

Utjecaj vrste, promjera i kuta na gubitak tlaka fleksibilnih cijevi sustava za odsis drvnih čestica

Kruljac, Antonio

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry and Wood Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:482880>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-24**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK
DIPLOMSKI STUDIJ
DRVNOTEHNOLOŠKI PROCESI

ANTONIO KRULJAC

UTJECAJ VRSTE, PROMJERA I KUTA NA GUBITAK
TLAKA FLEKSIBILNIH CIJEVI SUSTAVA ZA ODSIS
DRVNIH ČESTICA

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK

UTJECAJ VRSTE, PROMJERA I KUTA NA GUBITAK
TLAKA FLEKSIBILNIH CIJEVI SUSTAVA ZA ODSIS
DRVNIH ČESTICA

DIPLOMSKI RAD

Diplomski studij: Drvnotehnološki procesi

Predmet: Rukovanje materijalom

Ispitno povjerenstvo: 1. (mentor) doc. dr. sc. Matija Jug

2. (član) prof. dr. sc. Ružica Beljo Lučić

3. (član) Juraj Jovanović, mag. ing. techn. lign.

Student: Antonio Kruljac

JMBAG: 0068232501

Datum odobrenja teme: 25.04.2022.

Datum predaje rada: 23.09.2022.

Datum obrane rada: 30.09.2022.

Zagreb, rujan, 2022.

Temeljna dokumentacijska kartica

Naslov:	Utjecaj vrste, promjera i kuta na gubitak tlaka fleksibilnih cijevi sustava za odsis drvnih čestica
Autor:	Antonio Kruljac
Adresa autora:	Pod rub 2, Ravna Gora
Mjesto izrade:	Fakultet šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu
Vrsta objave:	Diplomski rad
Mentor:	doc. dr. sc. Matija Jug
Izradu rada pomogao:	doc. dr. sc. Matija Jug
Godina objave:	2022.
Opseg:	I-VI + 61 stranice, 75 slika, 9 navoda literature
Ključne riječi:	Sustav za odsis drvnih čestica, gubitak tlaka, fleksibilna cijev, otpor, brzina strujanja, dinamički tlak, statički tlak
Sažetak:	Cilj rada bio je odrediti gubitke tlaka u sustavu za odsis drvnih čestica, točnije gubitak tlaka u fleksibilnim cijevima. Također su prikazani odnosi gubitka tlaka, visine dinamičkih tlakova, brzina te odnosi koeficijenata otpora strujanju zraka između različitih vrsta, promjera i kuta savijenosti cijevi.

Basic Documentation Card

Title:	Influence of type, diameter and angle of flexible pipe pressure loss in a chip and dust extraction system
Author:	Antonio Kruljac
Address of Author:	Pod rub 2, Ravna Gora
Thesis Performed at:	Faculty of Forestry and Wood Technology, University of Zagreb
Publication Type:	Master's thesis
Supervisor:	Assistant professor Matija Jug, PhD
Preparation Assistant:	Assistant professor Matija Jug, PhD
Publication year:	2022
Volume:	I-VI + 61 pages, 75 pictures and 9 references
Keywords:	
Abstract:	Goal of this paper was to show pressure loss in chip and dust extraction system, more precisely the loss of pressure in flexible pipes. This paper also presents correlation between pressure loss, dynamic pressure, air velocity and coefficient of air stream resistance in different pipe types, different diameters and different angles of airstream in pipes.

	IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI	OB FŠDT 05 07
		Revizija: 2
		Datum: 2.2.2021.

„Izjavljujem da je moj *diplomski rad* izvorni rezultat mojega rada te da se u njegovoj izradi nisam *koristio* drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni“.

Zagreb, 07.09.2022.

vlastoručni potpis

Antonio Kruljac

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	5
3. Transport drvnih čestica zračnim konvejerima	5
3.1. Fizička svojstva zraka	6
3.2. Teorijske osnove rada zračnih konvejera	7
3.2.1. Brzina lebdenja	8
3.2.2. Statički, dinamički i totalni tlak	9
3.2.3. Bernoullijeva jednadžba	11
4. Sustavi za zračni transport drvnih čestica	13
4.1. Vrste zračnih konvejera	13
4.2. Sastavnice zračnih konvejera	16
4.3. Izbor ventilatora i elektromotora	19
5. Materijali i metode	21
5.1. Vrste odsisnih fleksibilnih cijevi	21
5.2. Mjerni instrumenti	25
5.3. Provođenje mjerenja	26
6. Rezultati i rasprava	30
6.1. Distribucija brzine po presjeku cijevi	30
6.2. Odnos brzina, pada tlaka, dinamičkog tlaka i koeficijenta otpora	40
6.3. Usporedba pada tlaka i koeficijenta otpora u koljenima i ravnoj cijevi	54
7. Zaključak	60
Literatura	61

1. Uvod

Prilikom obrade drva na kružnim pilama, blanjalicama, brusilicama, CNC strojevima te mnogim ostalim strojevima za obradu drva dolazi do odvajanja drvnih čestica. Odvojene drvene čestice nakupljaju se oko radnog alata te oko samog stroja za obradu drva, što predstavlja problem koji može uzrokovati usporavanje i zaustavljanje proizvodnje te smanjenje kvalitete obrade, štetno je po zdravlje radnika te naposljetku može izazvati požar. Za kontinuiranu proizvodnju bitno je odvesti drvene čestice od stroja do mjesta gdje će se one skladištiti. Transport drvnih čestica odvija se raznim rješenjima, kao što su elevatori koji u posudama okomito podižu piljevinu. Vodoravni transport drvnih čestica vrši se pužnim konvejerima, koji rade na principu rotacije puža ili vibracijskim konvejerima gdje se materijal transportira, odnosno „prebacuje“ prema mjestu skladištenja uslijed frekventnih vibracija transportera. U drvnoj industriji, može se primijetiti kako se većina transporta odvojenih drvnih čestica vrši zračnim konvejerima. Zračni konvejeri predstavljaju cijeli sustav odsisa odvojenih drvnih čestica s radnoga stroja te njihov transport cijevima do krajnjeg mjesta skladištenja. Važnu komponentu zračnog transportera čine fleksibilne cijevi. Stoga je cilj diplomskog rada prikazati gubitak tlaka, odnosno odrediti otpore strujanju zraka u fleksibilnim cijevima različitih vrsta i promjera te prikazati odnos veličine otpora i povećanja kuta strujanja zraka, tj. savijenosti cijevi.

2. Definicija drvnih čestica

Usitnjeno drvo, odnosno odvojene drvene čestice karakteristične su zbog nejednolikosti čestica materijala, za razliku od drugih sipkih materijala, npr. žitarica, koje su ujednačenog oblika. Svaka drvena čestica razlikuje se po obliku, veličini i masi. Oblik odvojenih drvnih čestica ovisi o raznim parametrima koji se svrstavaju u dvije skupine, parametri obrade (dubina rezanja, brzina rezanja, smjer rezanja, itd.) i parametri obratka (tehnička i mehanička svojstva obratka, odnosno drva) (Radmanović, 2015). U teoriji se čestice aproksimiraju na formu paralelopipeda s različitim odnosom stranica. Izračuni zračnog transporta vrše se na temelju najkрупnijih drvnih čestica u transportnom sustavu (Svjatkov, 1966). Vrlo utjecajni činitelj prilikom izračuna koji se koriste za projektiranje sustava za odsis ili druge svrhe vezane za zračni transport predstavlja vrsta proizvodnje. Naime, u različitim vrstama proizvodnje pojavljuje se različiti sadržaj vode iverja, tj. odvojenih drvnih čestica. Sadržaj vode može se kretati od 100 % u primarnoj proizvodnji prilikom raspiljivanja trupca do 4 % kod proizvodnje ploča iverica (Svjatkov, 1966).

2.1. Vrste usitnjenog drva u drвноj industriji

Vrste usitnjenog drva koje se transportiraju u drвноj industriji pojavljuju se u sljedećim oblicima: piljevina, blanjevina, sječka, iverje i drvena prašina.

Mehaničkom obradom drva piljenjem na kružnim pilama, tračnim pilama, itd. nastaje piljevina. Veličina čestica piljevine ovisi o načinu piljenja, tj. uzdužnom ili poprečnom prolasku pile u odnosu na obradak te o posmičnoj brzini i vrsti drva. Prilikom uzdužnog piljenja nastaju duge vlaknaste čestice koje zahtijevaju veću brzinu strujanja zraka u sustavu za odsis i transport drvnih čestica. Ako je sustav za odsis drvnih čestica poddimenzioniran, radi svog nepravilnog oblika često uzrokuju začepljenje i taloženje u cjevovodu. Obradom drva na blanjalicama nastaje blanjevina. Veličina čestica blanjevine ovisi o debljini odvajane strugotine prolaskom kroz zahvat i brzini prolaska obratka kroz stroj, odnosno o posmičnoj brzini te o broju reznih oštrica alata kojim se vrši obrada (Svjatkov, 1966). Iverje je oblik drvene čestice koji nastaje usitnjavanjem

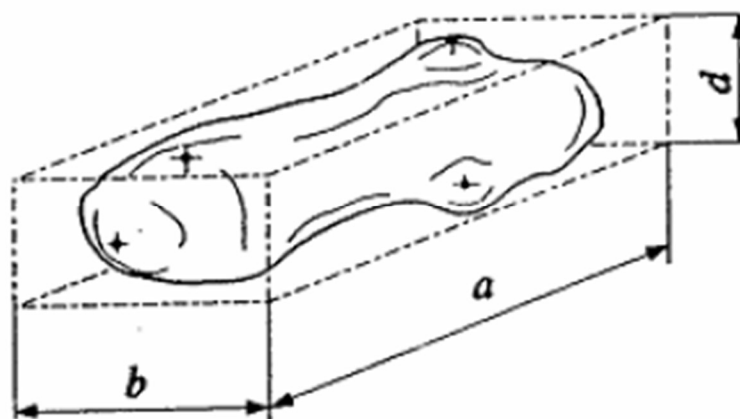
drva i drvnih ostataka, tj. iveranjem. Najveća uobičajena veličina iverja koja se transportira zračnim konvejerom ne prelazi 60 mm. Drvnu prašinu predstavlja skup drvnih čestica koje pojedinačno nisu veće od 0,1 mm. Drvna prašina najčešće se pojavljuje prilikom brušenja drva te zbog svoje kompaktnosti i visoke nasipne gustoće može uzrokovati začepljenje sustava za odsis. Svojstvo drvnih čestica u zračnom transportu je njihovo produljeno vrijeme kretanja u zraku u lebdećem stanju. Malena veličina čestica drvne prašine također predstavlja opasnost za ljudsko zdravlje, tj. za respiratorni sustav čovjeka (Svjatkov, 1966).

2.2. Sipki materijali

Sipki materijal je materijal kojim se rukuje presipavanjem i lopatanjem, prilikom čega ne gubi svoju uporabnu vrijednost i kakvoću. Sipki materijal je opisan sljedećim karakteristikama: granulacija (zrnatost), nasipna gustoća, nasipni kut, abrazivno djelovanje, fizička, mehanička i kemijska svojstva (Oluić, 1991).

2.2.1. Granulacija

Omjerom veličina najveće i najmanje drvne čestice izračunava se granulacija. Stupanj granulacije predstavlja podjelu drvnih čestica prema jednolikosti njihova sastava pa se podjela vrši na sortirane i nesortirane materijale. Sortirani materijali su sipki materijali čiji odnos najveće i najmanje veličine čestice iznosi manje od 2,5, a nesortirani materijali su sipki materijali omjera najveće i najmanje veličine čestice većeg od 2,5 (Svjatkov, 1966). U istraživanjima granulometrijskog sastava drvnih čestica došlo se do zaključka da je usitnjavanje uzoraka piljenjem hrastovine veće u odnosu na uzorke bukovine pri svim korištenim posmičnim brzinama (Jug i dr., 2015).



Slika 1. Drvna čestica

Slika 1 prikazuje:

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

2.2.2. Nasipna gustoća i nasipni kut

Nasipna gustoća odnos je mase i volumena slobodno nasutog sipkog materijala. Slobodno nasuti sipki materijal će uvijek biti manje nasipne gustoće od nasipne gustoće kompaktnog materijala. Istraživanja su pokazala da je nasipna gustoća usitnjenog drva veća kod mehaničke obrade drva blanjanjem pri većim posmičnim brzinama dok je faktor rastresitosti u tom slučaju manji (Jug i dr., 2016). 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). Također sve to ovisi o vrsti drva i o tome radi li se o termički modificiranom ili nemodificiranom materijalu.

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

nasipnog materijala (Svjatkov, 1966). Nasipna gustoća i nasipni kut moraju se uzeti u obzir prilikom skladištenja sipkih materijala, npr. u silosima.

2.2.3. Trenje materijala i abrazivnost

Vrlo važan čimbenik prilikom projektiranja sustava za odsis drvnih čestica jest trenje materijala. Trenje se pojavljuje prilikom kontakta sipkog materijala i dijelova transportnog sustava, kao što su cijevi. Veće trenje zahtjeva cijevi, ventilatore i druge dijelove sustava za odsis izrađene od otpornijih materijala. Uz trenje prilikom kontakta sipkog materijala s drugim materijalom pojavljuje se i abrazivnost. Abrazivnost je svojstvo nekog materijala da izaziva habanje drugog materijala. Kod transporta sipkih materijala abrazivnost utječe na brzinu transporta materijala. Za razliku od pepela, sipki materijali u obliku piljevine, blanjevine, itd. nisu abrazivni (Oluić, 1991).

3. Transport drvnih čestica zračnim konvejerima

Uloga zračnih konvejera jest transport drvnih čestica od stroja do njihova mjesta skladištenja. Zračni konvejeri koriste se u drвноj industriji u velikoj mjeri, a najčešće predstavljaju i najbolji izbor transporta odvojenih drvnih čestica zbog svoje jednostavne konstrukcije i lakog održavanja. Uspoređujući zračne konvejere s drugim oblicima transporta, njihova prednost je osim odvođenja piljevine ili blanjevine u tome što relativno lako odvodi i drvenu prašinu. Odvođenjem drvene prašine u neposrednom trenutku zahvata prilikom brušenja, postiže se zdravija i sigurnija radna okolina za radnika s manje štetnih čestica po prostornom metru. Hermetičnost cijelog transportnog sustava omogućava odvodnju drvene prašine.

3.1. Fizička svojstva zraka

Zrak je smjesa raznih plinova, od kojih su dominantni dušik, a zatim kisik. Uz ostale elemente zrak u sebi sadrži veliku količinu vodene pare. U svrhu proračuna smatra se da se atmosferski zrak ponaša kao idealni plin što je opravdano time da je parcijalni tlak vodene pare u vlažnom zraku puno manjeg iznosa nego barometarski tlak.

Gustoća zraka računa se pomoću jednadžbe stanja idealnog plina, a ovisna je 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 jest zbroj gustoće zraka i mase transportiranog materijala po jednom kubičnom metru zraka, tj. omjera napada usitnjenog materijala za transport i protoka zraka.

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

gdje je:

ρ_s – gustoća smjese (kg/m³)

Q_d – napad usitnjenog materijala (kg/s)

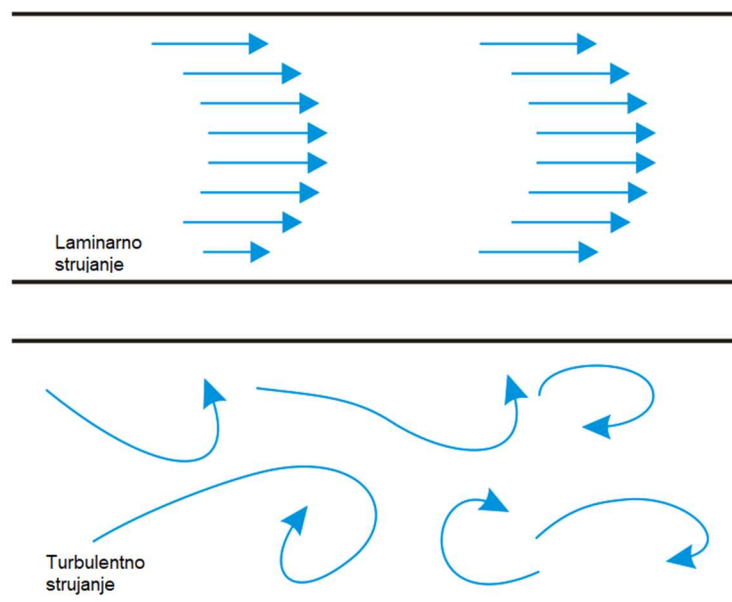
Q_z – protok zraka (m³/s)

$m_{dč}$ – masa drvnih čestica (kg)

V_z – volumen zraka (m³)

3.2. Teorijske osnove rada 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). Zbog određenog viskoziteta zraka dolazi do „sljepljivanja“ zraka na stijenku cijevi te zrak ostaje nepomičan. Prilikom kretanja zraka kroz cjevovod dolazi do stvaranja unutarnjeg trenja između slojeva zraka, a posljedica je različita brzina zraka po presjeku cjevovoda. Na stijenkaama cijevi, zrak stoji, tj. brzina je približno jednaka nuli, a u sredini cijevi postiže se najveća brzina. Također, viskoznost zraka uzrokuje vrtloženje i prekid laminarnog strujanja zraka. Uz sile viskoziteta, u zraku se javljaju i sile inercije. Na odnos između sila viskoziteta i sila inercije utječu čimbenici poput rasporeda brzina po presjeku, gubitaka energije i dr. Kada u struji zraka prevladava sila viskoziteta (unutrašnjeg trenja), javlja se laminarno strujanje zraka. Kod laminarnog strujanja ono je postojano, a struje zraka kreću se tako da se ne miješaju jedna s drugom. Laminarno strujanje dovodi do lakšeg zaobilaženja prepreka u samom sustavu za odsis. Kada je odnos sila inercije veći od sila viskoziteta, dolazi do turbulentnog strujanja zraka. Zrak se intenzivno miješa u poprečnom pravcu struje zraka. Kod zračnih konvejera, strujanje je većinom turbulentno, samo uz stijenke ostaje jedan granični sloj laminarnog strujanja (Svjatkov, 1966).

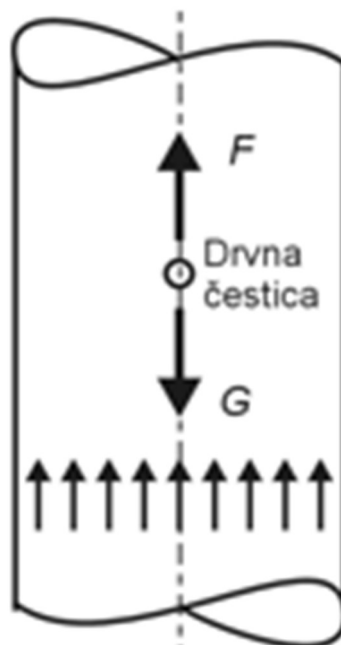


Slika 2. Shematski prikaz laminarnog i turbulentnog strujanja

(https://www.periodni.com/gallery/laminar_and_turbulent_flow.png)

3.2.1. Brzina lebdenja

Brzina strujanja zraka u cjevovodima ovisi o promjeru cijevi i o količini transportiranog zraka. Brzina strujanja zraka iznosi od 10 do 30 m/s, a kod transporta čestica s visokim sadržajem vode iznosi i više. Brzina lebdenja je brzina zraka prilikom koje je drvena čestica u stanju mirovanja u okomitom smjeru, što znači da se ne podiže uslijed djelovanja sile potiska niti pada uslijed djelovanja sile gravitacije.



Slika 3. Lebdenje drvene čestice

Sila potiska računa se prema formuli:

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

Sila gravitacije računa se prema formuli:

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

Kako bi drvena čestica bila u stanju lebdenja, sila potiska i sila gravitacije moraju biti jednake ($F=G$) te zbog mirovanja drvene čestice, brzina čestica 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 formula 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

U zračnom sustavu za odsis drvnih čestica pojavljuju se tri vrste tlaka: statički, dinamički i totalni tlak.

Statički tlak je tlak koji se pojavljuje između čestica zraka koje se gibaju u zračnoj struji. Statički tlak u sustavu za odsis djeluje na stjenke cijevi te se i mjeri uz stjenku, najčešće pomoću U-cijevi ili manometrom.

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

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).

