

Određivanje gubitaka tlaka u fleksibilnim cijevima sustava za odsis drvnih čestica

Kruljac, Antonio

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry / Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:750860>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-19**



Repository / Repozitorij:

[University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
ŠUMARSKI FAKULTET
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK

PREDDIPLOMSKI STUDIJ
DRVNA TEHNOLOGIJA

ANTONIO KRULJAC

ODREĐIVANJE GUBITAKA TLAKA U FLEKSIBILNIM CIJEVIMA
SUSTAVA ZA ODSIS DRVNIH ČESTICA
ZAVRŠNI RAD

ZAGREB, RUJAN, 2020.

PODACI O ZAVRŠNOM RADU

AUTOR:	Antonio Kruljac 3.11.1998., Rijeka 0068232501
NASLOV:	Određivanje gubitaka tlaka u fleksibilnim cijevima sustava za odsis drvnih čestica
PREDMET:	Transportna tehnika u drвноj industriji
MENTOR:	doc. dr. sc. Matija Jug
IZRADU RADA JE POMOGAO:	doc. dr. sc. Matija Jug
RAD JE IZRAĐEN:	Sveučilište u Zagrebu – Šumarski fakultet Zavod za procesne tehnike
AKAD. GOD.:	2019./2020.
DATUM OBRANE:	25.9.2020.
RAD SADRŽI:	Stranica: 37 Slika: 36 Tablica: 1 Navoda literature: 4
SAŽETAK: U ovom radu objašnjene su temeljne funkcije rada sustava za odsis drvnih čestica. Cilj rada bio je odrediti koeficijente otpora sedam različitih vrsta fleksibilnih cijevi, što je od velikog značaja za buduće određivanje pada tlaka u sustavu za odsis i transport drvnih čestica u drvoprerađivačkim pogonima.	

„Izjavljujem da je moj završni rad izvorni rezultat mogega rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni“.

vlastoručni potpis

Antonio Kruljac

U Zagrebu, 25.9.2020.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Definicija drvnih čestica	2
2.1. Vrste usitnjenog drva u drвноj industriji	2
2.2. Sipki materijali.....	3
2.2.1. Granulacija	3
2.2.2. Nasipna gustoća i nasipni kut.....	4
2.2.3. Trenje materijala i abrazivnost.....	4
3. Transport drvnih čestica zračnim konvejerima.....	4
3.1. Fizička svojstva zraka	5
3.2. Teorijske osnove djelovanja zračnih konvejera.....	6
3.2.1. Brzina lebdenja	7
3.2.2. Statički, dinamički i totalni tlak.....	9
3.2.3. Bernoullijeva jednadžba i otpori.....	10
3.2.4. Utjecaj promjene promjera presjeka na tlak	12
4. Materijali i metode	13
4.1. Sastavnice zračnog konvejera.....	13
4.2. Vrste zračnih konvejera	16
4.3. Izbor ventilatora i elektromotora	19
4.4. Vrste odsisnih fleksibilnih cijevi	20
4.5. Mjerenja.....	25
5. Rezultati	28
5.1. Koeficijenti otpora u fleksibilnim cijevima	33
6. Diskusija	35
7. Zaključak.....	36
8. Literatura	37

1. Uvod

U drvnoj industriji, pri obradi drva raznim strojevima, kao što su kružne pile, blanjalice, brusilice ili računalno upravljani strojevi, dolazi do odvajanja drvene materije i nastaju drvene čestice. Odvojene drvene čestice uzrokuju više problema pri obradi drva. Neki od njih se javljaju kod konstruiranja alata za obradu drva, odnosno veličina površine i oblik pazušnog prostora. Drugi veliki problem je nakupljanje odvajane strugotine, odnosno piljevine oko alata tijekom prolaska rezne oštrice kroz određeni zahvat.

Postoji više načina rješavanja navedenog problema. Za odstranjivanje usitnjenih drvnih čestica od alata i radnih površina te njihov transport do mjesta skladištenja, koriste se razni elevatori koji u posudama vertikalno ili pod nekim kutem transportiraju piljevinu. Nadalje, odvojena strugotina može se transportirati pužnim konvejerima koji odvojene drvene čestice vodoravno prenose pomoću okretanja puža ili vibracijski konvejeri koji uslijed djelovanja frekvencije i vibracije „prebacuju“ materijal prema naprijed i tako odvođe drvene čestice dalje od stroja (pile jarmače, tračne pile i sl.).

U drvnoj industriji su najčešće zastupljeni zračni konvejeri, tj. sustavi za odsis kao rješenje problema odstranjivanja drvnih čestica i njihovog skladištenja na za to predviđena mjesta.

Cilj završnog rada je prikazati gubitak tlaka u fleksibilnim cijevima, koja se vrlo često koriste u drvnoj industriji za spajanje ušća alatnog stroja i cjevovoda u sustavu za odsis.

2. Definicija drvnih čestica

Osobina svih oblika usitnjenog drva, za razliku od većine drugih sipkih materijala, je nejednolikost čestica materijala. Svaka čestica razlikuje se po obliku, masi i veličini. Teorijski, sve čestice se aproksimiraju na formu paralelopipeda s različitim odnosom stranica. Za izračune pneumatskog transporta uzimaju se najkrupnije čestice koje ulaze u sustav.

Bitna razlika postoji u sadržaju vode transportiranih drvnih čestica. Kod transporta čestica u proizvodnji iverice sadržaj vode iznosi do 4 % vlažnosti, a kod raspiljivanja trupaca na pilanama sadržaj vode piljevine može se kretati i do 100 % (Svjatkov, 1966).

2.1. Vrste usitnjenog drva u drvnoj industriji

U drvnoj industriji transportiraju se slijedeći oblici usitnjenog drva: piljevina, blanjevina, sječka, iverje i drvna prašina.

Piljevina nastaje pri mehaničkoj obradi drva piljenjem i veličina čestica ovisi o posmičnoj brzini te načinu piljenja, uzdužnom ili poprečnom. Uzdužnim piljenjem nastaju dugačke vlaknaste čestice koje za pneumatski transport trebaju veću brzinu zraka i često uzrokuju taloženje i začepljenje cjevovoda, ako one nisu dimenzionirane za takav oblik transporta.

Blanjevina nastaje procesom blanjanja, a veličina se čestica mijenja ovisno o brzini posmaka i debljini odvajane strugotine.

Iverje je dobiveno usitnjavanjem drva i drvnih ostataka i njegova veličina koja se transportira pomoću zračnog konvejera ne bi trebala prelaziti 60 mm.

Drvna prašina je skup čestica koje nisu veće od 0,1 mm. Karakteristika tih čestica je njihovo kretanje u zraku duže vrijeme u lebdećem stanju. Zbog malih veličina čestica, drvna prašina je izuzetno opasna za ljudsko zdravlje. (Svjatkov, 1966)

2.2. Sipki materijali

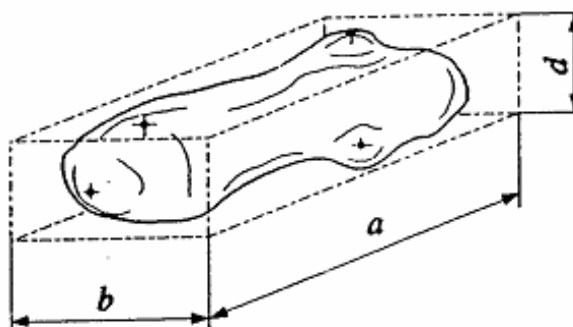
Pojam sipki materijal odnosi se na materijal kojim se rukuje, tj. onaj koji se može presipavati i lopatati, a da se njegova uporabna vrijednost i kakvoća ne smanjuju.

Karakteristike koje obilježavaju sipki materijal su: granulacija (zrnatost), nasipna gustoća, nasipni kut, abrazivno djelovanje, fizička, mehanička i kemijska svojstva (Oluić, 1991).

2.2.1. Granulacija

Granulacija predstavlja omjer veličina najveće i najmanje drvene čestice.

Prema stupnju zrnatosti, sipki materijali se mogu podijeliti obzirom na jednolikost njihova sastava. Dije se na sortirane i nesortirane materijale. Pod sortirane materijale spadaju sipki materijali čiji je odnos maksimalne i minimalne veličine čestice manji od 2,5, a nesortirani materijali su oni materijali čiji je odnos veći od 2,5.



Slika 1. Drvna čestica

Slika prikazuje:

- a – duljina, najveća mjera drvene čestice, mm
- b – širina, srednja mjera, mm
- c – debljina, najmanja mjera, mm

2.2.2. Nasipna gustoća i nasipni kut

Nasipna gustoća predstavlja omjer mase i volumena slobodno nasutog sipkog materijala. Nasipna gustoća uvijek će biti manja od nasipne gustoće kompaktnog materijala radi faktora rastresitosti. Faktor rastresitosti je broj koji pokazuje koliko je puta veći volumen rastresitog materijala u odnosu na volumen kompaktnog materijala. Za iverje taj broj iznosi 3,00, za piljevinu 3,20, a za blanjevinu 4,60 (Svjatkov, 1966).

Nasipni kut je kut kod slobodno nasutog materijala, npr. iverja, koji brid stošca zatvara s horizontalnom podlogom. Tangens nasipnog kuta jednak je faktoru unutarnjeg trenja nasipnog materijala.

2.2.3. Trenje materijala i abrazivnost

Vanjsko trenje javlja se kod kontakta sipkog materijala i dijelova transportnog sredstva kao što su cijevi u zračnom konvejeru. Trenje koje se javlja određuje odabir transportnog sredstva i materijala od kojeg je napravljeno. Abrazivnost je faktor koji je također važan pri odabiru materijala transportnih uređaja te uvelike utječe na samu brzinu kojom se materijal može transportirati. Abrazivnost je svojstvo nekog materijala da izaziva habanje drugog materijala. Drvna piljevina nije abrazivna, za razliku od pepela (Oluić, 1991).

3. Transport drvnih čestica zračnim konvejerima

Osnovna zadaća zračnih konvejera je odsis drvnih čestica od alatnih strojeva i njihov transport do mjesta skladištenja. Zračni konvejeri uvelike se upotrebljavaju u drвноj industriji i više je faktora zbog kojih su često i najbolji izbor transporta. Sastavnice zračnih konvejera su jednostavne konstrukcije i lako ih je održavati. Za razliku od drugih transportnih rješenja za odvođenje drvnih čestica, zračni konvejeri, osim što odvođe krupnije drvene čestice, kao što su piljevina ili blanjevina, u isto vrijeme odstranjuju i drvenu prašinu, što dovodi do sigurnije i zdravije radne okoline. Mogućnost odvođenja drvene prašine omogućena je hermetičnošću cijelog sustava.

3.1. Fizička svojstva zraka

Zrak koji nas okružuje predstavlja smjesu različitih plinova, najviše dušika i kisika, a sadrži i veliku količinu vodene pare. Za proračun se može uzeti da se atmosferski zrak ponaša kao idealni plin, upravo zbog toga što je parcijalni tlak vodene pare u vlažnom zraku puno manjeg iznosa nego što je to barometarski tlak.

