

# Analiza pada tlaka pri strujanju fluida kroz porozni sloj

---

**Vatović, Maris**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split, Faculty of Chemistry and Technology / Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:167:609111>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-28**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of chemistry and technology - University of Split](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET**

**ANALIZA PADA TLAKA PRI STRUJANJU FLUIDA KROZ  
POROZNI SLOJ**

**ZAVRŠNI RAD**

**MARIS VATOVIĆ**

**Matični broj: 1296**

**Split, rujan 2022.**



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET**  
**PREDDIPLOMSKI STUDIJ KEMIJSKA TEHNOLOGIJA**  
**KEMIJSKO INŽENJERSTVO**

**ANALIZA PADA TLAKA PRI STRUJANJU FLUIDA KROZ  
POROZNI SLOJ**

**ZAVRŠNI RAD**

**MARIS VATOVIĆ**

**Matični broj: 1296**

**Split, rujan 2022.**

**UNIVERSITY OF SPLIT**  
**FACULTY OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY**  
**UNDERGRADUATE STUDY OF CHEMICAL TECHNOLOGY**  
**CHEMICAL ENGINEERING**

**EFFECT OF FLUID FLOW ON PRESSURE DROP IN POROUS  
LAYERS**

**BACHELOR THESIS**

**MARIS VATOVIĆ**

**Parent number: 1296**

**Split, September 2022.**

## TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

ZAVRŠNI RAD

Sveučilište u Splitu  
Kemijско-tehnološki fakultet u Splitu  
Preddiplomski studij Kemijсka tehnologija  
Smjer Kemijско inženjerstvo

**Znanstveno područje:** Tehničke znanosti

**Znanstveno polje:** Kemijско inženjerstvo

**Tema rada** je prihvaćena na 25. sjednici Fakultetskog vijeća Kemijско-tehnološkog fakulteta u Splitu održanoj dana 25. ožujka 2022. godine.

**Mentor:** prof. dr. sc. Nenad Kuzmanić

### ANALIZA PADA TLAKA PRI STRUJANJU FLUIDA KROZ POROZNI SLOJ

Maris Vatović, (1296)

**Sažetak:** Prilikom strujanja fluida kroz porozni sloj dolazi do gubitaka energije fluida uslijed površinskog trenja i oblika čestica koje formiraju taj sloj. Ukupan gubitak energije fluida manifestira se padom tlaka kojeg je moguće eksperimentalno i računski odrediti. U ovom radu izvršena je karakterizacija triju poroznih slojeva čije se veličine čestica značajno razlikuju. Također je sagledan utjecaj visine poroznog sloja i površinske brzina strujanja fluida na pad tlaka u sustavu. Dobivene eksperimentalne vrijednosti pada tlaka potom su uspoređivane s onima određenim teorijskim izrazima. Oriјentaciona karakterizacija poroznog sloja može se izvršiti indirektnim načinom koristeći relativno jednostavno mjerljive karakteristike ispitivanog sloja. Eksperimentalnim ispitivanjima potvrđeno je da se povećanjem visine poroznog sloja kao i povećanjem površinske brzine strujanja fluida pad tlaka u sustavu znatno povećava, tj. da dolazi do većih gubitaka energije fluida. Usporedbom teorijski i eksperimentalno određenih vrijednosti pada tlaka najmanja odstupanja se uočavaju kod primjene Ergunove jednadžbe. To je posebno naglašeno kod poroznog sloja sastavljenog od najmanjih ispitivanih čestica ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0025$  m). Međutim, za konkretniji zaključak sugeriraju se dodatna ispitivanja koja bi uključivala slojeve u većem rasponu veličina čestica.