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

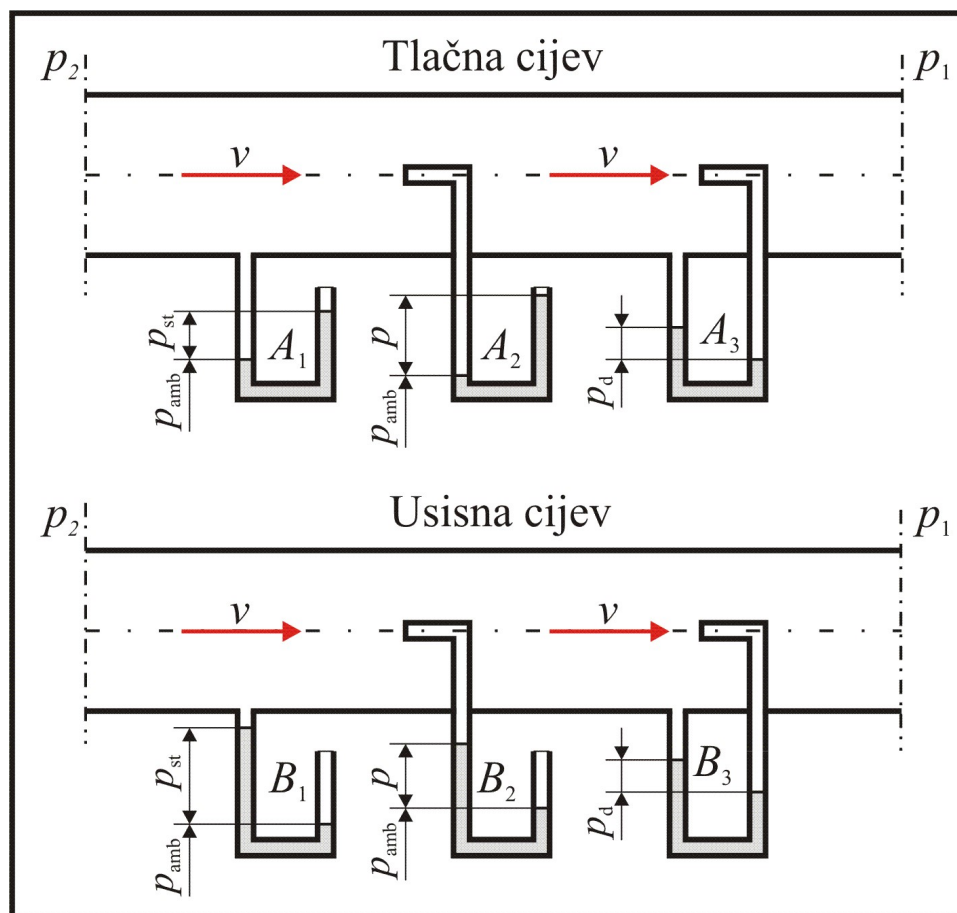
gdje je:

$p_{din.}$ – dinamički tlak (Pa)

V_z – obujam zraka (m^3)

E_k – kinetička energija (J)

Totalni tlak zbroj je dinamičkog i statičkog tlaka, može biti pozitivnog ili negativnog predznaka, što ovisi o mjestu mjerenja.



Slika 4. Tlačna i usisna cijev

Na slici 4 može se vidjeti prikaz tlačne i usisne cijevi te načini mjerenja statičkog, dinamičkog i totalnog tlaka. Statički tlak mjeri se na stjenkama cijevi, a totalni tlak na jednoj trećini promjera cijevi, gdje se ostvaruje najveća srednja brzina strujanja zraka. Dinamički tlak razlika je totalnog i statičkog tlaka.

3.2.3. Bernoullijeva jednadžba

Bernoullijeva jednadžba prikazuje odnos tlaka, gustoće i brzine kretanja fluida, također izražava zakon očuvanja energije. Jednadžba je primjenjiva na kretanje zraka u cjevovodima. Promjeri cijevi u sustavu za odsis drvnih čestica najčešće su različiti, tj. promjer cijevi se povećava od ušća na stroju do ventilatora, ako je na isti cjevovod spojeno više različitih strojeva. Upravo zbog različitih promjera, Bernoullijevom jednadžbom moguće je prikazati stanje u pojedinom dijelu sustava za odsis.

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

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/m^3)

Gubitak tlaka zbog otpora strujanja zraka računa se 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 simetrane koljena, a d – promjer cijevi) (Beljo Lučić i dr.). 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

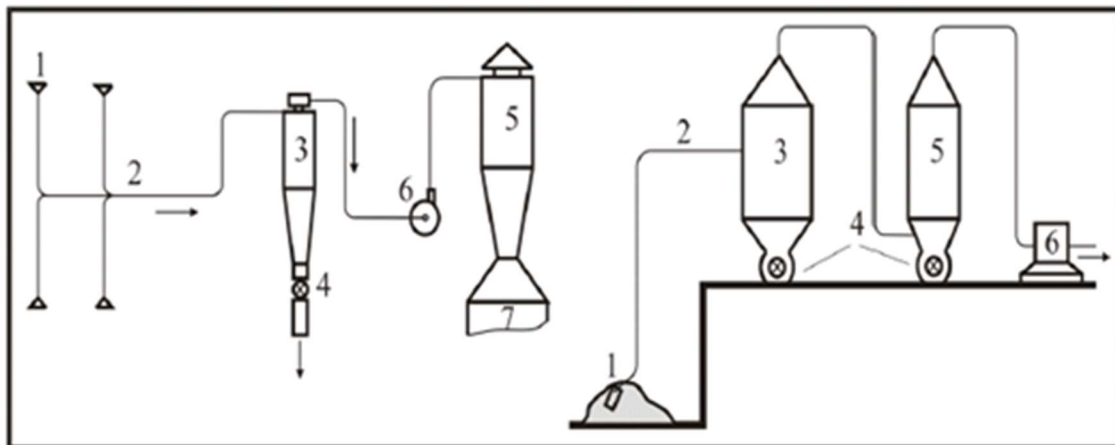
Navedeni faktori pružaju otpor strujanju zraka kroz cjevovod, što uzrokuje gubitak tlaka u sustavu za odsis, neučinkovitiji transport drvnih čestica te manju korisnost i veću potrošnju električne energije. Prilikom strujanja zraka od usisnog ušća do ventilatora dolazi do povećanja promjera te je zraku potrebno određeno vrijeme da ispuni presjek većeg promjera cijevi. Posljedica je vrtloženje zraka, što znači gubitak energije potrebne za transport drvnih čestica. Iz Bernoullijeve jednadžbe moguće je izračunati iznose tlakova, a prilikom promjene presjeka cijevi, odnosno povećanja promjera cijevi vidljivo je kako se statički tlak iznosom ne mijenja, a dinamički tlak nestaje, što objašnjava vrtloženje i gubitak brzine. Druga opcija koja se može pojaviti u drvanoj industriji je kretanje zraka iz cijevi većeg promjera u cijev manjeg promjera te se umjesto vrtloženja pojavljuju centrifugalne sile. Centrifugalna sila uzrokuje odvajanje zraka od stijenke cijevi te njegovo sabijanje. Nakon sabijanja, zrak se ponovo širi prilikom čega dolazi do utroška energije. U industriji se za sprječavanje gubitka energije i pojave centrifugalne sile ugrađuje kolektor koji osigurava prolaz zraka bez odvajanja od stjenki (Svjatkov, 1966).

4. Sustavi za zračni transport drvnih čestica

4.1. Vrste zračnih konvejera

Položaj ventilatora u sustavu za odsis određuje vrstu zračnog konvejera. Osnovna podjela zračnih konvejera vrši se na usisne, usisno – tlačne i tlačne sustave.

Kod usisnog zračnog konvejera ventilator se nalazi iza odvajača, što znači da drvene čestice ne prolaze kroz ventilator te se ventilator ne oštećuje. Na slici 5 moguće je vidjeti kako cjevovod direktno povezuje usisno ušće sa stroja s odvajačem drvnih čestica.

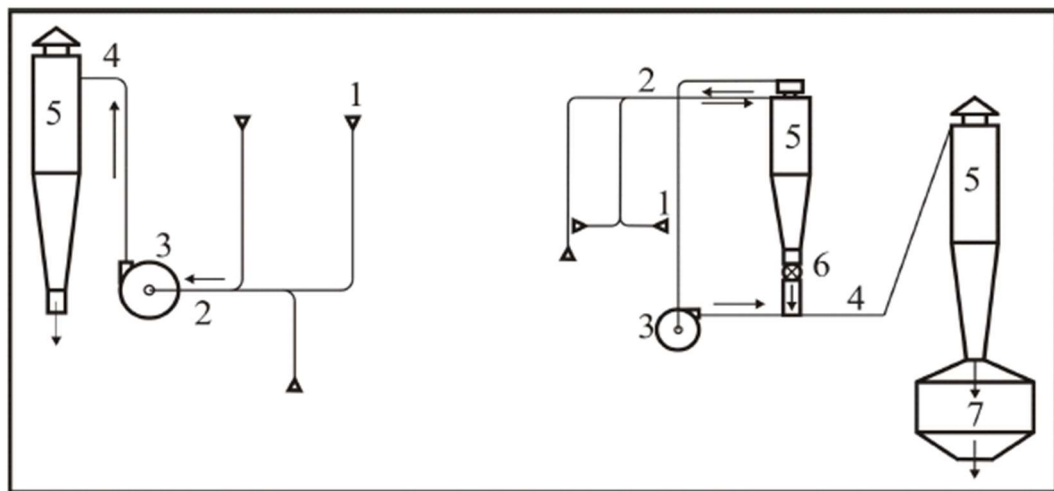


Slika 5. Uspisni zračni konvejer

Slika 5 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

Sustav koji je se u najvećoj mjeri koristi u drvenoj industriji je usisno – tlačni sustav. Kod usisno – tlačnih sustava ventilator se nalazi između usisnog ušća i odvajača drvnih čestica. Prilikom transporta, drvene čestice prolaze kroz ventilator, a posljedica je postupno oštećivanje ventilatora. Iako se ventilator oštećuje, usisno – tlačni sustav je najčešće korišten sustav zbog načina transporta, jer položaj ventilatora podiže dinamički tlak i prije i poslije njega, tj. i u usisnom i u tlačnom dijelu cjevovoda, što je veći dinamički tlak, to je transport drvnih čestica učinkovitiji.



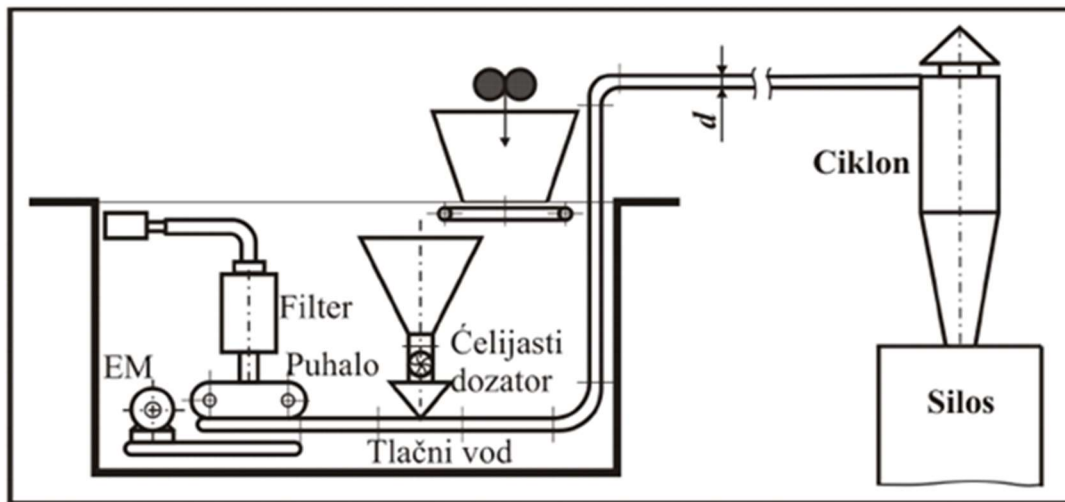
Slika 6. Usisno - tlačni sustav

Slika 6 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

Tlačni sustav za odsis drvnih čestica prikazan slikom 7 je sustav gdje se ventilator nalazi na početku sustava, odnosno piljevina se pužnim mehanizmom ili stružnim tračnim konvejerom dovodi na otvor gdje se dozira na ventilator. Tlačni sustavi najčešće se koriste kod udaljenijeg transporta, točnije do nekoliko stotina metara.

Navedene karakteristike tlačnih sustava omogućuju primjenu za transport drvnih čestica od pogona do kotlovnica i silosa koji nisu u neposrednoj blizini samog pogona. Prednosti tlačnih sustava su cijevi manjih promjera te manja potrošnja električne energije.



Slika 7. Tlačni sustav

Sljedeća podjela zračnih transportera konvejera je podjela prema tlaku i prema koncentraciji. Podjela prema tlaku vrši se na konvejere niskog tlaka (do 5 kPa) srednjeg tlaka (do 20 kPa), i visokog tlaka (iznad 20 kPa). Prema koncentraciji, postoje konvejeri male koncentracije (do 0,5), srednje koncentracije (do 2,0) i visoke koncentracije (više od 2,0). Koncentracija može biti težinska (N/N) ili masena (kg/kg).

4.2. Sastavnice zračnih konvejera

Osnovne sastavnice zračnih konvejera su cjevovodi, koljena, ventilator, pogonski elektromotor i odvajači drvnih čestica. Cjevovodi vidljivi na slici 8, a najčešće se izrađuju od čeličnog lima te su kružnog presjeka. Spajanje cijevi vrši se na preklop koji je vanjske strane, kako se ne bi stvarali dodatni otpori struji zraka i kako strujanje ne bi bilo turbulentno. Dimenzije presjeka cijevi iznose od 80 do 700 mm, uz zaokruživanje na 10 mm.



Slika 8. Cjevovod

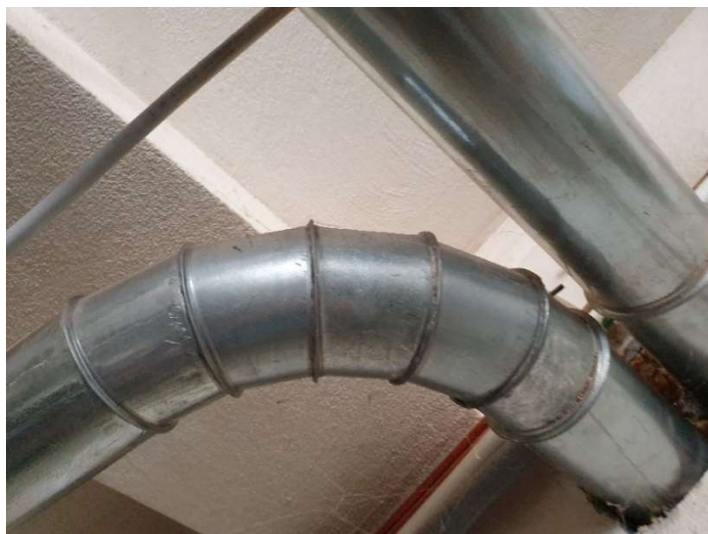
(<https://kimel-filtri.hr/proizvodi-i-rjesenja/sustavi-otprasivanja/>)

U drvnj industriji drvene čestice od strojeva odvođe se kroz ušće i cijev koja se spaja s magistralnim cjevovodom. Cijev sa stroja s magistralnim cjevovodom povezana je hlačnicom, a ovisno o izvedbi najčešće može biti dvostrana ili trostrana. Kada stroj nije u pogonu, on se isključuje iz ekshaucijske mreže zasunima, odnosno zatvara se cijev te je spriječen protok i gubitak energije. Ostali elementi cjevovoda su redukcije, prijelazni elementi i ušća na strojevima (prijemnici). Za promjenu smjera zračne struje u cjevovodu koriste se koljena (sl. 10). Prilikom proračuna sustava za odsis koljena se uzimaju kao dodatni faktor otpora.



Slika 9. Dvostrana hlačnica

Ušća, tj. prijemnici ili haube prvi su dio odsisnog sustava do samog stroja. Zadaća ušća je odsis drvnih čestica od stroja. Vrlo je bitna konstrukcija ušća, ona mora biti aerodinamična i hermetički zatvorena s otvorom na stroju, kako ne bi dolazilo do gubitaka i padova tlaka, što bi onemogućilo kvalitetan odsis. Ušća se izrađuju od metala te im konstrukcija ne smije ometati izmjenu i podešavanje alata.



Slika 10. Koljeno



Slika 11.Ušće na debljači

Ventilator je dio sustava za odsis, a prilikom svog rada pokreće struju zraka u cjevovodu. Odabire se iz dijagrama statičkih tlakova na temelju protoka. Ventilatori se dijele na ventilatore niskog (1000 Pa), srednjeg (1000-3000 Pa) i visokog (3000-15000 Pa) tlaka (Svjatkov, 1966). Odvajači piljevine koriste se u transportnom sustavu za odvajanje piljevine i drvene prašine i zraka. Važno je učinkovito odvajanje čestica od zraka zbog povrata zraka u radnu okolinu i ekoloških razloga. Primjenjuje se jednostupanjsko i višestupanjsko odvajanje drvnih čestica. Višestupanjsko odvajanje drvnih čestica odvija se prolaskom drvene piljevine i prašine kroz nekoliko odvajača, gdje se prema granulaciji čestice sortiraju. Centrifugalni odvajači, često nazivani cikloni (sl. 12), najrasprostranjeniji su uređaji za odvajanje drvnih čestica. Izrađeni su od 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

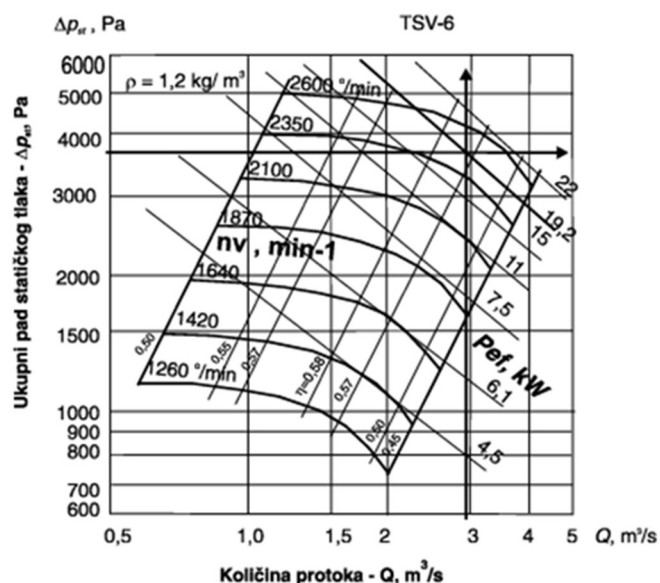
zraka dolazi u prostor između vanjskog i unutarnjeg cilindra te započinje kružno kretanje, pojavljuje se centrifugalna sila koja privlači drvene čestice na stijenke vanjskog cilindra. Zbog trenja i gubitka brzine, čestice padaju kroz konusni otvor (Svjatkov, 1966).



Slika 12. Cikloni (<https://tehno-filter.hr/ctf-centrifugalni-separatori-prasine/>)

4.3. Izbor ventilatora i elektromotora

Kako bi se odabrao ventilator, važno je poznavati pad statičkog i totalnog tlaka u sustavu te ukupni protok zraka. Bitni čimbenici pri odabiru ventilatora su tip ventilatora, efektivna snaga, frekvencija vrtnje rotora ventilatora i korisnost rada ventilatora. Pomoću dijagrama statičkih tlakova (sl. 13) vrši se odabir ventilatora, u ovom slučaju prikazani su podaci za tip ventilatora „TSV-6“.



Slika 13. Dijagram statičkih tlakova za ventilator TSV-6

Za odabir elektromotora važan je podatak o potrebnoj efektivnoj snazi ventilatora i njegovom broju okretaja. Prilikom izbora elektromotora potrebno je uvećati efektivnu snagu za 12 % do 14 % zbog predimenzioniranja i gubitaka u prijenosu snage. Slika 14 prikazuje natpisnu pločicu elektromotora gdje se nalaze podaci koji prikazuju karakteristike važne za pravilan odabir pogonskog elektromotora za ventilator u sustavu za zračni transport drvnih čestica.



