszállítási kísérleti eredményeinek bemutatása során.

Fentiekhez kapcsolható Roggenkamp és Fricke [67] leíró, tájékoztató jellegű cikkében a Braun-Angott KG cég méréseiről szóló következő ismertetése:

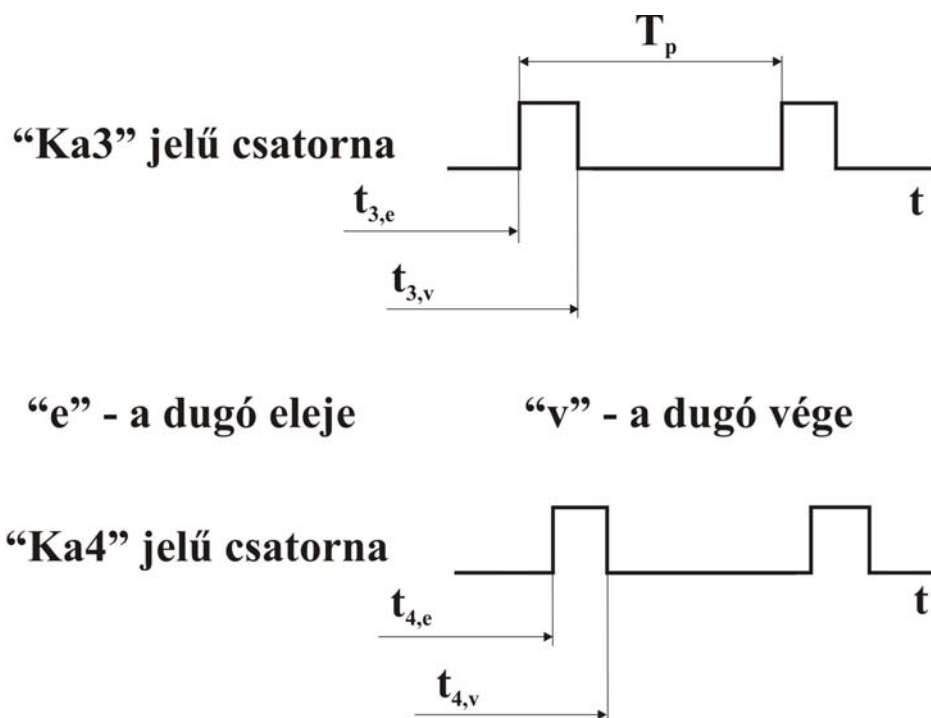
Kvarchomok szállításakor két dugó között a szállított anyag kb. 1/3 rétegmagasságban teljesen nyugalomban van. A tulajdonképpeni dugók részben gördülve mozognak előre, amely mozgás azáltal jön létre, hogy a nehézségi erő hatására a nyomásesés a dugó felső részén a legkisebb és a szállítócső fenekén a legnagyobb, a levegő a felső rétegeket gyorsabban, az alsó rétegeket lassabban képes előre mozgatni. A szállítandó anyag a dugó előtt lefelé csúszik a nyugalmi állapotban található anyagrétegre, az utána tolódó anyag pedig ismét dugót képez úgy, hogy az egyik pillanatban az adott helyen az egész szállítócső teljesen meg van töltve mozgó anyaggal, míg ugyanott előzetesen csak kb. 1/3 csőátmérő magasságú nyugvó anyagréteg helyezkedett el. A kísérleteik azt mutatták, hogy az egyes dugó szállítási sebessége az ilyen berendezésekben kb. 50%-kal kisebb, mint a levegő sebessége. A levegőfogyasztás is lényegében attól függ, mennyire távolodtak el egymástól az egyes dugók. Ez tehát annyit jelent – a hivatkozott szerzők szerint –, hogy a tulajdonképpeni toloszállítás a legkisebb levegőigényű és a dugós szállítás az egyre nagyobbá váló egyedi dugók révén több levegőt fogyaszt. Az aláhúzással kiemelt következtetést saját mérési eredményeim szerint nem helytálló, mivel a levegőfogyasztás növekedése a csőben egyre ritkábban előforduló dugók, azaz a dugók közötti megnövekedő levegőhólyagok következménye (Részletes, mérési adatokkal alátámasztott elemzését lásd ezen fejezet további részében).

A dugó mozgásának vizsgálata során az „LDR2” helyen mért jelekből a mozgásjellemzőket az alábbiak szerint határoztuk meg:

Minden szállítási mérés után a számítógép memóriájában tárolt – 204 s-os intervallumban rögzített –, feszültségugrási „helyekhez”, azaz a dugófront illetve a dugóhátlap adott mérőhely előtti elhaladásához tartozó időpontokat kigyűjtöttük. Fenti időpontok – az „LDR2” szakasz elején („KA3” jelű csatorna) és az „LDR2” szakasz végén („KA4” jelű csatorna) – felhasználásával integrálátlagként kiszámítottuk az alább felsorolt mennyiségeket:

$T_p$	[s]	- a dugómozgás periódusideje
$L_d$	[m]	- dugóhossz
$v_d$	[m/s]	- dugósebesség
$t_d$	[s]	- a perióduson belül a dugó (Pfropfen) mérőhely előtti elhaladásának ideje
$t_g$	[s]	- a levegőhólyag (Luftblase) elhaladás ideje
$f_d = 1/T_p$	[Hz]	- a dugómozgás frekvenciája

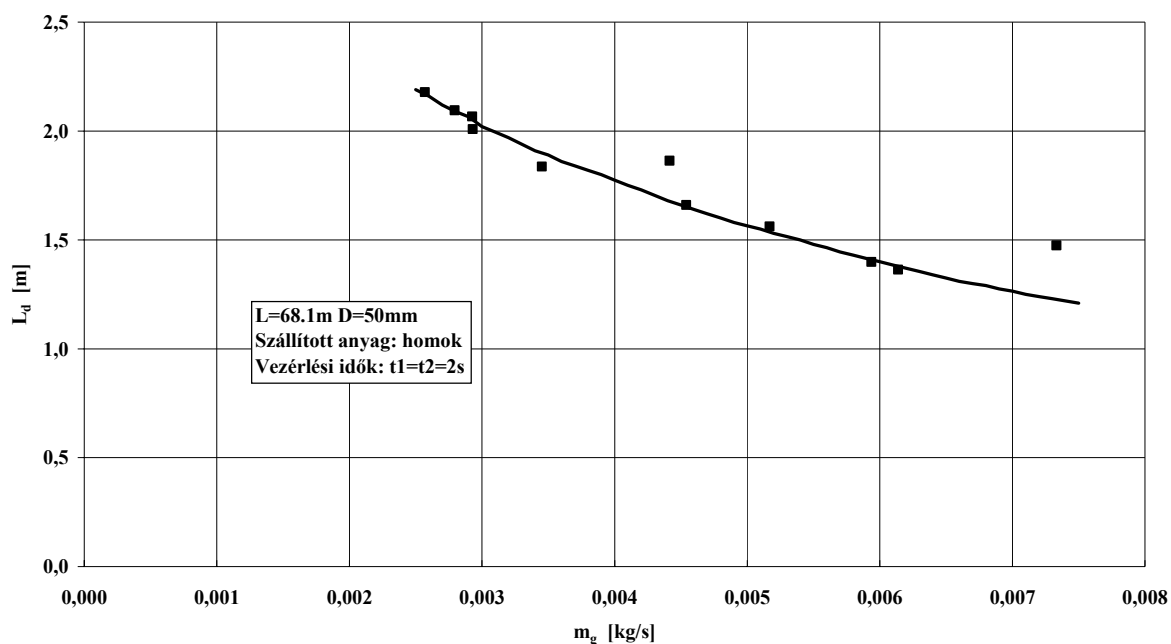
Megjegyezzük még, hogy a dugó sebességét a homlokfelület és a hátlap sebességeinek átlagaként értelmezzük.



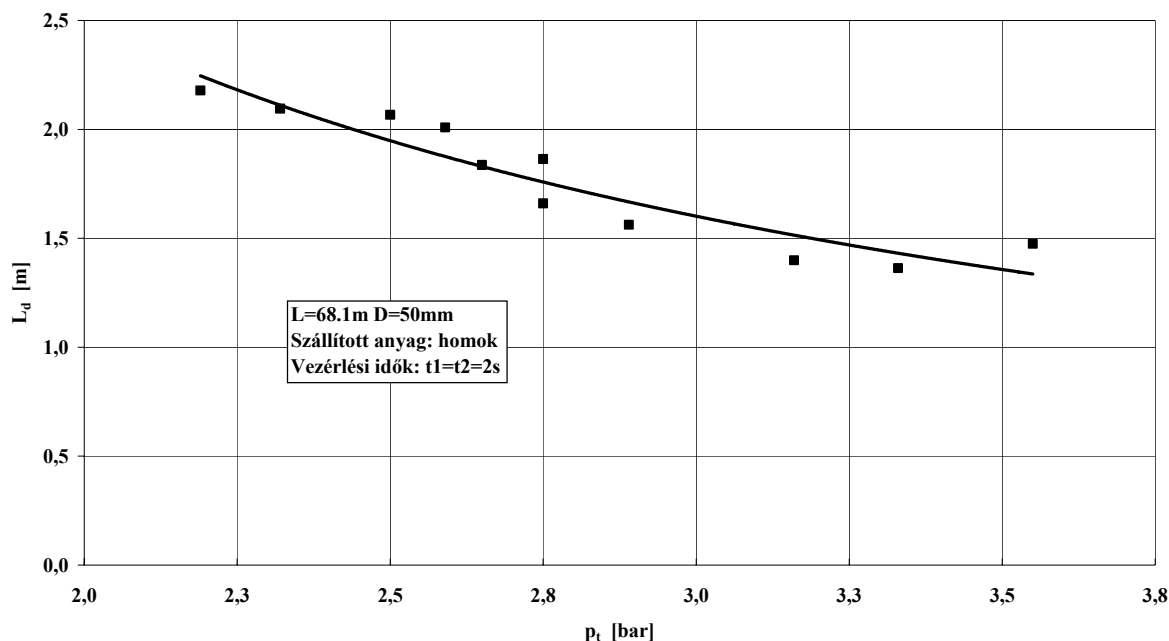
3.81. ábra. A fotódetektor jelei

A jobb érthetőség érdekében a fotódetektorok jeleit és a számításhoz szükséges adatokat a 3.81. ábrán mutatjuk be.

A 3.82. ábra a dugóhossz – levegő tömegáram függvénykapcsolatot tartalmazza. Az ábrából látható, hogy a vizsgált tartományban *a szállító levegő tömegáramának növekedése a dugóhossz csökkenését eredményezi*. Mivel a 3.76. ábra szerint a nyomás és levegő tömegáram kapcsolat közel lineáris, így az is megállapítható, hogy *a dugóhossz a nyomás növekedésével is csökken*, amint azt a 3.83. ábrán be is mutatjuk.