**Ključne riječi:** porozni sloj, pad tlaka, poroznost, visina sloja, površinska brzina fluida, Ergunova jednadžba

**Rad sadrži:** 54 stranice, 28 slika, 10 tablica i 20 literaturnih referenci

**Jezik izvornika:** hrvatski

**Sastav Povjerenstva za obranu:**

1. prof. dr. sc. Senka Gudić - predsjednik
2. doc. dr. sc. Antonija Čelan - član
3. prof. dr. sc. Nenad Kuzmanić - mentor

**Datum obrane:** 19. rujna 2022. godine

**Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u knjižnici Kemijско-tehnološkog fakulteta u Splitu, Ruđera Boškovića 35.**

## BASIC DOCUMENTATION CARD

## BACHELOR THESIS

**University of Split**  
**Faculty of Chemistry and Technology Split**  
**Undergraduate study of Chemical Technology**  
**Orientation Chemical Engineering**

**Scientific area:** Technical Sciences

**Scientific field:** Chemical Engineering

**Thesis subject** was approved by Faculty Council of Faculty of Chemistry and Technology Split, session no. 25. held on March 25<sup>th</sup> 2022.

**Mentor:** Nenad Kuzmanić, PhD, Full prof.

### EFFECT OF FLUID FLOW ON PRESSURE DROP IN POROUS LAYERS

Maris Vatović, (1296)

**Abstract:** When fluid flows through porous layer there are energy losses due to surface friction and resistance due to the shape of the particles which form that layer. The total loss of fluid energy is manifested by a pressure drop in the system, which can be determined experimentally and theoretically. In this work characterization of three porous layers whose particle sizes differ significantly was performed. The influence of the height of the porous layer and fluid superficial velocity on pressure drop in the system has been investigated as well. The experimentally determined pressure drops were then compared with those obtained using theoretical expressions. The orientational characterization of the porous layer can be performed using the relatively easily measurable characteristics of the questioned porous layer. Experimental examinations have confirmed that increasing the height of the porous layer as well as increasing the fluid superficial velocity, the pressure drop in the system increases significantly. Comparing theoretically and experimentally determined values of pressure drop, the smallest deviations are observed when Ergun's equation has been applied. This is especially emphasized in the case of the porous layer composed of the smallest examined particles ( $d_{c,ekv} = 0.0025$  m). However, for more concrete conclusion, additional examinations of porous layers in a larger range of particle sizes are suggested.

**Keywords:** porous layer, pressure drop, porosity, height of the porous layer, fluid superficial velocity, Ergun equation

**Thesis contains:** 54 pages, 28 figures, 10 tables and 20 references

**Original in:** Croatian

**Defence committee:**

1. Senka Gudić, PhD, Full prof. - chair person
2. Antonija Čelan, Assistant prof. - member
3. Nenad Kuzmanić, PhD, Full prof. - supervisor

**Defence date:** September 19<sup>th</sup>, 2022

**Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposited in** Library of Faculty of Chemistry and Technology Split, Ruđera Boškovića 35.





*Završni rad je izrađen u Zavodu za kemijsko inženjerstvo Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu pod mentorstvom prof. dr. sc. Nenada Kuzmanića u razdoblju od ožujka do rujna 2022. godine.*

*Od srca zahvaljujem svome mentoru prof. dr. sc. Nenadu Kuzmaniću na nesebičnoj pomoći, brojnim savjetima, prenesenom znanju, te velikoj količini vremena i truda koje mi je posvetio prilikom izrade završnog rada.*

*Također veliko hvala tehničaru Juri Škrapiću što je bio na raspolaganju i uvelike pomogao prilikom eksperimentalnih ispitivanja.*

*Međutim najveće hvala dugujem mojoj obitelji i mome Mati na pružanju bezuvjetne podrške, motivacije i ljubavi. Posebno hvala mami bez koje ovo do sada ostvareno ne bi bilo moguće, vjerovala je u mene i moj uspjeh kada ni sama nisam. Hvala!*

## ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

1. Izvršiti karakterizaciju triju poroznih slojeva različitih ekvivalentnih veličina čestica ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0025; 0,0035$  i  $0,0045$  m).
2. Za sva tri ispitivana porozna sloja analizirati ovisnost pada tlaka o visini poroznog sloja pri različitim površinskim brzinama strujanja fluida.
3. Ispitati ovisnost pada tlaka o površinskoj brzini strujanja fluida pri različitim visinama ispitivanih poroznih slojeva.
4. Utvrditi odnos pada tlaka o poroznosti sloja pri različitim površinskim brzinama strujanja fluida i konstantnoj visini slojeva.
5. Za ispitivane porozne slojeve analizirati ovisnost modificiranog koeficijenta trenja o modificiranoj Reynoldsovoj značajci.
6. Izvršiti usporedbu eksperimentalnih vrijednosti pada tlaka kroz porozni sloj s vrijednostima dobivenih uz pomoć Ergunove, Carman-Kozenyjeve i Burke-Pulmmerove jednađbe.