Slika 14. Natpisna pločica elektromotora

5. Materijali i metode

5.1. Vrste odsisnih fleksibilnih cijevi

Fleksibilne cijevi u drvenoj industriji koriste se za povezivanje stroja i njegovog ušća s granom cjevovoda, odnosno s metalnom cijevi koja se nastavlja u magistralni cjevovod.

Za potrebe istraživanja korišteno je sedam vrsta odsisnih fleksibilnih cijevi, a to su redom: „PUZ“, „PUR“, „PUM“, „PUH“, „PU Hose“, „EOLO L“ i „EOLO PU EST“. Cijevi su osigurane od tvrtke „Kimmel-filtri“, u promjerima: 80 mm, 100 mm, 120 mm i 140 mm. Potrebno je naglasiti kako se ne proizvode sve vrste cijevi u svim promjerima.

„PUZ“ je poliuretanska, prozirna, antistatička cijev ojačana metalnom spiralom, vidljiva na slici 15. 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. Cijev je dostupna u svim promjerima.



Slika 15. „PUZ“ cijev

(<https://kimmel-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 fleksibilna (sl. 16), proizvodi se u svim promjerima.



Slika 16. „PUR“ cijev

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

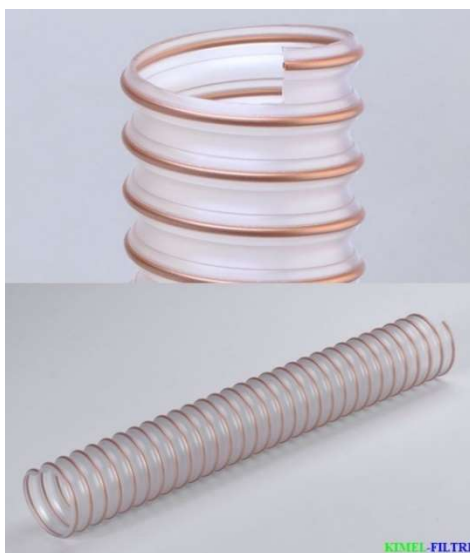
„PUM“ je poliuretanska, antistatička, prozirno mutna cijev ojačana pobakrenom metalnom spiralom, što se može vidjeti na slici 17. Debljina stijenke iznosi od 0,4 do 0,75 mm. Jednake je otpornosti na mehanička naprezanja kao i „PUR“, ali je fleksibilnija. Za potrebe izrade rada nije bila dostupna u promjeru od 80 mm.



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 (sl. 18). Debljina stijenke iznosi 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. Dostupna je u svim promjerima.



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 (sl.19).



Slika 19. „EOLO L“ cijev

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

„EOLO PU EST“ tvrda je 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 uz minimalne otpore (sl. 20).

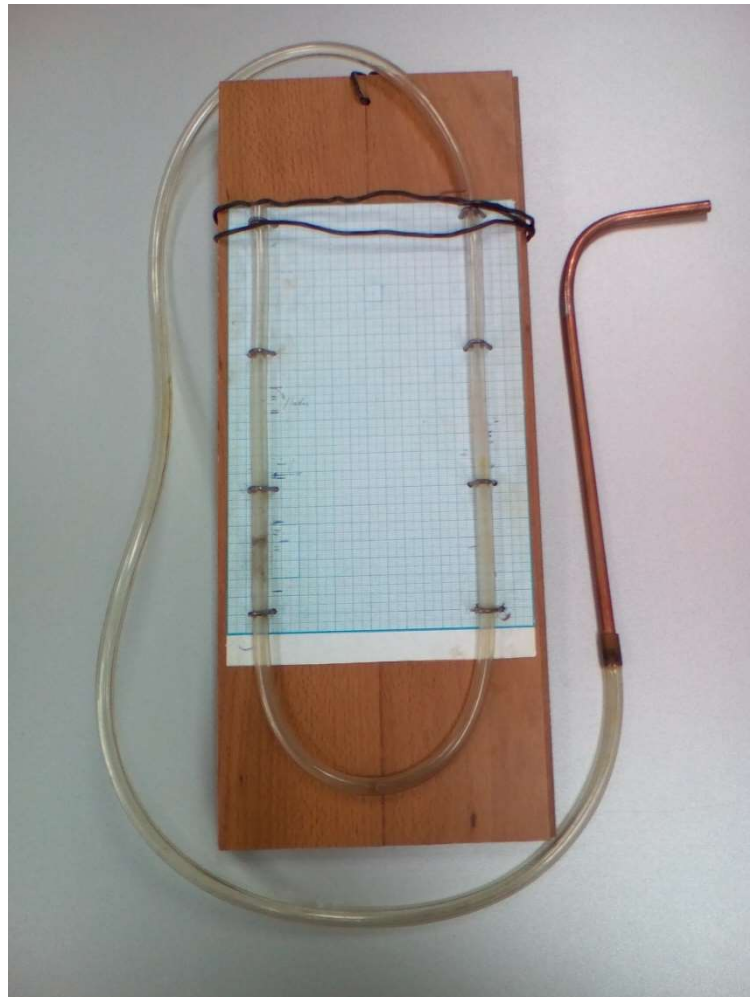


Slika 20. „EOLO PU EST“ cijev

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

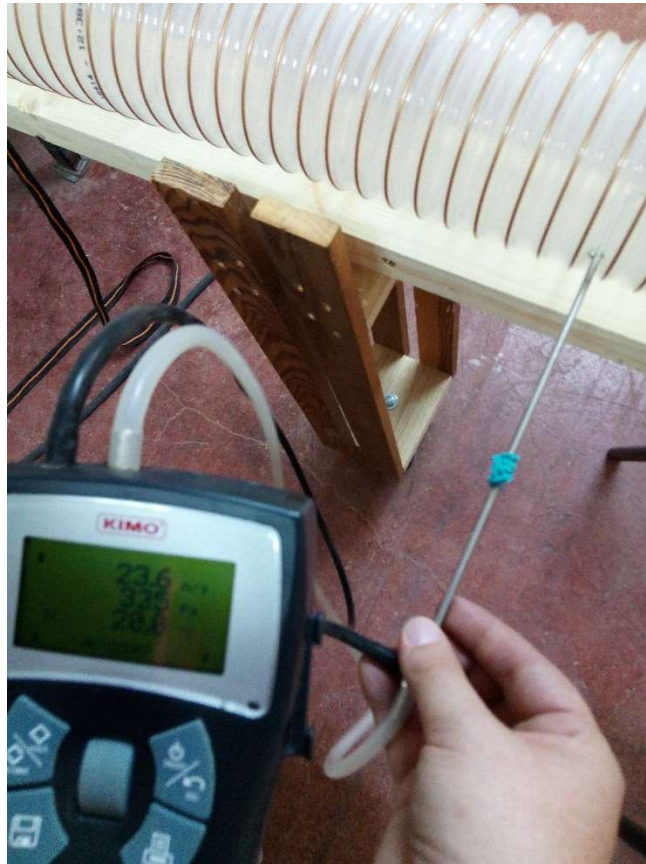
5.2. Mjerni instrumenti

U – manometar je cijev u obliku slova „U“ koja je ispunjena tekućinom, točnije vodom. Na jedan otvor cijevi djeluje atmosferski tlak, a na drugi zavisno o vrsti i mjestu mjerenja djeluje ili pretlak ili podtlak. Očitava se razlika u visini stupca na strani pretlaka ili podtlaka i na strani atmosferskog tlaka. Poznavajući podatke o razlici visine stupca i gustoći vode, može se izračunati tlak, točnije u ovom slučaju statički i totalni tlak. Na slici 21 može se vidjeti U – manometar korišten pri mjerenjima spomenutih tlakova. Iza cijevi nalazi se milimetarski papir pomoću kojega se očitava razlika visine meniskusa vode u oba stupca.



Slika 21. U – manometar

Uz U – manometar korištena je Pitotova mjerna sonda (cijev). Pitotovom cijevi izmjerena je vrijednost dinamičkog tlaka te iznos brzine strujanja zraka na određenim mjestima u fleksibilnim cijevima. Slika 22 prikazuje Pitotovu cijev i postupak mjerenja parametara u fleksibilnoj cijevi.



Slika 22. Pitotova cijev

5.3. Provođenje mjerenja

Cilj diplomskog rada bio je odrediti otpore strujanju zraka u fleksibilnim cijevima. Mjerenje je izvršeno na sedam vrsta fleksibilnih cijevi. Uz određivanje otpora u ravno postavljenim cijevima, otpor je izračunat i iz rezultata izmjerenih u savijenim cijevima pod 45° i 90° . Savijanjem cijevi promijenjen je smjer strujanja zraka te time povećan otpor strujanju zraka u cijevima.

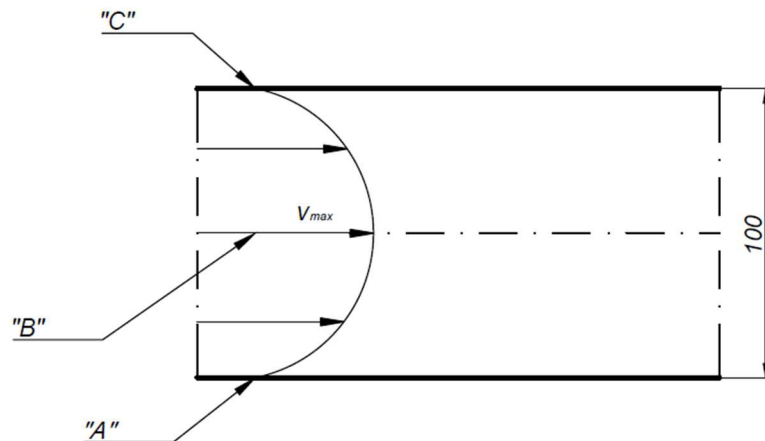
Za dobivanje rezultata otpora u ravnim cijevima, mjerenje se izvršilo na dva mjerna mjesta, M1 i M2, vidljivo na slici 23. Mjerno mjesto M1 od ventilatora odmaknuto je za 16 promjera cijevi, što znači da za promjer od 100 mm, udaljenost mjernog mjesta M1 iznosi 1600 mm. Mjerno mjesto M2 od ventilatora odmaknuto je za 8 duljina promjera

cijevi. Udaljenost od 8 duljina promjera cijevi osigurava pouzdane rezultate zbog dovoljne udaljenosti od ventilatora, tj. od izvora turbulencije.



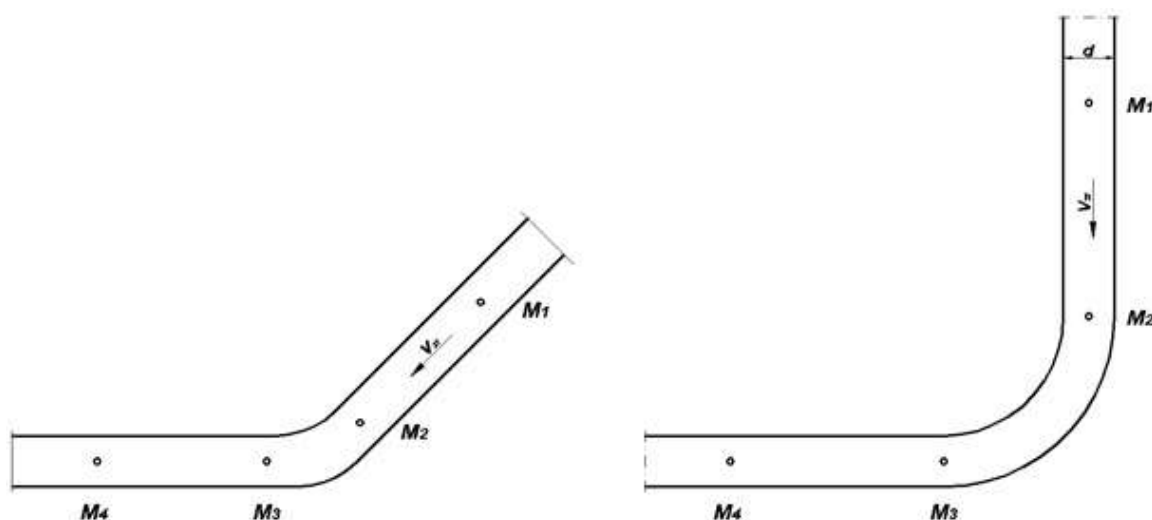
Slika 23. Mjerna mjesta M1 i M2

Na svakom mjernom mjestu s U – manometrom izmjerene su vrijednosti visine stupca vode u mmH₂O koje množenjem s ubrzanjem sile teže ($9,81 \text{ m/s}^2$) i gustoće vode (približno 10^3 kg/m^3) daju vrijednosti statičkog i totalnog tlaka. Statički tlak mjeri se uz stjenku cijevi, a totalni na jednoj trećini promjera cijevi. Mjerna mjesta A i C označuju mjerna mjesta uz stjenke, a B označuje mjerno mjesto u sredini promjera cijevi, gdje je također izmjeren totalni tlak. Na mjernim mjestima A, B i C na M1 i M2 izmjerena je brzina strujanja zraka i visina dinamičkog tlaka Pitotovom cijevi na ravno položenim cijevima u svrhu prikaza distribucije brzine strujanja po presjeku cijevi. Na 1/3 promjera cijevi izmjerena je veličina pada totalnog tlaka pomoću koje se izračunava iznos dinamičkog tlaka. Slika 24 shematski prikazuje distribuciju brzine zraka te mjerna mjesta A, B i C.



Slika 24. Shematski prikaz presjeka cijevi

Za određivanje otpora u savijenim cijevima, mjerenje je izvršeno na četiri različita mjerna mjesta M1, M2, M3 i M4. Mjerno mjesto M4 odmaknuto je 8 duljina promjera cijevi od ventilatora, M3 i M2 nalaze se na početku i završetku koljena, a mjerno mjesto M1 udaljeno je 8 duljina promjera cijevi od završetka koljena, tj. nalazi se najbliže ušću. Na svakom od četiri mjerna mjesta određen je statički i totalni tlak U – manometrom. Na U – manometru izmjerena je razlika u visini stupca vode te se tlak izračunavao množenjem očitano g stupca vode s gustoćom vode i gravitacijskom konstantom. Slika 25 prikazuje mjerna mjesta na dijelu cjevovoda gdje struja zraka mijenja smjer (cijev savijena pod kutom od 45° i 90°), a slika 26 prikazuje cijevi postavljene za mjerenje tlakova i brzina. Svako mjerenje provedeno je pet puta.



Slika 25. Shematski prikaz mjernih mjesta kod zakrivljenih cijevi, 45° (lijevo) i 90° (desno)



Slika 26. Prikaz cijevi postavljenih pod kutom od 45° i 90°

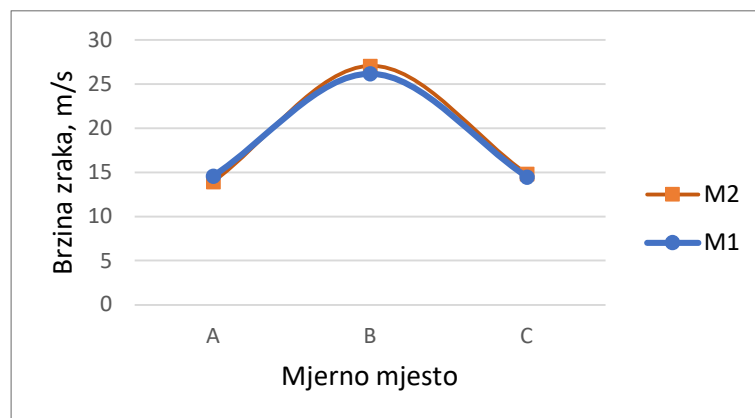
6. Rezultati i rasprava

Istraživanje je napravljeno na fleksibilnim cijevima u četiri različita promjera (80, 100, 120 i 140 mm). Važno je napomenuti kako sve vrste cijevi nisu dostupne, odnosno ne proizvode se u svim promjerima.

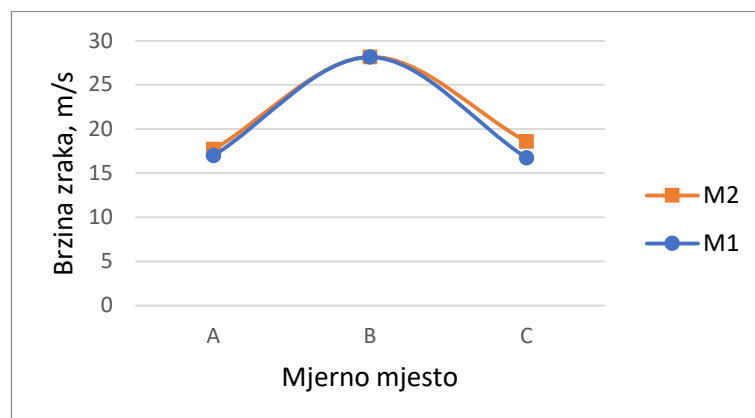
6.1. Distribucija brzine po presjeku cijevi

Grafovi na slikama 27-51 prikazuju promjenu brzine po presjeku ravno položenih cijevi, gdje slova A i C predstavljaju mjerna mjesta uz stijenke, a slovo B mjerno mjestu na sredini presjeka cijevi. Podaci za mjerna mjesta M1 i M2 objedinjeni su u istom grafu.

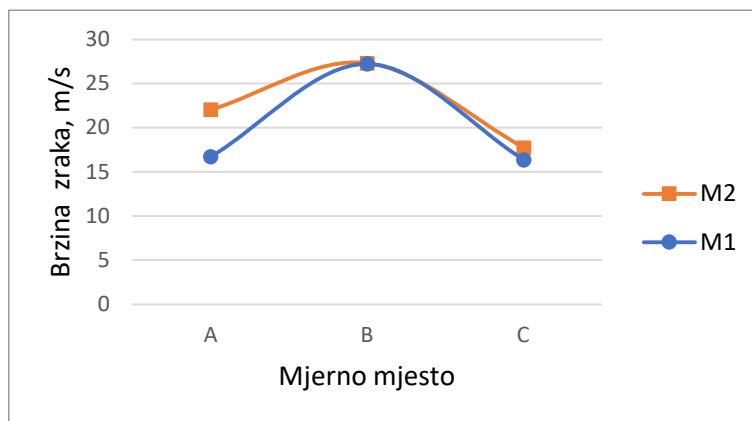
Slike 27-31 predstavljaju grafove za fleksibilne cijevi promjera 80 mm.