Gustoća zraka računa se pomoću jednadžbe stanja idealnog plina, a mijenja se ovisno o termodinamičkoj temperaturi i atmosferskom tlaku zraka.

$$\rho_z = \frac{p}{R * T}$$

gdje je:

ρ_z – gustoća zraka (kg/m³)

p – tlak okolnog zraka (Pa)

R – specifična plinska konstanta za zrak ($R = 287$ J/kgK)

T – termodinamička temperatura (K)

Gustoća smjese dobiva se zbrojem gustoće zraka i gustoće transportiranog materijala, tj. omjera napada usitnjenog materijala za transport i protoka zraka. Gustoća zraka povećava se zbog transporta drvnog materijala.

$$\rho_s = \rho_z + \frac{Q_d}{Q_z} = \rho_z + \frac{m_d}{V_z}$$

gdje je:

ρ_s – gustoća smjese (kg/m³)

Q_d – napad usitnjenog materijala (kg/s)

Q_z – protok zraka (m³/s)

m_d – masa drvnih čestica (kg)

V_z – volumen zraka (m³)

3.2. Teorijske osnove djelovanja zračnih konvejera

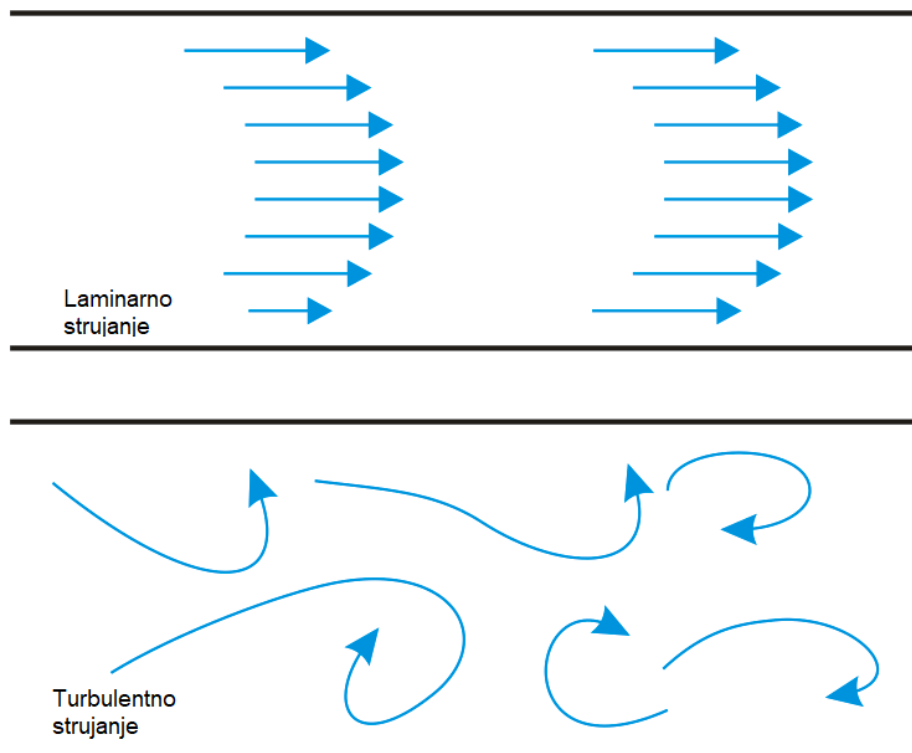
Princip rada pneumatskog transporta temelji se na svojstvu zraka koji struji te istovremeno vrši pritisak na drvenu česticu u sustavu. Ovisno o promjeni brzine strujanja zraka, drvene čestice mogu biti u stanju lebdenja ili ih zrak može povlačiti za sobom (Madjarević, 1969).

Zrak ima određeni viskozitet te se prilikom kretanja kroz cjevovode „lijepi“ za stijenke i na površini zrak ostaje nepokretan. Između slojeva zraka koji se kreće, javlja se unutarnje trenje, što uzrokuje različitu brzinu po poprečnom presjeku zračne struje. Na stijenkama brzina strujanja jednaka je nuli, a u sredini presjeka brzina je maksimalna. Viskoznost također uzrokuje vrtloženje, odnosno rotiranje mase zraka na određenim mjestima u sustavu.

Uz sile viskoziteta, u zraku se javljaju i sile inercije. Na odnos između sila viskoziteta i sila inercije utječu faktori kao što je raspored brzina po presjeku, gubici energije i dr.

Kada u struji zraka prevladava sila viskoziteta (unutrašnjeg trenja), javlja se laminarno strujanje zraka. Kod laminarnog strujanja, strujanje je postojano, a struje zraka se kreću tako da se ne miješaju jedna s drugom. Laminarno strujanje dovodi do lakšeg zaobilaženja prepreka u samom sustavu.

Kada je odnos sila inercije veći od sila viskoziteta, dolazi do turbulentnog strujanja zraka. Zrak se intenzivno miješa u poprečnom pravcu struje zraka (Svjatkov, 1966).



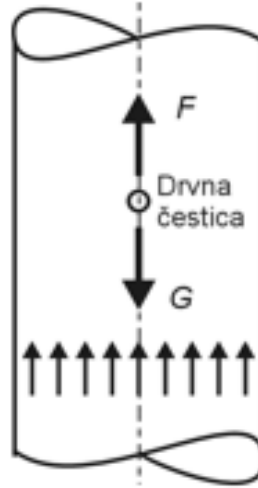
Slika 2. Shematski prikaz laminarnog i turbulentnog strujanja
https://www.periodni.com/gallery/laminar_and_turbulent_flow.png

Kod zračnih konvejera, strujanje je većinom turbulentno, samo uz stijenke ostaje jedan granični sloj laminarnog strujanja (Svjatkov, 1966).

3.2.1. Brzina lebdenja

Osnovni parametar kod zračnih konvejera je brzina strujanja zraka u samim cjevovodima. Brzina strujanja zraka ovisi o promjeru cijevi i o količini zraka koja se transportira. Brzine strujanja zraka kreću se od 10 do 30 m/s ili čak više pri transportu čestica s visokim sadržajem vode.

Brzina lebdenja je brzina zraka kod koje drvena čestica miruje u vertikalnom smjeru.



Slika 4. Shematski prikaz lebdenja drvene čestice

Sila potiska računa se prema formuli:

$$F = \frac{1}{2} * (v_z - v_{d.č.})^2 * \rho_z * A * k$$

Sila gravitacije računa se prema formuli:

$$G = m * g = \frac{d^3 * \pi}{6} * \rho_{d.č.} * g$$

Zbog lebdenja, sila potiska i sila gravitacije su jednake ($F = G$), a drvene čestice miruju i njihova brzina jednaka je nuli ($v_{d.č.} = 0$).

$$\frac{1}{2} * (v_z)^2 * \rho_z * \frac{d^2 * \pi}{4} * k = m * g = \frac{d^3 * \pi}{6} * \rho_{d.č.} * g$$

Iz čega proizlazi izraz za brzinu lebdenja:

$$v_z = \sqrt{\frac{4}{3} * \frac{d * g * \rho_{d.č.}}{k * \rho_z}} \quad (m/s)$$

gdje je:

d – promjer čestice (m)

g – gravitacijsko ubrzanje (m/s^2)

$\rho_{d.č.}$ – gustoća drvnih čestica

ρ_z – gustoća zraka

k – faktor aerodinamičnih svojstava

3.2.2. Statički, dinamički i totalni tlak

Statički tlak je tlak zračne struje između čestica zraka koje se kreću. Statički tlak djeluje na stijenke cjevovoda, tj. može se mjeriti manometrom ili pomoću U-cijevi uz stijenku cjevovoda.

$$p_{st.} = \frac{E_p}{V_z} = \frac{m * g * h}{V_z} = \rho * g * h$$

gdje je:

$p_{st.}$ – statički tlak (Pa)

V_z – obujam zraka (m^3)

E_p – potencijalna energija (J)

Dinamički tlak je onaj kojim je određena kinetička energija zračne struje. Proporcionalan je kvadratu brzine strujanja zraka u cjevovodu, odnosno povećanjem brzine strujanja, dinamički tlak eksponencijalno raste (Svjatkov, 1966).

$$p_{din.} = \frac{E_k}{V_z} = \frac{m * v^2}{2 * V_z} = \frac{\rho * v^2}{2}$$

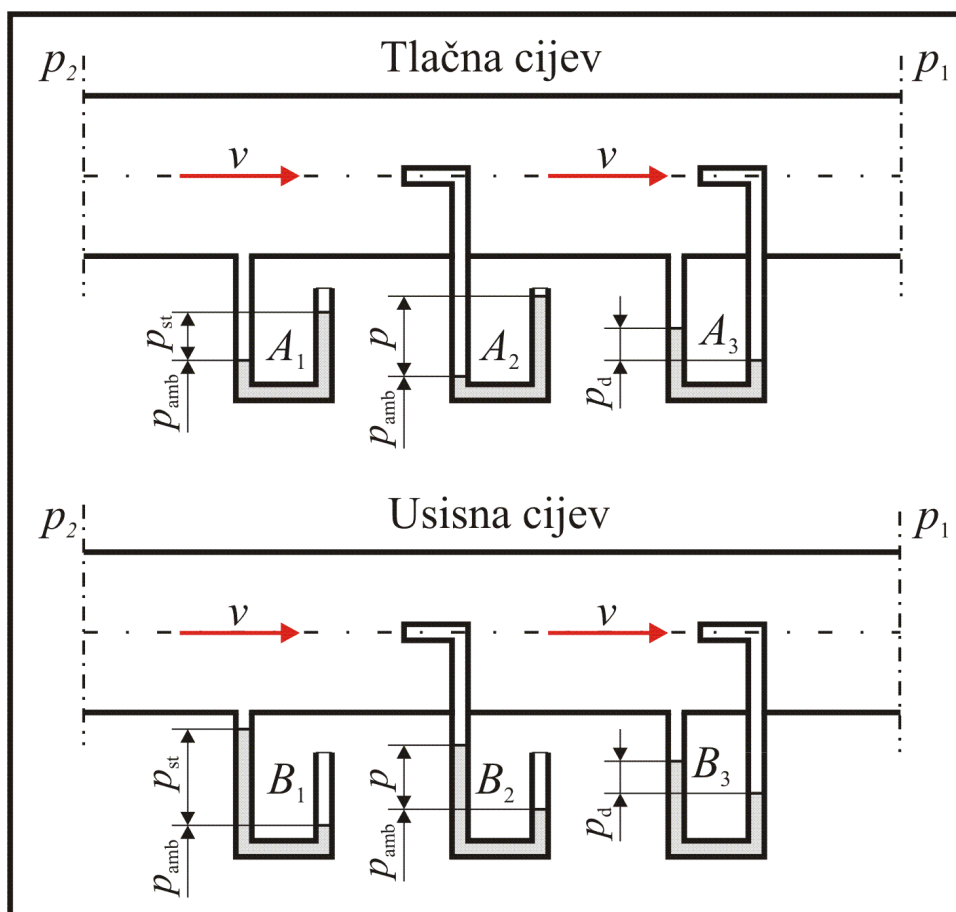
gdje je:

$p_{din.}$ – dinamički tlak (Pa)

V_z – obujam zraka (m^3)

E_k – kinetička energija (J)

Totalni tlak je zbroj statičkog i dinamičkog tlaka, a zavisno o mjestu mjerenja može biti pozitivan ili negativan.