# SAŽETAK

## Analiza pada tlaka pri strujanju fluida kroz porozni sloj

Prilikom strujanja fluida kroz porozni sloj dolazi do gubitaka energije fluida uslijed površinskog trenja i oblika čestica koje formiraju taj sloj. Ukupan gubitak energije fluida manifestira se padom tlaka kojeg je moguće eksperimentalno i računski odrediti.

U ovom radu izvršena je karakterizacija triju poroznih slojeva čije se veličine čestica značajno razlikuju. Također je sagledan utjecaj visine poroznog sloja i površinske brzina strujanja fluida na pad tlaka u sustavu. Dobivene eksperimentalne vrijednosti pada tlaka potom su uspoređivane s onima određenim teorijskim izrazima.

Orijentaciona karakterizacija poroznog sloja može se izvršiti indirektnim načinom koristeći relativno jednostavno mjerljive karakteristike ispitivanog sloja. Eksperimentalnim ispitivanjima potvrđeno je da se povećanjem visine poroznog sloja, kao i povećanjem površinske brzine strujanja fluida pad tlaka u sustavu znatno povećava, tj. da dolazi do većih gubitaka energije fluida.

Usporedbom teorijski i eksperimentalno određenih vrijednosti pada tlaka najmanja odstupanja se uočavaju kod primjene Ergunove jednadžbe. To je posebno naglašeno kod poroznog sloja sastavljenog od najmanjih ispitivanih čestica ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0025$  m). Međutim, za konkretniji zaključak sugeriraju se dodatna ispitivanja koja bi uključivala slojeve u većem rasponu veličina čestica.

### Ključne riječi:

porozni sloj, pad tlaka, poroznost, visina sloja, površinska brzina fluida, Ergunova jednadžba

## SUMMARY

### Effect of fluid flow on pressure drop in porous layers

When fluid flows through porous layer there are energy losses due to surface friction and resistance due to the shape of the particles which form that layer. The total loss of fluid energy is manifested by a pressure drop in the system, which can be determined experimentally and theoretically.

In this work characterization of three porous layers whose particle sizes differ significantly was performed. The influence of the height of the porous layer and fluid superficial velocity on pressure drop in the system has been investigated as well. The experimentally determined pressure drop were then compared with those obtained using theoretical expressions.

The orientational characterization of the porous layer can be performed using the relatively easily measurable characteristics of the questioned porous layer. Experimental examinations have confirmed that increasing the height of the porous layer as well as increasing the fluid superficial velocity, the pressure drop in the system increases significantly.

Comparing theoretically and experimentally determined values of pressure drop, the smallest deviations are observed when Ergun's equation has been applied. This is especially emphasized in the case of the porous layer composed of the smallest examined particles ( $d_{\check{c},ekv} = 0.0025$  m). However, for more concrete conclusion, additional examinations of porous layers in a larger range of particle sizes are suggested.

#### Keywords:

porous layer, pressure drop, porosity, height of the porous layer, fluid superficial velocity, Ergun equation