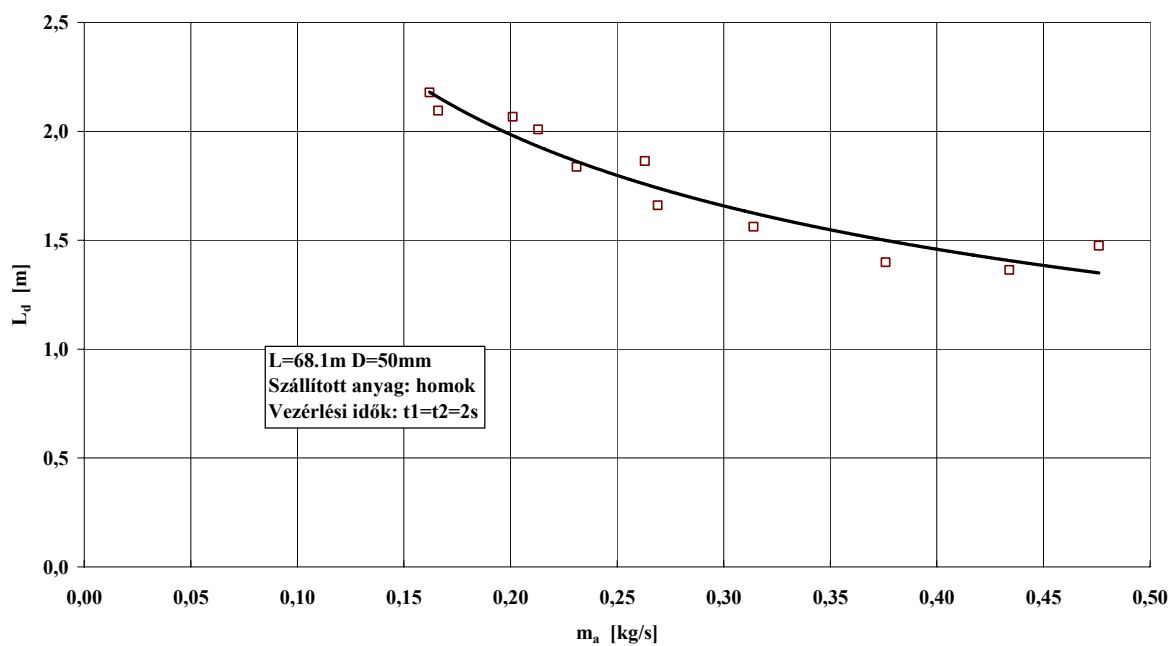


3.82. ábra. Dugóhossz – levegő tömegáram függvénykapcsolat



3.83. ábra. Dugóhossz – tartálynyomás függvénykapcsolat

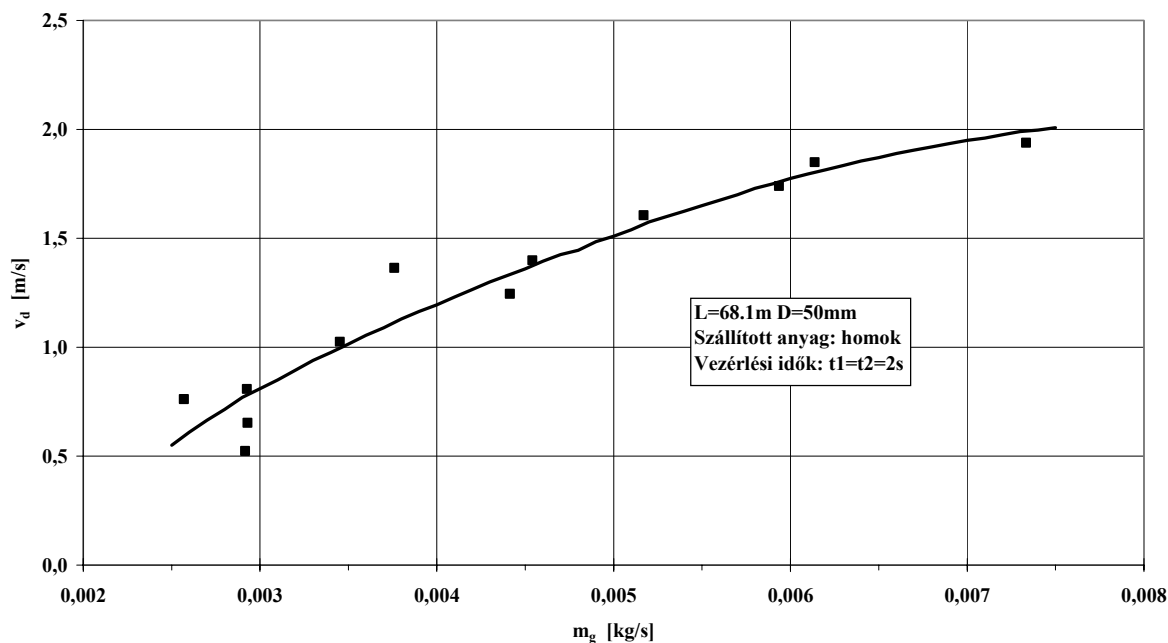
A dugóhossz közvetlenül az anyag tömegárammal is összefügg, mely függvénykapcsolatot a vizsgált tartományban a 3.84. ábra tartalmazza.



3.84. ábra. Dugóhossz – anyag tömegáram függvénykapcsolat

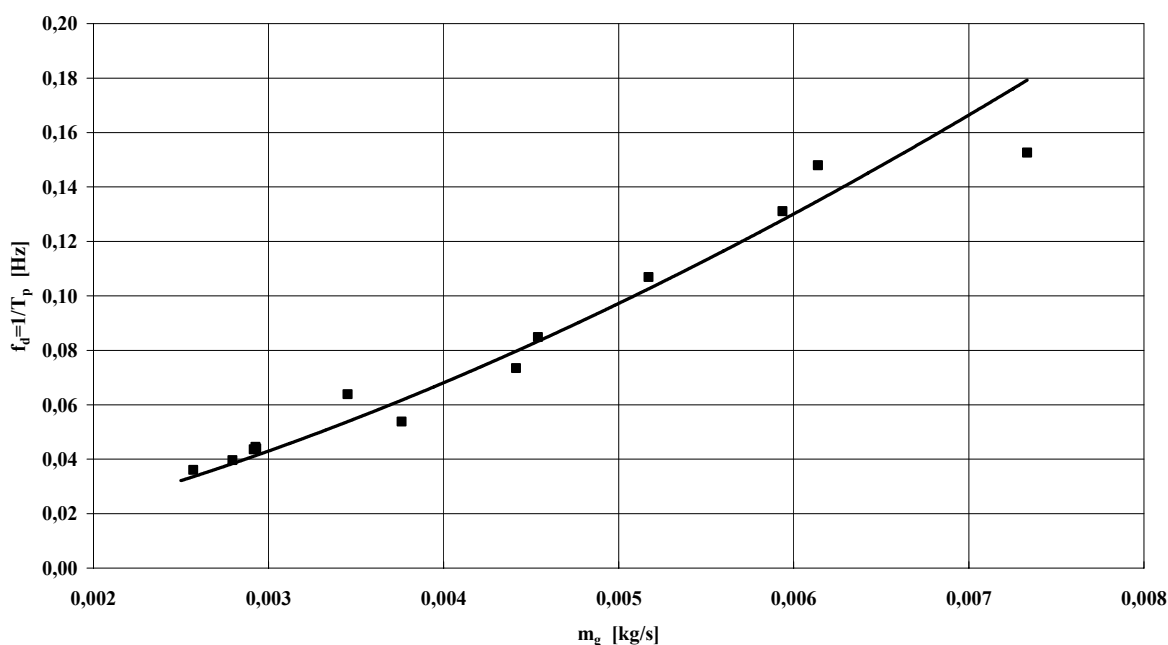
A 3.85. ábrán a dugósebesség szállítólevegő tömegárama szerinti változását mutatjuk be. A növekvő levegő tömegáram értékekhez egyre nagyobb dugósebesség tartozik. Különösen jelentősnek ítéljük, hogy az „LDR2” jelű mérőszakasz beépítési helyén, azaz a szállítóvezeték végéhez közel is igen kicsiny dugósebesség értékek adódtak, ami a kíméletes anyagszállításhoz jól megfelel.





3.85. ábra. Dugósebesség – levegő tömegáram függvénykapcsolat

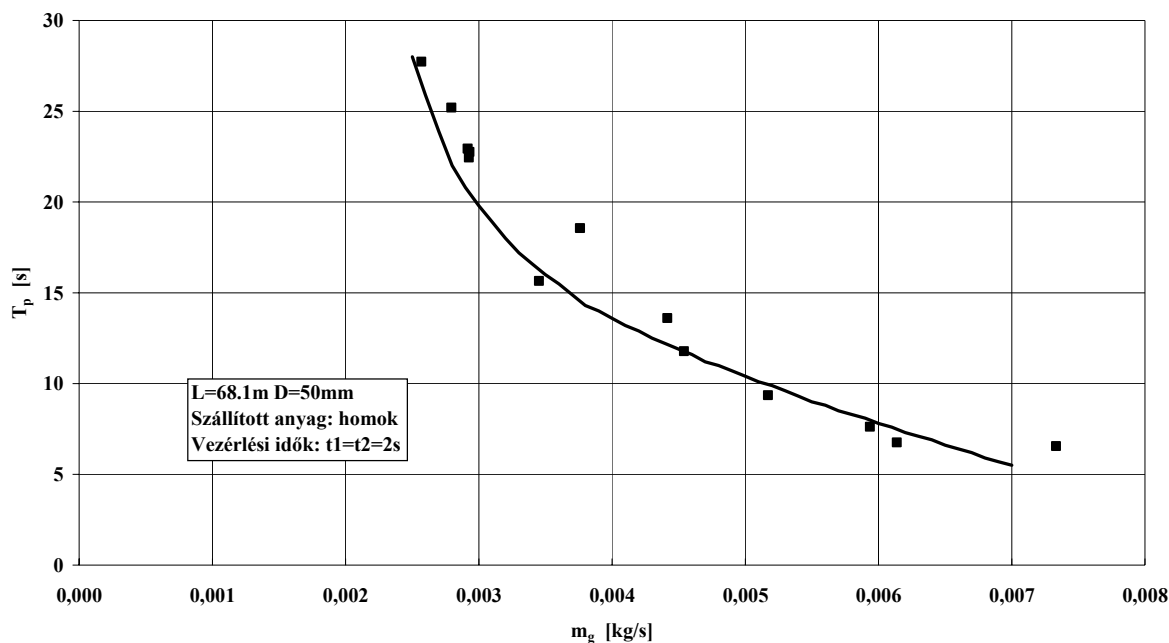
A 3.86. ábra a dugómozgás frekvenciájának levegő tömegáram szerinti változását mutatja.



3.86. ábra. Frekvencia – levegő tömegáram függvénykapcsolat

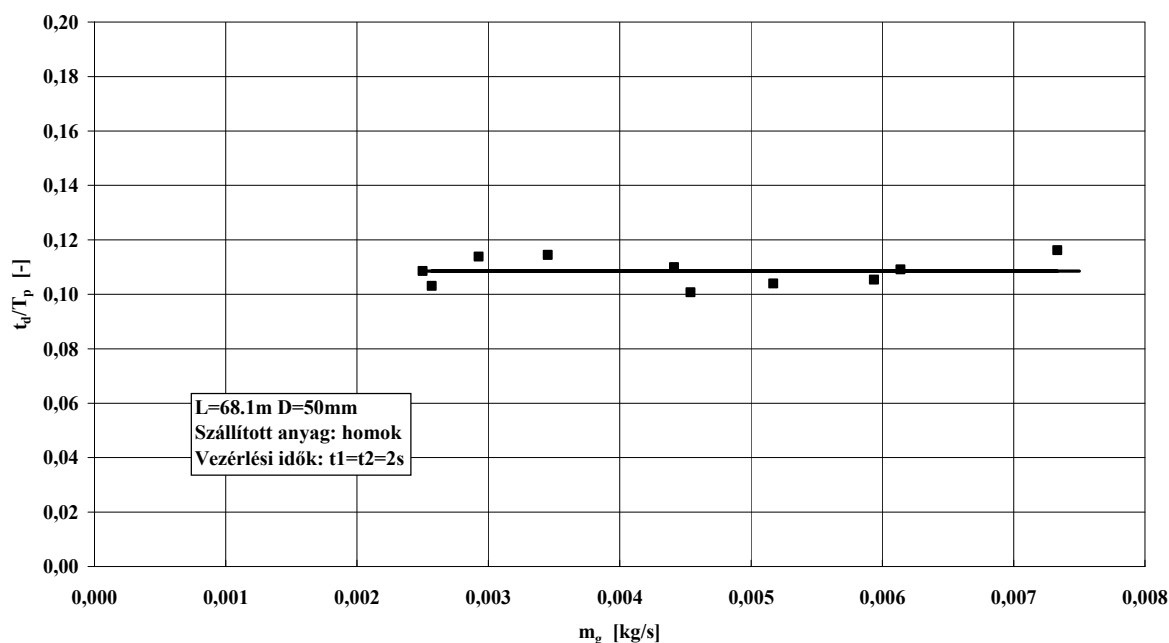
A 3.87. ábrán vázolt periódusidő azt jelzi, hogy a memóriában tárolt adatok integrálátlagként az „LDR2” beépítési helyen milyen időközönként jelennek meg, haladnak el, illetve követik egymást a dugók.