Slika 5. Prikaz tlačne i usisne cijevi

Slika 5. prikazuje mjesta gdje se na cjevovodu mjere statički, totalni i dinamički tlak (s lijeva na desno).

3.2.3. Bernoullijeva jednadžba i otpori

Bernoullijeva jednadžba povezuje tlakove i brzinu strujanja zraka u različitim presjecima cjevovoda. Jednadžba izražava zakon pretvorbe energije, odnosno očuvanja energije.

$$p_{st1} + \frac{\rho * v_1^2}{2} = p_{st2} + \frac{\rho * v_2^2}{2} + \Delta p$$

gdje je:

p_{st1} i p_{st2} – statički tlakovi u dva različita presjeka (Pa)

v_1 i v_2 – srednje brzine strujanja zraka u dva različita presjeka (m/s)

Δp – gubitak tlaka zbog otpora strujanja zraka (Pa)

ρ – gustoća zraka (kg/m³)

Gubitak tlaka zbog otpora strujanja zraka se računa pomoću Darcyjeve formule:

$$\Delta p = \xi_{r.c.} * \frac{\rho * v^2}{2}$$

gdje je:

Δp – gubitak tlaka zbog otpora strujanja zraka (Pa)

$\xi_{r.c.}$ – koeficijent gubitaka za ravne cijevi

$$\xi_{r.c.} = \lambda * \frac{l}{d} = 0,0125 + \frac{0,0011}{d} * \frac{l}{d}$$

gdje je:

λ – faktor trenja

l – duljina ravnog dijela cijevi (m)

d – promjer cijevi (m)

Faktor usisnog ušća ξ_u (ξ_1) za proračune iznosi 0,3. Faktor otpora koljena ξ_k (ξ_3) je otpor strujanja zraka u koljenu, a ovisi o obliku presjeka cijevi, broju koljena, kutu koljena, udaljenosti koljena od izvora turbulencije (najčešće ušća i ventilatora) i omjeru r/d (gdje je r – polumjer simetrale koljena, a d – promjer cijevi). (Nastavni materijali – Zbirka zadataka iz predmeta „Transportna tehnika u drvnjoj industriji”). Faktor otpora koljena računa se na sljedeći način:

$$\xi_k = i * f_1 * f_2 * \xi_{90}^{r/d}$$

gdje je:

i – broj koljena

f_1 – korekcijski faktor za kut luka

f_2 – korekcijski faktor za udaljenost kuta od izvora turbulencije

$\xi_{90}^{r/d}$ – korekcijski faktor za omjer r/d

Svi navedeni otpori za posljedicu daju gubitak tlaka u cjevovodima.

3.2.4. Utjecaj promjene promjera presjeka na tlak

Naglim povećanjem promjera, struja zraka ne ispunjava presjek odmah, već se zrak počinje vrtložiti, čime se gubi energija struje. Rješavanjem Bernoullijeve jednadžbe može se primijetiti kako statički tlak ostaje nepromijenjen, a dinamički se tlak u potpunosti gubi kada struja prelazi u veći presjek, tj. u slobodni prostor.

Kod obrnute situacije, kada zrak prelazi iz većeg presjeka cijevi u manji, dolazi do pojave centrifugalnih sila. Struja zraka odvaja se od stijenki cijevi te dolazi do sabijanja zračne struje, a zatim do širenja. Pri tome se troši dio energije zračne struje. Kako bi se ta pojava spriječila, na ulazu u cjevovod, ugrađuju se kolektori koji osiguravaju ulaz zraka bez odvajanja od stijenki (Svjatkov, 1966).

4. Materijali i metode

4.1. Sastavnice zračnog konvejera

Osnovne sastavnice zračnih konvejera su cjevovodi, koljena odnosno skretnici, ventilator, elektromotor i odvajači drvnih čestica.

Cjevovodi su najčešće kružnog presjeka, a izrađuju se od čeličnog lima debljine od 0,7 do 1,0 mm (2 mm koljena). Cijevi se spajaju na preklop koji mora biti izveden s vanjske strane cjevovoda, jer unutarnje površine moraju biti glatke kako ne bi došlo do nepotrebnih zastoja u protoku zraka. Promjeri cijevi kreću se najčešće u rasponu od 100 do 700 mm uz zaokruživanje na 10 mm. Elementi cjevovoda su dvostrane i trostrane hlačnice, koje služe za paralelno spajanje cjevovoda, odnosno dovod drvnih čestica u magistralni cjevovod. Slijede zasuni za isključivanje grane iz ekshaucijske mreže, redukcije, prijelazni elementi i prijemnici koji direktno s alata odsisavaju odvojenu strugotinu (ušća).



Slika 6. Primjer cjevovoda

(<https://kimel-filtri.hr/proizvodi-i-rjesenja/sustavi-otprasivanja/>)



Slika 7. Primjer dvostrane hlačnice

Koljena su dio cjevovoda, a koriste se za promjenu smjera zračne struje i predstavljaju dodatni koeficijent otpora u pneumatskom sustavu. Vrlo je bitna glatkoća unutarnje površine kako ne bi došlo do dodatnih otpora i u krajnjem slučaju zaštopavanja sustava.



Slika 8. Primjer koljena

Ušća (haube) odnosno prijemnici, služe za odsis piljevine i drvene prašine od alatnog stroja. Vrlo je važno kvalitetno konstruirati ušća, kako bi se što bolje hvatala odvajana strugotina, a gubitak brzine bio što manji. Prijemnik je najčešće izrađen od varenih metalnih elemenata koji moraju zadovoljavati nekoliko uvjeta. Najvažnije je osiguravati dobro hvatanje (taloženje) piljevine, moraju imati male aerodinamične otpore i ne smiju ometati izmjenu i podešavanje reznog alata.



Slika 9. Ušće na debljači

Ventilatori su dio zračnog konvejera koji svojim radom uzrokuju strujanje zračne struje u cjevovodu. Ventilator je ujedno i glavni element u sustavu, a odabire se iz dijagrama statičkih tlakova na temelju protoka. Na odabir utječu tip ventilatora, efektivna snaga, frekvencija vrtnje rotora ventilatora i korisnost rada ventilatora. Ventilatori se dijele na ventilatore niskog (1000 Pa), srednjeg (1000-3000 Pa) i visokog (3000-15000 Pa) pritiska (Svjatkov, 1966).

Odvajači piljevine i drvene prašine odvajaju transportiranu piljevinu i prašinu od zraka. Odvajanje sitnijih čestica kao što je drvena prašina je mnogo zahtjevnije od odvajanja većih čestica. Vrlo je bitno odvajanje drvnih čestica od zraka radi sigurnosti radne okoline i s druge strane iz ekoloških razloga. Postoji jednostupanjsko i višestupanjsko odvajanje drvnih čestica. U višestupanjskom odvajanju mješavina zraka i drvene prašine prolazi kroz više odvajača, a čestice se

odvajaju u odnosu na njihovu granulaciju, tj. prvo dolazi do odvajanja većih čestica.

Centrifugalni odvajajući ili tzv. cikloni su najrasprostranjeniji uređaji za odvajanje drvnih čestica. Izrađeni su iz dva cilindra, unutarnjeg i vanjskog. Na dnu vanjskog cilindra nalazi se konusni otvor gdje se ispuštaju nataložene drvene čestice. Cikloni rade tako da smjesa drvnih čestica i zraka dolazi u prostor između vanjskog i unutarnjeg cilindra te započinje kružno kretanje, pojavljuje se centrifugalna sila koja privlači drvene čestice na stijenke vanjskog cilindra. Zbog trenja i gubitka brzine, čestice padaju kroz konusni otvor (Svjatkov, 1966).

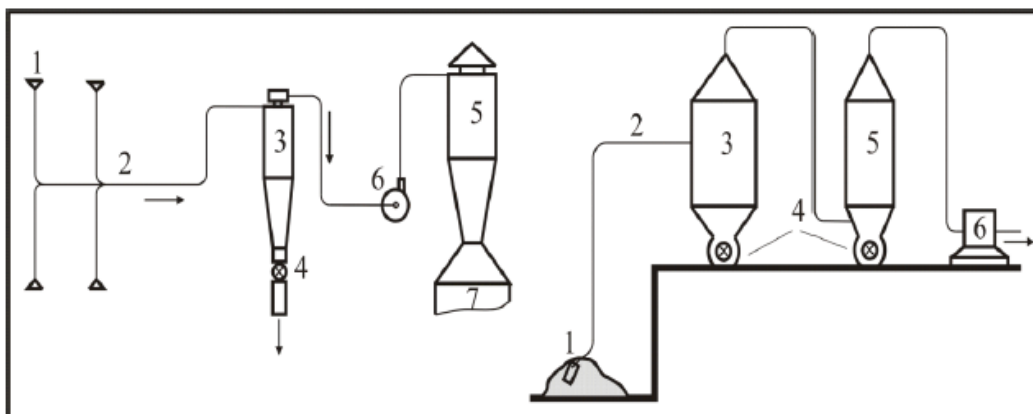


Slika 10. Primjeri ciklona (<https://teho-filter.hr/ctf-centrifugalni-separatori-prasine/>)

4.2. Vrste zračnih konvejera

Zračni konvejeri razlikuju se prema položaju ventilatora u odnosu na transportni cjevovod.

Usisni zračni konvejeri osiguravaju kretanje materijala samo kroz usisnu cijev te se ne oštećuje ventilator. Kod takve se izvedbe najveće ili gotovo sve čestice talože u odvajaju i ne prolaze kroz ventilator.

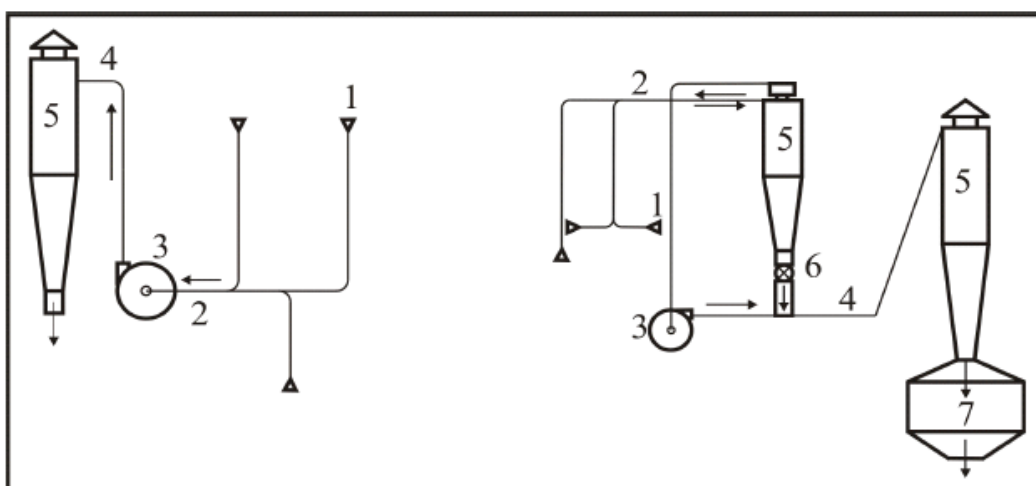


Slika 11. Prikaz usisnog sustava

Slika 11 prikazuje sljedeće dijelove sustava:

- 1 – usisno ušće
- 2 – usisna cijev
- 3 i 5 – odvajači drvnih čestica
- 4 – hermetički zatvarač
- 6 – ventilator
- 7 – bunker (silos) za drvene čestice

Najčešće korišteni sustav u drvenoj industriji je usisno – tlačni.