# SADRŽAJ

|   |    |
|---|----|
| UVOD .....  | 1  |
| 1. OPĆI DIO .....   | 2  |
| 1.1. Strujanje fluida kroz porozni sloj .....   | 3  |
| 1.2. Geometrijske karakteristike poroznog sloja .....   | 4  |
| 1.2.1. Strujanje fluida kroz uske pore poroznog sloja .....   | 7  |
| 1.2.2. Strujanje fluida kroz široke pore poroznog sloja .....   | 8  |
| 1.3. Primjeri strujanja fluida kroz porozne slojeve u kemijskom procesnom inženjerstvu .....                              | 10 |
| 2. EKSPERIMENTALNI DIO .....  | 14 |
| 2.1. Opis aparature .....   | 15 |
| 2.2. Baždarenje rotametra .....   | 17 |
| 2.3. Provedba eksperimenta .....  | 19 |
| 2.4. Karakterizacija poroznog sloja .....   | 20 |
| 3. REZULTATI .....  | 23 |
| 3.1. Karakterizacija poroznih slojeva .....   | 24 |
| 3.2. Ovisnost pada tlaka o visini poroznog sloja .....  | 28 |
| 3.3. Ovisnost pada tlaka o površinskoj brzini fluida .....  | 31 |
| 3.4. Odnos pada tlaka o poroznosti sloja pri različitim površinskim brzinama strujanja fluida .....                       | 34 |
| 3.5. Ovisnost modificiranog koeficijenta trenja o modificiranoj Reynoldsovoj značajci za ispitivane porozne slojeve ..... | 35 |
| 3.6. Usporedba eksperimentalno i teorijski određenih vrijednosti pada tlaka kroz porozni sloj .....                       | 36 |
| 4. RASPRAVA .....   | 42 |
| 5. ZAKLJUČCI .....  | 49 |
| 6. LITERATURA .....   | 52 |

## UVOD

Strujanje fluida kroz porozne slojeve temelj je brojnim jediničnim operacijama kemijskog inženjerstva. Tipičan primjer takve vrste strujanja je operacija filtracije kod koje fluid protiče kroz nakupljeni sloj čestica, tzv. "filtarski kolač". I kod operacije fluidizacije, kod koje se nastoji ostvariti što prisniji kontakt između čvrstog materijala i fluida, fluid također protječe kroz sloj čvrstih čestica u smjeru odozdo prema gore. Slična situacija se susreće i kod apsorpcije plinova gdje porozni sloj služi za povećanje kontaktne površine između fluida i plina iz kojeg se želi ukloniti određena komponenta.

Porozni slojevi obično su sačinjeni od čvrstih čestica različitih veličina i oblika pri čemu se njihovim slučajnim rasporedom formiraju nepravilne pore različitih dužina i promjera kroz koje fluid struji. U tim slučajevima mogu se opaziti efekti koji su karakteristični za protjecanje, ali i za optjecanje. Da li će strujanje fluida kroz pore sloja biti laminarno ili turbulentno ovisi prvenstveno o pokretačkoj sili koja uzrokuje strujanje, tj. razlici tlakova na krajevima sloja, ali i o otporu kojeg porozni sloj pruža strujanju fluida. Ako je sloj sastavljen od pretežno krupnijih čestica tada su pore relativno široke, te je otpor takvog sloja manji u usporedbi s onim kojeg pruža sloj sastavljen od sitnijih čestica, gdje su pore vrlo uske. Do gubitaka energije fluida dolazi zbog površinskog trenja i zbog otpora uslijed oblika čestica koje formiraju porozni sloj. Ukupan gubitak energije fluida manifestira se padom tlaka u sustavu kojeg je moguće eksperimentalno i računski odrediti.

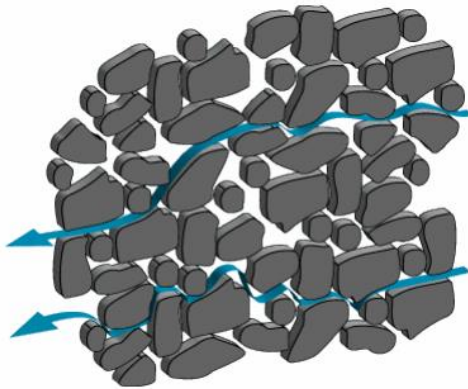
U ovom radu će se analizirati gubici energije fluida tijekom njegovog strujanja kroz porozne slojeve različitih karakteristika, s tim da će biti sagledan utjecaj visine tih slojeva, kao i različitih površinskih brzina strujanja fluida na pad tlaka u sustavu. Visine poroznih slojeva tijekom ispitivanja će biti konstantne. Za sva ispitivanja korištena je aparatura vlastite izvedbe, a dobiveni eksperimentalni rezultati bit će uspoređivani s onima dobivenima teorijskim izrazima iz literature.