A 3.88. ábrán azt ábrázoltuk, hogy a dugóelhaladás ideje a periódusidőhöz viszonyítva hogyan alakul. Az ábrából megállapítható, hogy a fenti viszonyszám a vizsgált tartományban közel állandó és azt jelzi, hogy az átlagos relatív dugó elhaladási idő ( $t_d/T_p=0.10-0.12$ ), míg ebből adódóan az átlagos relatív levegőhólyag elhaladási idő szintén állandó ( $t_g/T_p=0.88-0.90$ )



3.87. ábra. Periódusidő - levegő tömegáram függvénykapcsolat

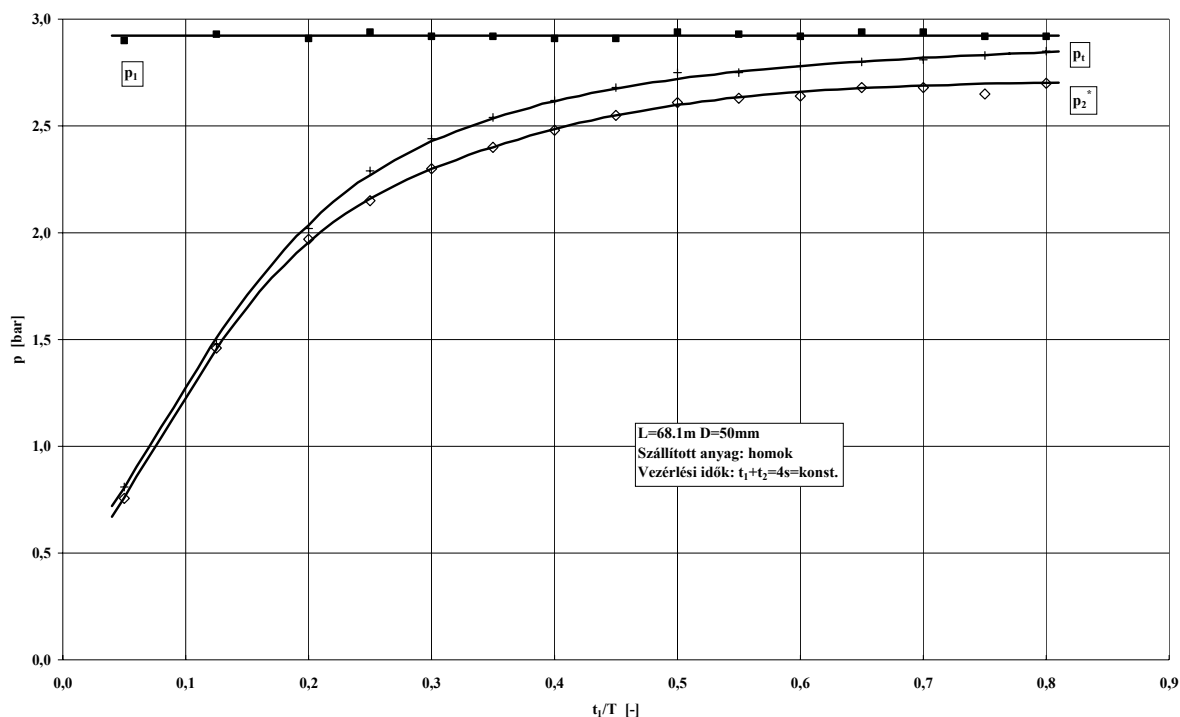
azaz a dugókat kb. 9-szer olyan hosszú idő alatt elhaladó levegő hólyagok követik. Ebben a mérési sorozatban tehát megállapítható, hogy *a szállítócső átlagos töltöttségi állapota a tartálynyomás és ezáltal a levegő tömegáram változtatásával szinte egyáltalán nem változtatható.*



3.88. ábra. Relatív dugó elhaladási idő – levegő tömegáram függvénykapcsolat

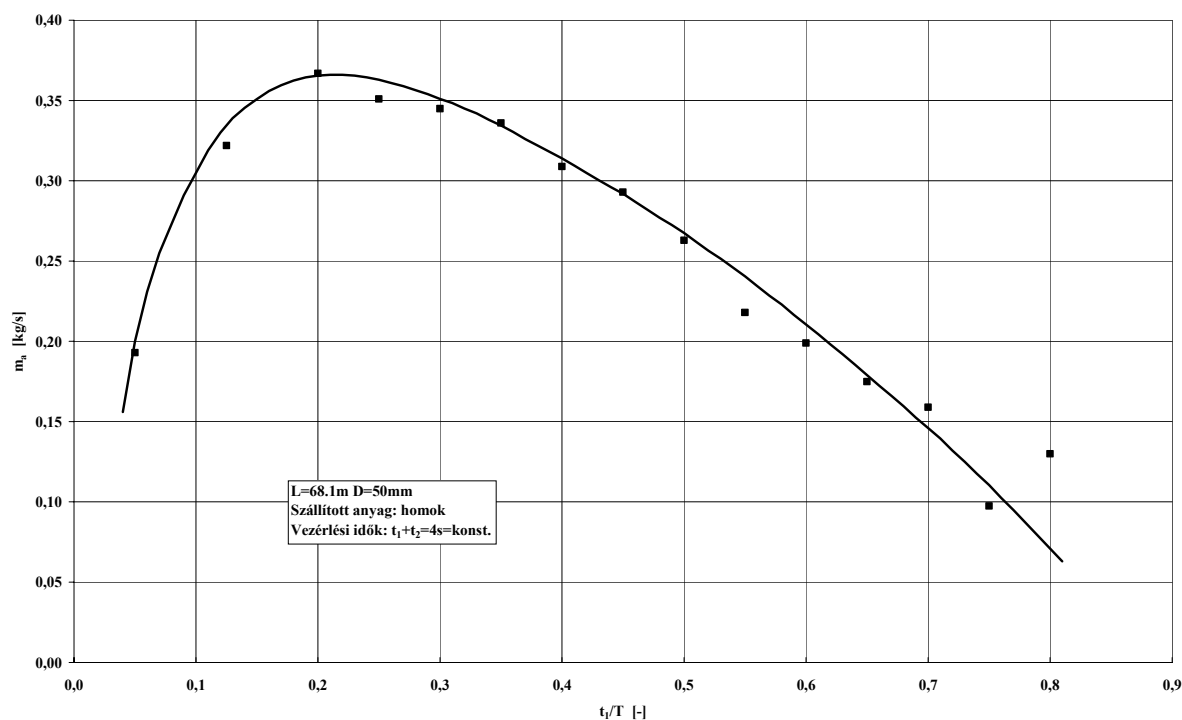
Az ábra szerinti közel állandó relatív dugó elhaladási idő ugyanis egyúttal azt is jelenti, hogy a szállítócső hosszegységére jutó anyagtömeg sem változik lényegesen. Természetesen a folyómétertömeg eredeti definíciójából – anyagsebesség egységre vonatkoztatott anyag tömegáram – hasonló eredmény adódik.

A második mérési sorozat eredményeként először a 3.89. ábrán a nyomások (hálózati nyomás, tartálynymomás és a szállítócső elején lévő nyomás) alakulását mutatjuk be. A hálózati nyomást



3.89. ábra. A nyomások vezérléssel beállított adagolási arány szerinti változása

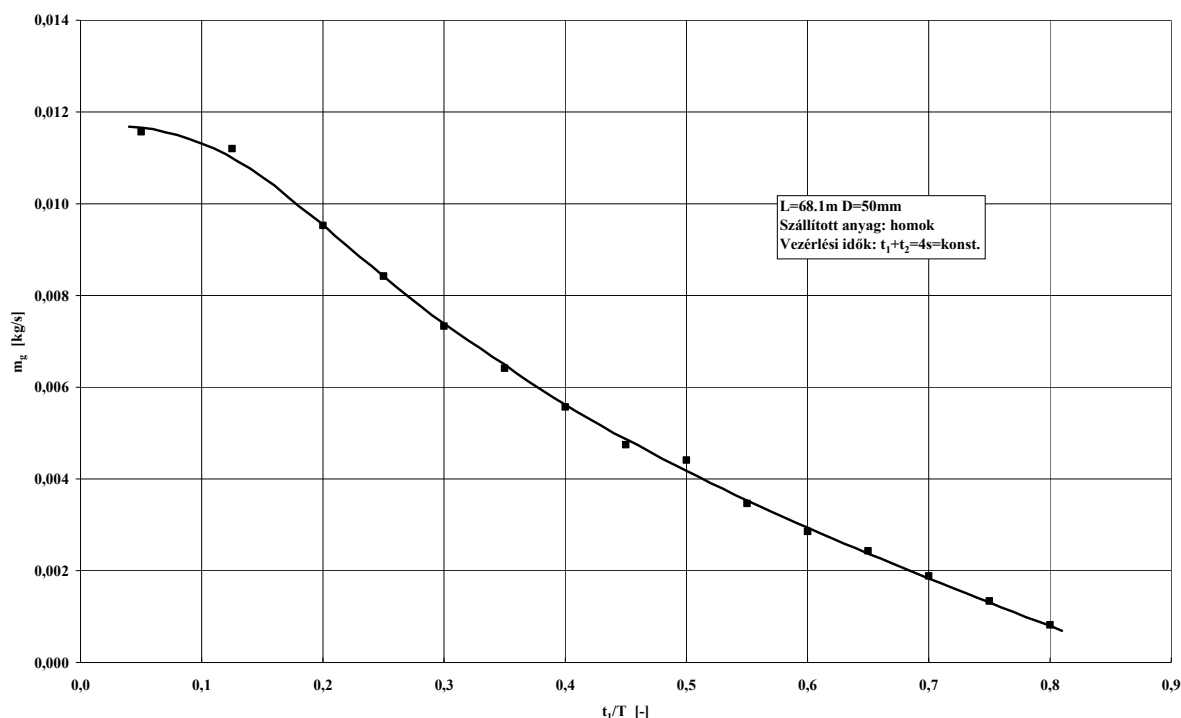
a sorozatban állandó értéken tartottuk, míg a „ $t_1$ ” időtartamot – azaz a levegő tartályba vezetésének időtartamát – csökkentve a tartálynymomás és ezzel együtt a szállítócső elején lévő



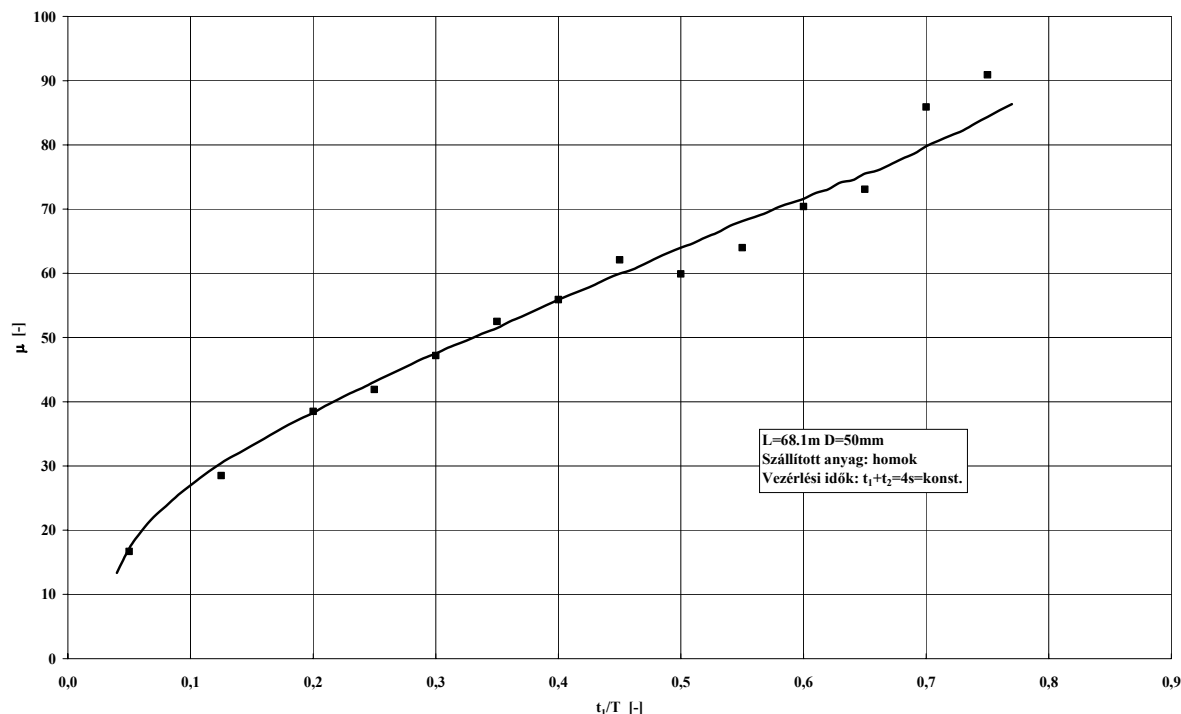
3.90. ábra. Az anyag tömegáram vezérléssel beállított adagolási arány szerinti változása

nyomás monoton csökken. A legkisebb nyomás ezen sorozat állandó paramétereinek figyelembe vételével  $t_1 = 0.2$  s beállításakor adódott. Megjegyezzük, hogy a vezérlési

lehetőségként programozható legkisebb érték ( $t_1 = 0.1$  s) esetén a tartályba jutó levegőmennyiség hatására kialakuló kicsiny tartálynyomás nem volt elegendő az anyag elindításához, azaz ezen beállításkor a levegő a szállítócsőben csupán az üresjárási állapotnak megfelelően áramlott.