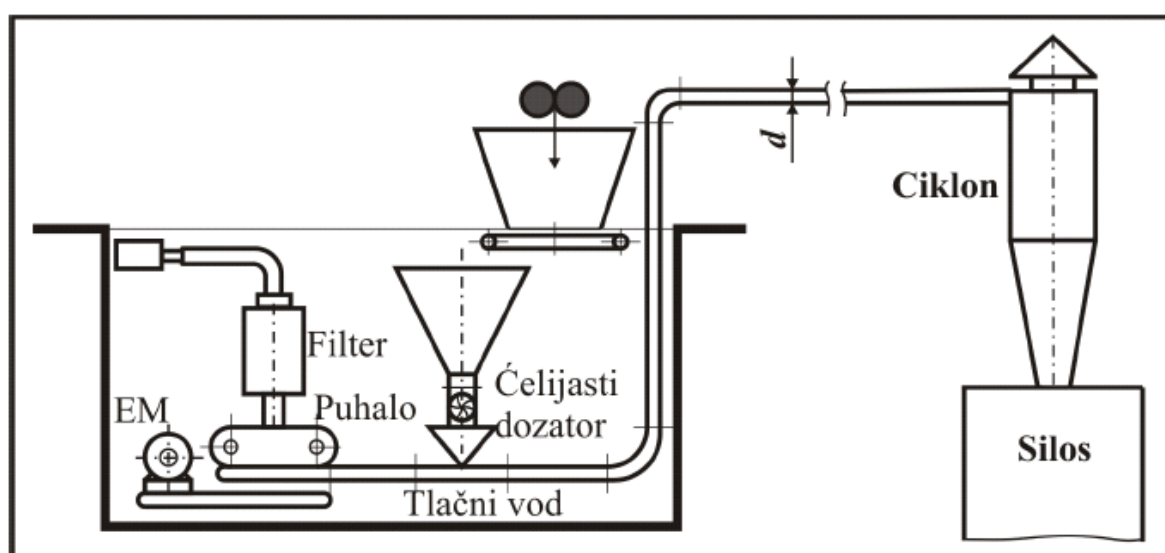


Slika 12. Prikaz usisno - tlačnog sustava

Slika 12 prikazuje sljedeće dijelove sustava:

- 1 – usisno ušće
- 2 – usisna cijev
- 3 - ventilator
- 4 – tlačna cijev
- 5 – odvajač drvnih čestica
- 6 – hermetički zatvarač s dozatorom
- 7 – bunker (silos) za drvene čestice

Zadnji sustav koji se u drvnj industriji koristi je tlačni sustav. Sustav se odlikuje manjom potrošnjom električne energije, cijevi su manjih dimenzija i ventilator se slabo troši. Takvi sustavi se obično koriste za transport usitnjenog materijala na veće udaljenosti i do nekoliko stotina metara u kombinaciji s još jednim ili više radijalnih ventilatora ako su te udaljenosti veće. Najčešće doziranje na takav ventilator je pomoću pužnog mehanizma ili stružnim tračnim konvejerom koji pomalo doziraju drvene čestice na otvor ventilatora. Često se takav način koristi za transport materijala do kotlovnica ili skladišta koja su od pogona udaljena iz nekog razloga.

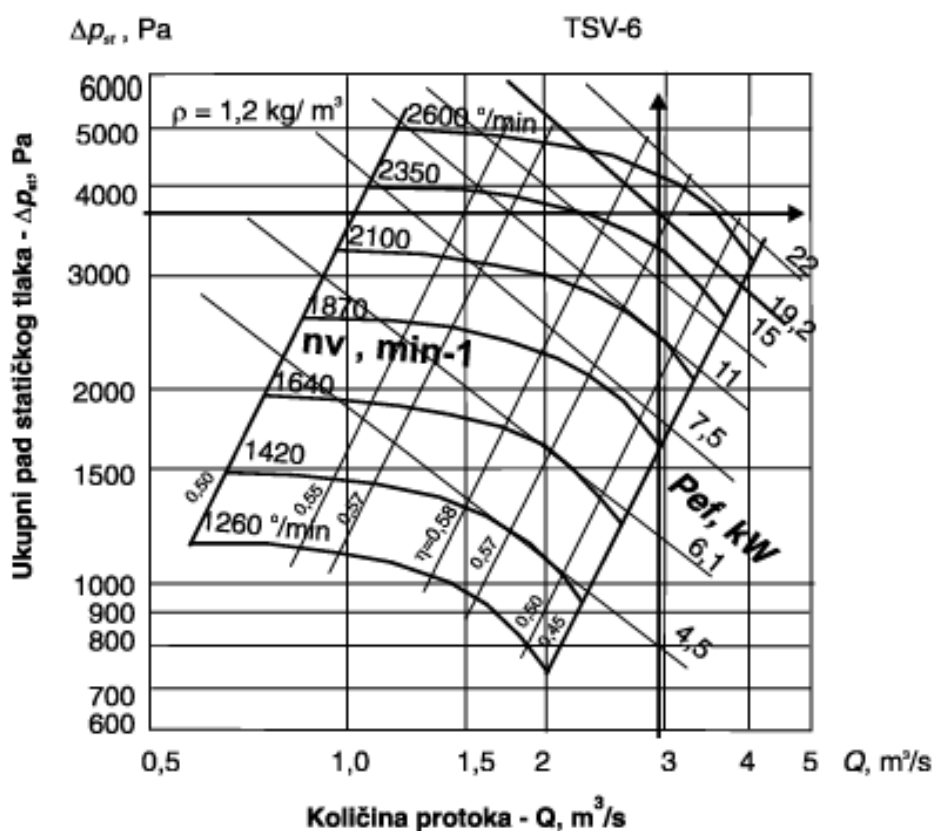


Slika 13. Prikaz tlačnog sustava

Zračni konvejeri se mogu podijeliti prema tlaku i prema koncentraciji. Prema tlaku se dijele na one s niskim tlakom (ispod 5 kPa), srednjim tlakom (do 20 kPa) i visokim tlakom (preko 20 kPa). Prema koncentraciji se dijele na one niske koncentracije (ispod 0,5), srednje koncentracije (0,5 – 2,0) i visoke koncentracije (više od 2,0). Koncentracija se može definirati kao težinska (N/N) ili masena (kg/kg).

4.3. Izbor ventilatora i elektromotora

Izbor ventilatora se temelji na padu statičkog, odnosno totalnog tlaka i ukupnog protoka. Prilikom odabira ventilatora prate se vrijednosti kao što su tip ventilatora, efektivna snaga, frekvencija vrtnje rotora ventilatora i korisnost rada ventilatora. Iz slike 14 se mogu očitati potrebne veličine, ako su prije poznati ukupni pad statičkog tlaka i količina protoka. Tip ventilatora koji prikazuje slika 14 je TSV – 6.



Slika 14. Dijagram statičkih tlakova

Izbor elektromotora ovisi o potrebnoj efektivnoj snazi ventilatora i o potrebnom broju okretaja. Za izbor elektromotora, efektivna snaga uvećava se zbog predimenzioniranja za 10 % i 2 do 4 % na gubitke u prijenosu snage.

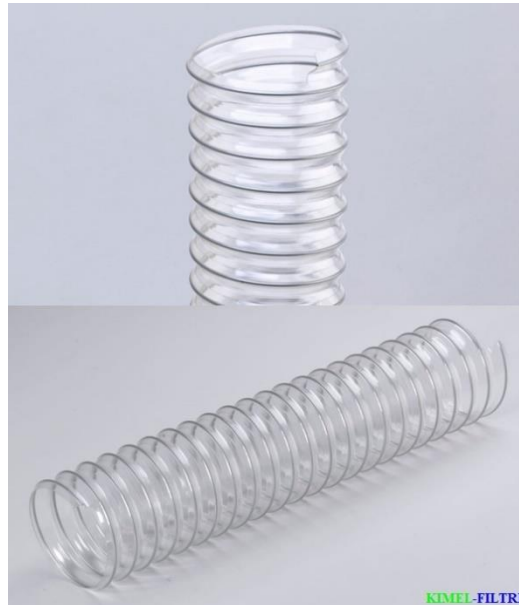


Slika 15. Natpisna pločica pogonskog elektromotora

4.4. Vrste odsisnih fleksibilnih cijevi

U istraživanju je bilo korišteno sedam vrsta odsisnih fleksibilnih cijevi promjera 100 mm tvrtke „Kimel filtri“. To su redom: „PUZ“, „PUR“, „PUM“, „PUH“, „PU Hose“, „EOLO L“ i „EOLO PU EST“.

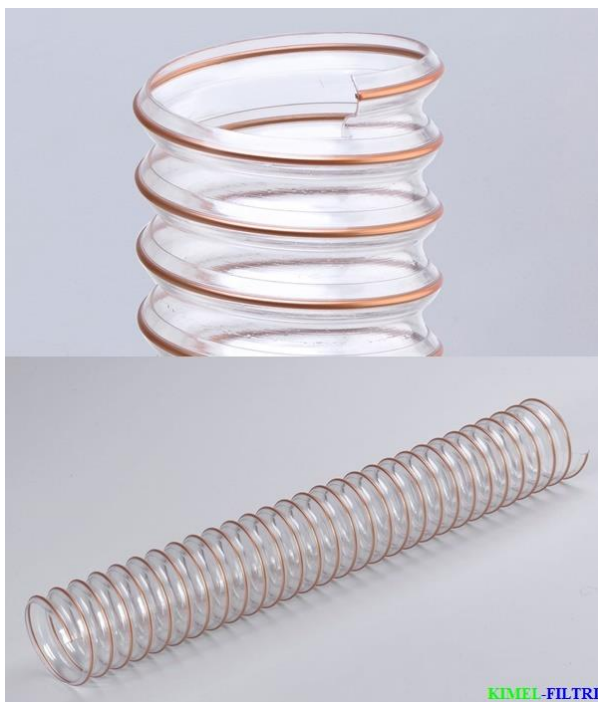
„PUZ“ je poliuretanska, prozirna, antistatička cijev ojačana metalnom spiralom, vidljiva na slici 16. Debljina stijenke iznosi od 0,35 do 0,50 mm. Zbog svoje fleksibilnosti i male mase prikladna je za povezivanje pokretnih priključaka, kao što su CNC obradni centri.



