

## 5. Kétfázisú áramlás szállítási paramétereinek mérése korrelációs módszerrel

A 4. fejezetben ismertetett, a szállítóvezeték hossz menti nyomás- és sebességeloszlásának számítási módszere a matematikai-fizikai modell egyik megköltése szerint az anyagsebességnek és a szállítólevegő sebességének állandó viszonyát tartalmazza. A fenti sebességviszony ismeretében a számítási módszer további pontosítására nyílik lehetőség, melynek érdekében jelen fejezetben a korrelációs anyagsebesség mérésének módszerét ismertetjük. Az ismertetendő mérések során a csővezetékbe épített triboelektromos elven működő érzékelőkkel dolgoztunk. Az érzékelők olyan kialakításúak, hogy ne zavarják meg az áramképet, ne csökkentsék a belső csőkeresztmetszetet.

Az érintkezés nélküli anyagsebesség mérésénél vagy a Doppler módszert, vagy a keresztkorrelációs módszert használják. A huszadik század végén jelentős előrelépés történt az iparban a kereszt-korrelátorok fejlesztése terén. Az ilyen rendszerek által kezelhető jelek többnyire kapacitív, vagy elektrosztatikus elven működő érzékelőktől származnak (Corbett és Coulthard [82]).

### *Elektrosztatikus (közvetett) anyag tömegáram mérő*

A gáz-szilárd kétfázisú áramlásban előforduló tribo-elektrosztatikus töltés a részecskék egymás közötti, illetve a csőfalhoz ütközésének tulajdonítható. Az elektrosztatikus töltéseket gyűrű alakú szenzorokkal lehet detektálni (Coulthard és Byrne [83]). A szilárd anyag sebességének mérése viszonylag egyszerű. A probléma a szilárd anyag koncentrációjának és az elektrosztatikus töltésjel amplitúdójának kapcsolatát leíró összefüggés meghatározásában rejlik. A töltésjel ugyanis függ egyrészt a részecskék fizikai tulajdonságaitól (alak, forma, méret, tömegeloszlás, vezetőképesség, kémiai összetétel, nedvességtartalom...stb.), másrészt pedig az áramlás körülményeitől (mint például a szállító közeg sebessége, a szállítócső mérete, a csőfal érdessége...stb.). A fentiek következtében nehéz értelmezni a mérési eredményeket, kivéve ha az említett összes paraméter jól definiált és közel állandó.

### *Kapacitív tömegáram mérő*

A szilárd anyagok tömegáramának kapacitív elven történő mérése azon alapul, hogy az érzékelő zónán keresztül áramló szilárd anyag megváltoztatja a mérőzóna kapacitását. A kapacitív érzékelők ugyanolyan elven működnek, mint az elektrosztatikus típusúak, különbség csupán a jel feldolgozásában van. A szakirodalomban számos publikáció számolt be arról, hogy a kutatómunka során kapacitív elvű mérési módszert használtak.

Az érzékelő elektródák lehetnek sík-, Gyűrű alakúak, vagy többlemezesek, és elhelyezhetők a szállítócső szigetelt részén kívül vagy belül. A mért kapacitás állhat közvetlen vagy közvetett kapcsolatban a szilárd anyag mérőszakaszbeli koncentrációjával. A kapacitív elvű mérési módszer speciális – kis szilárdanyag tartalmú hígáramú pneumatikus szállításnál történt – felhasználásáról Beck és szerzőtársai számolnak be [84, 85].

### *Akusztikus rezonanciás anyag tömegáram mérő*

A hang terjedési sebessége valamely közegben függ a közeg sűrűségétől. Ha szilárd anyag kerül gázba kétfázisú diszperz közeg formájában, akkor a hangsebesség ebben a keverékben alacsonyabb lesz, mint amikor a gáz maga van csak jelen. Megfelelő geometria esetén akusztikus rezonancia jön létre, olyan rezonanciafrekvenciával, ami egyenesen arányos a

hangsebességgel. Az akusztikai rezonanciafrekvencia mérése magával hozza a hangsebesség és ezen keresztül a szilárdanyag hányad mérését (Vetter és Culick [86]).

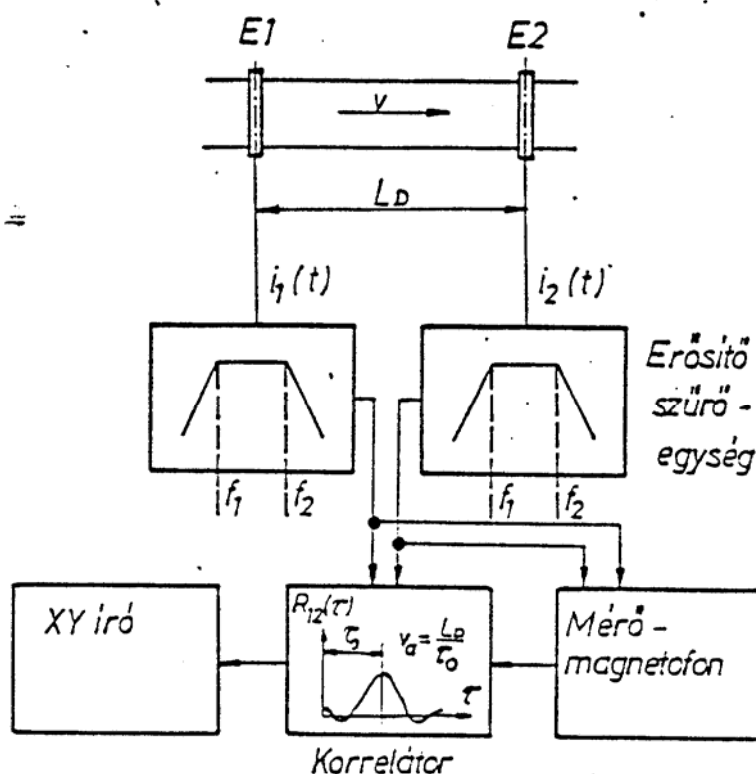
### *Optikai anyag tömegáram mérő*

Ennél a módszernél a gáz-folyadék áramlásban a fény szóródását használják a szilárdanyag koncentráció meghatározására. Az eljárás a „Mie” elméleten alapul, ami kimondja, hogy egy fénysugár nyalábjában a fény intenzitása exponenciális kapcsolatban van a szilárdanyag koncentrációjával. A rendszer fényforrásként használhat lézer vagy villanófényt és egy fotósokszorozón keresztül optikai szálal fénydetektorként (Lu és szerzőtársai [87]).