3.91. ábra. A levegő tömegáram vezérléssel beállított adagolási arány szerinti változása

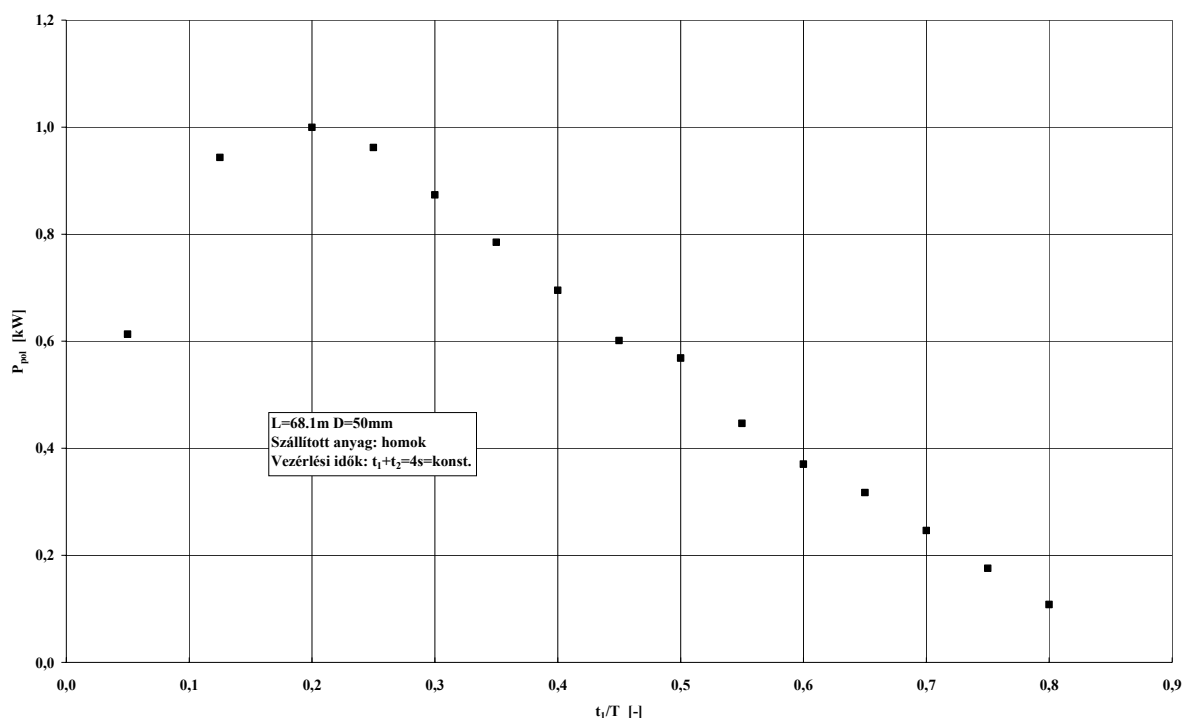


3.92. ábra. A keverési arány - vezérléssel beállított adagolási arány szerinti változása

A 3.90. ábra az anyag tömegáram jellegzetes alakú, maximummal rendelkező görbét mutatja. A görbe segítségével megadhatók a berendezés optimális – legnagyobb anyag

tömegáramot eredményező – üzemállapotához tartozó vezérlési adatok, esetünkben:  $t_1 = 0.8$  s;  $t_2 = 3.2$  s.

A 3.91. ábrán a szállító levegő tömegáram változása, míg a 3.92. ábrán a keverési arány alakulása látható. A levegő tömegáram görbe monoton csökkenő jellege magyarázható azzal, hogy a független változó – azaz praktikusán a „ $t_1$ ” vezérlési idő – növelésével egyre hosszabb időn át vezetünk levegőt az adagolótartályba, így annak nyomásnövekedése a levegő tömegáram csökkenéséhez vezet. Az adagolótartályba egyre hosszabb időszak alatt levegőt bevezetve, az így megnövekvő ellenállás miatt a szállítócsőben egyre kisebb levegő tömegáram adódik.

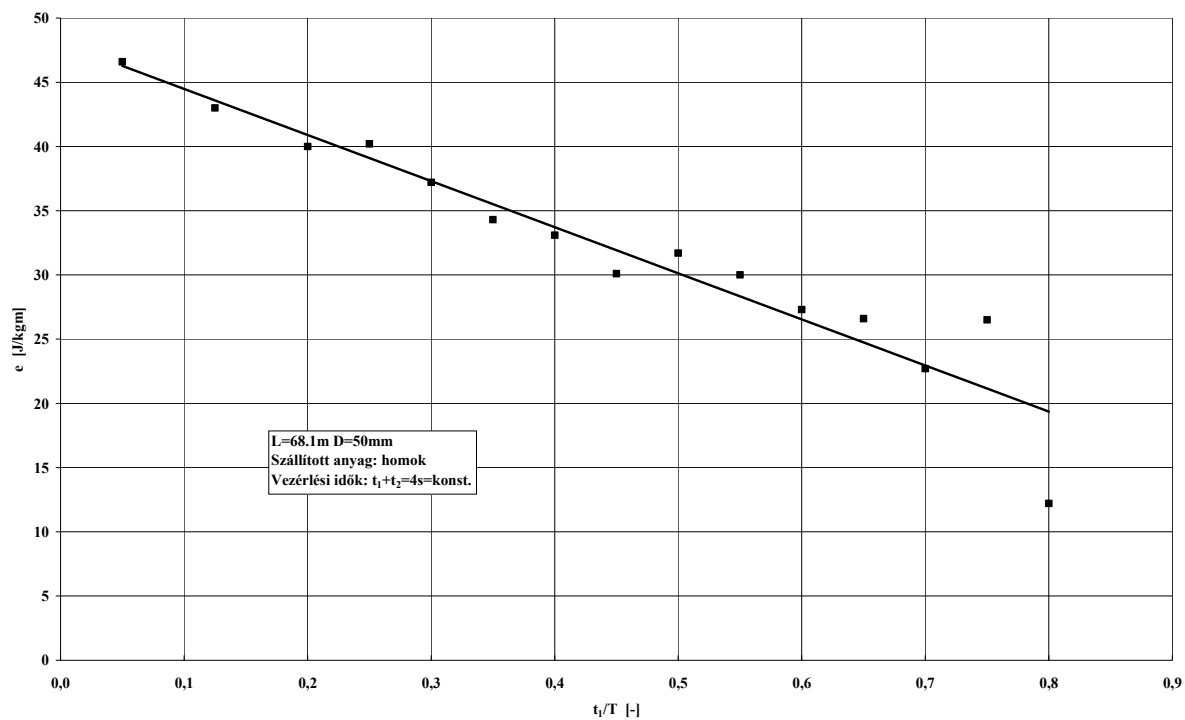


3.93. ábra. A teljesítmény - vezérléssel beállított adagolási arány szerinti változása

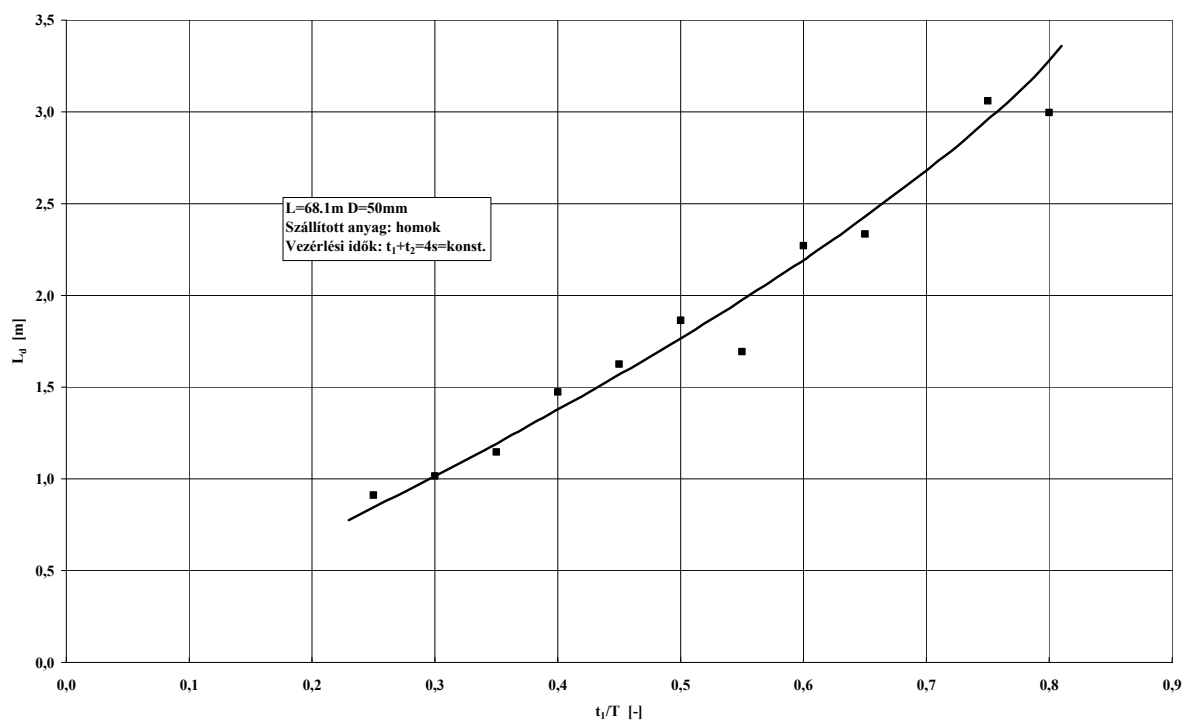
A szállítás teljesítményszükségletének a 3.93. ábra szerinti alakja az anyag tömegáramához hasonló. A független változó kis értékeinél tapasztalható teljesítmény növekedés azzal magyarázható, hogy ebben a tartományban a nyomótartály nyomása rohamosan nő, azaz a teljesítmény növekedés oka itt a „ $p_t/p_0$ ” nyomásviszony jelentős változása. A teljesítmény szélsőérték helye a maximális anyag tömegáram értékénél található. A szélsőérték fölötti tartományban a kismértékű nyomás növekedés helyett a levegő tömegáram csökkenő jellege a domináló a teljesítmény alakulásában.

A fajlagos energiaigény 3.94. ábra szerinti kicsiny értékei a kis levegő tömegáramoknál adódnak, ami összhangban van a nyomótartályos szállítóberendezéseken szerzett mérési tapasztalatokkal.

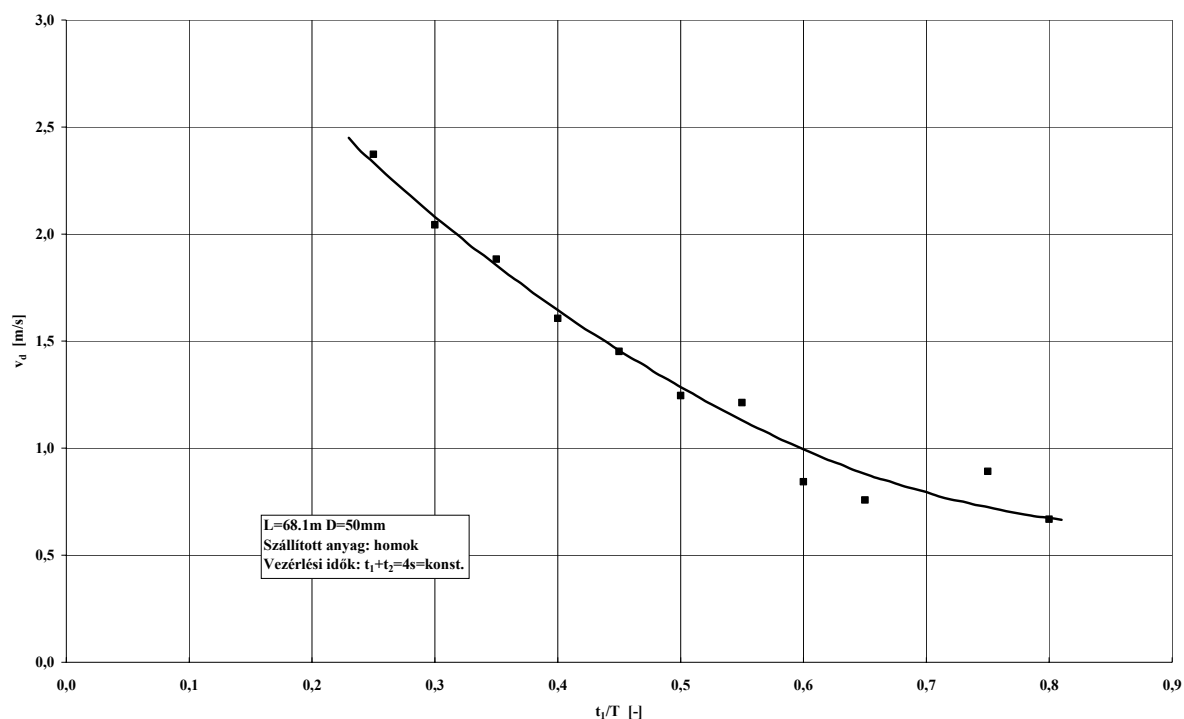
A 3.95. ábrán bemutatott dugóhossz arányos a tartályba történő levegő bevezetési időhánnyal, azaz a vezérléssel beállított adagolási aránnyal., míg a 3.96. ábrán jelölt dugósebesség görbe lefutása a levegő tömegáraméhoz hasonló. A sorozat három legnagyobb levegő tömegáramú mérésénél a dugó mozgásjellemzőit nem értékeltük ki, mivel az „LDR2” mérőhelyről ekkor érkező feszültségugrás jelek kiolvasása a nagy jelsűrűség miatt már bizonytalan volt.