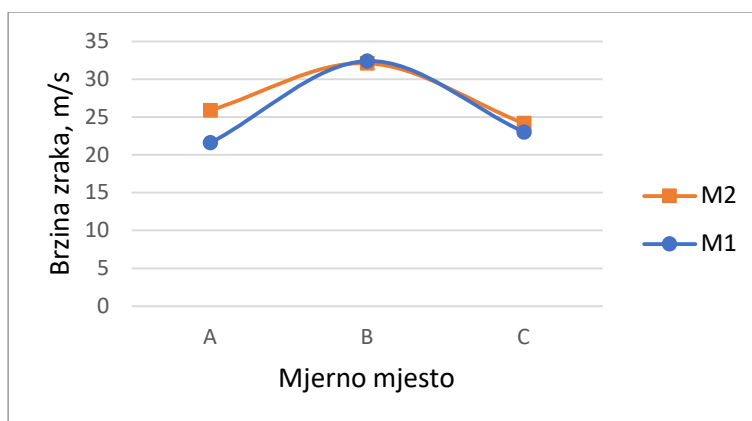
Slika 27. „PUZ“ - promjena brzine po presjeku (80 mm)



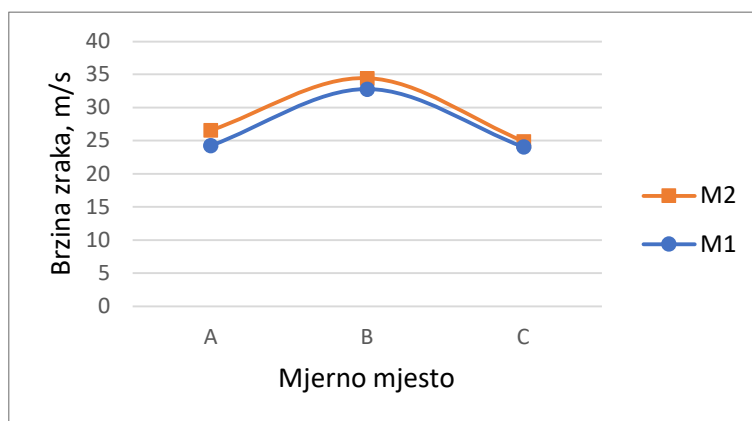
Slika 28. „PUR“ - promjena brzine po presjeku (80 mm)



Slika 29. „PUH“ - promjena brzine po presjeku (80 mm)



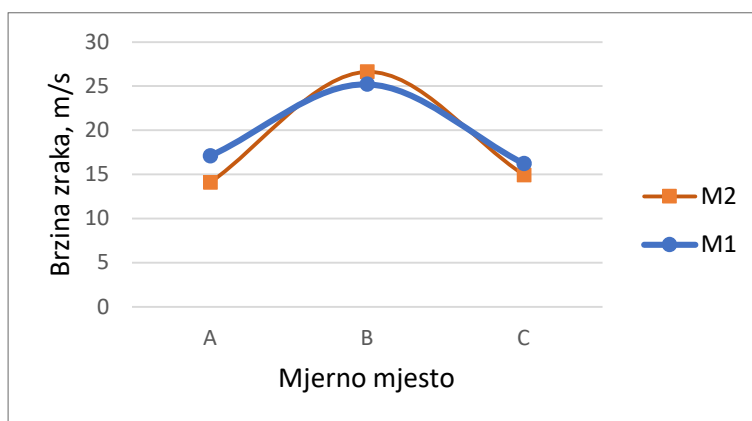
Slika 30. „EOLO L“ - promjena brzine po presjeku (80 mm)



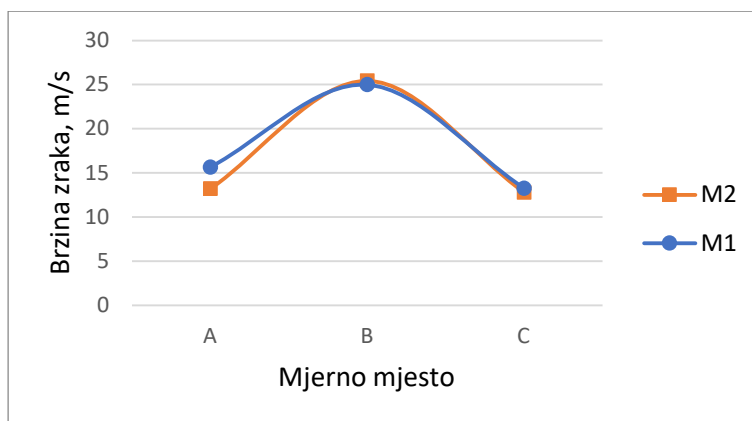
Slika 31. „EOLO PU EST“ - promjena brzine po presjeku (80 mm)

Vidljivo je kako zračna struja ima najmanju brzinu u cijevi „PUZ“, a najveću u cijevi „EOLO PU EST“, također jednaki rezultati postižu se i kod distribucije brzine po presjeku cijevi.

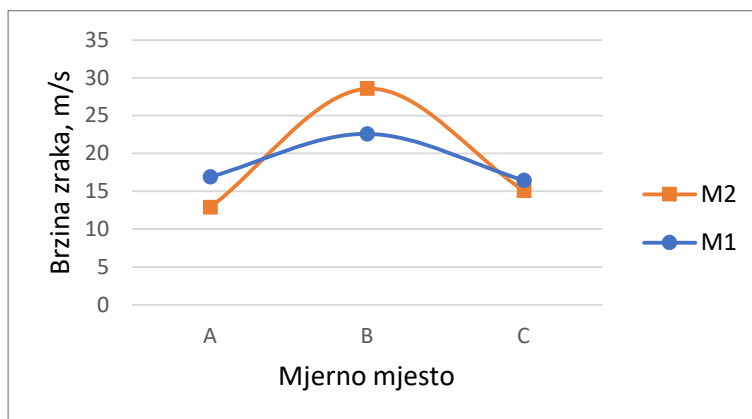
Slike 32 do 38 predstavljaju grafove za fleksibilne cijevi promjera 100 mm.



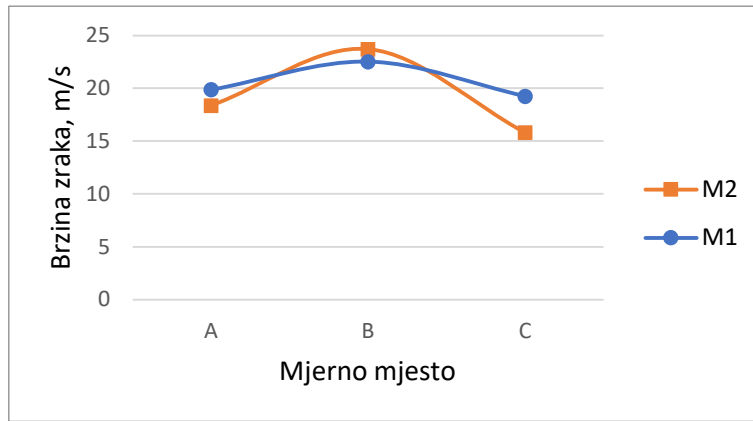
Slika 32. „PUZ“ - promjena brzine po presjeku (100 mm)



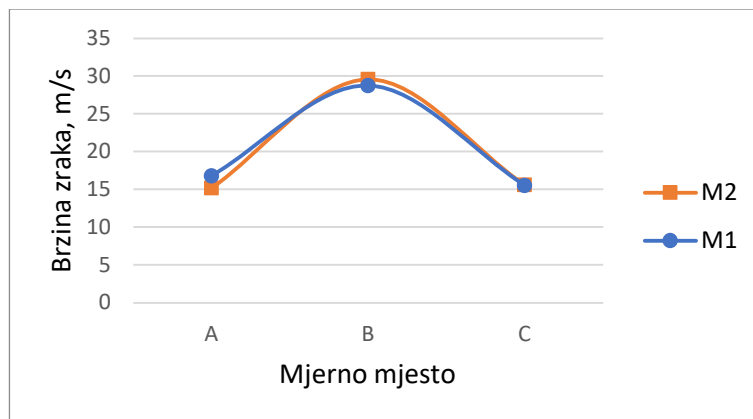
Slika 33. „PUR“ - promjena brzine po presjeku (100 mm)



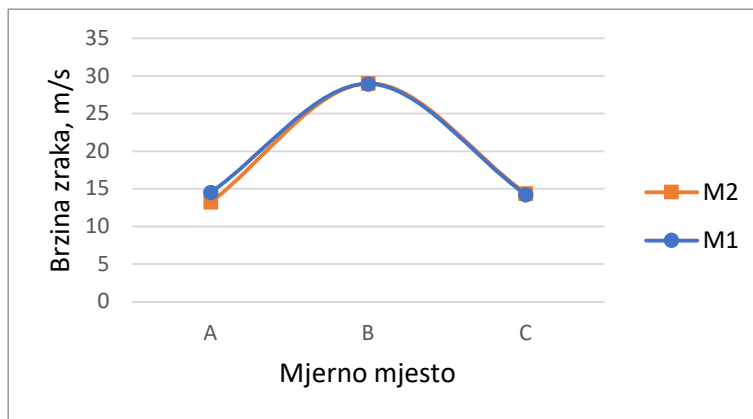
Slika 34. „PUM“ - promjena brzine po presjeku (100 mm)



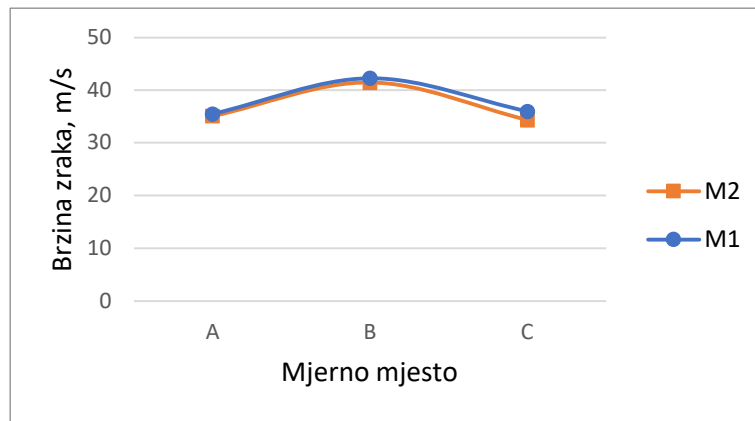
Slika 35. „PUH“ - promjena brzine po presjeku (100 mm)



Slika 36. „PU Hose“ - promjena brzine po presjeku (100 mm)



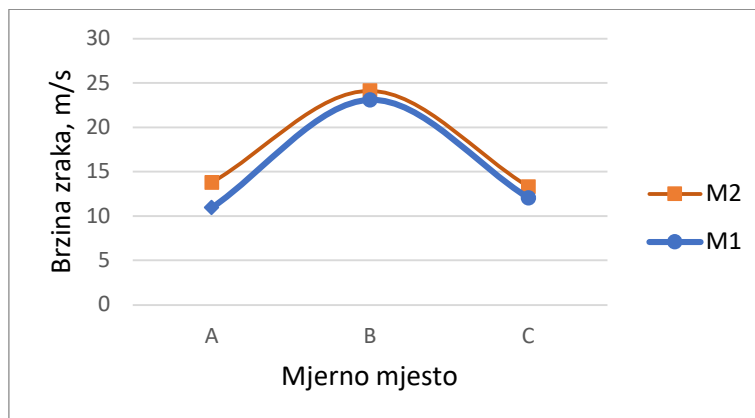
Slika 37. „EOLO L“ - promjena brzine po presjeku (100 mm)



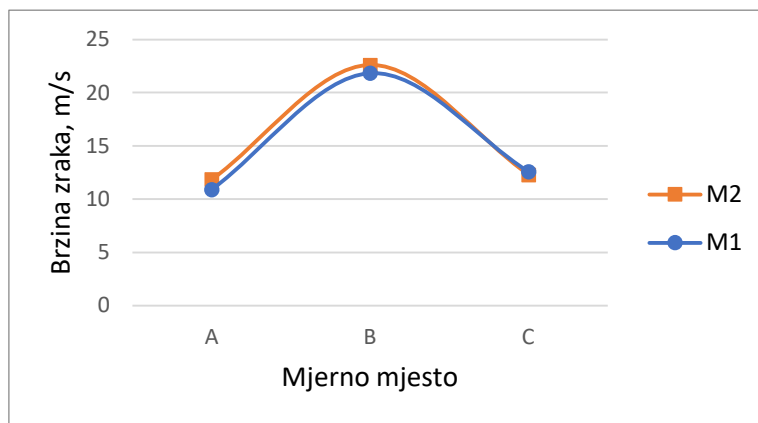
Slika 38. „EOLO PU EST“ - promjena brzine po presjeku (100 mm)

U cijevima „PUZ“ i „PUR“ promjera 100 mm strujanje zraka ima najmanju brzinu i najveće razlike u iznosima brzine po presjeku, dok je distribucija brzine strujanja zraka kod cijevi „EOLO PU EST“ mnogo ravnomjernija. U cijevi „EOLO PU EST“ postignute su najviše brzine strujanja zraka. Ta vrsta cijevi s unutarnje strane je gotovo glatka, bez spiralnih namota po obodu.

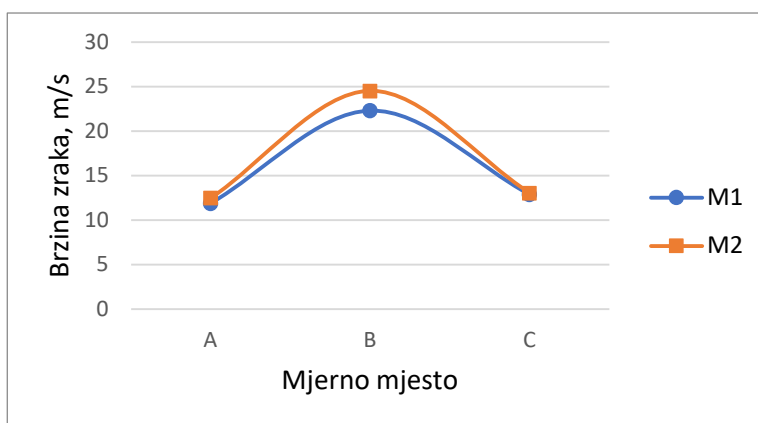
Slike 39-44 predstavljaju grafove za fleksibilne cijevi promjera 120 mm.



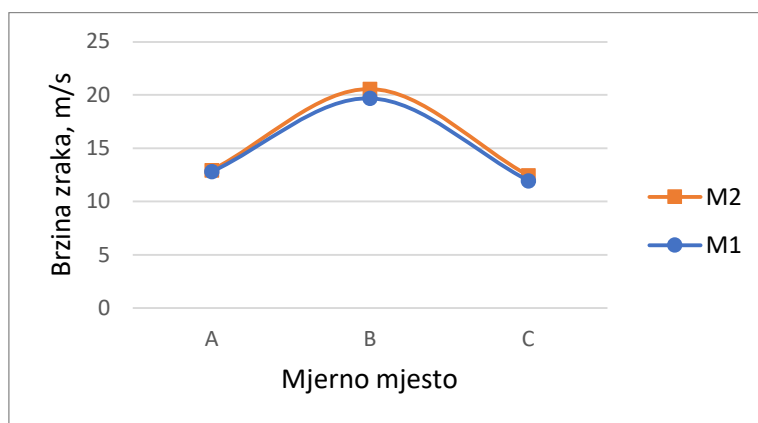
Slika 39. „PUZ“ - promjena brzine po presjeku (120 mm)



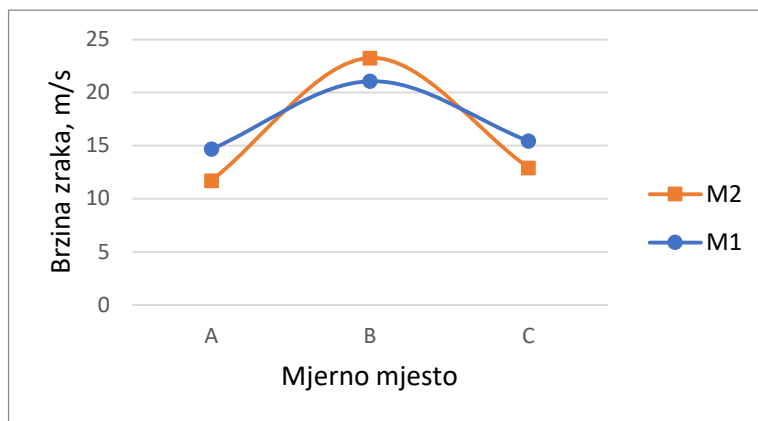
Slika 40. „PUR“ - promjena brzine po presjeku (120 mm)



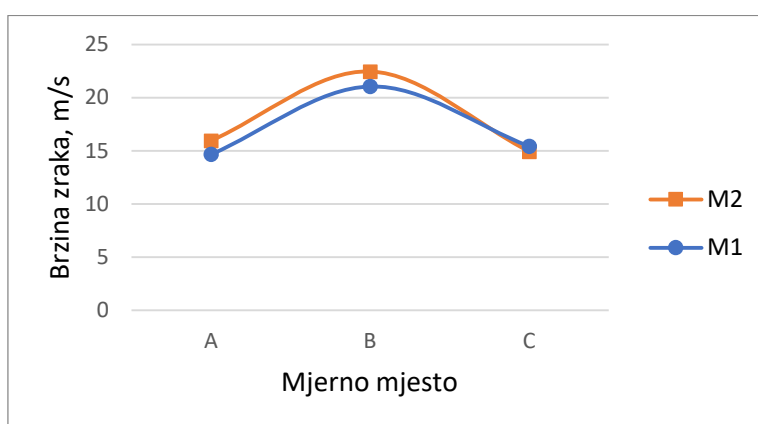
Slika 41. „PUM“ - promjena brzine po presjeku (120 mm)



Slika 42. „PUH“ - promjena brzine po presjeku (120 mm)

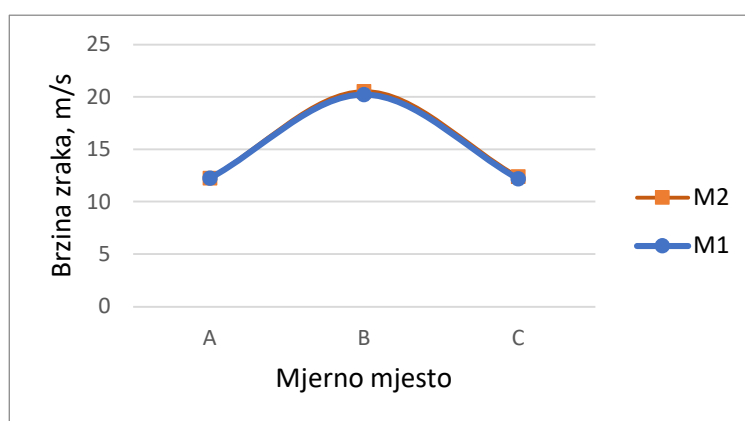


Slika 43. „EOLO L“ - promjena brzine po presjeku (120 mm)

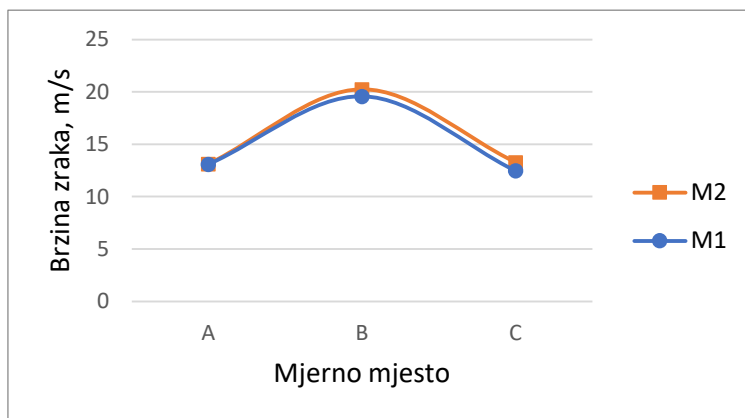


Slika 44. „EOLO PU EST“ - promjena brzine po presjeku (120 mm)

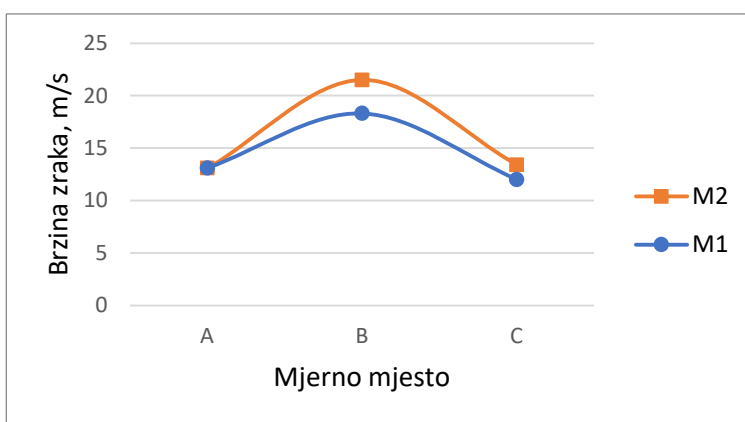
Slike 45-51 predstavljaju grafove za fleksibilne cijevi promjera 140 mm.