Slika 16. „PUZ“ cijev

(<https://kimel-filtri.hr/proizvodi-i-rjesenja/prateca-oprema-2/>)

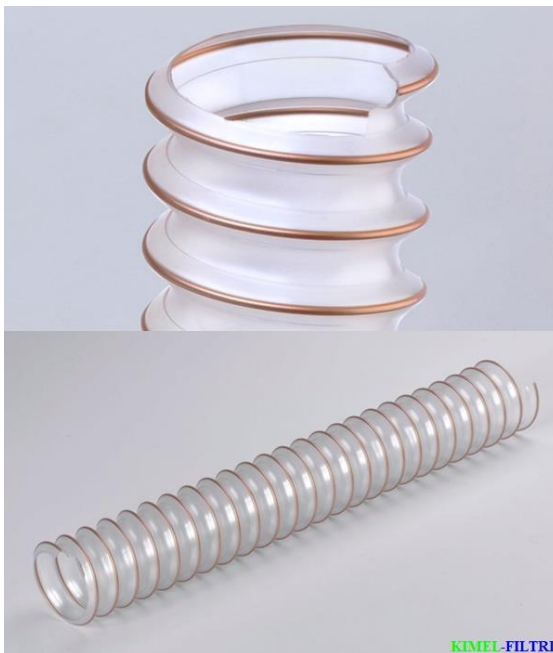
„PUR“ je poliuretanska, antistatička, prozirna cijev ojačana pobakrenom metalnom spiralom. Debljina stijenke iznosi od 0,4 do 0,75 mm. Kruća je od „PUZ“ cijevi, što znači da je izdržljivija, no manje fleksibilnija.



Slika 17. „PUR“ cijev

(<https://kimel-filtri.hr/proizvodi-i-rjesenja/prateca-oprema-2/>)

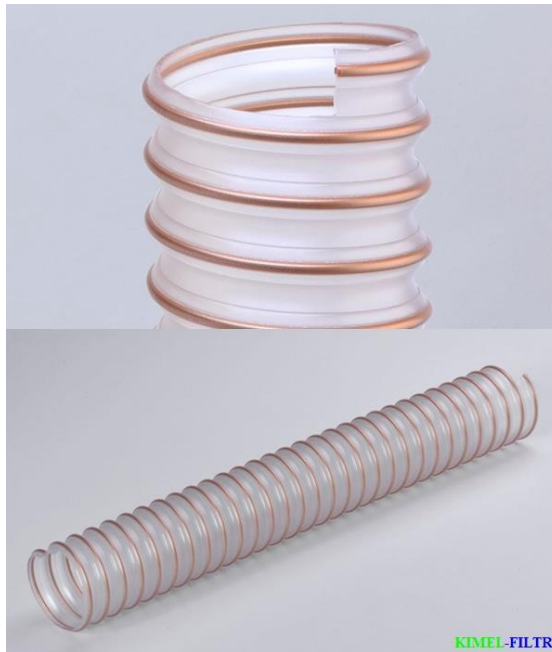
„PUM“ je poliuretanska, antistatička, prozirno mutna cijev ojačana pobakrenom metalnom spiralom, što se može vidjeti na slici 17. Debljina stijenke iznosi od 0,4 do 0,75 mm. Jednake je otpornosti na mehanička naprezanja kao i „PUR“, ali je fleksibilnija.



Slika 17. „PUM“ cijev

(<https://kimel-filtri.hr/proizvodi-i-rjesenja/prateca-oprema-2/>)

„PUH“ je poliuretanska, antistatička, prozirno mutna cijev ojačana pobakrenom metalnom spiralom. Debljina stijenke iznosi od 0,9 mm. Kvalitetnija je od „PUR“ cijevi, zbog veće otpornosti na mehanička naprezanja, što joj omogućuje dvostruko jača stijenka. Moguće ju je koristiti u najtežim uvjetima rada, ne samo zbog velike izdržljivosti, već i zbog fleksibilnosti koja je veća od prethodno navedenih cijevi.



Slika 18. „PUH“ cijev

(<https://kimel-filtri.hr/proizvodi-i-rjesenja/prateca-oprema-2/>)

„EOLO L“ je PVC cijev tamnosive boje ojačana krutom PVC spiralom. Debljina stijenke iznosi od 0,8 do 1,1 mm. Cijev je glatka iznutra, a naborana izvana. Vrlo je lagana i fleksibilna.



Slika 19. „EOLO L“ cijev

(<https://kimel-filtri.hr/proizvodi-i-rjesenja/prateca-oprema-2/>)

„EOLO PU EST“ je tvrda prozirna PVC cijev ojačana krutom PVC spiralom. Debljina stijenke iznosi od 0,5 do 0,8 mm. Otporna je na struganje i uvijanje, a glatkoća cijevi iznutra osigurava najveći optimalni protok.

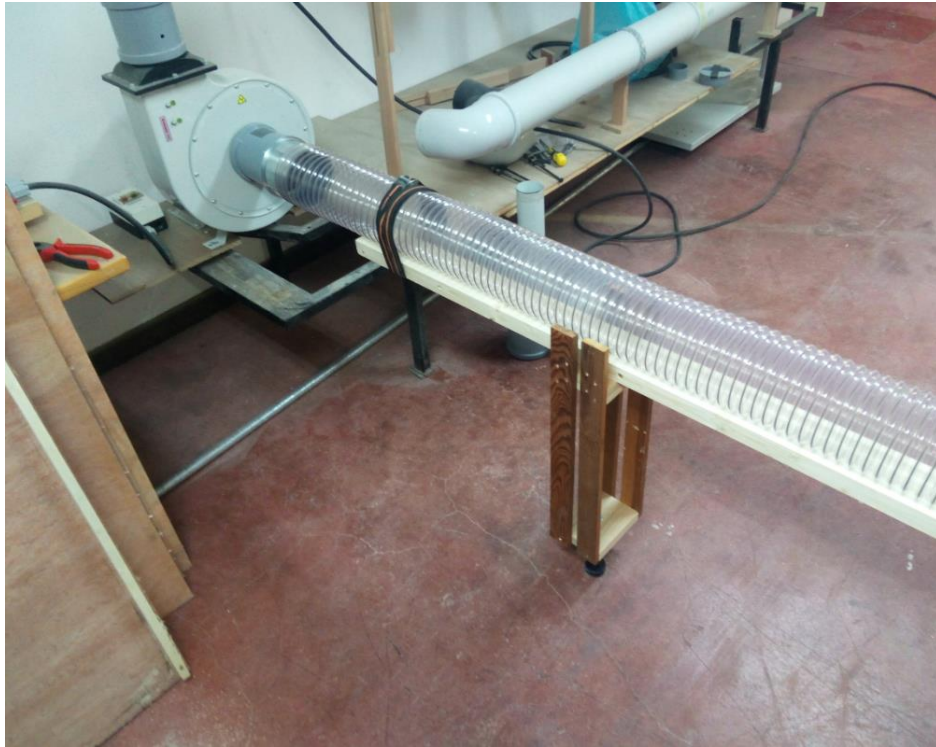


Slika 20. „EOLO PU EST“ cijev

(<https://kimel-filtri.hr/proizvodi-i-rjesenja/prateca-oprema-2/>)

4.5. Mjerenja

Cilj mjerenja bio je odrediti otpore za sedam različitih vrsta fleksibilnih cijevi promjera 100 mm. Za određivanje otpora važno je izmjeriti tlakove i brzine zraka na ravnom dijelu fleksibilnih cijevi na dva mjerna mjesta s razmakom od 1 m.

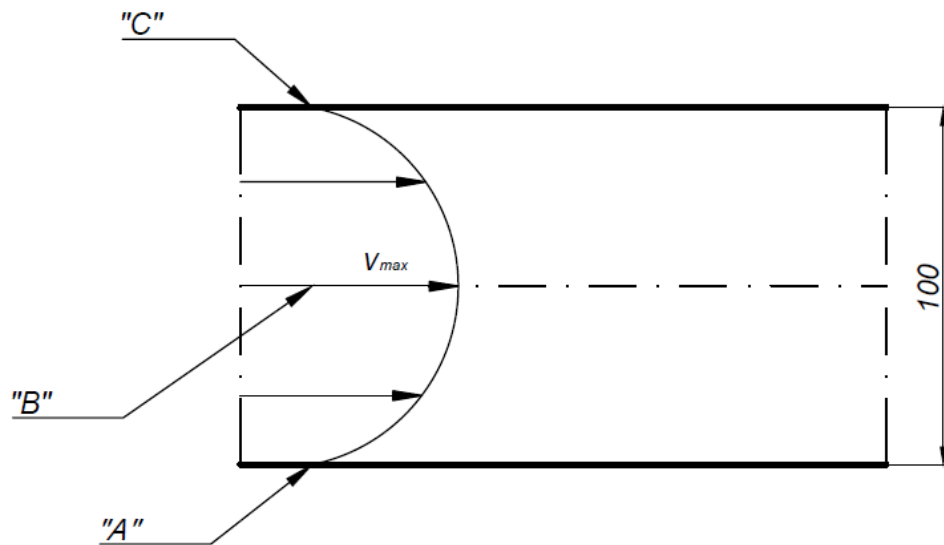


Slika 21. Spoj fleksibilne cijevi s ventilatorom

Na dva mjerna mjesta (slika 22), prvo koje je udaljeno 2 m od ventilatora, i drugo koje je udaljeno 1 m od ventilatora, izmjereni su parametri. Pomoću U-cijevi određen je statički tlak i totalni tlak na tri mjesta kroz promjer cijevi, na dva nasuprotna mjesta uz stijenku cijevi („A“ i „C“) i na sredini promjera cijevi („B“) (Slika 23). Brzina strujanja zraka na ušću mjerena je anemometrom. Pitotovom cijevi na mjestima „A“, „B“ i „C“ izmjeren je dinamički tlak i brzina zraka (Slika 24).