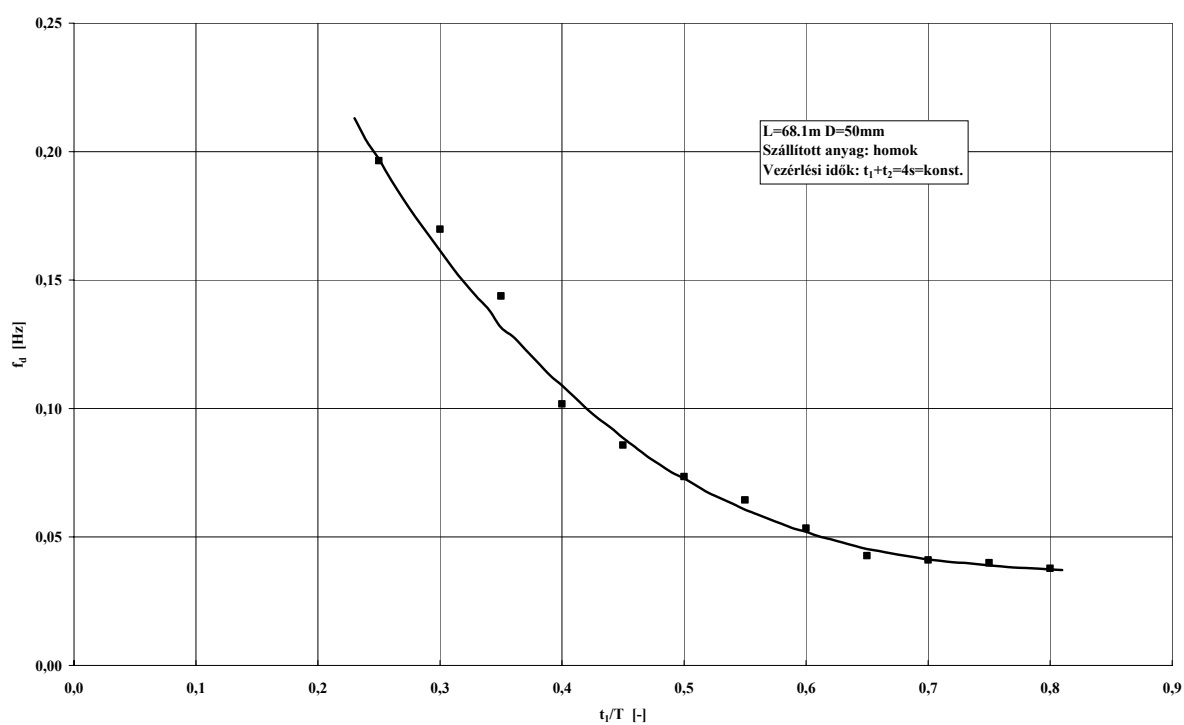
3.94. ábra. A fajlagos energiaigény - vezérléssel beállított adagolási arány szerinti változása



3.95. ábra. A dugóhossz - vezérléssel beállított adagolási arány szerinti változása

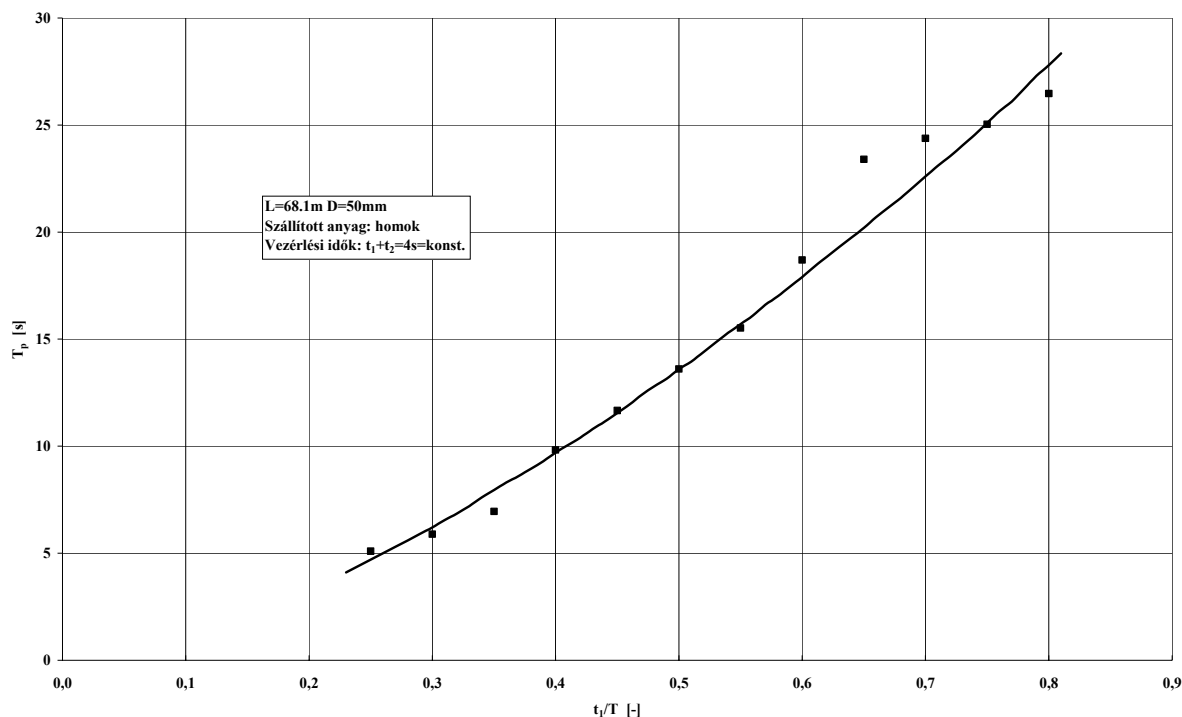


3.96. ábra. A dugósebesség - vezérléssel beállított adagolási arány szerinti változása

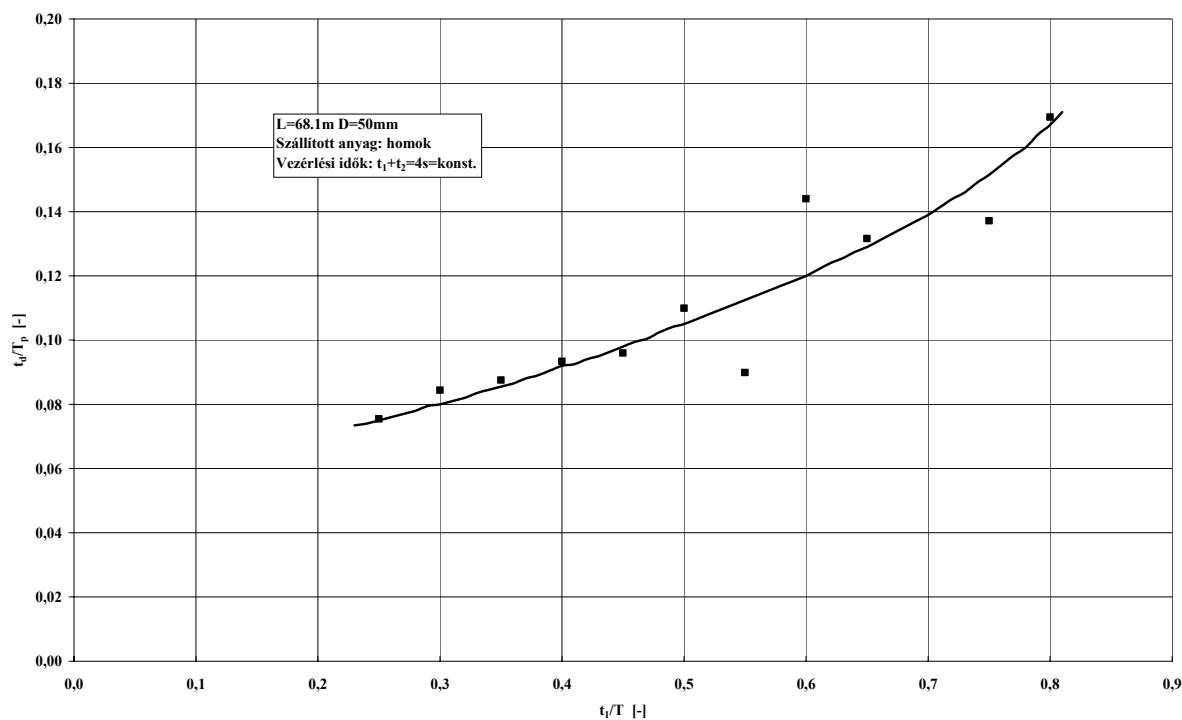


3.97. ábra. A dugómozgás frekvenciájának - vezérléssel beállított adagolási arány szerinti változása

A 3.97. ábra a dugómozgás frekvenciájának változását, míg a 3.98. ábra a periódusidő alakulását mutatja, a 3.99. ábrán pedig azt ábrázoltuk, hogy a dugóelhaladás ideje a periódusidőhöz viszonyítva hogyan alakul.



3.98. ábra. A dugómozgás periódusidejének - vezérléssel beállított adagolási arány szerinti változása

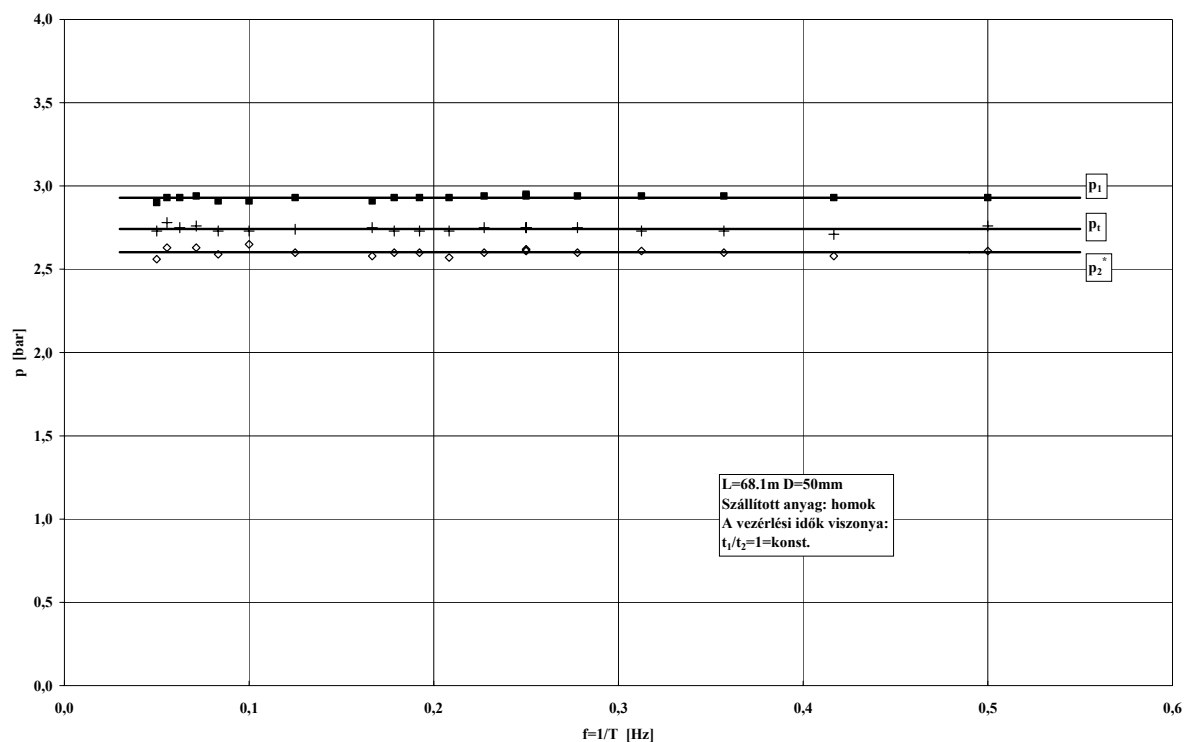


3.99. ábra. A relatív dugó elhaladási idő - vezérléssel beállított adagolási arány szerinti változása

A harmadik mérési sorozat független változója a vezérlési frekvencia, miközben a két párhuzamos levegőágban azonos mágnesszelep nyitási időket programoztunk, azaz  $t_1=t_2$ , vagy általánosabban megfogalmazva  $t_1/t_2=1=\text{konst.}$  A mérési pontok beállításakor igyekeztünk azonos hálózati nyomásokat beállítani, ám az egyenletes szállítás alatt összegyűjtött „p<sub>1</sub>”

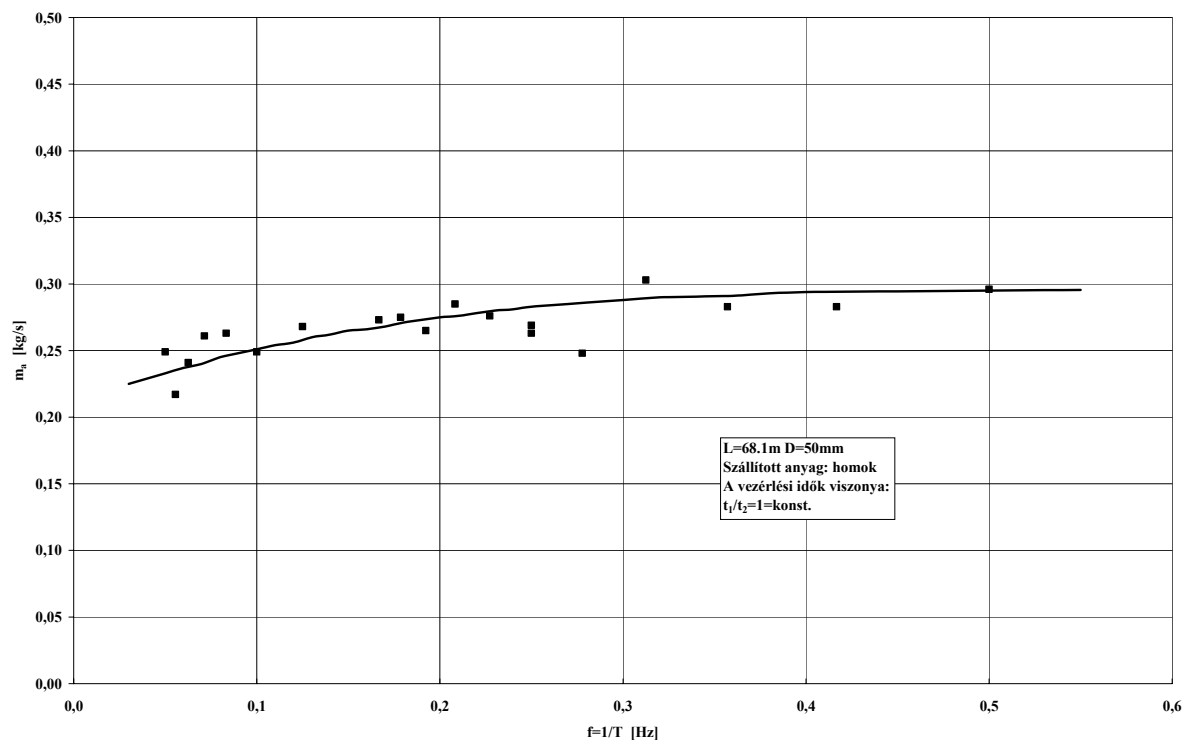


hálózati nyomásértékek integrálátlagai a 3.100. ábrán látható módon kis eltérést mutatnak ( $p_1=2.90-2.95\text{bar}$ ).