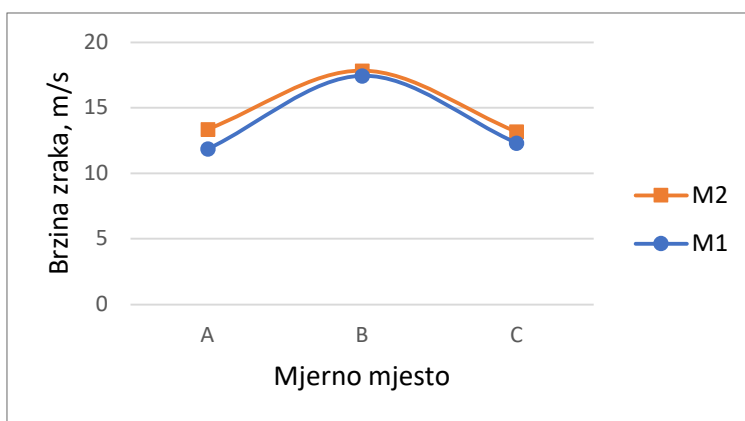
Slika 45. „PUZ“ - promjena brzine po presjeku (140 mm)



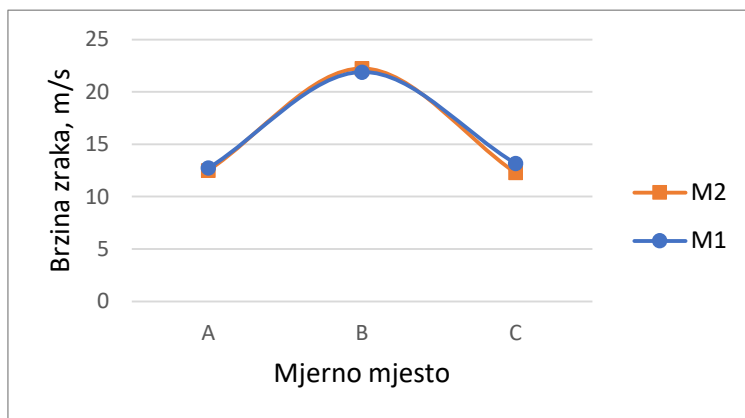
Slika 46. „PUR“ - promjena brzine po presjeku (140 mm)



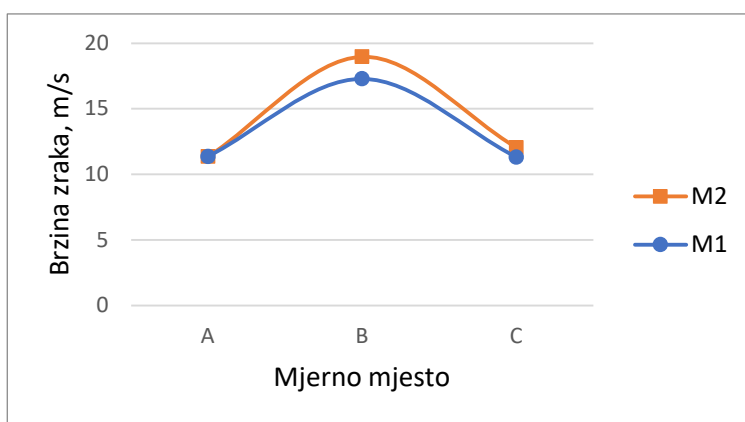
Slika 47. „PUM“ - promjena brzine po presjeku (140 mm)



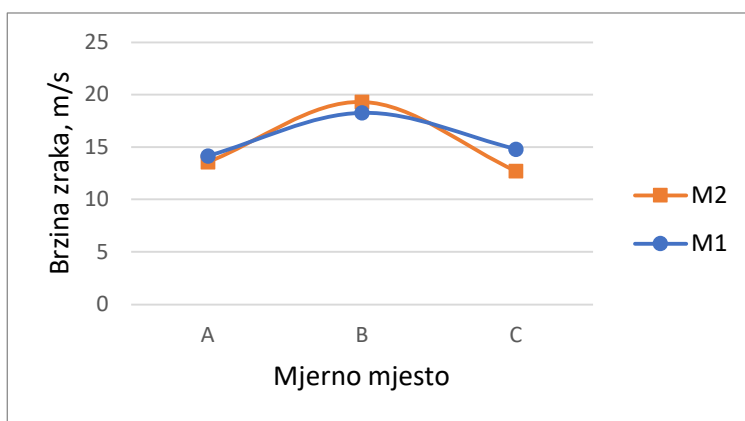
Slika 48. „PUH“ - promjena brzine po presjeku (140 mm)



Slika 49 „PU Hose“ - promjena brzine po presjeku (140 mm)



Slika 50. „EOLO L“ - promjena brzine po presjeku (140 mm)



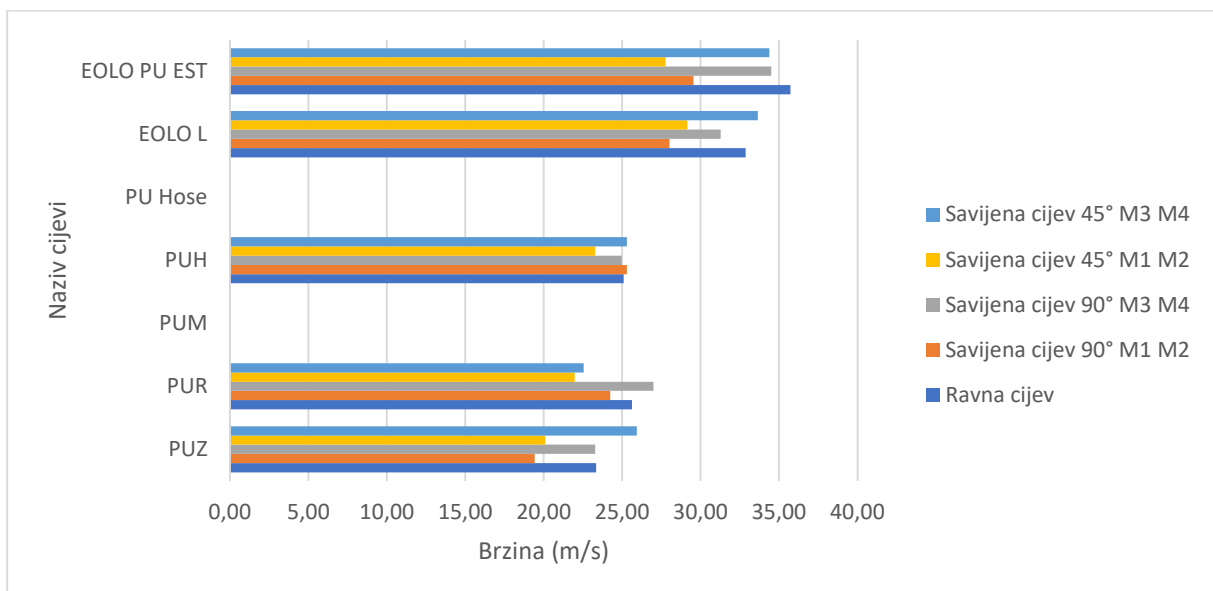
Slika 51. „EOLO PU EST“ - promjena brzine po presjeku (140 mm)

Kod fleksibilnih cijevi promjera 120 i 140 mm nema značajnih promjena u iznosu brzine strujanja zraka i obliku distribucije zraka kroz promjer cijevi u odnosu na fleksibilne cijevi promjera 80 i 100 mm. Najveće brzine i najpravilnija distribucija strujanja zraka postižu se kod cijevi „EOLO PU EST“ u svakom promjeru. Važno je napomenuti kako svaki graf prikazuje najveći iznos brzine na mjestu B koje se nalazi u sredini presjeka cijevi, a manje, gotovo identične brzine pojavljuju se na mjestima A i C, tj. uz stijenku fleksibilne cijevi. Valja naglasiti da je korišten ventilator granične snage za upotrebu cijevi promjera većeg od 140 mm. To je još jedan od razloga zašto je za najveći promjer fleksibilnih cijevi u ovom istraživanju izabrana ta dimenzija.

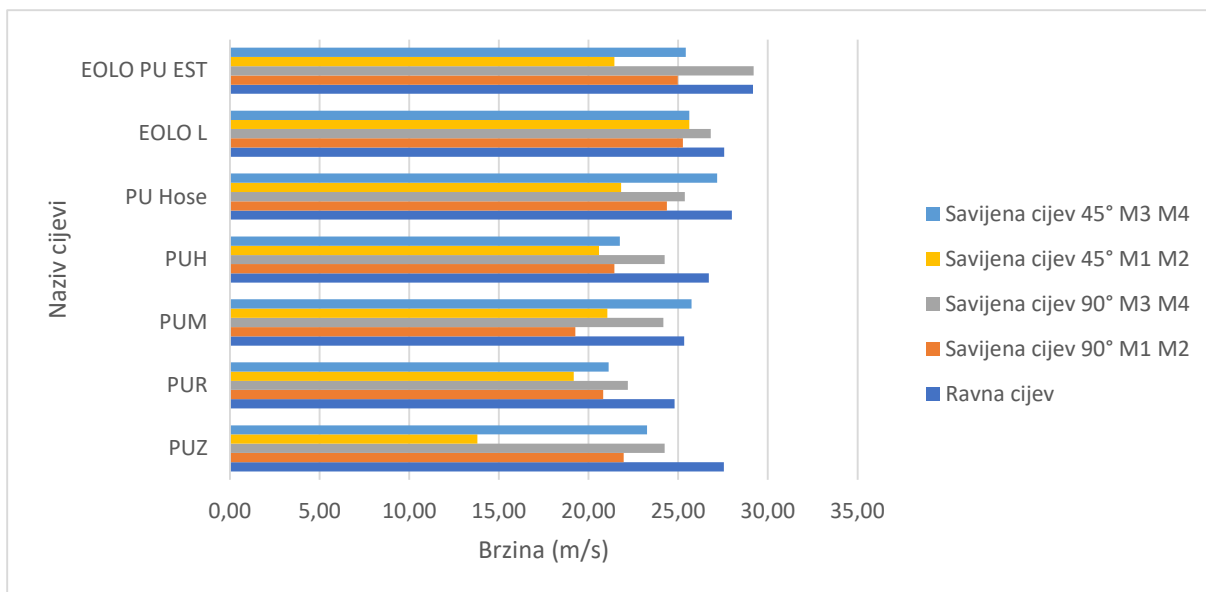
6.2. Odnos brzina, pada tlaka, dinamičkog tlaka i koeficijenta otpora

Sljedeći grafovi u poglavlju prikazuju odnos brzina strujanja zraka izračunatih mjerenjem totalnog i statičkog tlaka, pada tlaka, odnosno gubitak tlaka po dužnom metru, odnose dinamičkih tlakova te razlike u otporima koji se pojavljuju prilikom strujanja zraka u cijevi između svake vrste cijevi i kuta pod kojim je ista savijena. Promatrane su razlike između ravno položene cijevi, cijevi savijene pod kutom od 45° i 90° pri istim promjerima cijevi. Prikazani podaci ukazuju na vrijednosti između mjernih mjesta M1 i M2 te M3 i M4, tj. na stanje ispred i iza koljena.

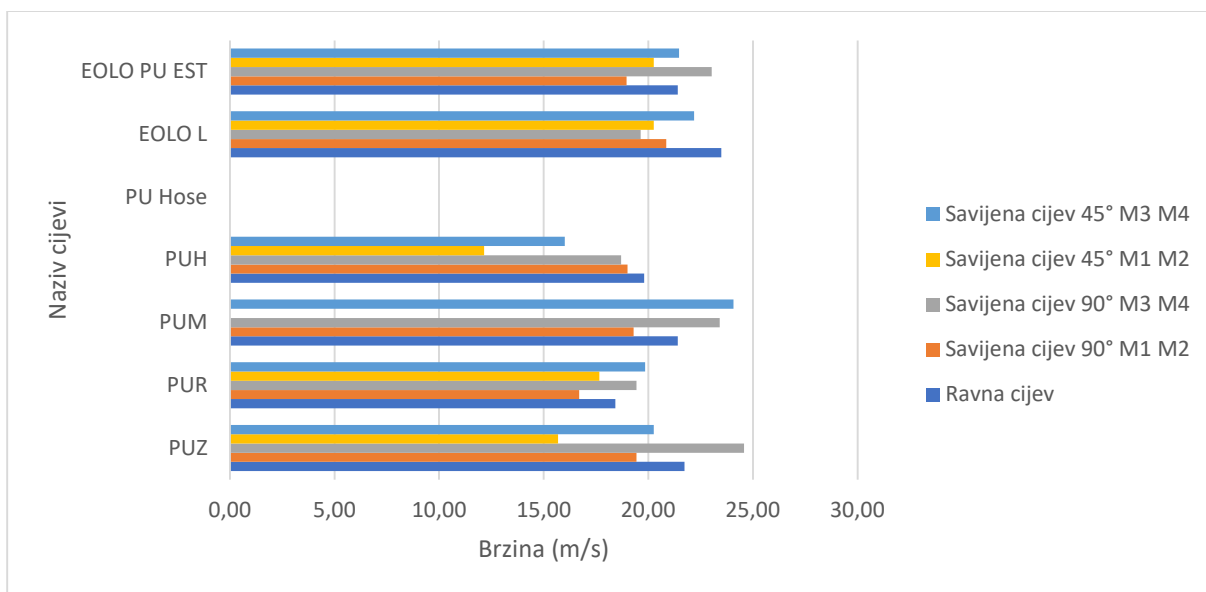
Grafovi na slikama 52-55 prikazuju odnos brzina strujanja zraka.



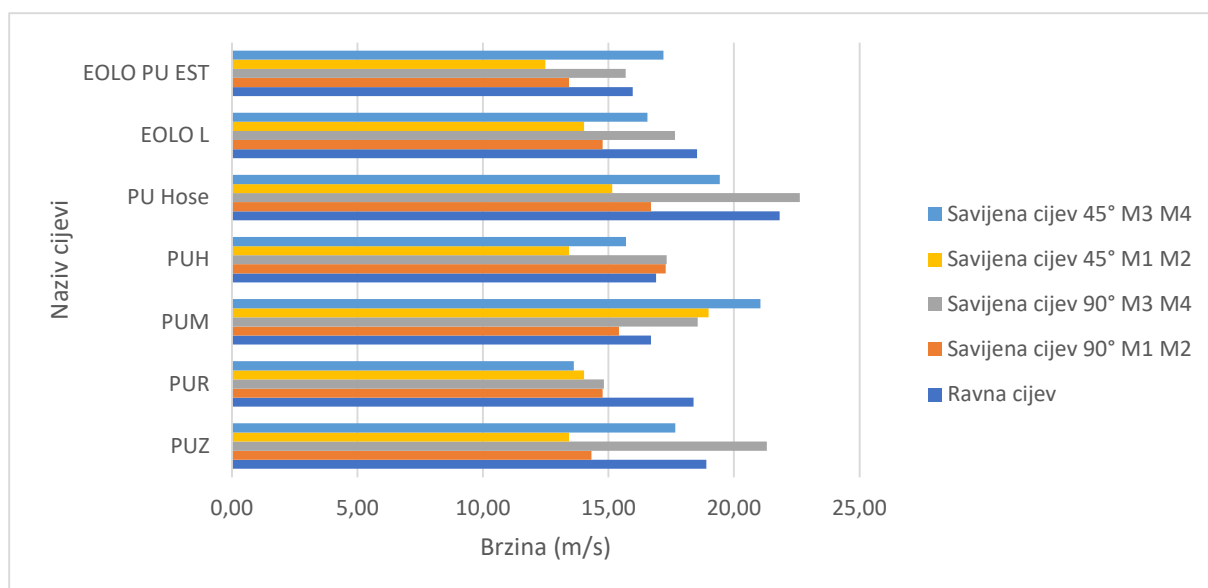
Slika 52. Odnos brzina između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi (80 mm)



Slika 53. Odnos brzina između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi (100 mm)



Slika 54. Odnos brzina između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi (120 mm)



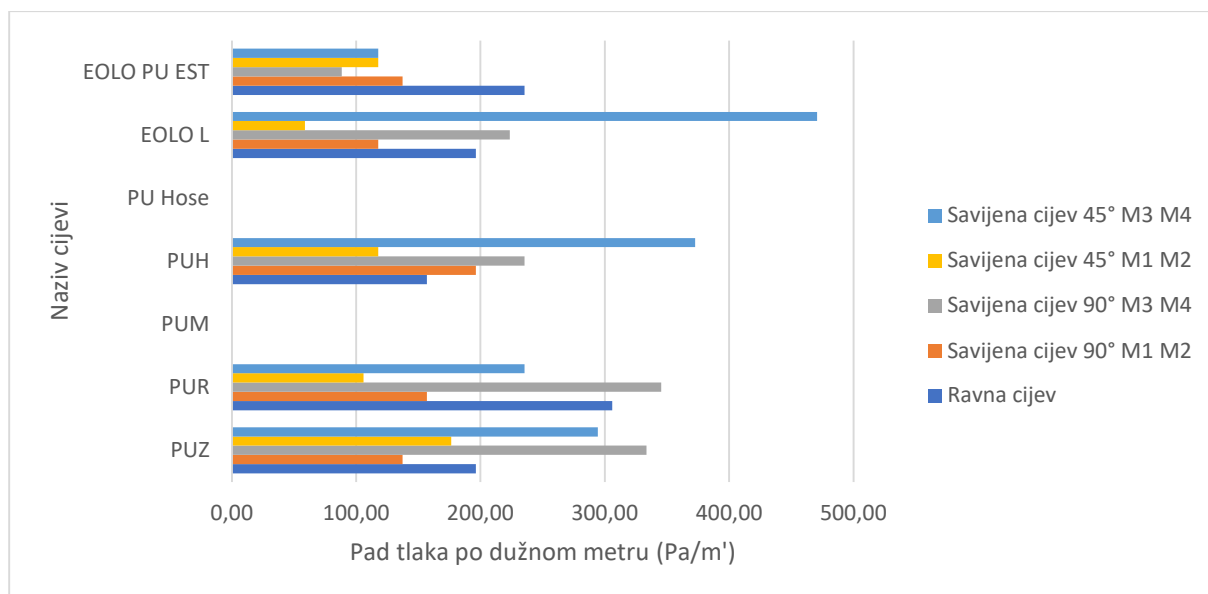
Slika 55. Odnos brzina između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi (140 mm)

Promatrajući grafove može se primijetiti kako se povećanjem promjera cijevi brzina strujanja zraka u cijevima smanjuje. Kod promjera od 80 i 100 mm, najveće brzine postignute su u ravno položenoj cijevi kod gotovo svih vrsta cijevi. U cijevima promjera 120 i 140 mm, veće brzine strujanja zraka pojavljuju se između mjernih mjesta M3 i M4 na cijevima savijenim za 45° i 90° u odnosu na ravnu cijev. U cijevi savijenoj za 90° češće se postiže veća brzina nego u cijevi savijenoj za 45° na mjernim mjestima bliže ventilatoru, jednaki odnosi rezultata pojavljuju se i na mjernim mjestima M1 i M2, tj. prije koljena i dalje od ventilatora. Važno je primijetiti kako su rezultati vrste cijevi „EOLO“ veći u manjim promjerima u odnosu na druge vrste cijevi, a povećanjem promjera rezultati se iznosom približavaju. Kod promjera od 140 mm najveće brzine postižu se kod cijevi „PU Hose“ i „PUZ“, a najmanje kod „EOLO“ cijevi, što se može vidjeti i u tablici 1.