Slika 22. Mjerna mjesta 1 i 2 i mjerenje pomoću U-cijevi



Slika 23. Tlocrtni prikaz mjernih mjesta „A“, „B“ i „C“ te distribucije brzine zraka po promjeru

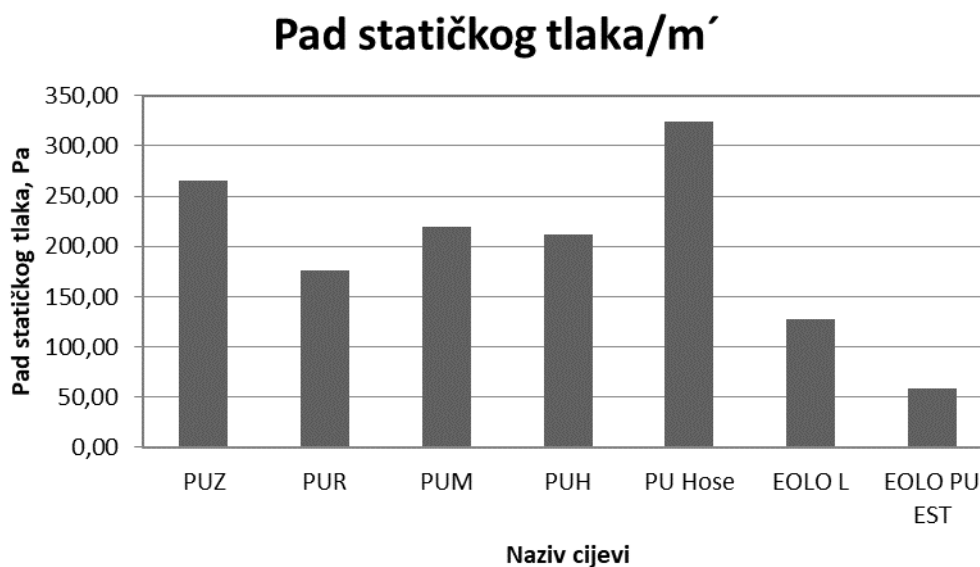


Slika 24. Mjerenje dinamičkog tlaka i brzine strujanja zraka pomoću Pitotove cijevi

5. Rezultati

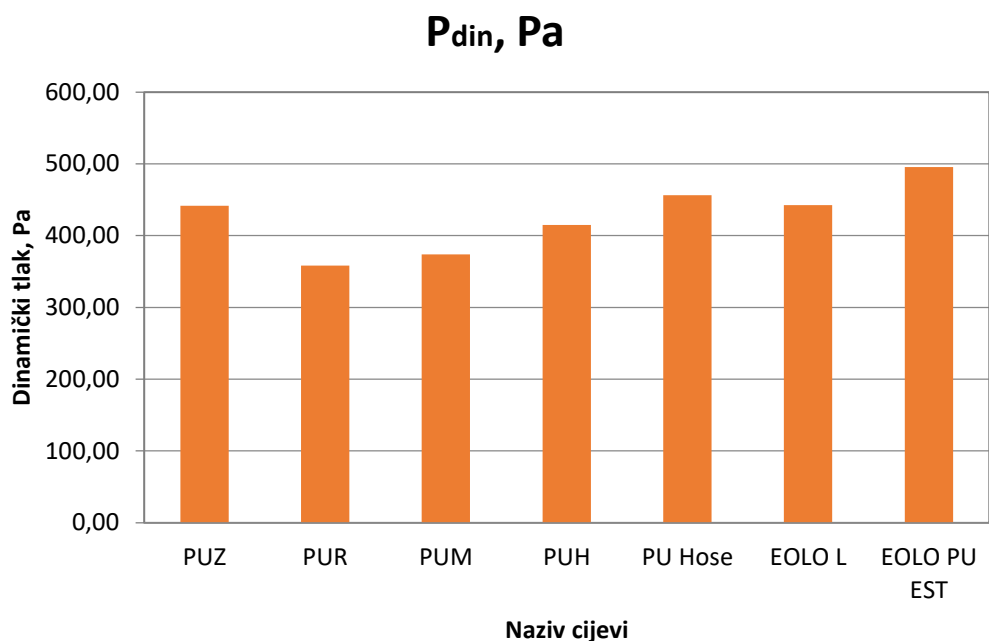
Fleksibilne cijevi su različite u odnosu na ravne metalne cijevi. Zbog svojih ožljebljenja i vrste materijala od kojih su napravljene, fleksibilne cijevi imaju mogućnost promjene duljine te ne moraju biti ravne, što znači da omogućuju promjenu pozicije radnog stroja. Za razliku od ravnih cijevi koje imaju glatku unutarnju stijenku, fleksibilne cijevi zbog svojih užljebljenja i vrste materijala (poliuretan ili PVC) imaju mnogo veći faktor trenja.

Na mjernim mjestima M1 i M2 na sedam vrsta cijevi izmjeren je statički i totalni tlak. Slika 25 prikazuje pad statičkog tlaka između mjernih mjesta M1 i M2 za sve vrste cijevi. Cijev „PU Hose“ ima najveću pad statičkog tlaka, a „EOLO PU EST“ najmanji. Pitotovom cijevi izmjeren je dinamički tlak i brzine strujanja zraka kroz tri mjesta po presjeku cijevi.

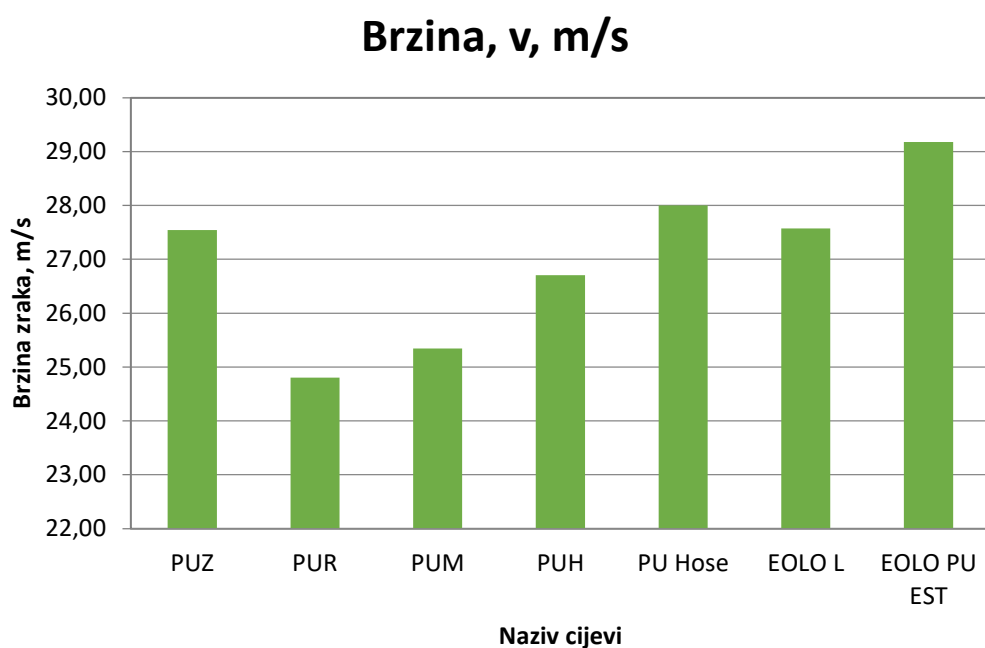


Slika 25. Pad statičkog tlaka

Dinamički tlak je najveći na sredini promjera cijevi, gdje je najveća brzina strujanja zraka i nema otpora trenja. Slika 26 prikazuje srednji iznos dinamičkog tlaka između mjernih mjesta M1 i M2.



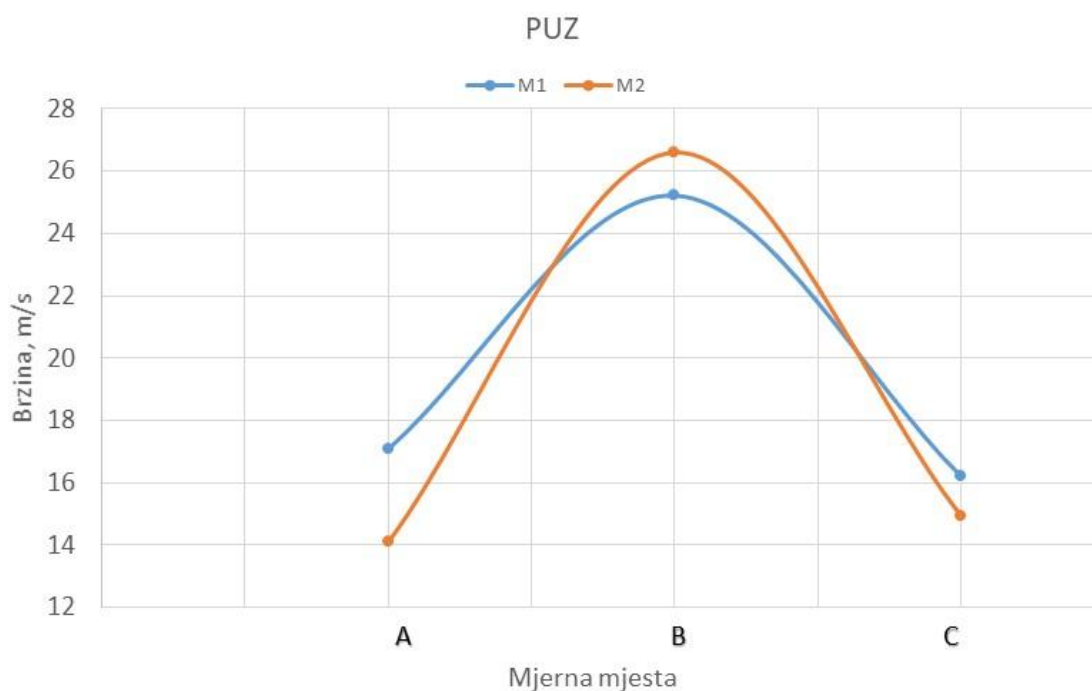
Slika 26. Dinamički tlak u ravnom dijelu cijevi



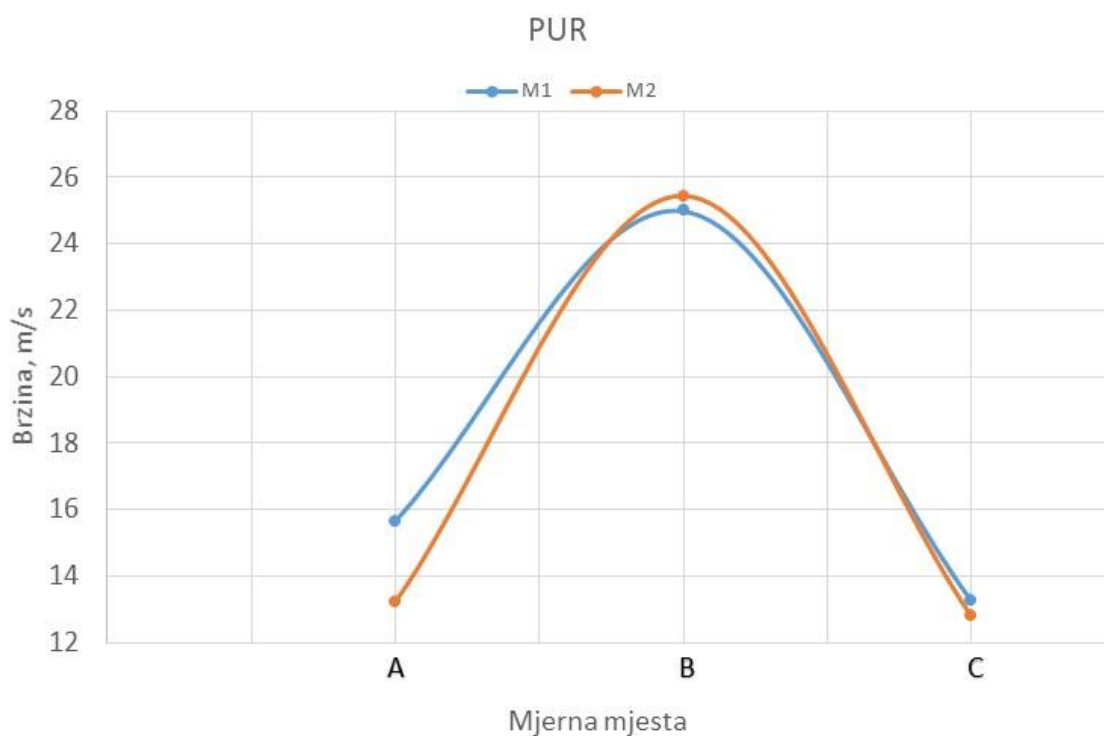
Slika 27. Srednja brzina strujanja zraka između M1 i M2 za sve cijevi