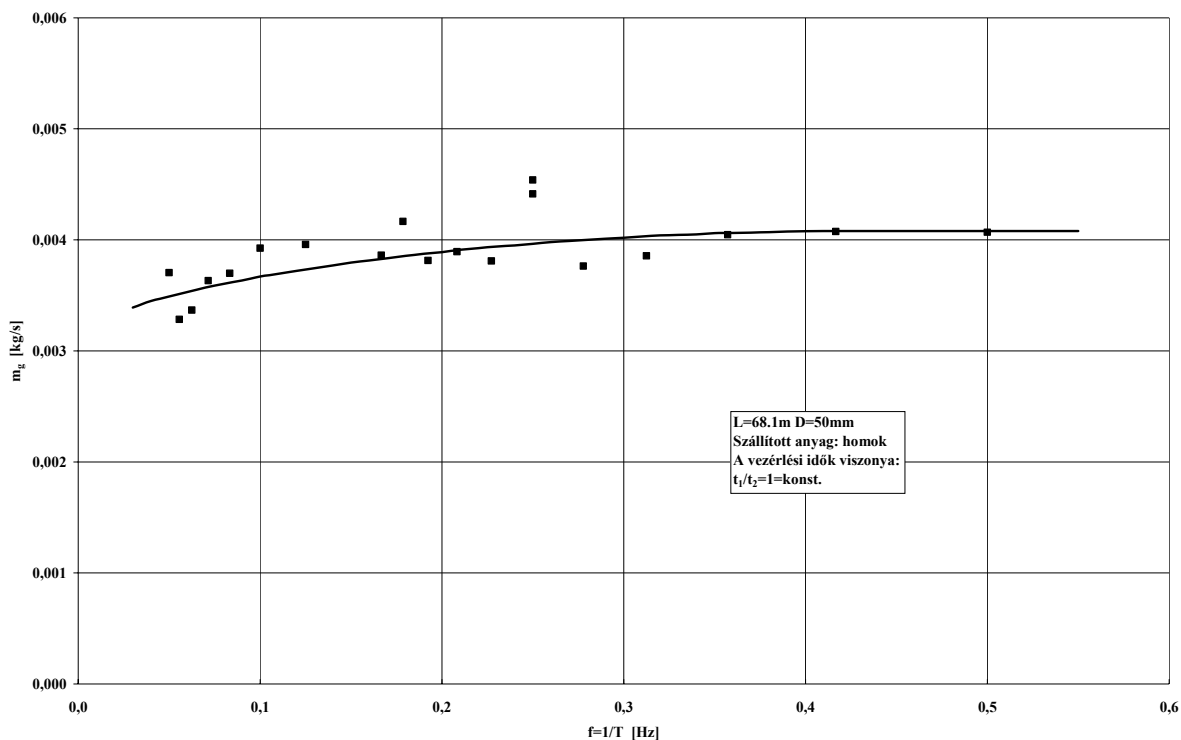


3.100. ábra. Nyomások a vezérlési frekvencia függvényében

A 3.101. ábrán az anyag tömegáramot, a 3.102. ábrán a levegő tömegáramot ábrázoltuk.

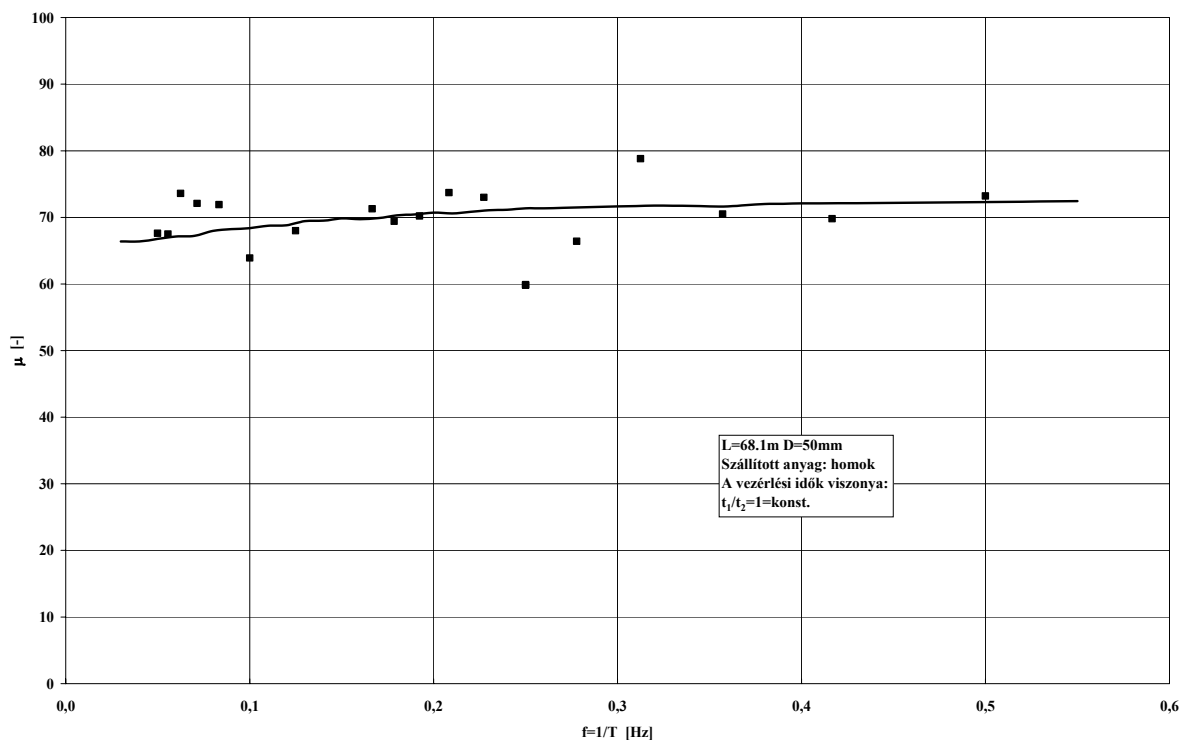


3.101. ábra. Anyag tömegáram a vezérlési frekvencia függvényében



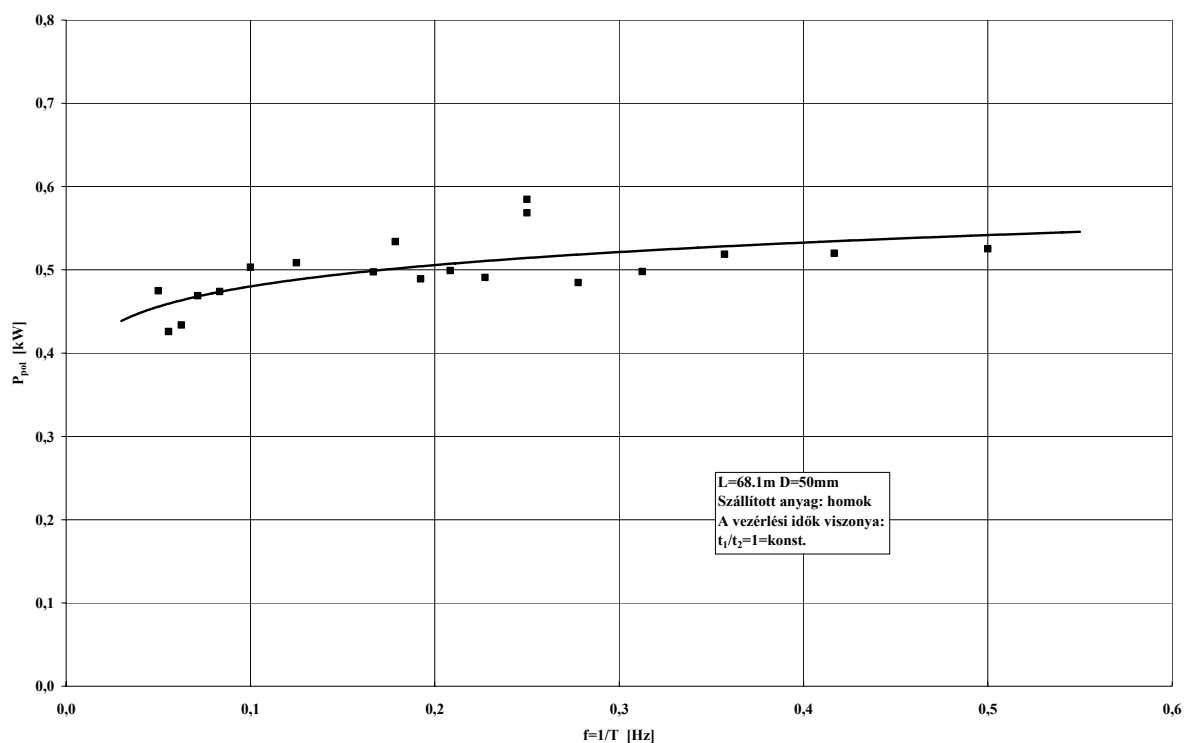
3.102. ábra. Levegő tömegáram a vezérlési frekvencia függvényében

Mindkét görbe enyhén növekedő jellegű a vezérlési frekvencia növekedésével, azaz az egyre rövidebb vezérlési idők beállítása esetén. A 3.103. ábrán bemutatott keverési arány görbe a definíciójának megfelelően az előző két ábrán szereplő mennyiségekből származik.



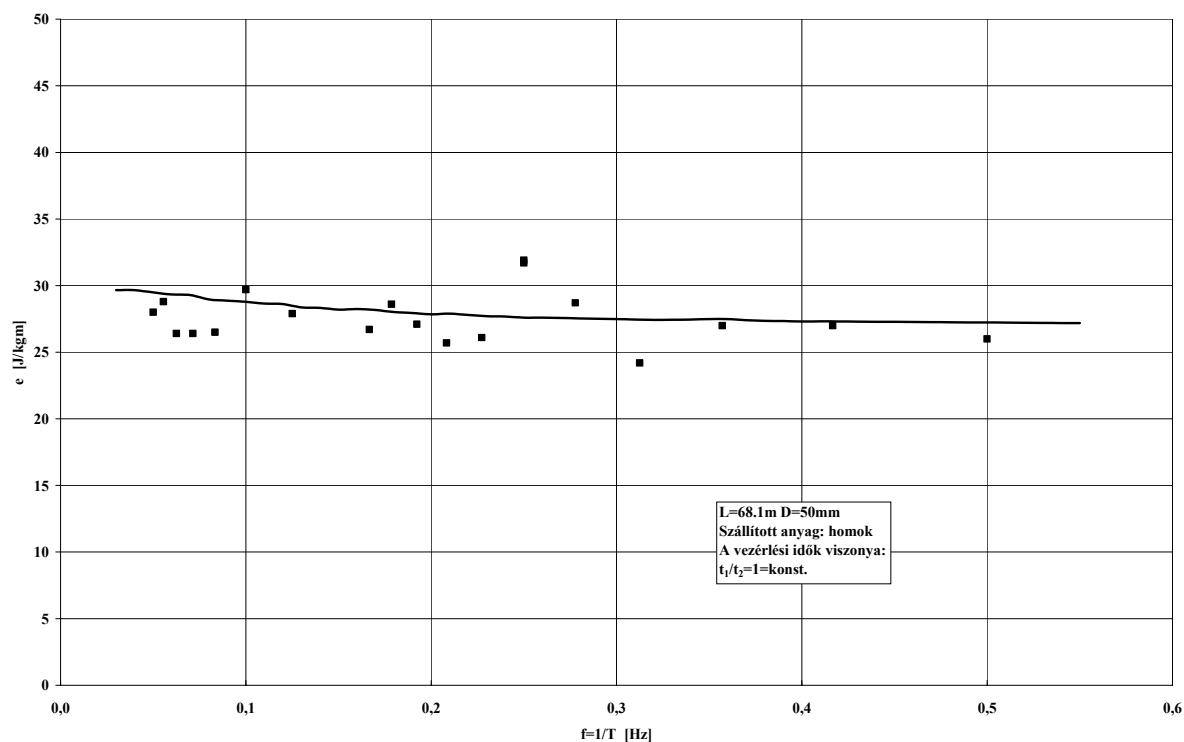
3.103. ábra. Keverési arány a vezérlési frekvencia függvényében

A 3.104. ábra a szállítás teljesítményszükséglet alakulását mutatja. A görbe a levegő tömegáram változásához hasonló, hiszen a hálózati nyomást a mérési sorozatban állandó értéken tartottuk és a nyomótartály nyomása – a 3.100. ábra szerint – a vizsgált tartományban szintén nem változott.