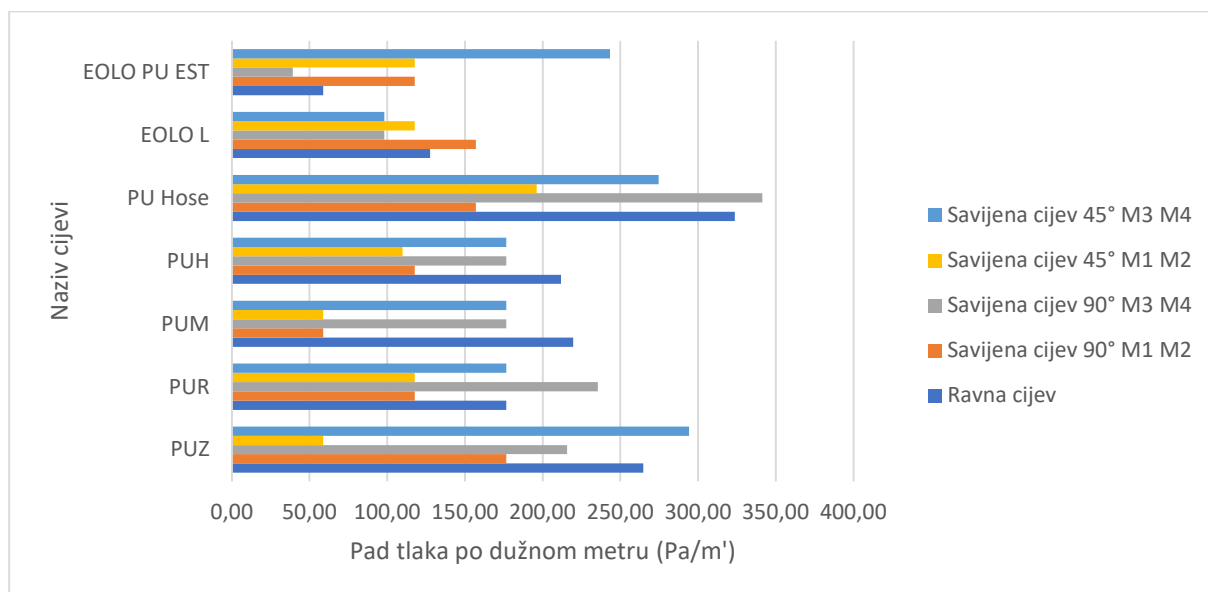
Tablica 1. Odnos brzina između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi (m/s)

Ravna cijev							
m/s	PUZ	PUR	PUM	PUH	PU Hose	EOLO L	EOLO PU EST
80 mm	23,34	25,63		25,09		32,87	35,73
100 mm	27,54	24,81	25,34	26,70	28,00	27,57	29,18
120 mm	21,72	18,43	21,41	19,80		23,49	21,41
140 mm	18,89	18,39	16,70	16,90	21,82	18,53	15,97
Savijena cijev 90° M1 M2							
80 mm	19,43	24,24		25,30		28,01	29,55
100 mm	21,97	20,82	19,26	21,44	24,38	25,27	24,97
120 mm	19,43	16,70	19,30	19,00		20,86	18,96
140 mm	14,32	14,77	15,42	17,28	16,70	14,77	13,43
Savijena cijev 90° M3 M4							
80 mm	23,27	27,00		24,97		31,28	34,50
100 mm	24,24	22,19	24,17	24,24	25,37	26,81	29,22
120 mm	24,58	19,43	23,41	18,70		19,64	23,03
140 mm	21,31	14,82	18,56	17,32	22,62	17,65	15,68
Savijena cijev 45° M1 M2							
80 mm	20,09	21,97		23,27		29,16	27,78
100 mm	13,80	19,18	21,05	20,58	21,82	25,62	21,44
120 mm	15,69	17,66		12,15		20,26	20,26
140 mm	13,43	14,03	18,99	13,43	15,15	14,03	12,48
Savijena cijev 45° M3 M4							
80 mm	25,94	22,56		25,30		33,65	34,38
100 mm	23,27	21,13	25,75	21,74	27,18	25,62	25,43
120 mm	20,26	19,85	24,07	16,00		22,19	21,48
140 mm	17,66	13,62	21,06	15,69	19,43	16,56	17,19

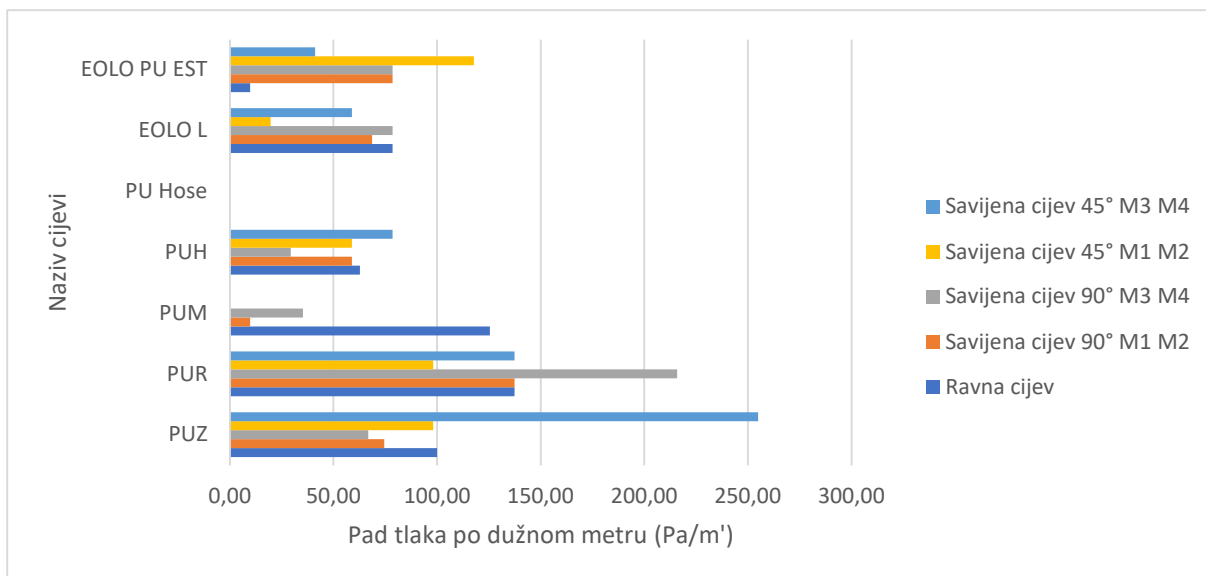
Grafovi na slikama 56-59 prikazuju odnos pada tlaka po dužnom metru cijevi. Najveći iznos pada tlaka može se izmjeriti na mjestu najbližem ventilatoru, udaljavanjem mjernog mjesta od ventilatora pad tlak se smanjuje.



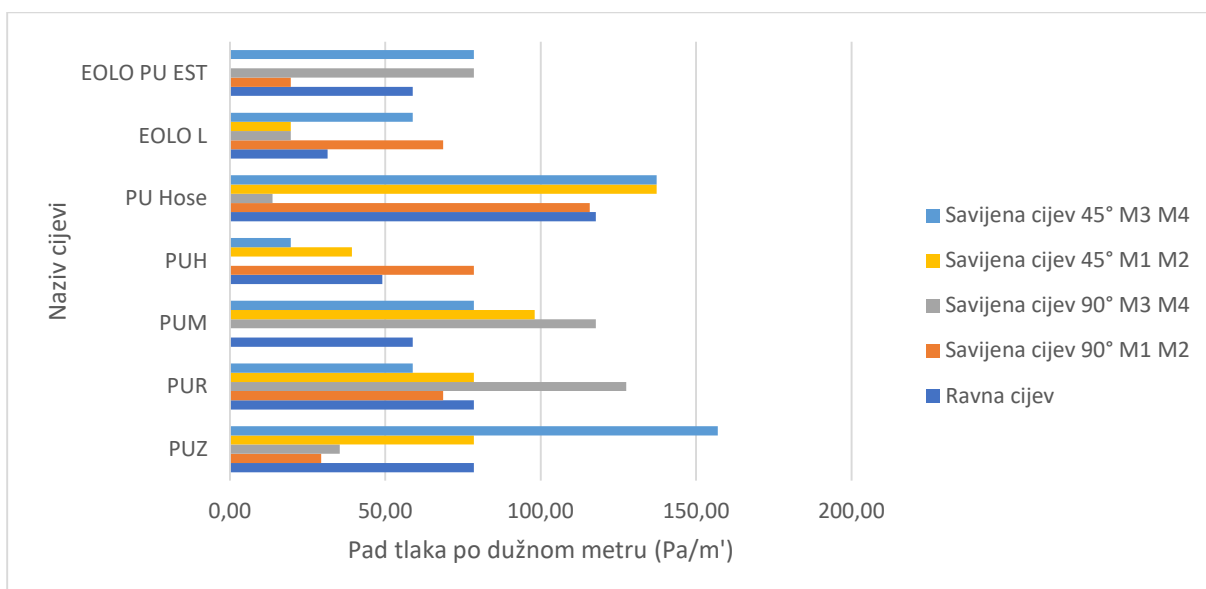
Slika 56. Odnos pada tlaka po dužnom metru između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi (80 mm)



Slika 57. Odnos pada tlaka po dužnom metru između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi (100 mm)



Slika 58. Odnos pada tlaka po dužnom metru između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi (120 mm)



Slika 59. Odnos pada tlaka po dužnom metru između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi (140 mm)

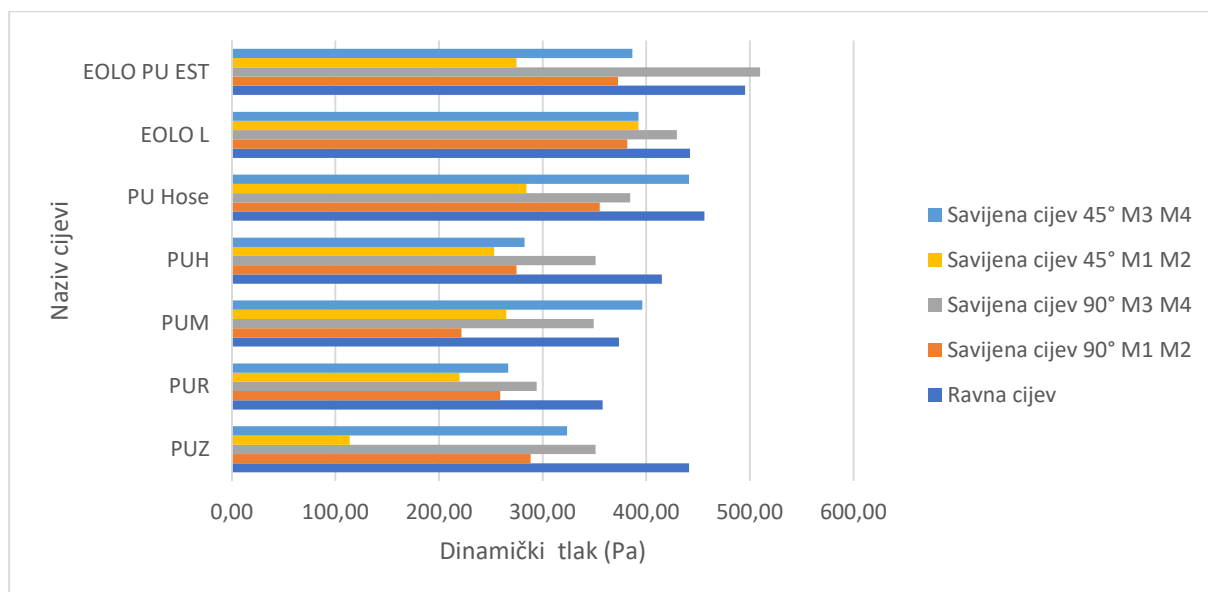
Visina tlaka ovisi o promjeru cijevi, tj. što je promjer cijevi manji visina tlaka je veća. Kod promjera od 80 i 100 mm pad tlaka najveći je nakon koljena, odnosno bliže ventilatoru u cijevima savijenim za 45° i 90°. U promjeru od 100 mm pad tlaka u ravnim cijevima u odnosu na savijene cijevi mnogo je veći nego u promjeru od 80 mm. Odnosi iznosa pada tlaka u većim promjerima razlikuju se kod svake vrste cijevi te se može zaključiti kako je gubitak tlaka u većim promjerima mnogo više ovisan o vrsti materijala fleksibilne cijevi, ali kao i u manjim promjerima pad tlaka je u većini slučajeva veći na mjernim mjestima bližim ventilatoru. U gotovo svim cijevima pad tlaka u ravno položenoj cijevi je veći od pada tlaka na mjernim mjestima M1 i M2 savijenih cijevi, tj.

na mjestima prije koljena. Rezultati odnosa pada tlaka po dužnom metru između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi vidljivi su u tablici 2.

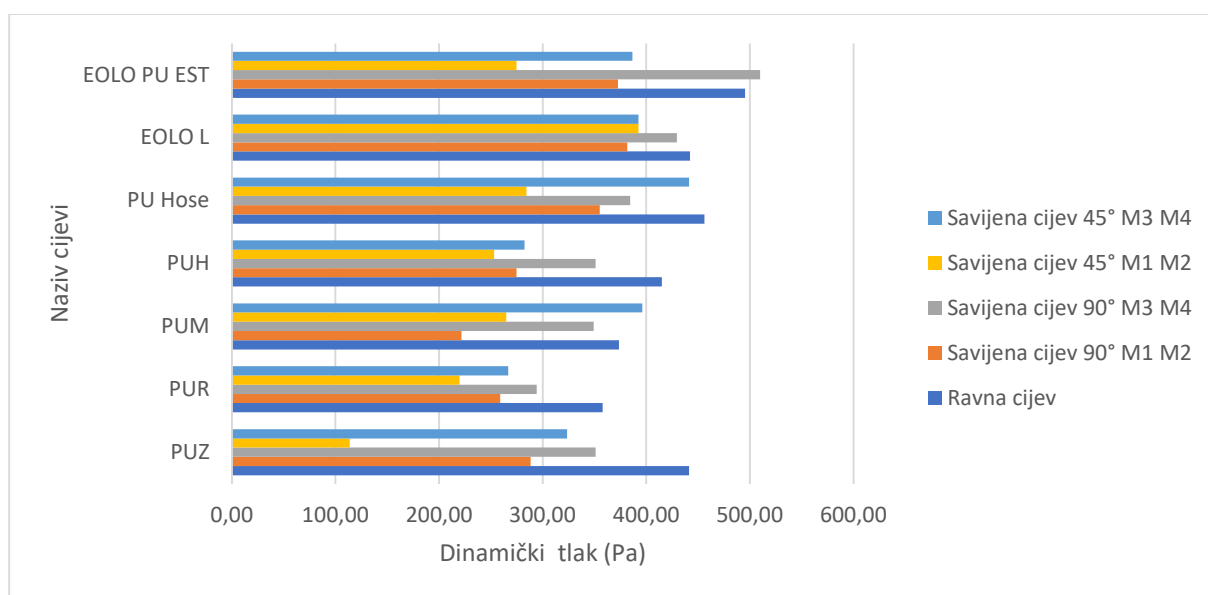
Tablica 2. Odnos pada tlaka po dužnom metru između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi (Pa/m')

Ravna cijev							
Pa/m'	PUZ	PUR	PUM	PUH	PU Hose	EOLO L	EOLO PU EST
80 mm	196,20	306,07		156,96		196,20	235,44
100 mm	264,87	176,58	219,74	211,90	323,73	127,53	58,86
120 mm	100,06	137,34	125,57	62,78		78,48	9,81
140 mm	78,48	78,48	58,86	49,05	117,72	31,39	58,86
Savijena cijev 90° M1 M2							
80 mm	137,34	156,96		196,20		117,72	137,34
100 mm	176,58	117,72	58,86	117,72	156,96	156,96	117,72
120 mm	74,56	137,34	9,81	58,86		68,67	78,48
140 mm	29,43	68,67	0,00	78,48	115,76	68,67	19,62
Savijena cijev 90° M3 M4							
80 mm	333,54	345,31		235,44		223,67	88,29
100 mm	215,82	235,44	176,58	176,58	341,39	98,10	39,24
120 mm	66,71	215,82	35,32	29,43		78,48	78,48
140 mm	35,32	127,53	117,72	0,00	13,73	19,62	78,48
Savijena cijev 45° M1 M2							
80 mm	176,58	105,95		117,72		58,86	117,72
100 mm	58,86	117,72	58,86	109,87	196,20	117,72	117,72
120 mm	98,10	98,10		58,86		19,62	117,72
140 mm	78,48	78,48	98,10	39,24	137,34	19,62	0,00
Savijena cijev 45° M3 M4							
80 mm	294,30	235,44		372,78		470,88	117,72
100 mm	294,30	176,58	176,58	176,58	274,68	98,10	243,29
120 mm	255,06	137,34	0,00	78,48		58,86	41,20
140 mm	156,96	58,86	78,48	19,62	137,34	58,86	78,48

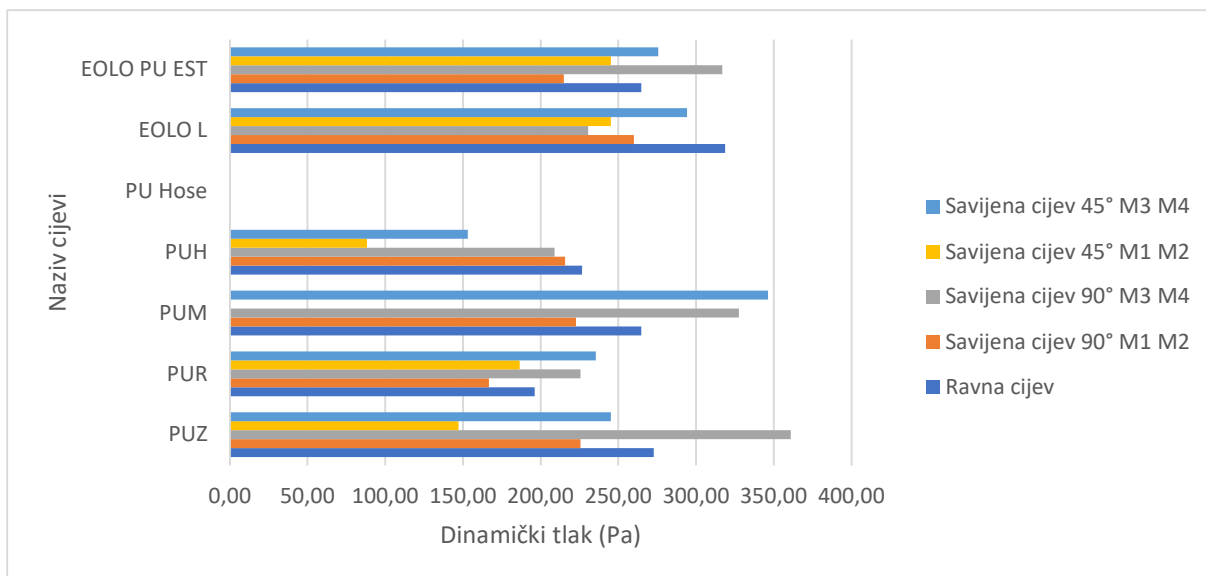
Grafovi na slikama 60-63 prikazuju odnos dinamičkih tlakova.



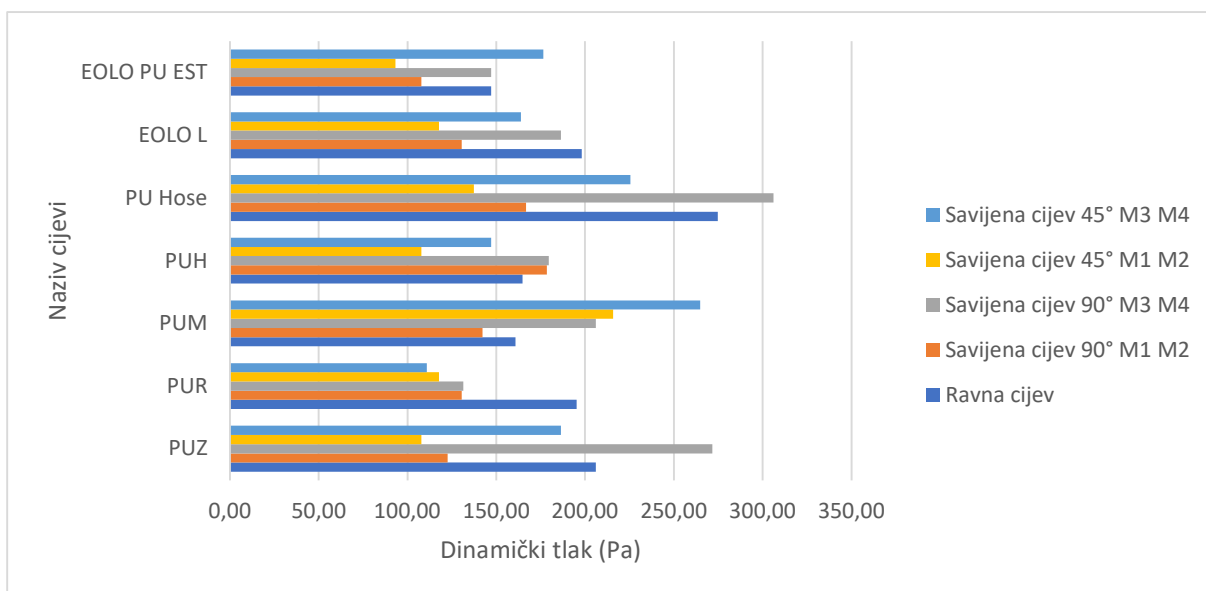
Slika 60. Odnos dinamičkih tlakova između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi (80 mm)



Slika 61. Odnos dinamičkih tlakova između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi (100 mm)



Slika 62. Odnos dinamičkih tlakova između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi (120 mm)



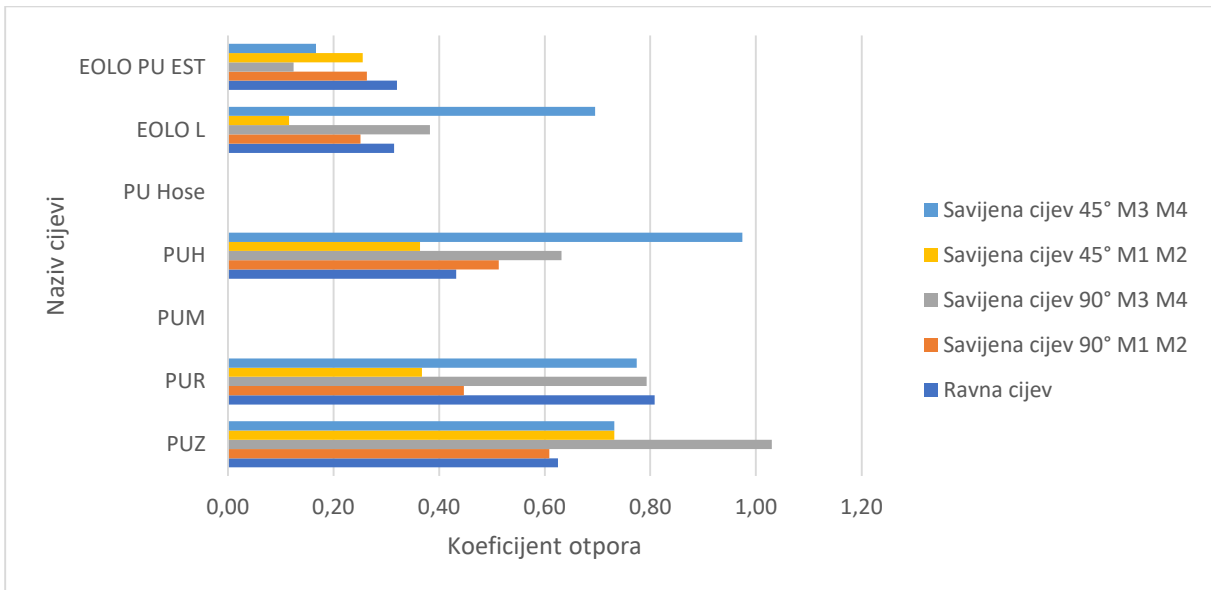
Slika 63. Odnos dinamičkih tlakova između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi (140 mm)

Kao i kod pada tlaka, važno je naglasiti kako se povećanjem promjera cijevi smanjuje maksimalni iznos dinamičkog tlaka. Iz formule za izračunavanje dinamičkog tlaka može se vidjeti kako dinamički tlak proporcionalno ovisi o kvadratu brzine. Promatrajući grafove odnosa brzina na slikama 52-55 te ih uspoređujući s grafovima dinamičkog tlaka, može se zaključiti kako su grafovi gotovo identični upravo zbog ovisnosti dinamičkog tlaka o brzini strujanja zraka. U tablici 3 može se vidjeti kako se rezultati mijenjaju povećanjem promjera, odnosno u cijevima „EOLO“ u kojima se postižu najveći iznosi dinamičkih tlakova u promjeru od 80 i 100 mm. U promjeru od 140 mm iznos dinamičkog tlaka manji je nego u cijevi „PUZ“, u kojoj se prosječno postižu najniži iznosi dinamičkog tlaka u manjim promjerima.