## **1. OPĆI DIO**



## 1.1. Strujanje fluida kroz porozni sloj

Strujanje fluida kroz porozni sloj temelj je brojnih jediničnih operacija u kemijskom inženjerstvu kao što su fluidizacija, filtracija, apsorpcija, taloženje itd. Porozni slojevi su sastavljeni od čestica različitih veličina i oblika, te su nastale pore u sloju vrlo nepravilne, različitih dužina i promjera kroz koje struji fluid (Slika 1). Brzina strujanja fluida kroz sloj čestica ovisi o pokretačkoj sili koja uzrokuje strujanje, tj. razlici tlakova na krajevima sloja, ali i o otporima koje pruža sam sloj. Zbog otpora uslijed površinskog trenja i otpora uslijed oblika čestice dolazi do nepovrativih gubitaka energije fluida koji se manifestiraju padom tlaka u sustavu ( $\Delta p$ ). Prilikom strujanja fluida kroz porozni sloj prisutni su efekti protjecanja i optjecanja.<sup>1,2</sup>



*Slika 1.* Strujanje fluida kroz porozni sloj.

Kod analize strujanja fluida kroz porozni sloj nužno je izvršiti karakterizaciju tog sloja. Upravo struktura sloja definira u znatnoj mjeri hidrodinamička zbijanja unutar njega.

## 1.2. Geometrijske karakteristike poroznog sloja

Porozni sloj je kompleksno opisati budući da se sastoji od čestica različitih veličina i oblika, koje formiraju veliki broj pora nepravilnih oblika, različitih dužina i promjera. Za opis geometrije tih kompleksnih poroznih sustava nastoje se koristiti lako mjerljive veličine<sup>3</sup>. Osnovne karakteristike poroznog sloja su:

- **Poroznost sloja,  $\varepsilon$** , koja se definira kao udio šupljina u poroznom sloju:

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_{sl}} \quad (/) \quad (1)$$

gdje je:

$V_p$  – volumen pora ( $m^3$ )

$V_{sl}$  – volumen sloja ( $m^3$ )

- **Broj čestica u poroznom sloju,  $n$** , se dobije iz omjera volumena svih čestica u poroznom sloju i volumena jedne čestice u sloju

$$n = \frac{V_{sl} \cdot (1 - \varepsilon)}{\frac{d_{\check{c},ekv}^3 \cdot \pi}{6}} = \frac{A_{sl} \cdot l \cdot (1 - \varepsilon)}{\frac{d_{\check{c},ekv}^3 \cdot \pi}{6}} \quad (/) \quad (2)$$

pri čemu je:

$d_{\check{c},ekv}$  – ekvivalentni promjer čestice (m)

$A_{sl}$  – površina poprečnog presjeka poroznog sloj ( $m^2$ )

$l$  – visina poroznog sloja (m)

- **Ekvivalentni promjer pora u poroznom sloju,  $d_{p,ekv}$** , uvodi se s obzirom na to da su pore poroznog sloja izrazito nepravilnog oblika. Taj promjer određuje se izrazom:

$$d_{p,ekv} = 4 \cdot \frac{A_p}{O} = 4 \cdot \frac{A_p}{O} \cdot \frac{l}{l} = 4 \cdot \frac{V_p}{S_{uk}} = 4 \cdot \frac{\frac{V_p}{V_{sl}}}{\frac{S_{uk}}{V_{sl}}} = 4 \cdot \frac{\varepsilon}{S_v} \quad (m) \quad (3)$$

gdje je:

$A_p$  – površina poprečnog presjeka pora ( $m^2$ )

$O$  – nakvašeni opseg pore (m)

$S_{uk}$  – ukupna slobodna površina čvrstih čestica od kojih je pora formirana ( $m^2$ )

$S_v$  – specifična površina pora u poroznom sloju ( $m^{-1}$ )