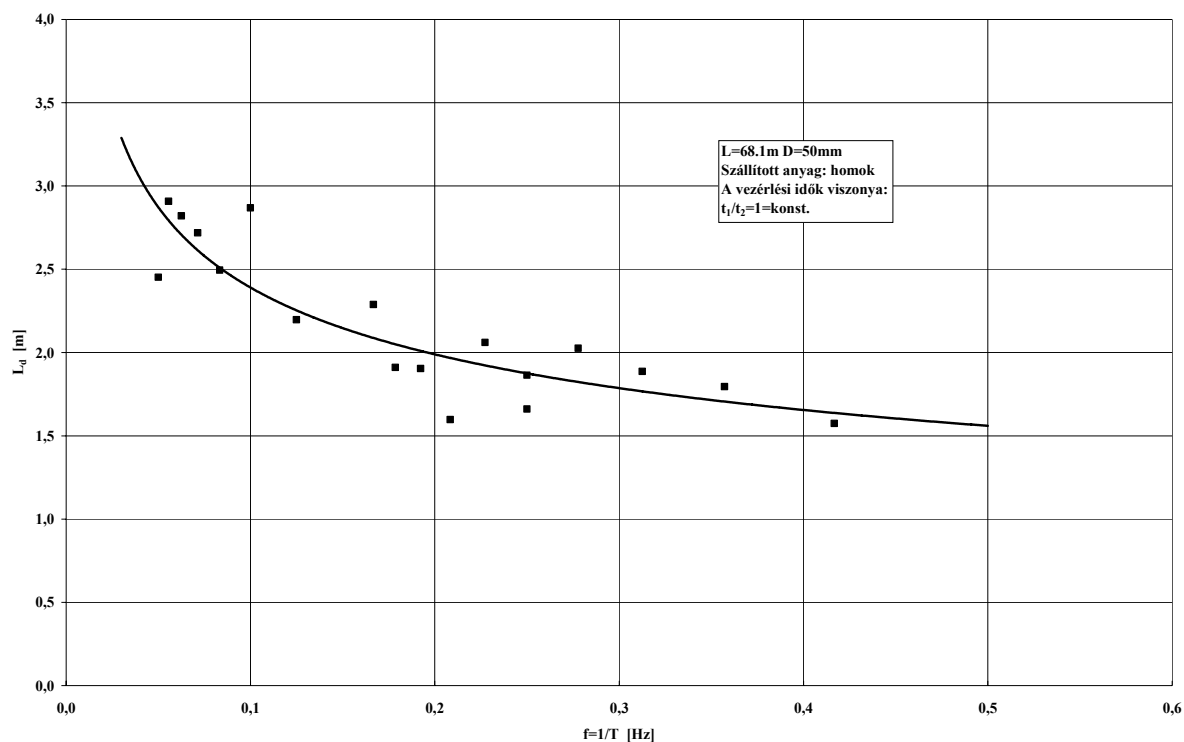
3.104. ábra. A teljesítményszükséglet a vezérlési frekvencia függvényében

A fajlagos energiaigény a 3.105. ábrán látható módon alakul.

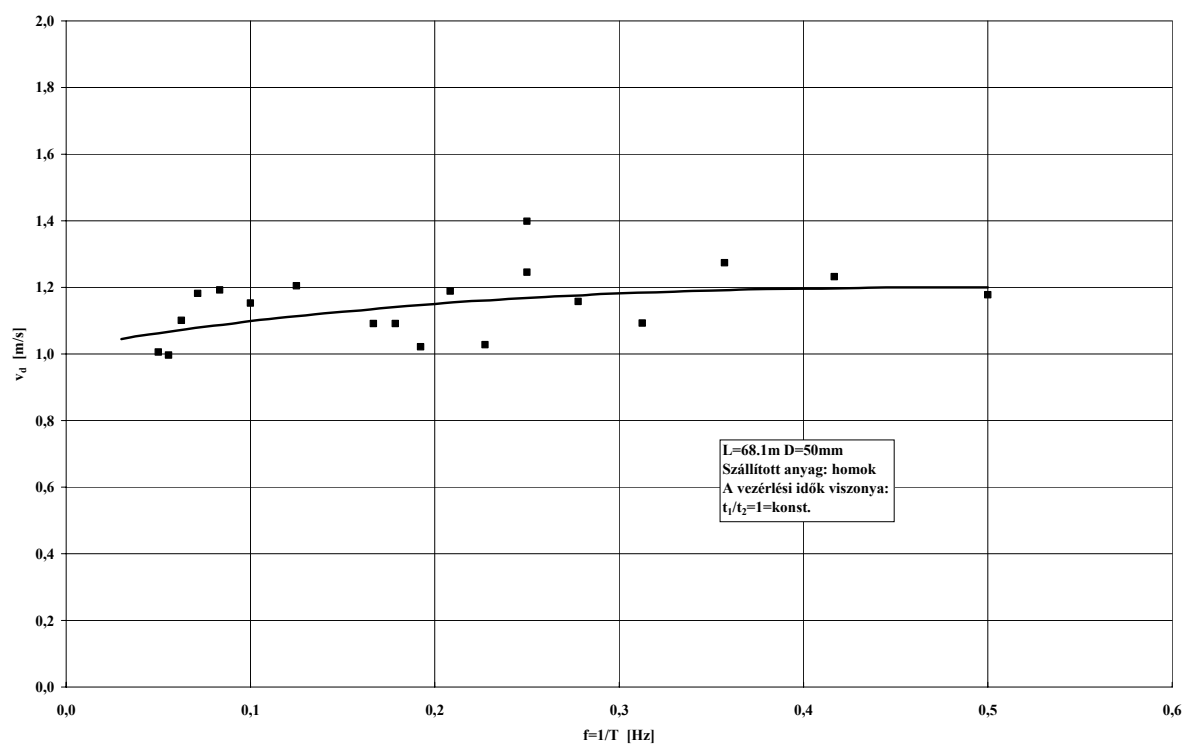


3.105. A fajlagos energiaigény a vezérlési frekvencia függvényében

A 3.106. ábrán bemutatjuk a dugóhossz, míg a 3.107. ábrán a dugósebesség változását a vezérlési frekvencia függvényében.



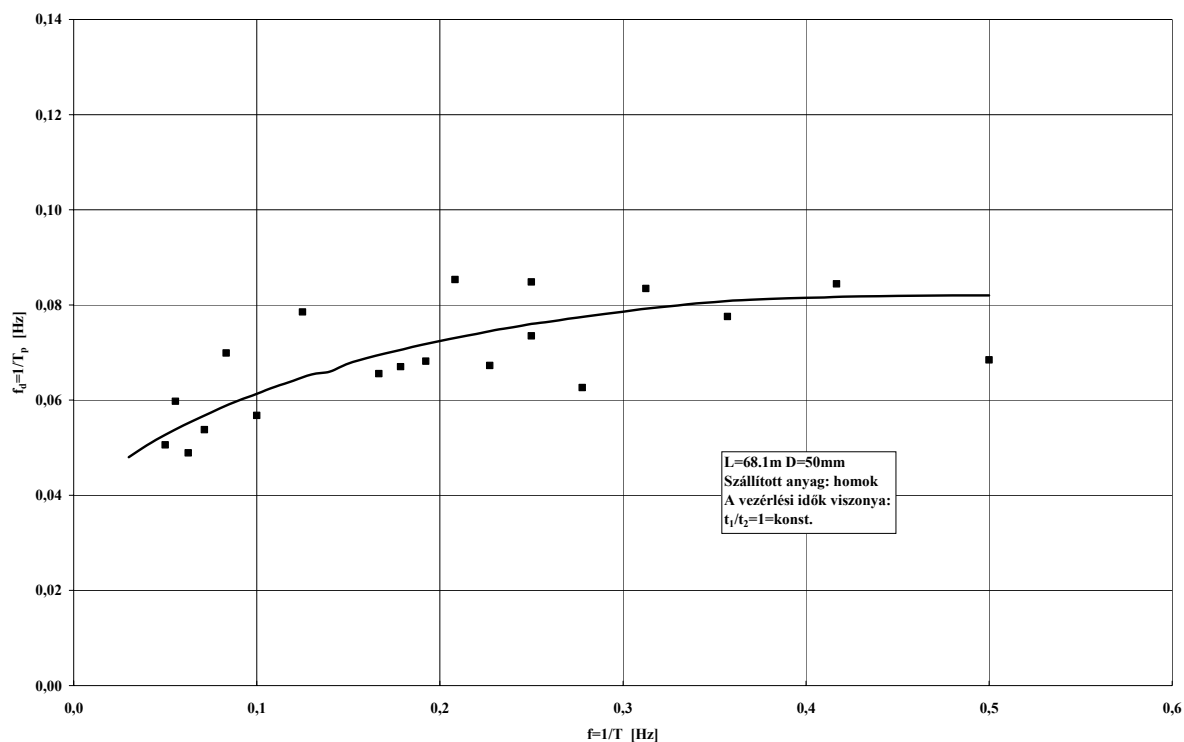
3.106. ábra. Dugóhossz a vezérlési frekvencia függvényében



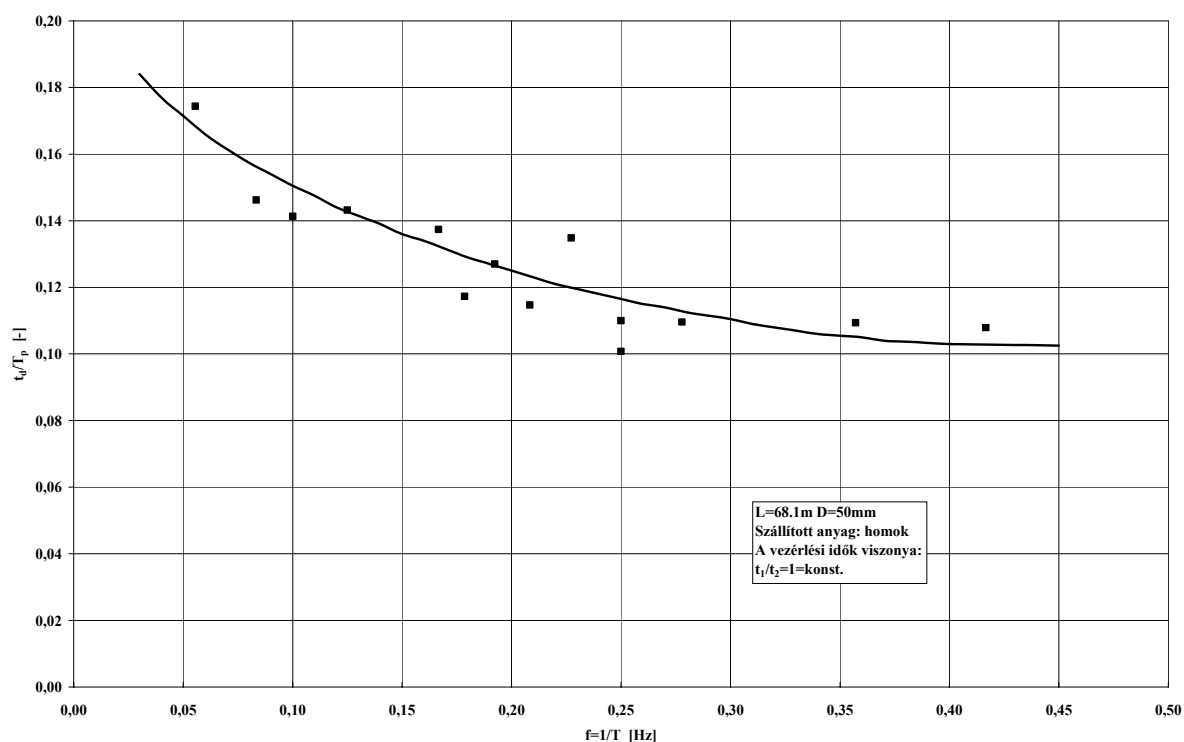
3.107. ábra. Dugósebesség a vezérlési frekvencia függvényében

A 3.108. ábrán bemutatjuk a dugók mozgásából számított sajátfrekvencia alakulását a vezérlési frekvencia függvényében. Az ábra alapján megállapítható, hogy a dugómozgás

frekvenciája alig változik, annak ellenére, hogy a levegőkéses vezérlési frekvenciát egy nagyságrendet átfogó, széles tartományban változtattuk.