A rövid irodalmi áttekintés után a jelen fejezetben részletesen ismertetésre kerülő triboelektromos érzékelők (detektorok) által szolgáltatott áramjelek feldolgozása – erősítés és szűrés után – korrelációs méréstechnikával történik [88, 89]. A kísérleti kutatómunka során szállított anyag „BL55” jelzésű búzaliszt, amely anyag szállítási paramétereinek meghatározására felhasználtuk a Wehrmann [90] könyvében elméletileg kifejtett mérési eljárást.

## 5.1. Anyagsebesség mérés

Pneumatikus szállítás során a részecskék mozgás közben a cső falához ütköznek, amikor elszakadnak a csőfaltól, töltés marad rajtuk, amit magukkal visznek. Végeredményben tehát a porrészecskék a csőben feltöltődnek. A feltöltődés mértéke az érintkező anyagok tulajdonságaitól függ [91]. A részecskék csőfalon történő ütközéséből, súrlódásából származó jel sztochasztikus jelnek tekinthető, amely az elhaladó anyagfelhő alakjától, mozgásától, sűrűség eloszlásától függően változik.



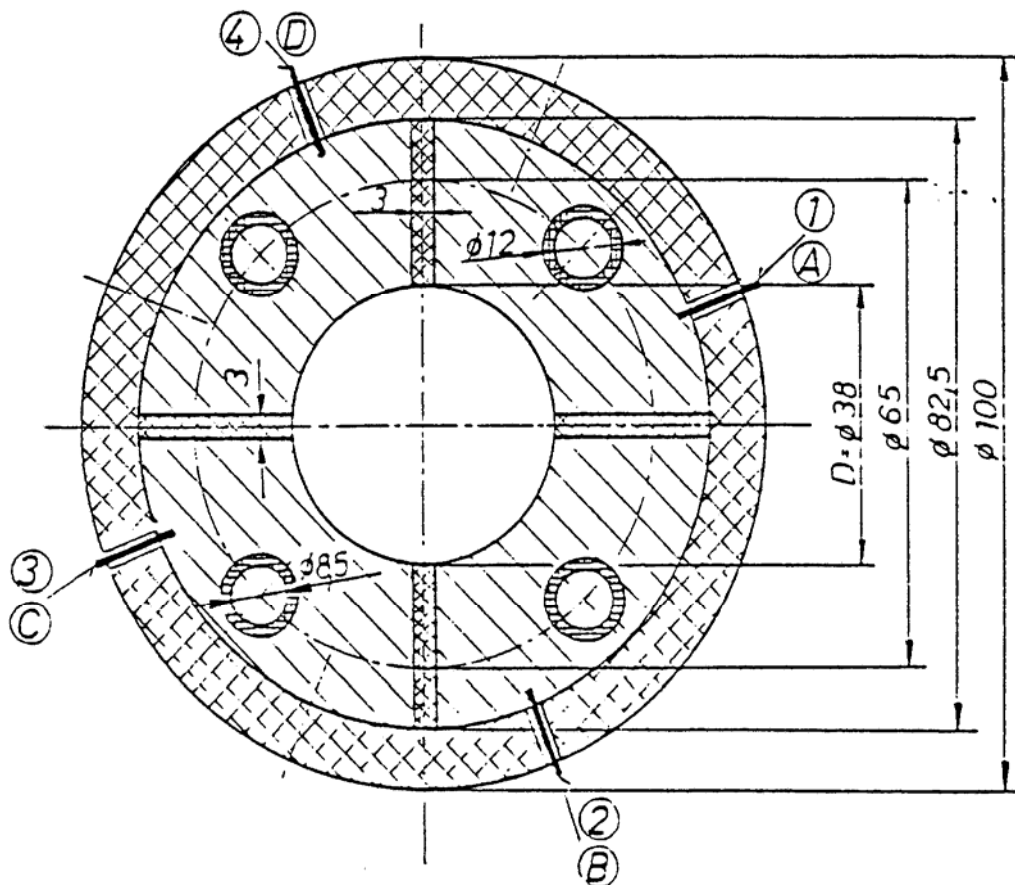
5.1. ábra. Anyagsebesség mérés korrelációs módszerrel

A vízszintes szállítócsőben egymástól „ $L_D$ ” távolságra elhelyezett két triboelektromos érzékelő villamosan szigetelt belső felületén az áramló „részecskefelhő”  $i_1(t)$  és  $i_2(t)$  sztohasztikus áramjelet hoz létre [92]. Az analóg áramjelek erősítés és sávszűrés után egy korrelátor bemenetére jutnak. A mérőkör vázlata az 5.1. ábrán látható.