- **Specifična površina pora u poroznom sloju,  $S_v$ ,** predstavlja cjelokupnu slobodnu površinu čvrstih čestica unutar poroznog sloja izraženu po jedinici volumena sloja. Ekvivalentna je vanjskoj površini svih čestica koje tvore danu poroznu strukturu, a određuje se na sljedeći način:

$$S_v = \frac{S_{uk}}{V_{sl}} = \frac{n \cdot S_{jedne\ čestice}}{V_{sl}}$$

$$S_v = \frac{\frac{A_{sl} \cdot l \cdot (1 - \varepsilon)}{\frac{d_{č,ekv}^3 \cdot \pi}{6}} \cdot d_{č,ekv}^2 \cdot \pi}{A_{sl} \cdot l} = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d_{č,ekv}} \quad (m^{-1}) \quad (4)$$

- **Površinska brzina strujanja fluida,  $v_a$ ,** je brzina kojom fluid nastrojava na površinu poroznog sloja. Međutim, u skladu sa zakonom kontinuiteta brzina strujanja fluida kroz porozni sloj, zbog manje površine poprečnog presjeka pora, je puno veća u odnosu na površinsku brzinu strujanja fluida. Površinska brzina strujanja fluida,  $v_a$ , određuje se iz volumnog protoka ( $\dot{V}$ ) na sljedeći način:

$$v_a = \frac{4 \cdot \dot{V}}{d_{kol}^2 \cdot \pi} \quad (m\ s^{-1}) \quad (5)$$

gdje  $d_{kol}$  predstavlja promjer kolone u kojoj se nalazi porozni sloj. Dok se brzina strujanja fluida kroz porozni sloj,  $v_p$ , određuje uz pomoć površinske brzine fluida i poroznosti sloja:

$$v_p = \frac{v_a}{\varepsilon} \quad (m \ s^{-1}) \quad (6)$$

- **Modificirana Reynoldsova značajka,  $Re_p$ ,** služi za određivanje vrste strujanja kroz porozni sloj. Ta značajka uzima u obzir kompleksne karakteristike poroznog sloja i ima sljedeći oblik:

$$Re_p = \frac{v_p \cdot d_{ekv} \cdot \rho}{\mu} = \frac{v_a}{\varepsilon} \cdot \frac{4}{6} \cdot \frac{\varepsilon \cdot d_{\check{c},ekv}}{1 - \varepsilon} \cdot \rho = \frac{v_a \cdot d_{\check{c},ekv} \cdot \rho}{\mu \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (/) \quad (7)$$

pri čemu je:

$\rho$  - gustoća fluida ( $kg \ m^{-3}$ )

$\mu$  - viskoznost fluida (Pa s)

S obzirom na to da se kod bezdimenzijskih značajki uzimaju u obzir samo fizikalne veličine koje definiraju strujanje kroz porozni sloj, koeficijent  $\frac{4}{6}$  se može zanemariti.

Ako se Darcy-Weisbachova jednadžba primjeni na strujanje fluida kroz porozni sloj:

$$\frac{\Delta p}{\rho \cdot g} = \lambda \cdot \frac{l}{d_{ekv}} \cdot \frac{v_p^2}{2 \cdot g} \quad (8)$$

dobije se:

$$\frac{\Delta p}{\rho \cdot g} = \lambda \cdot \frac{6 \cdot l \cdot (1 - \varepsilon)}{4 \cdot d_{\check{c},ekv} \cdot \varepsilon^3} \cdot \frac{v_a^2}{2 \cdot g} \quad (9)$$

Rješavanjem jednadžbe po  $\frac{\lambda}{4} = f$ , gdje je  $f$  tzv. Fanningov koeficijent trenja dobiva se:

$$\frac{\lambda}{4} = f = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} \cdot \frac{d_{\check{c},ekv}}{6 \cdot l} \cdot \frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon} \cdot \frac{2 \cdot g}{v_a^2} \quad (10)$$

Uzimajući u obzir samo fizičke veličine iz navedene jednadžbe, Sabri Ergun je definirao **bezdimenzijski modificirani koeficijent trenja,  $f_p$** :

$$f_p = \frac{\Delta p}{l} \cdot \frac{d_{\check{c},ekv}}{\rho \cdot v_a^2} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)} \quad (/) \quad (11)$$

gdje član  $\frac{\Delta p}{l}$  predstavlja vrijednost pada tlaka po jedinici visine poroznog sloja<sup>4</sup>.