Kod već spomenutih brzina strujanja zraka, distribucija po promjeru cijevi jednaka je kao i kod dinamičkog tlaka. Slike 28-34 prikazuju distribuciju brzine po promjeru cijevi (A, B, C) za mjerna mjesta M1 i M2. Na slici 23 vidljivo je kako je na sredini promjera cijevi najveća brzina strujanja zraka, a uz stijenke najmanja. Iz

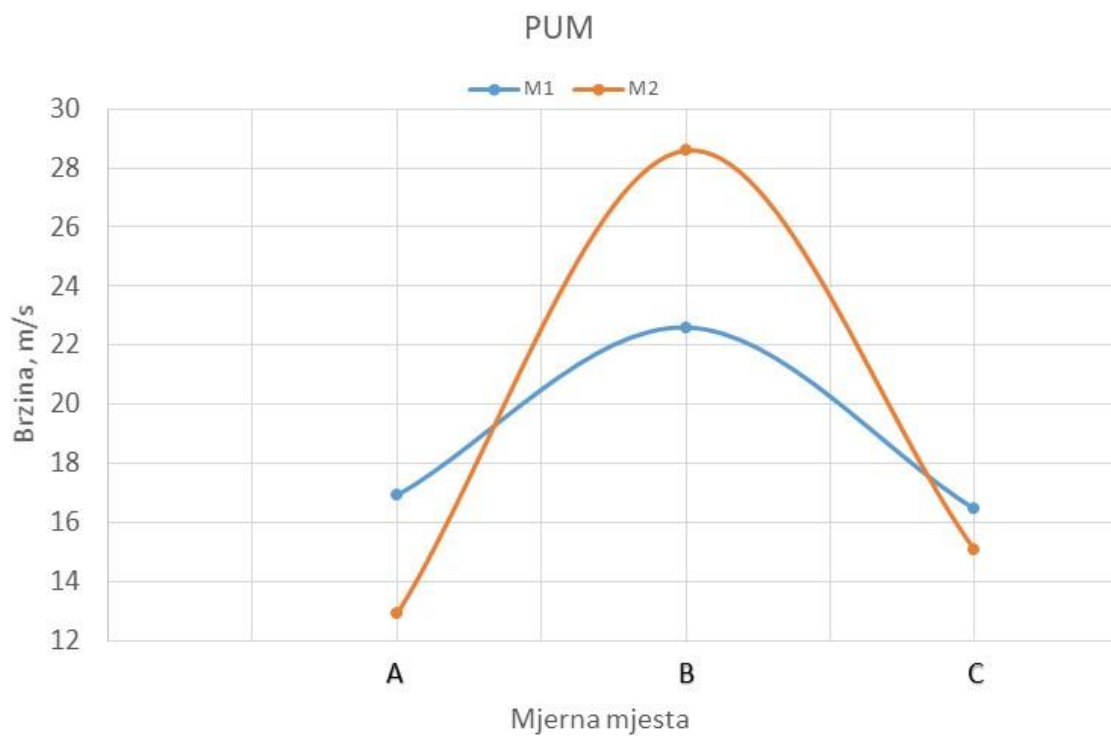
grafa sa slike 27 može se vidjeti kako je u cijevi „EOLO PU EST“ najveći iznos brzine strujanja zraka.



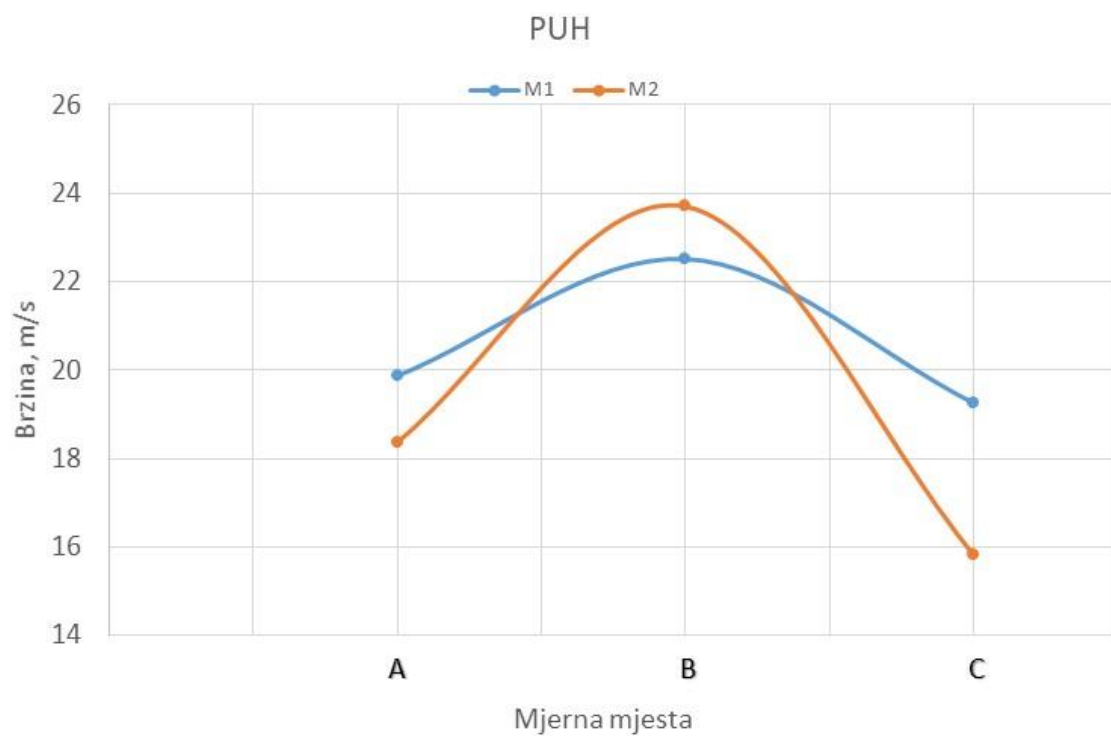
Slika 28. Distribucija brzine strujanja zraka kroz presjek cijevi na M1 i na M2 (PUZ)



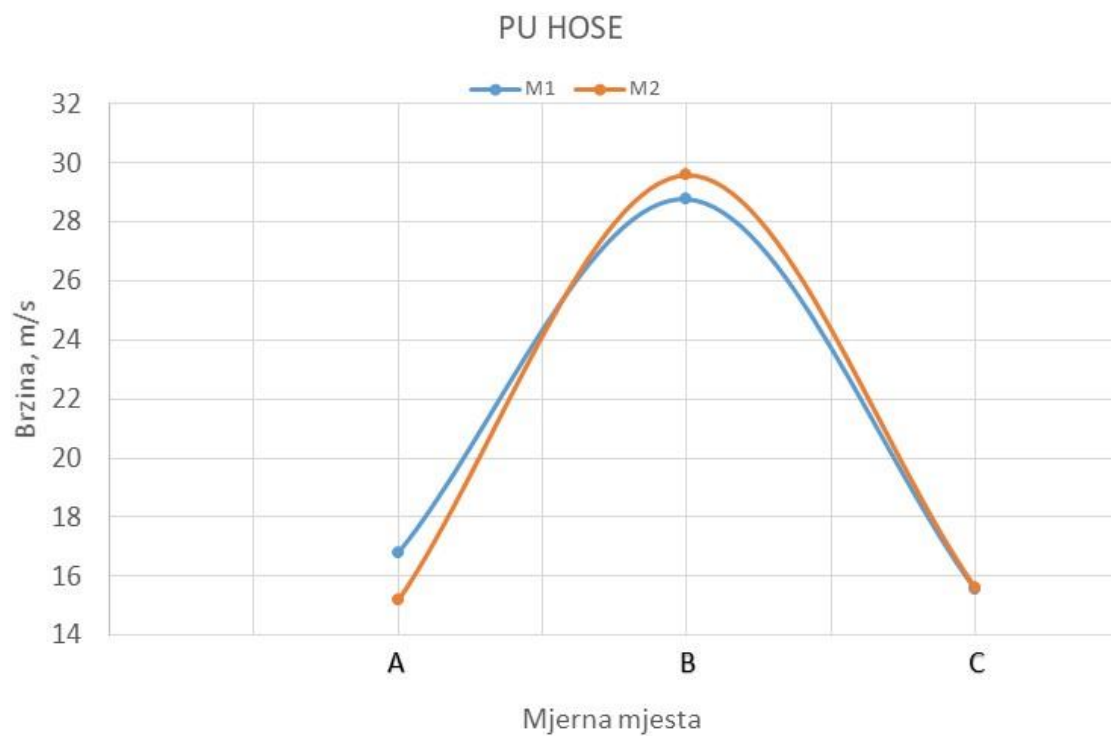
Slika 29. Distribucija brzine strujanja zraka kroz presjek cijevi na M1 i na M2 (PUR)



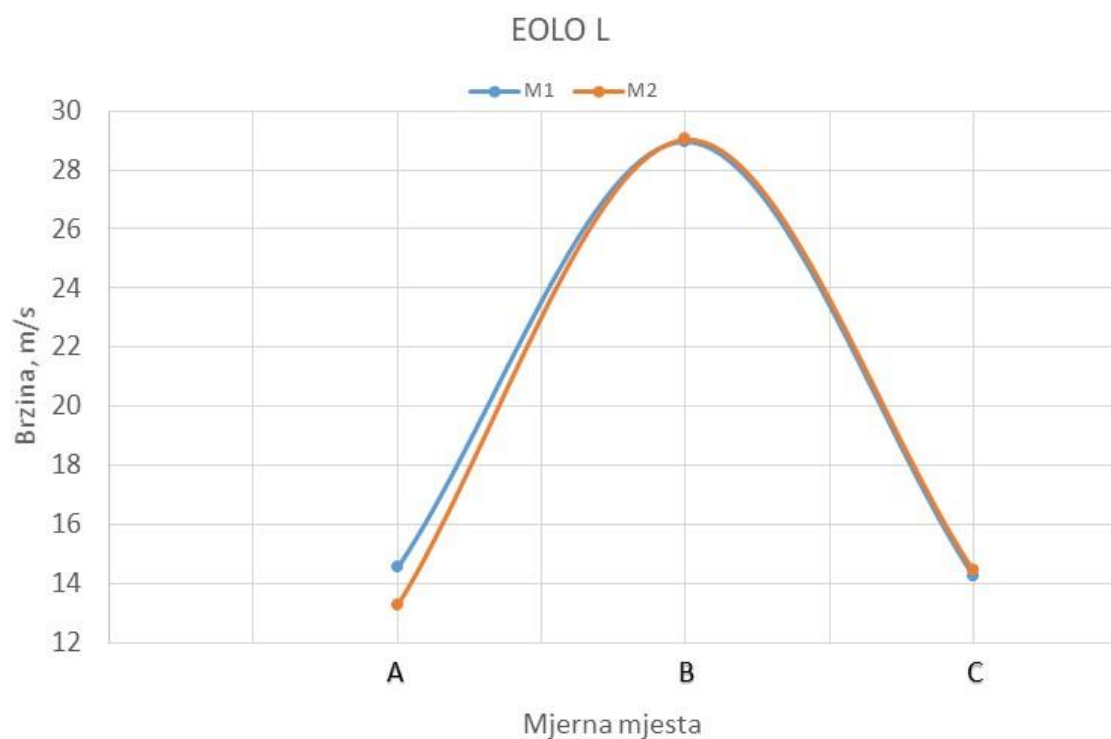
Slika 30. Distribucija brzine strujanja zraka kroz presjek cijevi na M1 i na M2 (PUM)