A korrelátor szolgáltatja – a keresztkorreláció függvény mérésének segítségével – azt a „ $\tau_o$ ” időt, amely alatt az áramló „részecskefelhő” megteszi az érzékelők közötti „ $L_D$ ” távolságot. Ezzel a „ $v_a$ ” anyagsebesség az alábbi módon számítható:

$$v_a = \frac{L_D}{\tau_o} \quad (5.1)$$

Az érzékelő a csővezeték karimás kötése közé építhető, természetesen minden külső érintkező felületen villamos szigetelés található. A teflon gyűrűkkel és lapokkal szigetelt érzékelő metszete az 5.2. ábrán látható.



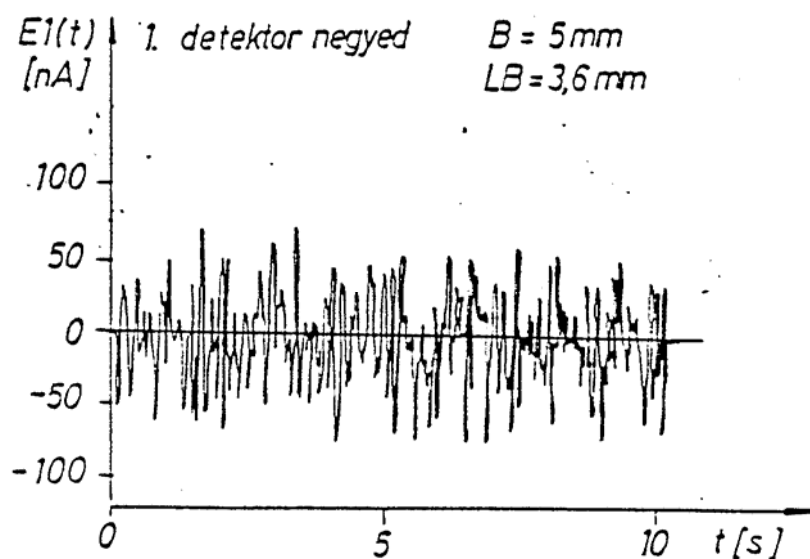
5.2. ábra. Szegmensekből álló triboelektromos érzékelő szerkezeti felépítése

A detektor kialakítása lehetőséget nyújt a vizsgált keresztmetszetben az áramló „részecskefelhő” sebességeloszlásának vizsgálatára. Ezt a cső palástján egymástól és a környezettől megfelelően elszigetelt négy negyedkörívű, acélból készült szegmens elhelyezése teszi lehetővé. Az 5.2. ábrán a szigetelt kivezetések jelölése az áramlási irányban első „E1” jelű érzékelőnél 1, 2, 3 és 4, illetve az „E2” jelű második érzékelőnél A, B, C és D kódokkal történt

A szigetelt kivezetéseken a megfelelő negyed köríveken generált áramjel mérhető. Ez az áram kezdetben arányosan nő a porkoncentrációval, de később nagy porkoncentráció esetén lecsökken a létrejövő por összetömörülések által kialakított áramutak miatt [91].

## 5.2. Korrelációs jelfeldolgozás

A mérések egy része az „E1” és „E2” gyűrűdetektorok egyes szegmenseinek áramjeleit értékeli ki, nagy részük azonban a teljes gyűrűfelület egyidejű összegzett áramjelét dolgozza fel. Az áramjelek stacionáriusnak tekinthető fluktuáló részét korreláció függvényeik és teljesítmény-sűrűség spektrumaik jellemzik. Az 5.3. ábrán az „E1” jelű érzékelő áramjelenek fluktuáló része – zaja – látható.



5.3. ábra. Az „E1” jelű detektor áramjelenek időfüggvénye

A mért áram zajjelek autokorreláció függvénye:

$$R_{ii}(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T i(t) i(t + \tau) dt \quad (5.2)$$

ahol „T” - az elegendően hosszú mérési idő  
 „τ” - a késleltetési idő

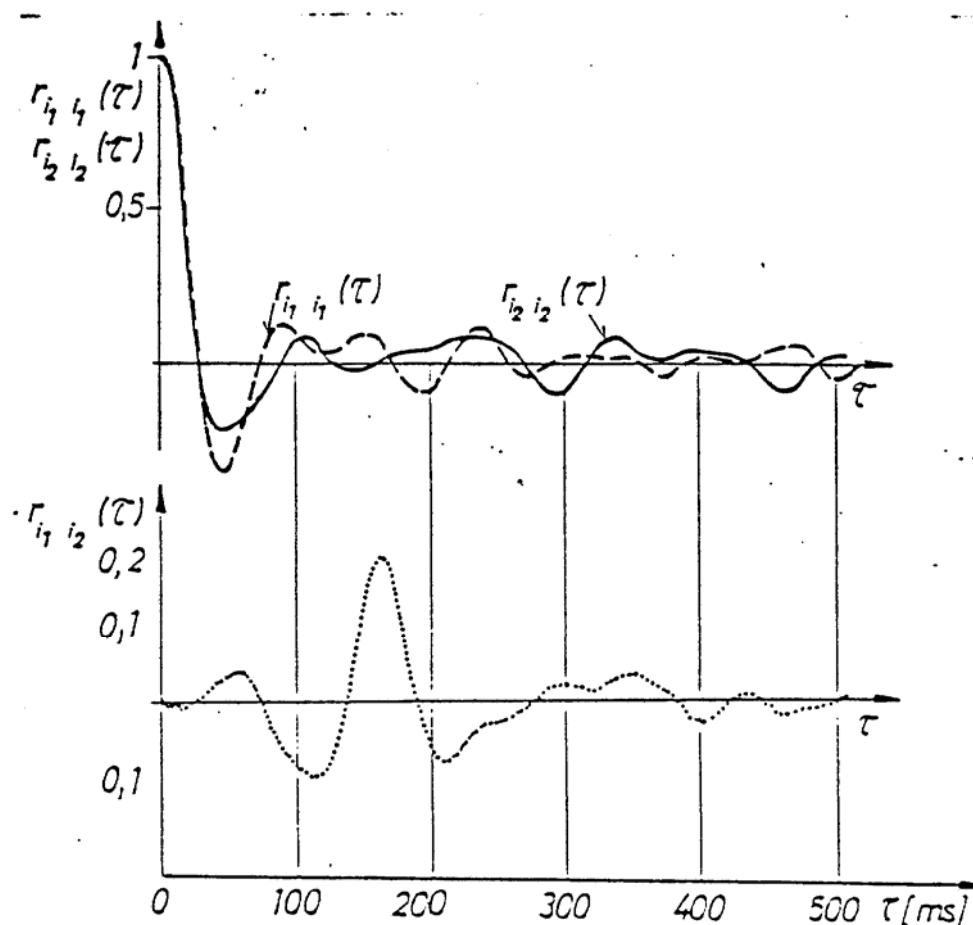
Az autokorreláció függvény felvilágosítást ad egy sztochasztikus jel időtartománybeli belső összefüggéseiről, ha a minta regisztrátumok megfigyelését különböző „τ” időközökben végezzük. Az „ $R_{ii}(\tau)$ ” autokorreláció függvény értéke általában annál kisebb, minél nagyobb a „τ” intervallum, mivel az egymástól távoli függvényértékek közötti kapcsolat általában gyenge. Minél gyorsabb változások jellemzik a jelet, annál gyorsabban csökken az autokorreláció függvény értéke „τ” növelésével, illetve minél gyorsabban csökken az „ $R_{ii}(\tau)$ ” értéke, annál magasabb frekvenciájú jelösszetevők jellemzik a sztochasztikus jelet. A függvény értéke a  $\tau=0$  helyen egyenlő az  $i(t)$  jel négyzetes középértékével és ez egyben a függvény maximális értéke. Ebből gyökvonás után a jel effektív értéke számítható az alábbi módon:

$$I_{eff} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (5.3)$$

Ha a korreláció függvényt két különböző jelre értelmezzük –  $i_1(t)$  és  $i_2(t)$  – a jelek *keresztkorreláció függvényét* kapjuk.

$$R_{i_1 i_2}(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T i_1(t) i_2(t + \tau) dt \quad (5.4)$$

Amennyiben az „E1” és „E2” detektorok „ $L_D$ ” távolsága nem túl nagy, úgy az áramzajok időbeni változása – a késleltetési idővel eltolva – nem túlságosan tér el egymástól. Ekkor az „ $R_{i_1 i_2}(\tau)$ ” függvénynek a  $\tau = \tau_0$  értéknél maximuma van. Az 5.4. ábrán az „E1” és „E2” érzékelők autokorreláció függvényei és a hozzá tartozó keresztkorreláció függvény látható.



5.4. ábra. Az  $i_1(t)$  és  $i_2(t)$  jelek korreláció függvényei

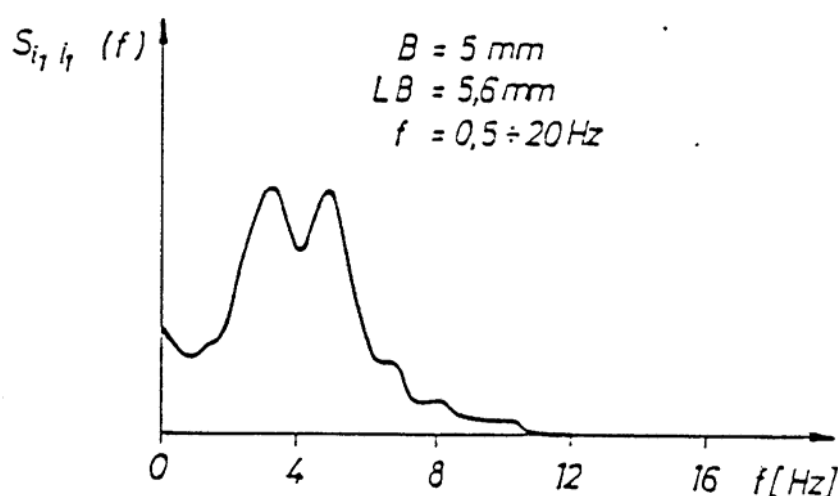
A vizsgált áramlási folyamatoknál (sűrűáramú pneumatikus szállítás esetén) változik a részecskék elrendeződése a csőszakasz mentén. A növekvő érzékelő távolság csökkenti a keresztkorreláció függvény maximumát, szélesíti a csúcs lefutását. A mérések összevetésére bevezethető a *normalizált korreláció függvény*, illetve az „ $r$ ”-rel jelölt *korrelációs tényező*. A korreláció függvények normalizálása a zaj négyzetes középértékének figyelembe vételével történik. Ez a keresztkorreláció függvény esetén:

$$r_{i1i2}(\tau) = \frac{R_{i1i2}(\tau)}{[R_{i1i1}(0)R_{i2i2}(0)]^{1/2}} \quad (5.5)$$

ahol „ $R_{i1i1}(0)$ ” és „ $R_{i2i2}(0)$ ” az érzékelőkön kapott  $i_1(t)$  és  $i_2(t)$  jelek autokorreláció függvényeinek értéke a  $\tau=0$  helyen.