### 1.2.1. Strujanje fluida kroz uske pore poroznog sloja

Ako je porozni sloj sastavljen od manjih čestica, tada su pore vrlo uske, te je u njima, zbog izrazitih otpora strujanju fluida prisutno laminarno strujanje. U tom slučaju modificirana Reynoldsova značajka ima vrijednost manju od 5. Eksperimentalno je utvrđeno da je tada:

$$f_p = \frac{150}{Re_p} \quad (12)$$

Kada se u navedenu relaciju uvrste izrazi za modificirani koeficijent trenja (11) i modificiranu Reynoldsovu značajku (10) dobije se Carman-Kozenyjeva jednadžba koja se koristi pri procjeni pada tlaka po jedinici visine poroznog sloja kod laminarnog strujanja fluida kroz porozni sloj<sup>5,6</sup>.

$$\frac{\Delta p}{l} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{v_a \cdot \mu}{d_{\check{c},ekv}^2} \quad (13)$$

## 1.2.2. Strujanje fluida kroz široke pore poroznog sloja

Ukoliko je porozni sloj sastavljen od krupnijih čestica unutar njega se formiraju široke pore u kojima strujanje fluida može biti i laminarno i turbulentno. Da bi se strujanje fluida kroz pore okarakteriziralo turbulentnim, modificirana Reynoldsova značajka mora biti veća od 2000. Sloj koji sadrži široke pore pruža znatno manji otpor pri strujanju fluida u odnosu na sloj s uskim porama.

Eksperimentalno je utvrđeno da za izrazito turbulentne uvjete strujanja fluida kroz porozni sloj modificirani koeficijent trenja poprima konstantnu vrijednost:

$$f_p = 1,75 \quad (14)$$

Kada se u jednadžbu (14) uvrsti izraz za modificirani koeficijent trenja (izraz 11) dobije se Burke-Plummerova jednadžba koja se primjenjuje za procjenu pada tlaka po jedinici visine poroznog sloja sastavljenog od krupnijih čestica, tj. za turbulentno strujanje fluida unutar poroznog sloja<sup>7,8</sup>.

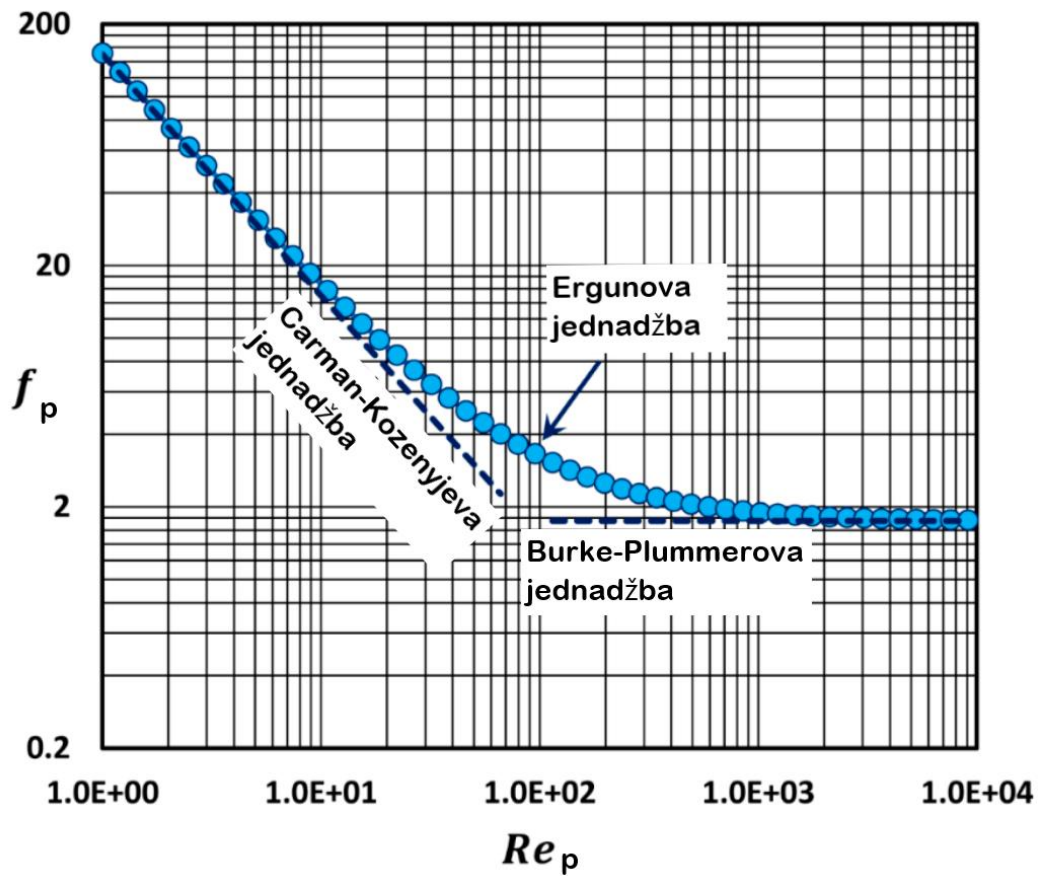
$$\frac{\Delta p}{l} = 1,75 \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{v_a^2 \cdot \rho}{d_{\check{c},ekv}} \quad (15)$$