3.108. ábra. A dugó mozgásából számolt frekvencia a vezérlési frekvencia függvényében



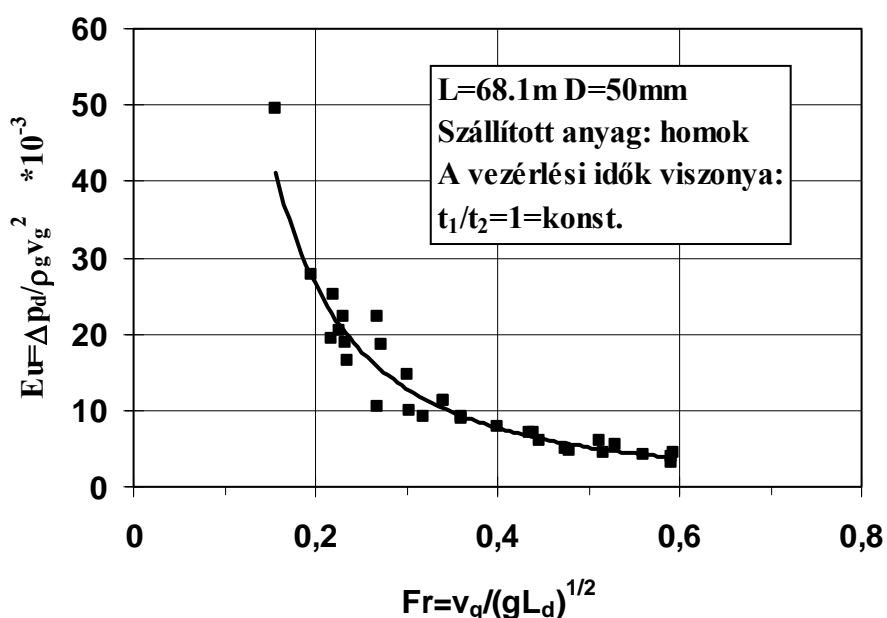
3.109. ábra. A periódusidőre vonatkoztatott relatív dugóelmozdulási idő a vezérlési frekvencia függvényében

A 3.109. ábrán azt ábrázoltuk, hogy az átlagos hosszúságú, átlagos sebességgel mozgó dugónak a fotódetektor előtti elmozdulási ideje a periódusidőhöz viszonyítva hogyan alakul.

Az ábrából jól látható, hogy a kísérletek során a vezérlési frekvencia kb. egy nagyságrendű változtatása közben a szállítócső telítettsége mindvégig eléggé kicsiny, hiszen az adatok szerint a dugókat négyszer-kilencszer hosszabb levegő hólyagok követik.

Annak érdekében, hogy a dugó mozgásjellemzőiről többet megtudhassunk, mint ami az eddigiekben vázolt közvetlen mérési eredményekből kiolvasható, dimenziótlan mennyiségeket képeztünk és az azok közötti kapcsolatot kerestük. A 3.110. ábra az Euler-szám és a Froude-szám közötti függvénykapcsolatot mutatja. A fenti dimenziótlan számok számításához az alábbi mért, vagy mérésből származtatott mennyiségeket használtuk:

$L_d$	[m]	- az „LDR2” mérőhelyen mért dugóhossz
$v_g$	[m/s]	- levegősebesség az „LDR2” mérőhelyen
$\Delta p_d$	[Pa]	- egy dugóra jutó nyomáskülönbség
$\rho_g$	[kg/m <sup>3</sup> ]	- Levegősűrűség az „LDR2” mérőhelyen
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	- nehézségi gyorsulás ( $g=9.81\text{m/s}^2$ )



3.110. ábra. Összefüggés az Euler-szám és a Froude-szám között

Az Euler-szám definíció szerint:

$$Eu = \frac{\Delta p_d}{\rho_g v_g^2} \quad (3.48)$$

A Froude-szám definíció szerint:

$$Fr = \frac{v_g}{(g L_d)^{1/2}} \quad (3.49)$$

A 3.110. ábrából kiolvasható, hogy a kis sebességgel mozgatott hosszú dugók ellenállása a kis „ $\rho_g v_g^2$ ”-tel arányos előrehajtó erő ellenére jelentősen megnő, tehát *hosszú dugókat kis*

*sebességgel nem célszerű mozgatni, mert ez a szállítócső eldugulásához vezet. A dugós szállításnak éppen ez az előnye használható ki a hagyományos tolószállítással szemben.*

A dugós szállítási kísérleti kutatómunka összefoglalásaként megállapítható, hogy

- a. A bemutatott dugós pneumatikus szállítóberendezés – hasonlóan a korábbi fejezetekben tárgyalt nyomótartályos berendezésekhez – *üzembiztosan működtethető, munkapontja széles tartományban tetszőlegesen beállítható.*
- b. A dugós pneumatikus szállítóberendezés *nyomás – levegő tömegáram jelleggörbéi hasonlóak a nyomótartályos berendezéseknél megszokottakhoz.*
- c. A *vezérlőlevegő főágbeli (adagolótartály), illetve mellékágbeli (pulzátor, vagy levegőkés) bevezetésének megfelelő megválasztásával a berendezés optimális üzemállapotú – maximális anyag tömegáramú – munkapontja beállítható.*
- d. A *vezérelt levegő bevezetés által létrehozott anyagdugók* a függőleges szállítócső szakaszban *összeomlanak*, majd ezt követően a függőlegesből vízszintesbe vezető ív után *újraképződnek* a mindenkori szállítási állapot függvényében más és más módon. A szállítócsőben kialakult dugók mozgásjellemzői a szállítócső vonalvezetésétől, vízszintes-függőleges szakaszainak méretviszonyától és a szállítási állapottól függenek. *A vezérelt levegő bevezetés frekvenciájának változtatása aállítás fő üzemtani paramétereit nem módosítja alapvetően.*
- e. A vizsgált dugós szállítóberendezés *levegőfogyasztása* kisebb, mint a hasonló paraméterű nyomótartályos szállítóberendezéseké.
- f. A szállítócső kedvezőtlen telítettsége következtében aállítás fajlagos energiaigénye a hasonló nyomótartályos szállítóberendezésekével közelítőleg megegyezik. A „szállítóteljesítmény” (anyag tömegáram) értéke kisebb, mint az azonos csőátmérőjű, közel azonos hosszúságú szállítócsövet tartalmazó felső ürítésű nyomótartályos szállítóberendezésén saját mérési eredményeink során adódott. A „szállítóteljesítmény” és a fajlagos energiaigény javítása a szállítócsőben kialakuló áramkép további tanulmányozása segítségével, a dugókat elválasztó levegőhólyagok hosszának csökkentésével, azaz a szállítócső jobb kihasználásával lehetséges.

Dugós szállítóberendezéssel sokfajta, nehezen szállítható anyag (üvegtörmelék, korund, kaolin, samott, nedves homok, feltárt formahomok, titándioxid, zsíros tejpor, ólom-sztearátok, cinkoxidok, korom, reze, nedves agyag, nedves sók stb.) üzembiztos, kis sebességgel történő és így kis anyag- illetve szállítócső-kopást eredményező szállítása megvalósítható [68]. A kis sebességű szállításból adódóan sok esetben a dugó csővezetékben belüli megállása sem vezet okvetlenül üzemzavarhoz, cső elduguláshoz. Bizonyos nagyon koptató anyagoknál (pl. kvarchomok, korund, krómérc homok esetében) a szállítóvezetékét állandóan anyaggal megtöltve tartják, hogy elkerüljék a túlságos sebességnövekedést, ami a nyomótartályok teljes kiürítésekor az utolsó dugó expanziója során szükségszerűen bekövetkezik. Erősen inhomogén összetételű, szemcseméretű, sűrűségű, többkomponensű anyagokállítás közben szétválasztódásának, szétkeveredésének, fajtázódásának az esélye dugós szállítási üzemmódban igen kicsiny [68, 69].

Végül a dugós szállítóberendezések széleskörű felhasználhatóságának igazolásául a BÜHLER-MIAG cég kutatóközpontjában végzett szállítási kísérletek néhány publikált [70], műszaki adatokat tartalmazó mintapéldáját mutatjuk be:

Nyers szemes kávé

Szállítóteljesítmény:	3	t/h
Szállítási távolság:	150	m
Szállítási sebesség:	3	m/s

Szítalással meghatározott aprózódás, törés: „Takt-Schub-Förderung” rendszerű berendezésben háromszori átszállítás után 0.017%

Mandula (10-16 mm)

Szállítóteljesítmény:	1.5	t/h
Szállítási távolság:	42	m
Szállítási sebesség:	3	m/s

A 6 mm-nél finomabb frakció:

„Takt-Schub-Förderung” rendszerű berendezésben történt átszállítás előtt 0.140%  
 „Takt-Schub-Förderung” rendszerű berendezésben történt átszállítás után 0.161%

Kristálycukor (0.1-0.5 mm)

	„Takt-Schub-Förderung”	Hagyományos pneumatikus szállítás
Szállítóteljesítmény:	3.2 t/h	4 t/h
Szállítási távolság:	42 m	50 m
Szállítási sebesség:	2 m/s	
Szítalással meghatározott aprózódás, törés a 0.16 mm-nél kisebb frakcióban:		
Szállítás előtt	1.00%	1.00%
6-szori átszállítás után	1.32%	10.40%

Kukorica (kb. 12\*9\*5 mm)

	„Takt-Schub-Förderung”	Hagyományos pneumatikus szállítás
Szállítóteljesítmény:	4.5 t/h	6 t/h
Szállítási távolság:	155 m	50 m
Szállítási sebesség:	2 m/s	19 m/s
Nagyító segítségével meghatározott szemcsesérülés:		
Szállítás előtt	8.87%	8.87%
6-szori átszállítás után	10.20%	12.57%

Mosószer alapanyag (0.3-1.0 mm)

Szállítóteljesítmény:	5 t/h
Szállítási távolság:	70 m
Szállítási sebesség:	1.5 m/s
A halmazsűrűség értékei „Takt-Schub-Förderung” rendszerű berendezésben történt:	
Szállítás előtt	0.830 t/m <sup>3</sup>
1-szori átszállítás után	0.831 t/m <sup>3</sup>
2-szeri átszállítás után	0.838 t/m <sup>3</sup>
15-szori átszállítás után	0.872 t/m <sup>3</sup>



Takarmány-pellet (Ø5, 10-15 mm hosszú)

Szállítóteljesítmény:	10 t/h
Szállítási távolság:	200 m
Szállítási sebesség:	2 m/s
Szitálással meghatározott aprózódás, törés a 3 mm-nél kisebb frakcióban:	
„Takt-Schub-Förderung” rendszerű berendezésben történt szállítás előtt	0.72%
„Takt-Schub-Förderung” rendszerű berendezésben történt 1-szeri átszállítás után	0.76%

Polietilén granulátum (Ø4\*2.5 mm)

Szállítóteljesítmény:	10	t/h
Szállítási távolság:	100	m
Szállítási sebesség:	2	m/s

Aprózódás „Takt-Schub-Förderung” rendszerű berendezésben történt 10 átszállítás után  
0.011156 %  $\approx$  111.56 g/t

Rizs (kb. 8 mm hosszú, Ø3)

Szállítóteljesítmény:	18 t/h
Szállítási távolság:	55 m
Szállítási sebesség:	3 m/s
A törés definíciója: a szemek átlagos hosszmérete kisebb, mint a névleges 8 mm-es szemhosszúság 75 %-a	
„Takt-Schub-Förderung” rendszerű berendezésben történt szállítás előtt	6.05%
„Takt-Schub-Förderung” rendszerű berendezésben történt 1-szeri átszállítás után	7.45%
„Takt-Schub-Förderung” rendszerű berendezésben történt 2-szeri átszállítás után	9.30%
„Takt-Schub-Förderung” rendszerű berendezésben történt 100 átszállítás után	25.10%

Aktív szén („a”-Ø1.5\*5 mm, „b”- Ø4\*6 mm, „c”-Ø9\*16 mm)

Szállítóteljesítmény:	4	t/h	
Szállítási távolság:	50	m	
Szállítási sebesség:	2	m/s	
Szitálással meghatározott aprózódás, törés a szállítás előtti szitálási eredményhez viszonyítva:	„a”	„b”	„c”
„Takt-Schub-Förderung” rendszerű berendezésben történt 3-szori átszállítás után	0.500 %	0.564 %	1.470 %