A korreláció függvények Fourier transzformáltjai a teljesítmény-sűrűség spektrumok. A kereszt teljesítmény-sűrűség spektrum az „ $R_{i1i2}(\tau)$ ” keresztkorreláció függvény felhasználásával az alábbi összefüggés szerint számítható:

$$S_{i1i2}(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{i1i2}(\tau) e^{-2\pi f \tau} d\tau \quad (5.6)$$



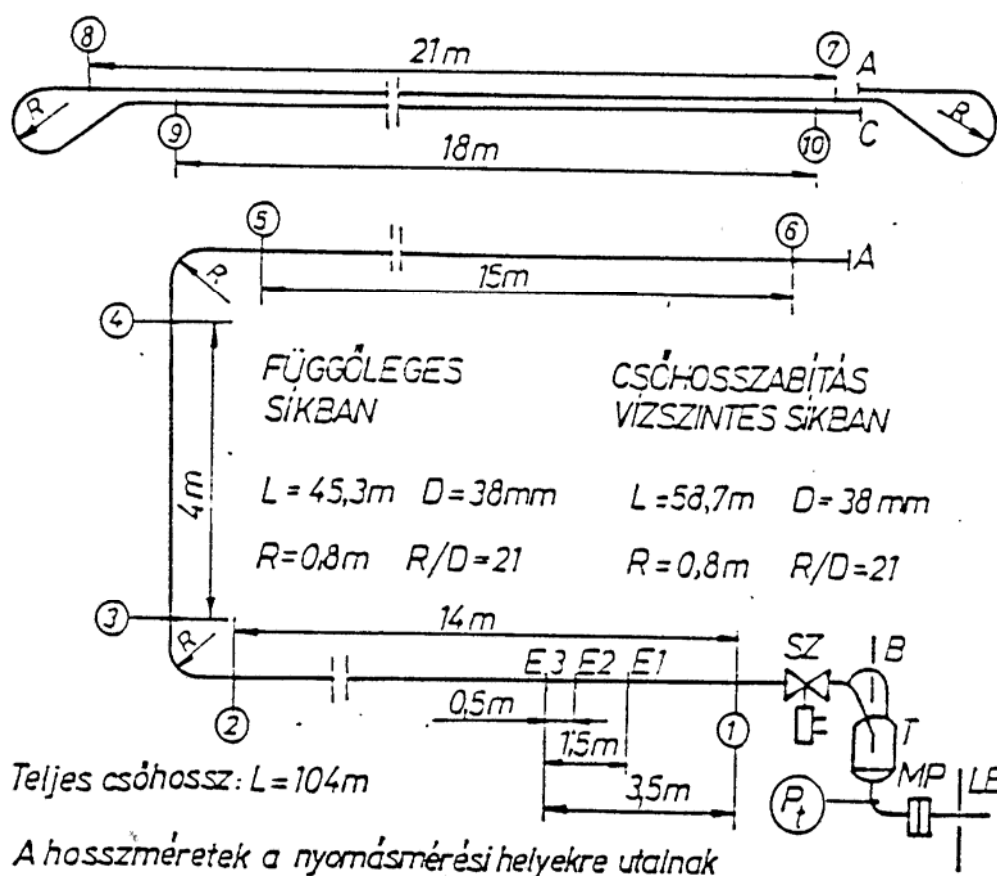
5.5. ábra. Az  $i_1(t)$  és  $i_2(t)$  jelek kereszt teljesítmény-sűrűség spektruma

A mérések alatt az erősített és 0.5-20Hz sávszélességgel szűrt zaj jelek mérő magnetofon felhasználásával lettek rögzítve. Az off-line kiértékeléssel készült kereszt teljesítmény-sűrűség spektrum az 5.5. ábrán látható.

### 5.3. A kísérleti nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezésen elvégzett mérések

Az anyagsebesség méréseket az 5.6. ábrán látható pneumatikus szállítóberendezésen végeztük. A berendezés  $D=38\text{mm}$  belső átmérőjű,  $L=104\text{m}$  hosszúságú szállítóvezetékében „BL55” jelű búzalisztet szállítottunk és a csővégen „C” helyen beépített ciklonnal választottuk le a szállító levegőáramból. A szállítóvezeték vonalvezetését és méreteit az 5.6. ábrán tüntettük fel. A leválasztó ciklonból az anyag az alatta mérlegre telepített fogadótartályba került, amelynek segítségével az elszállított anyag tömegárama meghatározhatóvá vált. A szállító levegőt egy állítható végnyomású ATLAS COPCO csavarkompresszor szolgáltatta. A levegővezeték a nyomótartály aljához csatlakozik. A levegővezetékbe a szállító levegő tömegáramának reprodukálható beállítása céljából az „LB” jelű szűkítő nyílás (lemezblende), illetve a levegő tömegáram mérésére az „MP” jelű mérőperemes mérőszakaszt építettük be. A nyomótartály lazító rétege alatti tiszta levegő-tér „ $p_i$ ” jelű tartálynyomásának mérésére dobozos manométer szolgált. A tartály tetejét a

szállítóvezeték elejével - a 3. fejezetben részletesen ismertetett – megkerülővezeték köti össze, amelyben az ott átbocsátandó levegő tömegáramának változtatására a „B” jelű szűkítő nyílást használtuk.



5.6. ábra. A kísérleti nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezés