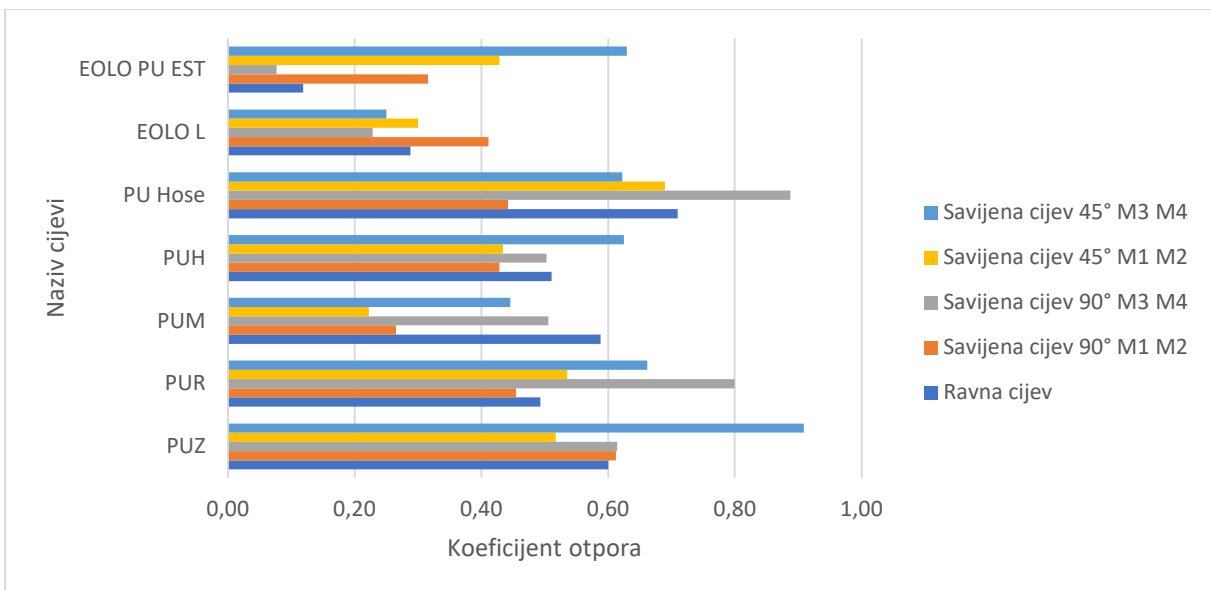
Tablica 3. Odnos dinamičkih tlakova između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi (Pa)

Ravna cijev							
Pa	PUZ	PUR	PUM	PUH	PU Hose	EOLO L	EOLO PU EST
80 mm	313,92	378,67		362,97		622,94	735,75
100 mm	441,45	358,07	373,76	414,96	456,17	442,43	495,41
120 mm	272,72	196,20	264,87	226,61		318,83	264,87
140 mm	206,01	195,22	160,88	164,81	274,68	198,16	147,15
Savijena cijev 90° M1 M2							
80 mm	225,63	351,20		382,59		468,92	521,89
100 mm	288,41	258,98	221,71	274,68	355,12	381,61	372,78
120 mm	225,63	166,77	222,69	215,82		259,97	214,84
140 mm	122,63	130,47	142,25	178,54	166,77	130,47	107,91
Savijena cijev 90° M3 M4							
80 mm	323,73	435,56		372,78		584,68	711,23
100 mm	351,20	294,30	349,24	351,20	384,55	429,68	510,12
120 mm	361,01	225,63	327,65	208,95		230,54	316,86
140 mm	271,74	131,45	206,01	179,52	306,07	186,39	147,15
Savijena cijev 45° M1 M2							
80 mm	241,33	288,41		323,73		508,16	461,07
100 mm	113,80	219,74	264,87	253,10	284,49	392,40	274,68
120 mm	147,15	186,39		88,29		245,25	245,25
140 mm	107,91	117,72	215,82	107,91	137,34	117,72	93,20
Savijena cijev 45° M3 M4							
80 mm	402,21	304,11		382,59		676,89	706,32
100 mm	323,73	266,83	396,32	282,53	441,45	392,40	386,51
120 mm	245,25	235,44	346,29	153,04		294,30	275,66
140 mm	186,39	110,85	264,87	147,15	225,63	163,83	176,58

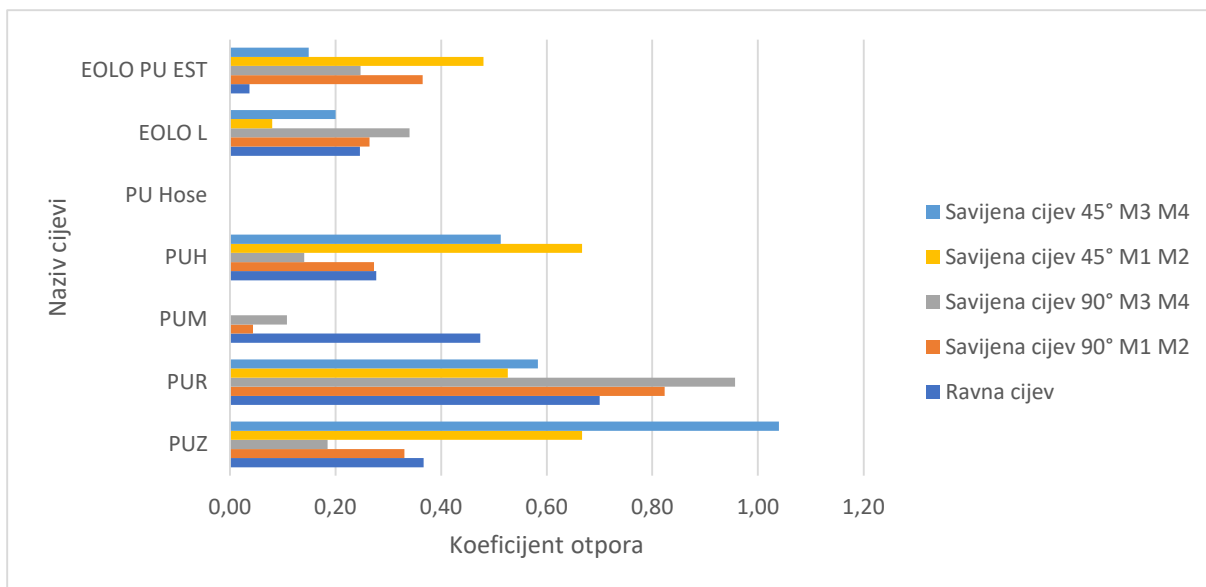
Grafovi na slikama 64-67 prikazuju odnos otpora u cijevima.



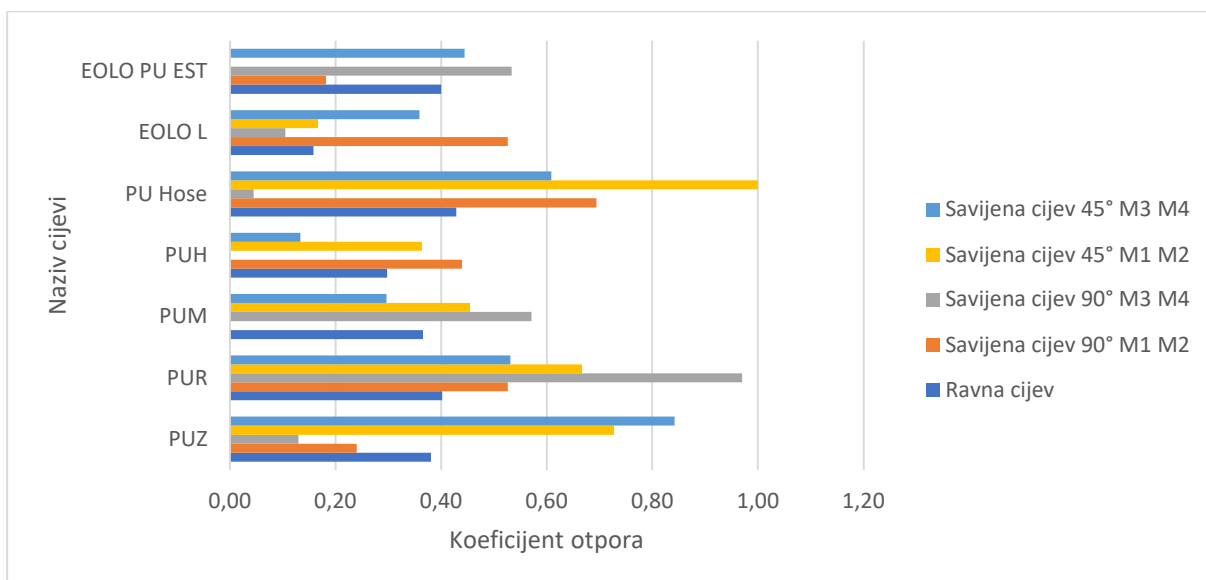
Slika 64. Odnos koeficijenta otpora između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi (80 mm)



Slika 65. Odnos koeficijenta otpora između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi (100 mm)



Slika 66. Odnos koeficijenta otpora između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi (120 mm)



Slika 67. Odnos koeficijenta otpora između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi (140 mm)

Koeficijent otpora za fleksibilnu cijev izračunat je 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 iz razlike totalnog tlaka izmjenog na 1/3 promjera fleksibilne cijevi i statičkog tlaka.

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

gdje je:

$p_{din.}$ – dinamički tlak (Pa)

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

$p_{stat.}$ – statički tlak (Pa)

Na mjernim mjestima M1 i M2 te M3 i M4 izračunate su apsolutne srednje vrijednosti za dobivanje dinamičkog tlaka. Kako bi se izračunala visina dinamičkog tlaka između mjernih mjesta M1 i M2 te M3 i M4 apsolutne srednje vrijednosti uzete su za izračunavanje srednje vrijednosti. Promatrajući grafove može se zaključiti kako je u većini slučajeva koeficijent otpora u ravnim cijevima manji nego u savijenim cijevima. Uz nekoliko iznimki, veći koeficijenti otpora izmjereni su na mjernim mjestima bližima ventilatoru, što objašnjava veći iznos statičkog tlaka u odnosu na dinamički. U većim promjerima mogu se vidjeti rezultati koji prikazuju veći iznos koeficijenta otpora u ravnoj cijevi nego u cijevi savijenoj za 90° ili 45° (slika 66 i 67) iz čega se može zaključiti kako je povećanjem promjera i savijanjem cijevi veći gubitak statičkog nego dinamičkog tlaka. Nadalje, u cijevima savijenim za 45° u većim promjerima pojavljuju se mnogo veći iznosi koeficijenata otpora u odnosu na cijev od 90° kod koje je protok zraka manji te je odnos statičkog i dinamičkog tlaka zbog ograničenosti snage ventilatora puno manji. U promjerima od 80 do 120 mm najmanji sveukupni koeficijent

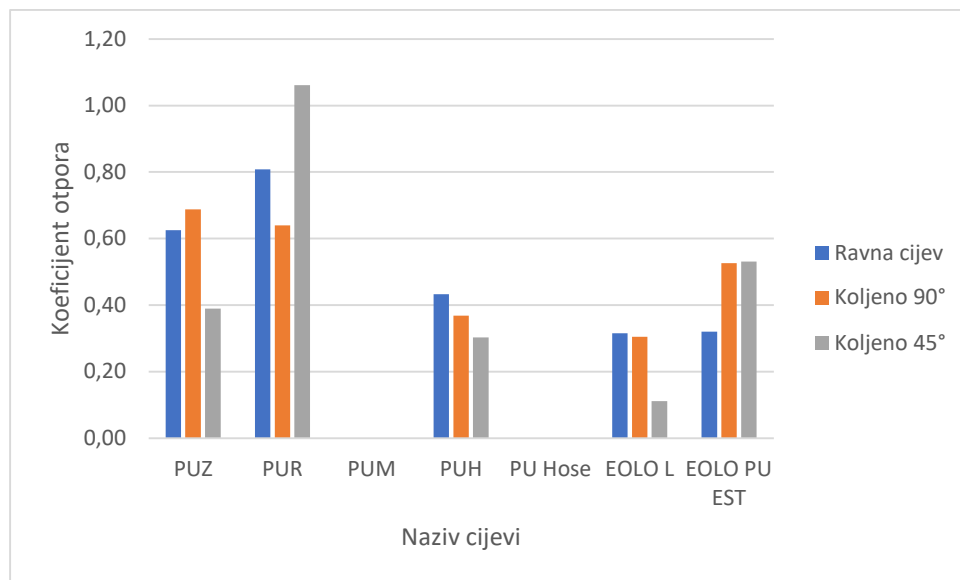
otpora je u cijevi „EOLO PU EST“, zatim u cijevi „EOLO L“ (vidljivo u tablici 4). U promjeru od 80 do 120 mm najveći koeficijent otpora ima cijev „PUZ“, ali povećavanjem promjera na 140 mm koeficijenti otpora su približno jednaki u svim cijevima. „EOLO“ cijevi u promjeru od 140 mm nemaju prednost nižeg koeficijenta otpora u odnosu na druge cijevi, kao što prikazuju rezultati u manjim promjerima, štoviše koeficijent otpora „EOLO“ cijevi veći je od prosjeka, čak i veći od koeficijenta otpora cijevi „PUZ“ koja ima najveće koeficijente otpora u manjim promjerima. Promjer od 140 mm uzet je kao gornja granica promjera cijevi zbog nedovoljne snage ventilatora i pogonskog elektromotora, što je uzrok približno jednakih iznosa koeficijenata otpora u svim vrstama cijevi u promjeru od 140 mm.

Tablica 4. Odnos koeficijenta otpora između vrsta cijevi i načina savijanja cijevi

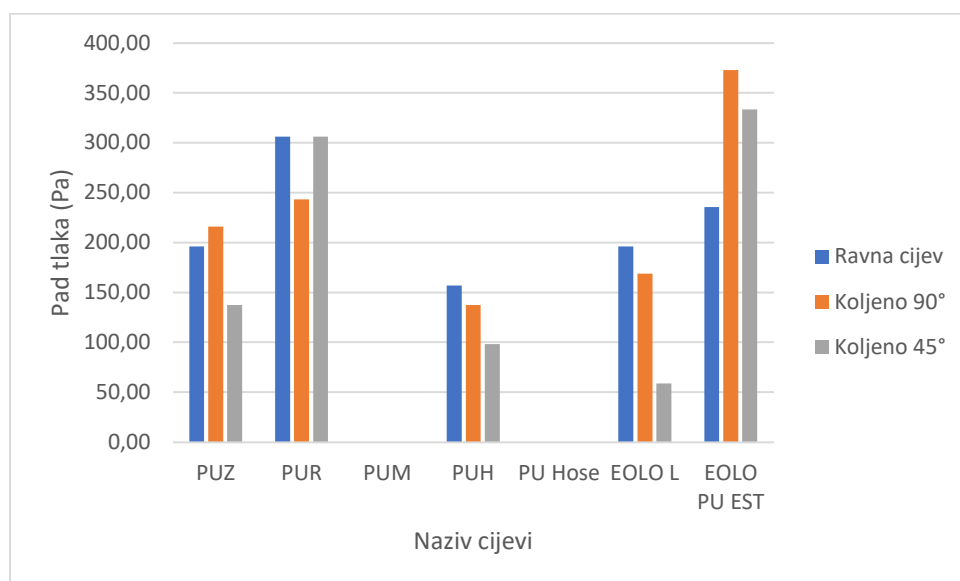
Ravna cijev							
	PUZ	PUR	PUM	PUH	PU Hose	EOLO L	EOLO PU EST
80 mm	0,63	0,81		0,43		0,31	0,32
100 mm	0,60	0,49	0,59	0,51	0,71	0,29	0,12
120 mm	0,37	0,70	0,47	0,28		0,25	0,04
140 mm	0,38	0,40	0,37	0,30	0,43	0,16	0,40
Savijena cijev 90° M1 M2							
80 mm	0,61	0,45		0,51		0,25	0,26
100 mm	0,61	0,45	0,27	0,43	0,44	0,41	0,32
120 mm	0,33	0,82	0,04	0,27		0,26	0,37
140 mm	0,24	0,53	0,00	0,44	0,69	0,53	0,18
Savijena cijev 90° M3 M4							
80 mm	1,03	0,79		0,63		0,38	0,12
100 mm	0,61	0,80	0,51	0,50	0,89	0,23	0,08
120 mm	0,18	0,96	0,11	0,14		0,34	0,25
140 mm	0,13	0,97	0,57	0,00	0,04	0,11	0,53
Savijena cijev 45° M1 M2							
80 mm	0,73	0,37		0,36		0,12	0,26
100 mm	0,52	0,54	0,22	0,43	0,69	0,30	0,43
120 mm	0,67	0,53		0,67		0,08	0,48
140 mm	0,73	0,67	0,45	0,36	1,00	0,17	0,00
Savijena cijev 45° M3 M4							
80 mm	0,73	0,77		0,97		0,70	0,17
100 mm	0,91	0,66	0,45	0,63	0,62	0,25	0,63
120 mm	1,04	0,58	0,00	0,51		0,20	0,15
140 mm	0,84	0,53	0,30	0,13	0,61	0,36	0,44

6.3. Usporedba pada tlaka i koeficijenta otpora u koljenima i ravnoj cijevi

Uspoređujući iznose pada tlaka i koeficijenta otpora u ravnoj cijevi s koljenima u cijevima savijenim za 45° i 90°, moguće je ukazati na promjene, odnosno na stanje u savijenoj cijevi. Sljedeći grafovi prikazuju usporedbu između svih vrsta cijevi u istom promjeru. Kod savijenih cijevi rezultati se odnose na mjerna mjesta M2 i M3, odnosno na mjerna mjesta ispred i iza koljena. To je dio cjevovoda koji nazivamo koljeno. Koljena su u sustavu za odsis mjesta s velikim padom tlaka odnosno većim otporima nego li je to na ravnom dijelu cjevovoda. Pogotovo je to izraženo kod fleksibilnih cijevi koje se koriste za priključivanje metalnog dijela cjevovoda i ušća strojeva.