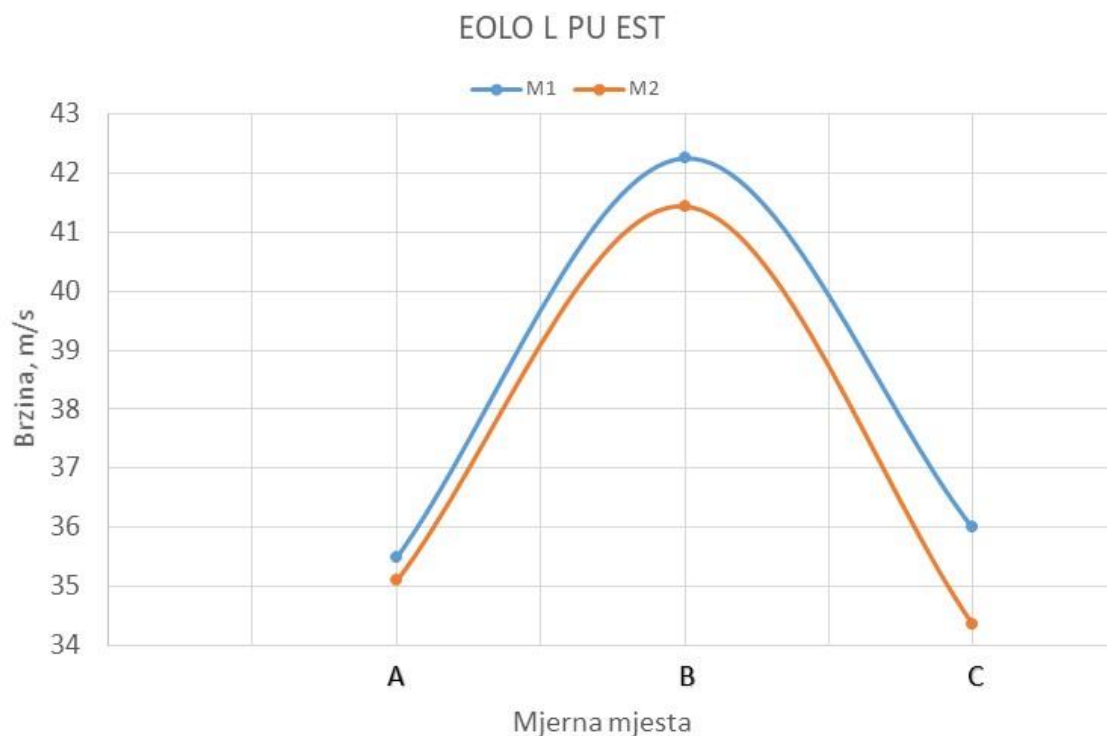
Slika 31. Distribucija brzine strujanja zraka kroz presjek cijevi na M1 i na M2 (PUH)



Slika 32. Distribucija brzine strujanja zraka kroz presjek cijevi na M1 i na M2 (PU Hose)



Slika 33. Distribucija brzine strujanja zraka kroz presjek cijevi na M1 i na M2 (EOLO L)



Slika 34. Distribucija brzine strujanja zraka kroz presjek cijevi na M1 i na M2 (EOLO PU EST)

5.1. Koeficijenti otpora u fleksibilnim cijevima

Koeficijenti otpora za svaku vrstu cijevi određeni su između mjernog mjesta M1 i M2. Dobiveni su dijeljenjem srednje vrijednosti statičkog tlaka i srednje vrijednosti dinamičkog tlaka. Iz tablice 1 mogu se vidjeti iznosi koeficijenta otpora za svaku cijev.

Tablica 1. Vrijednosti za sve vrste cijevi

Vrsta cijevi	PUZ	PUR	PUM	PUH	PU HOSE	EOLO L	EOLO PU EST
Parametri							
Brzina, m/s	27,54	24,81	25,34	26,70	28,00	27,57	29,18
Dinamički tlak, Pa	441,45	358,07	373,76	414,96	456,17	442,43	495,41
Pad tlaka/m', Pa	264,87	176,58	219,74	211,90	323,73	127,53	58,86
Koeficijent otpora	0,6000	0,4932	0,5879	0,5106	0,7097	0,2882	0,1188

Koeficijenti otpora dobiveni su iz omjera statičkog i dinamičkog tlaka.

$$\xi = \frac{p_{stat.}}{p_{din.}}$$

gdje je:

ξ – koeficijent otpora

$p_{stat.}$ – statički tlak (Pa)

$p_{din.}$ – dinamički tlak (Pa)

Dinamički tlak izračunat je pomoću izmjerenih veličina statičkog tlaka i totalnog tlaka na 1/3 promjera cijevi.

$$p_{din.} = p_{tot.1/3} - p_{stat.}$$

gdje je:

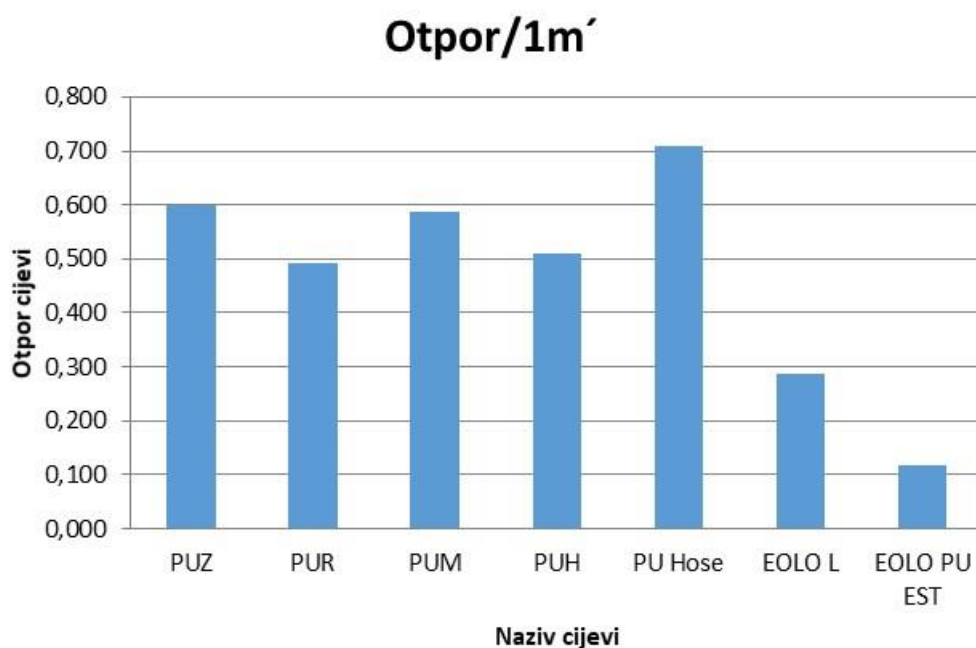
$p_{din.}$ – dinamički tlak (Pa)

$p_{tot.1/3}$ – totalni tlak na 1/3 promjera cijevi (Pa)

$p_{stat.}$ – statički tlak (Pa)

Izračunati su dinamički tlakovi za mjerna mjesta „M1“ i „M2“ te su njihove apsolutne srednje vrijednosti uzete za dobivanje srednje vrijednosti dinamičkog tlaka između mjernih mjesta „M1“ i „M2“.

Statički i totalni tlak na 1/3 cijevi mjereni su pomoću U-cijevi u kojoj je bila voda. Kako bi se dobile vrijednosti u Pa, izmjerene vrijednosti u mmH₂O množene su s ubrzanjem sile teže, odnosno s 9,81 m/s².



Slika 35. Visina koeficijenta otpora u fleksibilnim cijevima

6. Diskusija

Otpori trenja koji se javljaju u fleksibilnim cijevima, značajno su veći od onih u ravnim metalnim cijevima.

Uočljivo je kako cijevi bolje kvalitete i višeg cjenovnog razreda, kao što je „EOLO L“ ima manji faktor trenja, dok najkvalitetnija i najskuplja cijev „EOLO PU EST“ ima najmanji faktor trenja, što je vidljivo na slici 35. Zbog niskog koeficijenta otpora cijev „EOLO PU EST“ ima najmanju vrijednost statičkog tlaka i najveći iznos dinamičkog tlaka (slike 25 i 26).



Slika 36. Cijev „EOLO PU EST“ na mjerenju

7. Zaključak

Unatoč visokom faktoru trenja, što dovodi do većih gubitaka nego kod klasičnih ravnih cijevi, fleksibilne cijevi su nezamjenjive u drvnoj industriji. One osiguravaju najbolju povezanost ušća radnih strojeva i ekshaucijskog cjevovoda, upravo radi svoje fleksibilnosti koja omogućuje pomicanje cijelog radnog stroja ili pomičnog radnog dijela na stroju. Pretpostavka je da vrsta materijala od kojeg se izrađuju fleksibilne cijevi utječe na otpore pri strujanju zraka i čestica, a o čemu će biti više riječi nakon daljnjih istraživanja.

8. Literatura

1. Madjarević, B., 1969: Rukovanje materijalom. Tehnička knjiga, Zagreb.
2. Nastavni materijali, „Zbirka riješenih zadataka iz predmeta „Transportna tehnika u drvnoj industriji““. Šumarski fakultet, Zagreb.
3. Oluić, Č., 1991: Transport u industriji, Rukovanje materijalom 1. dio. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
4. Svjatkov, S.N., 1966: Pneumatski transport usitnjenog drveta. Zavod za tehnologiju drveta, Sarajevo.
5. (<https://kimel-filtri.hr/proizvodi-i-rjesenja/prateca-oprema-2/>)
6. (https://www.periodni.com/gallery/laminar_and_turbulent_flow.png)