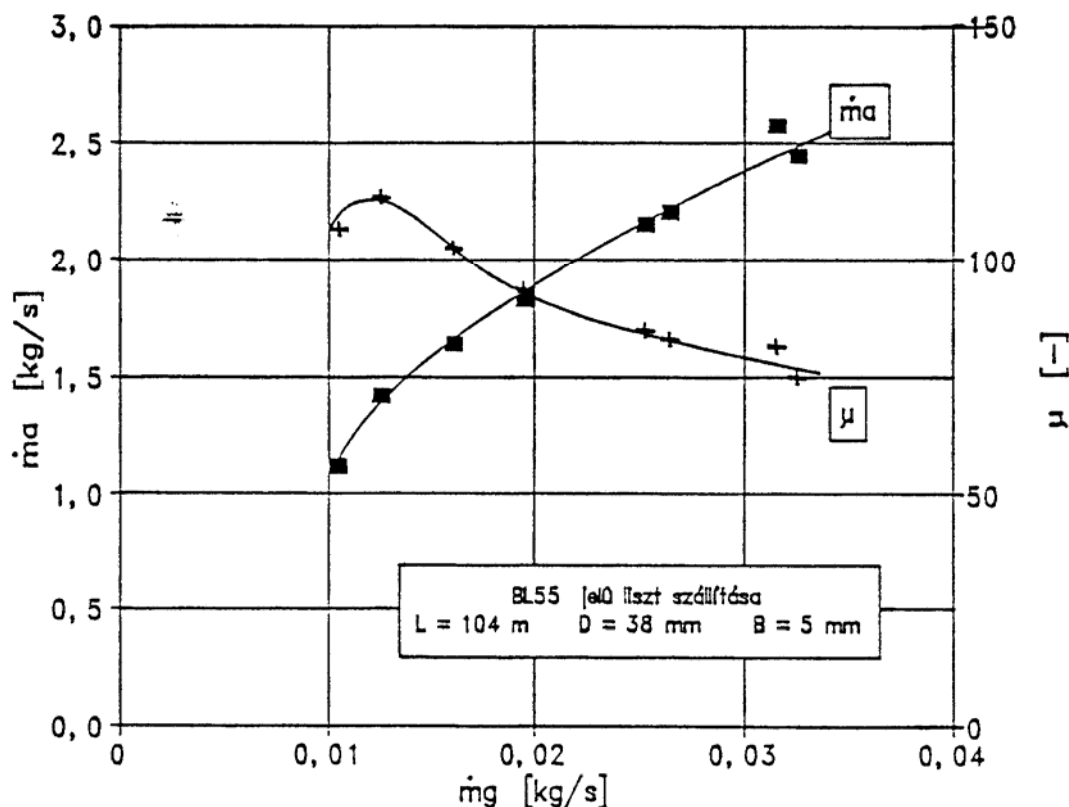
A szállítóvezetékhez – az 5.6. ábrán bekarikázott számokkal jelölt – tíz darab dobozos manométer csatlakozik a hossz menti nyomáseloszlás mérése és a 4. fejezetben ismertetett ütközési tényező (anyagjellemző) meghatározása céljából.

A szállítóvezeték elejére beépített „SZ” jelű elektromos vezérlésű, pneumatikus működtetésű elcsípő szelep itt nem csupán a 3. fejezetben leírtak szerinti pneumatikus szállítási előnyös feltételeket teremtette meg, hanem az indítószelepes mérésnél adódó hosszabb stacionárius szállítási időtartam révén az 5.2. összefüggéssel definiált autokorrelációs függvény felvételéhez szükséges „T” mérési időt is sikerült ezzel megnövelni.

Az „E1”, „E2” és „E3” jelű triboelektromos érzékelőket a szállítóvezeték alsó vízszintes szakaszán az 5.6. ábrában látható módon építettük be. A mérések során egyidejűleg csupán két érzékelő jelét értékeltük ki. A kialakított három különböző hosszúságú mérőszakasz ( $LD=500\text{mm}$ ;  $1000\text{mm}$ ;  $1500\text{mm}$ ) lehetőséget nyújtott ellenőrző mérések végzésére és a legjobb regressziót adó állapotok kiválasztására is.

## 5.4. Mérési eredmények

A kísérleti kutatómunka eredményeinek jelenlegi ismertetésekor a nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezéssel a  $B=5\text{mm}$ -állandó megkerülővezeték szűkítő nyílással végzett mérések eredményeit mutatjuk be.



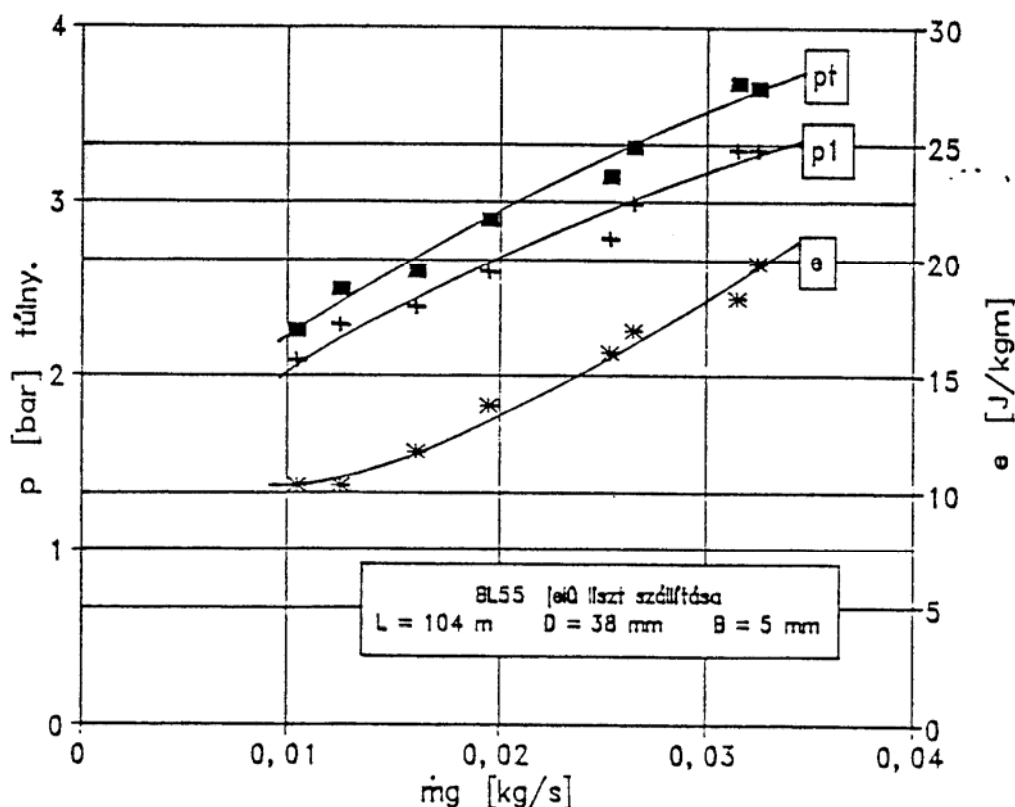
5.7. ábra. Az anyag tömegáram és a keverési arány változása a vizsgált levegő tömegáram tartományban