Slika 68. Koeficijenti otpora (80 mm)

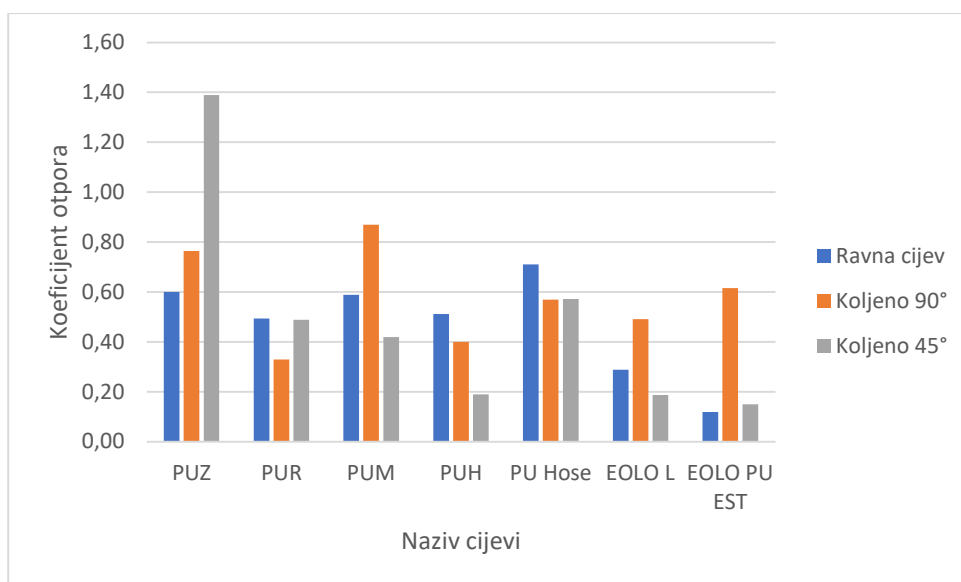


Slika 69. Pad tlaka (80 mm)

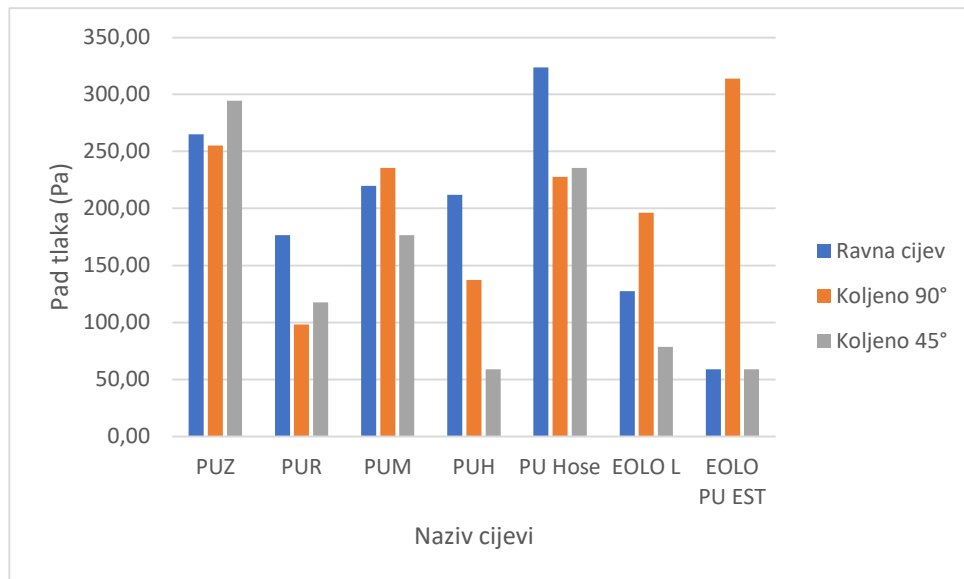
Tablica 5. Usporedba koeficijenta otpora i pada tlaka (80 mm)

Koeficijent otpora	PUZ	PUR	PUM	PUH	PU Hose	EOLO L	EOLO PU EST
Ravna cijev	0,63	0,81		0,43		0,31	0,32
Koljeno 90°	0,69	0,64		0,37		0,30	0,53
Koljeno 45°	0,39	1,06		0,30		0,11	0,53
Pad tlaka (Pa)	PUZ	PUR	PUM	PUH	PU Hose	EOLO L	EOLO PU EST
Ravna cijev	196,20	306,07		156,96		196,20	235,44
Koljeno 90°	215,82	243,29		137,34		168,73	372,78
Koljeno 45°	137,34	306,07		98,10		58,86	333,54

Koeficijenti otpora sa slike 68 najveći su kod cijevi „PUR“ u koljenu na cijevi savijenoj za 45°. Može se primijetiti kako je kod fleksibilnijih cijevi („PUZ“, „PUR“, „PUH“) koeficijent otpora mnogo većeg iznosa u odnosu na manje fleksibilne cijevi („EOLO L“ i „EOLO PU EST“) te je u većini slučajeva koeficijent otpora u ravnoj cijevi veći nego kod savijene cijevi, što se može objasniti visokim iznosom pada tlaka (sl. 69) i niskim iznosom dinamičkog tlaka (promatrajući odnos ravne i savijene cijevi). Iznimka su cijevi „EOLO“ gdje su iznosi dinamičkog tlaka visoki te su posljedica manji sveukupni koeficijenti otpora unatoč visokom iznosu pada tlaka.



Slika 70. Koeficijenti otpora (100 mm)

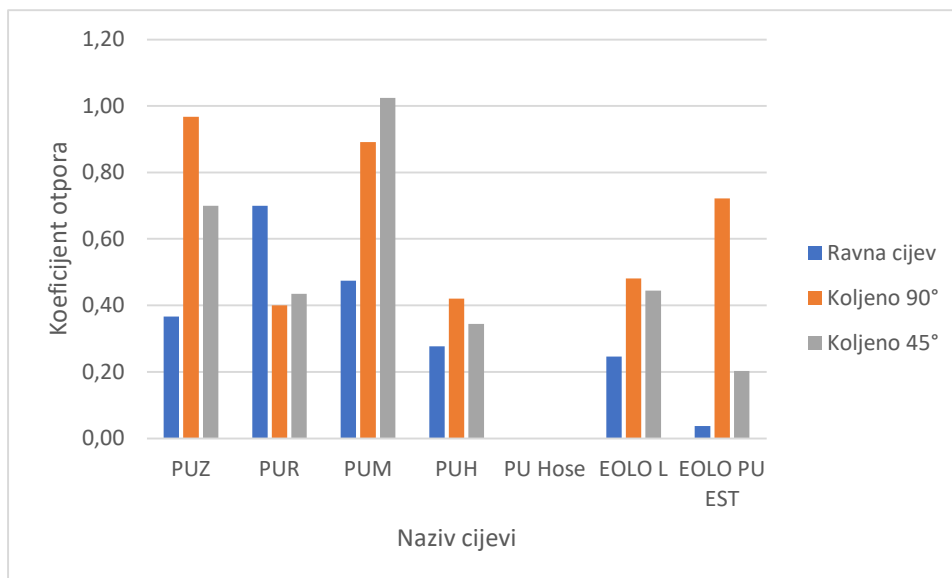


Slika 71. Pad tlaka (100 mm)

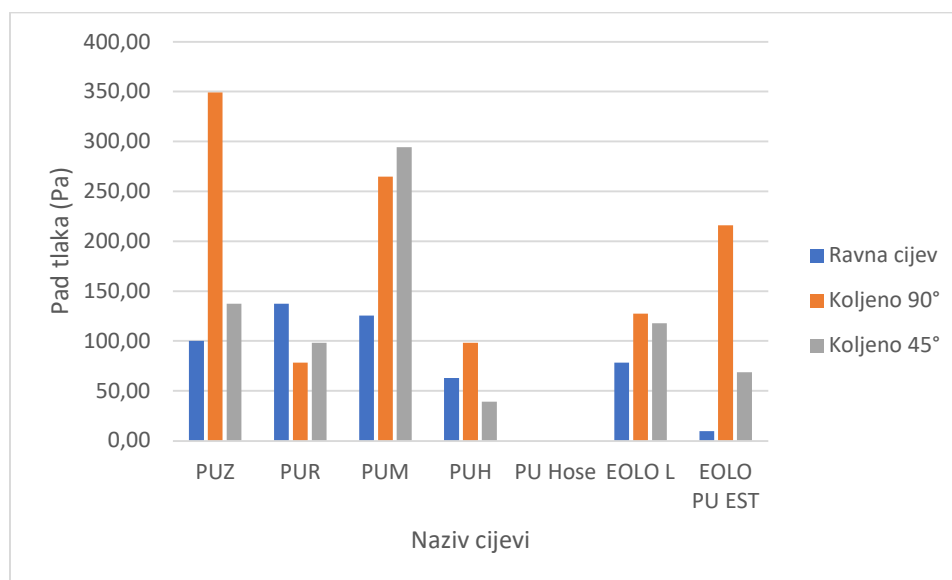
Tablica 6. Usporedba koeficijenta otpora i pada tlaka (100 mm)

Koeficijent otpora	PUZ	PUR	PUM	PUH	PU Hose	EOLO L	EOLO PU EST
Ravna cijev	0,60	0,49	0,59	0,51	0,71	0,29	0,12
Koljeno 90°	0,76	0,33	0,87	0,40	0,57	0,49	0,62
Koljeno 45°	1,39	0,49	0,42	0,19	0,57	0,19	0,15
Pad tlaka (Pa)	PUZ	PUR	PUM	PUH	PU Hose	EOLO L	EOLO PU EST
Ravna cijev	264,87	176,58	219,74	211,90	323,73	127,53	58,86
Koljeno 90°	255,06	98,10	235,44	137,34	227,59	196,20	313,92
Koljeno 45°	294,30	117,72	176,58	58,86	235,44	78,48	58,86

Kod promjera cijevi od 100 mm odnosi koeficijenta otpora (sl. 70) između vrsta cijevi ne razlikuju se značajno u odnosu na cijevi promjera 80 mm, no vidljivo je povećanje koeficijenta otpora u koljenu cijevi savijene za 90°, što su očekivani rezultati. Promatrajući grafove pada tlaka (sl. 71) može se vidjeti kako su iznosi pada tlaka visoki u odnosu na savijene cijevi, no koeficijenti otpora su manji zbog mnogo višeg iznosa dinamičkog tlaka ravne cijevi (tablica 6).



Slika 72. Koeficijenti otpora (120 mm)

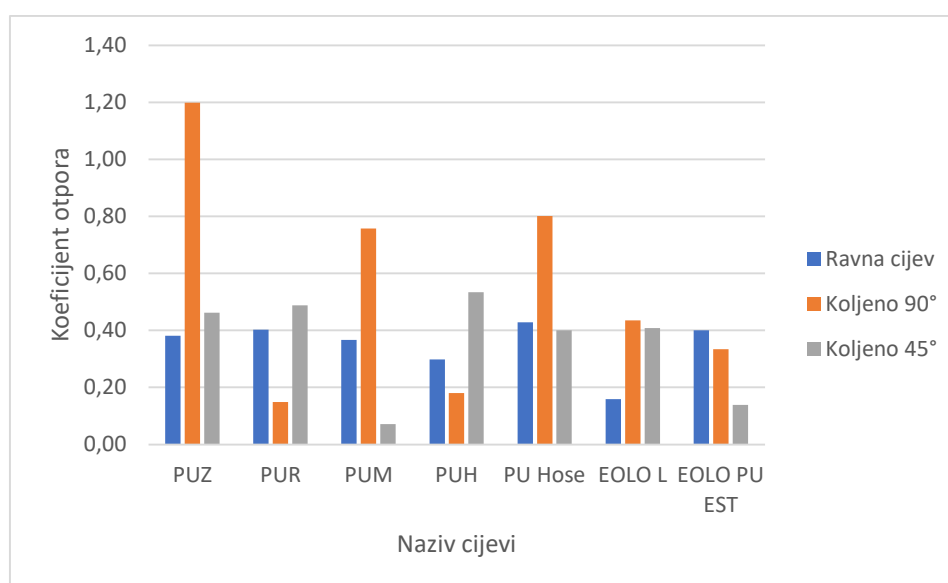


Slika 73. Pad tlaka (120 mm)

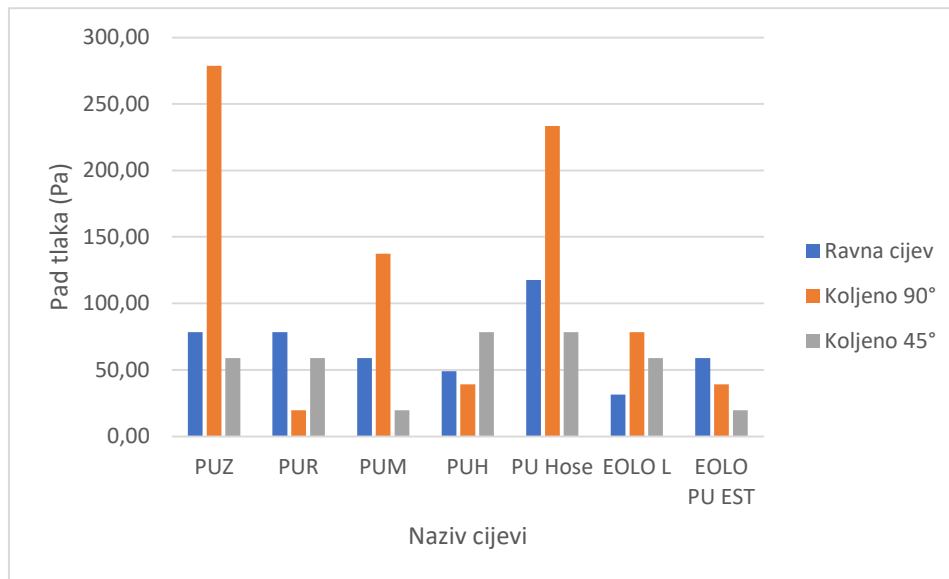
Tablica 7. Usporedba koeficijenta otpora i pada tlaka (120 mm)

Koeficijent otpora	PUZ	PUR	PUM	PUH	PU Hose	EOLO L	EOLO PU EST
Ravna cijev	0,37	0,70	0,47	0,28		0,25	0,04
Koljeno 90°	0,97	0,40	0,89	0,42		0,48	0,72
Koljeno 45°	0,70	0,43	1,02	0,34		0,44	0,20
Pad tlaka (Pa)	PUZ	PUR	PUM	PUH	PU Hose	EOLO L	EOLO PU EST
Ravna cijev	100,06	137,34	125,57	62,78		78,48	9,81
Koljeno 90°	349,24	78,48	264,87	98,10		127,53	215,82
Koljeno 45°	137,34	98,10	294,30	39,24		117,72	68,67

Grafovi koeficijenta otpora i pada tlaka kod promjera cijevi od 120 mm na slikama 72 i 73 prikazuju gotovo jednake odnose veličina kao i kod promjera cijevi od 100 mm. Primjetne su blago povećane razlike odnosa rezultata između ravne cijevi i koljena, gdje su koeficijenti otpora i padovi tlaka manji kod ravne cijevi (tablica 7).



Slika 74. Koeficijenti otpora (140 mm)



Slika 75. Pad tlaka (140 mm)

Tablica 8. Usporedba koeficijenta otpora i pada tlaka (140 mm)

Koeficijent otpora	PUZ	PUR	PUM	PUH	PU Hose	EOLO L	EOLO PU EST
Ravna cijev	0,38	0,40	0,37	0,30	0,43	0,16	0,40
Koljeno 90°	1,20	0,15	0,76	0,18	0,80	0,43	0,33
Koljeno 45°	0,46	0,49	0,07	0,53	0,40	0,41	0,14
Pad tlaka (Pa)	PUZ	PUR	PUM	PUH	PU Hose	EOLO L	EOLO PU EST
Ravna cijev	78,48	78,48	58,86	49,05	117,72	31,39	58,86
Koljeno 90°	278,60	19,62	137,34	39,24	233,48	78,48	39,24
Koljeno 45°	58,86	58,86	19,62	78,48	78,48	58,86	19,62

Slike 74 i 75 prikazuju grafove koeficijenata otpora i padove tlaka kod cijevi promjera 140 mm. U najvećem promjeru moguće je vidjeti kako su najveći iznosi koeficijenta otpora i pada tlaka u koljenu cijevi savijene za 90° (tablica 8). Primjećuje se proporcionalnost grafova koeficijenata otpora i pada tlaka. Grafovi su na izgled slični, a razlog jest niži iznos dinamičkog tlaka koji je uzrokovan graničnom snagom ventilatora i pogonskog elektromotora.

7. Zaključak

Iz rezultata se može vidjeti da je u većini slučajeva najbolji izbor fleksibilne cijevi „EOLO PU EST“, u kojoj se postižu najveće brzine strujanja zraka te ravnomjerna distribucija brzine po presjeku cijevi. Osim brzine postignuti su najbolji rezultati kod dinamičkog tlaka što je i logično, gubitka tlaka te veličine koeficijenta otpora. Promatrajući rezultate može se reći kako je cijev „PUZ“ upravo suprotna cijevi „EOLO PU EST“, iako se povećanjem promjera cijevi rezultati ne razlikuju kao kod manjih promjera. Osim rezultata u obzir treba uzeti i namjenu cijevi. Naime, cijev „EOLO PU EST“ nije fleksibilna kao cijev „PUZ“ te je cijev „PUZ“ vjerojatno bolji izbor gdje je potrebna velika fleksibilnost cijevi, npr. kod CNC strojeva. Treba imati na umu kako se povećanjem kuta koljena, odnosno savijenosti cijevi povećava koeficijent otpora u odnosu na ravnu cijev, što se može očitati iz rezultata te je preporučljivo izbjegavati nepotrebno savijanje fleksibilne cijevi u industrijskom pogonu. Metalna cijev puno manjeg otpora i pada tlaka ne može zamijeniti fleksibilnu koja omogućuje pomicanje stroja ili radnog dijela na stroju da ga se prilikom toga ne isključuje iz ekshaucijske mreže. Na mjestima gdje nije potrebna velika fleksibilnost cijevi važno je u sustav uklopiti kvalitetniju cijev s manjim gubicima tlaka, što će na kraju rezultirati učinkovitijim i ekonomičnijim sustavom za odsis. U konačnici, potrebno je pravilno uskladiti kvalitetu i namjenu fleksibilne cijevi.

Literatura

1. Beljo Lučić, R., Čavlović, A. O., „Zbirka riješenih zadataka iz predmeta „Transportna tehnika u drvnoj industriji““. Šumarski fakultet, Zagreb.
2. Jug, M; Beljo Lučić, R; Čavlović, A. O., 2015.: Uloga posmične brzine i visine lista kružne pile iznad obratka u distribuciji veličina usitnjenog materijala, str. 119-126 (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni).
3. Jug, M; Beljo Lučić, R; Čavlović, A. O., 2016.: Čimbenici koji utječu na rastresitost usitnjenog materijala nastalog blanjanjem drva. Drvna industrija: znanstveno-stručni časopis za pitanja drvne tehnologije, 67, 3; 229-239 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni).
4. Madjarević, B., 1969: Rukovanje materijalom. Tehnička knjiga, Zagreb.
5. Oluić, Č., 1991: Transport u industriji, Rukovanje materijalom 1. dio. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
6. Radmanović, K., 2015: Utjecaj mehaničkih svojstava drva na snagu potrebnu za odvajanje čestice pri ortogonalnom rezanju, doktorski rad, Šumarski fakultet, Zagreb.
7. Svjatkov, S.N., 1966: Pneumatski transport usitnjenog drveta. Zavod za tehnologiju drveta, Sarajevo.
8. Kimel-Filtri <https://kimel-filtri.hr/proizvodi-i-rjesenja/prateca-oprema-2/>
(Pristupljeno 07.09.2022.)
9. Periodni https://www.periodni.com/gallery/laminar_and_turbulent_flow.png
(Pristupljeno 07.09.2022.)