Az 5.7. ábrán a stacionárius szállítási állapothoz tartozó „ $\dot{m}_a(m_g)$ ” anyag tömegáram - levegő tömegáram és, „ $\mu(m_g)$ ” keverési arány - levegő tömegáram mérésrel meghatározott függvényei láthatók. A szállított anyag „BL55” jelű liszt. Az ábrából látható, hogy az elszállítható anyag tömegáram – amit a szakirodalomban gyakran „szállítóteljesítménynek” neveznek – a levegő tömegáram növelésével nő. Az anyag tömegáram görbéhez az origóból húzható érintő kijelöli a legnagyobb keverési arány helyét.

Az 5.8. ábrán a mérési sorozatban a stacionárius szállítási állapotok során átlagolt „ $p_t$ ” tartálynyomás, „ $p_l$ ” szállítócső eleji nyomás és az „ $e$ ” fajlagos energiaigény értékeit ábrázoltuk az „ $\dot{m}_g$ ” levegő tömegáram függvényében.

Az „E1” és „E2” jelű gyűrűdetektorok egymástól villamosan elszigetelt szegmenseinek (lásd 5.2. ábra) felhasználásával megvizsgáltuk, hogyan alakul a szegmensekként külön-külön átlagolt anyagsűrűség a szállítócső egy keresztmetszetében.





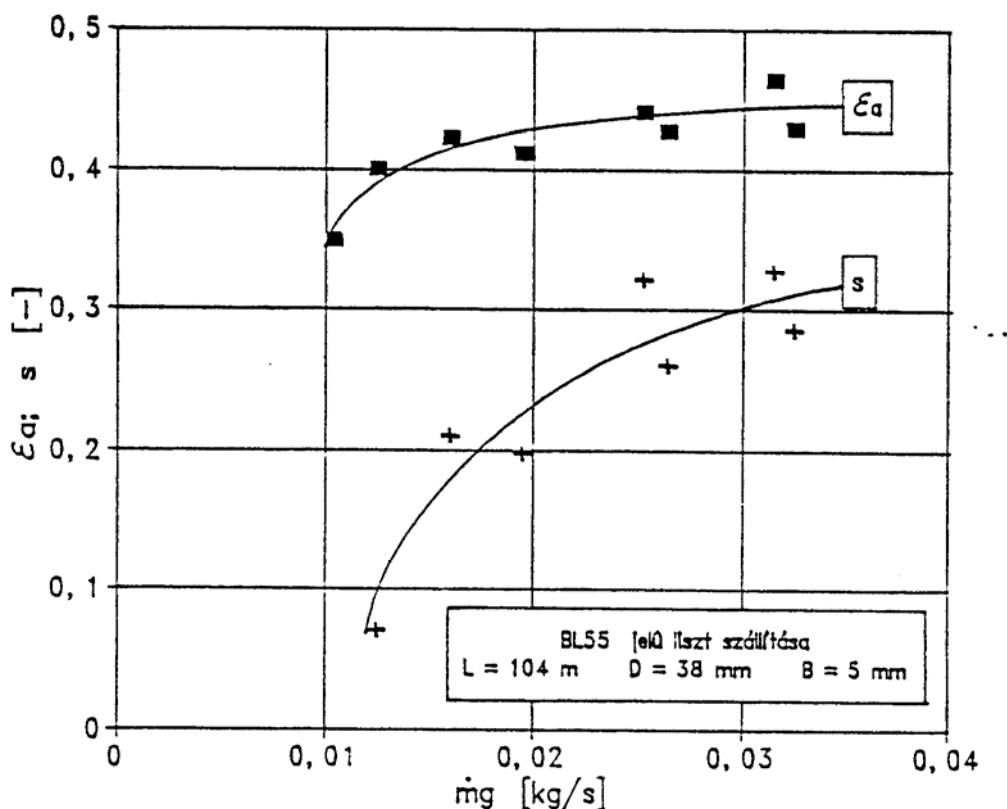
5.8. ábra. A nyomások és a fajlagos energia a levegő tömegáram függvényében

A mérési eredmények egy jellemző összetartozó adatsora a következő táblázatban található:

„BL55” jelű liszt szállítása L=104m hosszúságú D=38mm átmérőjű szállítócsőben B=5mm átmérőjű megkerülővezeték szűkítő nyílásméret esetén							
E1	E2	$I_{\text{leff}}$	$I_{\text{2eff}}$	$\tau_o$	$r(\tau_o)$	$v_a$	megjegyzés
érzékelő		[nA]	[nA]	[ms]	[-]	[m/s]	
1	A	56	38	245	0.35	4.08	felső pár
2	B	42	29	280	0.19	3.57	alsó pár
3	C	60	40	280	0.21	3.53	alsó pár
4	D	56	26	240	0.27	4.17	felső pár
A mérés állandó paramétereit:							
anyag tömegáram						$m_a = 1.12 \text{ kg/s}$	
levegő tömegáram						$m_g = 0.0105 \text{ kg/s}$	
keverési arány						$\mu = 106.7$	
nyomótartály nyomás						$p_t = 2.26 \text{ bar}$ túlnyomás	
szállítócső eleji nyomás						$p_l = 2.10 \text{ bar}$ túlnyomás	
a detektorok (E1-E2) távolsága						$L_D = 1000 \text{ mm}$	
szűrés						$f = 2 - 20 \text{ Hz}$	

A táblázat adatai alapján megállapítható, hogy a keresztmetszetben a felső szegmensek jeleinek átlagaként adódott anyagsebesség 13-15 % -kal nagyobb, mint az alsó félben mért érték. Ez a mérési eredmény is igazolja azt a feltevést, hogy vízszintes szállítócsőben sűrűáramú pneumatikus szállítás során olyan áramkép alakul ki, hogy az anyag egy része a

cső alján nagy halmazsűrűségű „részecskefelhőt” alkotva, részben a csőfalon csúszva halad előre, míg a felül kialakuló ritkább térben az anyagrészecskék döntően ütközve, pattogva és nagyobb átlagsebességgel mozognak. A táblázat adataiból látható továbbá, hogy az „ $r$ ” korrelációs tényező nem éri el a 0.4-et.



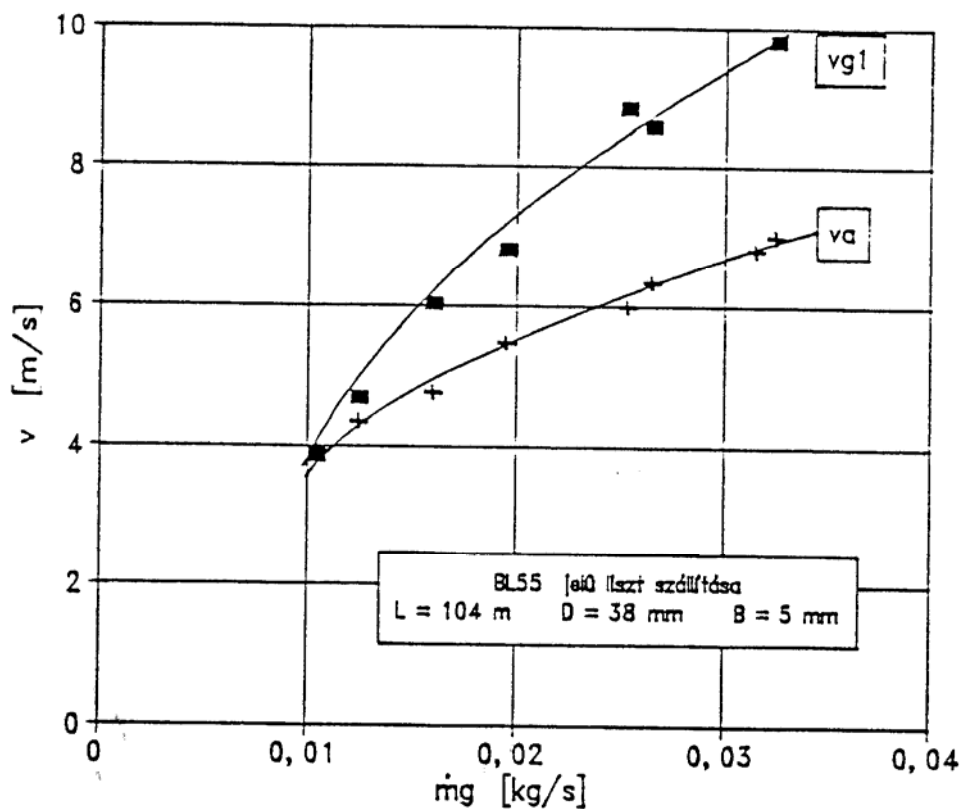
5.9. ábra. Az anyag viszonylagos térfogataránya- és a szlip levegő tömegáram szerinti változása

Az 5.7. és 5.8. ábrákhoz tartozó „ $v_a$ ” anyagsebesség mért értékeinek ismeretében az ismert definíció alapján számítható az „ $\varepsilon_a$ ” viszonylagos anyag térfogatarány:

$$\varepsilon_a = \frac{A_a}{A} = \frac{\dot{m}_a}{v_a \rho_a A} \quad (5.7)$$

Az anyagsebesség mérésekor összegeztük az érzékelőnkénti négy-négy „E1” 1-2-3-4 és „E2” A-B-C-D jeleket. A számításnál  $\rho_a=720\text{kg/m}^3$  anyagsűrűség értéket vettünk figyelembe. Az 5.9. ábrából látható, hogy „ $\varepsilon_a$ ” értéke a vizsgált levegő tömegáram tartományban változik ( $\varepsilon_a=0.35\text{-}0.45$ ), továbbá látható, a fenti viszonylag nagy „ $\varepsilon_a$ ” értékek indokolják a helyi levegősebesség számításakor az anyag jelenléte miatti keresztmetszet-szűkítés figyelembe vételét, ami a hígáramú pneumatikus szállításkor ( $\varepsilon_a \leq 0.01\text{-}0.02$ ) elhanyagolható. Az ábra tartalmazza még a szlip értékeket is, melyek igen nagy szórása miatt csupán a levegő tömegáram szerinti változás tényére, esetleg jellegére mutat rá. Ez ugyanis arra utal, hogy a szlip a szállítási állapot függvényében változik. Kis levegő tömegáramoknál az anyag-levegő keverék jobban együtt halad, míg nagy levegő tömegáramoknál a szlip értéke már jelentősen megnőtt ( $s=0.25\text{-}0.30$ ).

Az 5. 10. ábrán az anyagsebesség és a helyi „ $v_{g1}$ ” levegősebesség látható a vizsgált levegő tömegáram tartományban. Az 1-es index a szállítócső elején mért „ $p_1$ ” nyomású helyre utal.



5.10. ábra. Az anyag- és levegősebesség mért értékei a vizsgált levegő tömegáram tartományban