U praksi, zbog složene strukture poroznog sloja, su obično nazočna istovremeno oba mehanizma strujanja fluida. U tom slučaju se ukupni pad tlaka po jedinici visine poroznog sloja dobiva objedinjavanjem Carman-Kozenyjeve i Burke-Plummerove jednadžbe, čime dolazi do Ergunove jednadžbe<sup>9</sup>.

$$\frac{\Delta p}{l} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{v_a \cdot \mu}{d_{\check{c},ekv}^2} + 1,75 \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{v_a^2 \cdot \rho}{d_{\check{c},ekv}} \quad (16)$$

Ergunova jednadžba vrijedi za određivanje pada tlaka po jedinici visine poroznog sloja pri svim vrijednostima modificirane Reynoldsove značajke. Ako se navedenoj jednadžbi pregrupiraju članovi dobije se bezdimenzijska forma koja je pogodna za grafičku interpretaciju (Slika 2):

$$f_p = \frac{150}{Re_p} + 1,75 \quad (17)$$



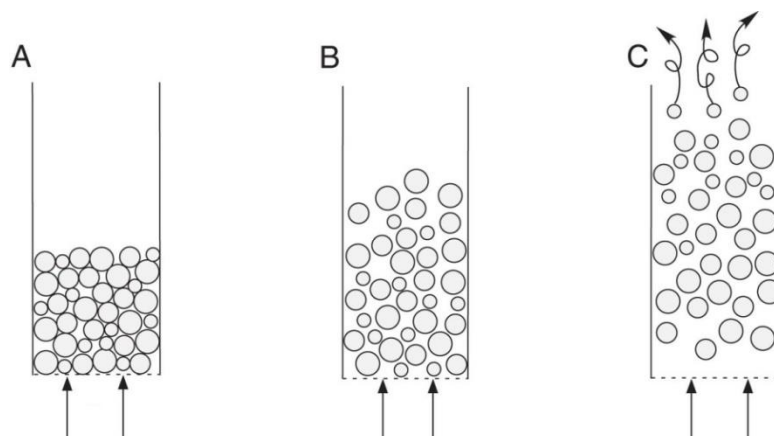
Slika 2. Grafički prikaz Ergunove jednađbe <sup>10</sup>.

Ukoliko je poznat režim strujanja, tj. vrijednost modificirane Reynoldsove značajke, može se očitati vrijednost modificiranog koeficijenta trenja, te iz njega odrediti i pad tlaka pri strujanju kroz porozni sloj <sup>11</sup>.

### 1.3. Primjeri strujanja fluida kroz porozne slojeve u kemijskom procesnom inženjerstvu

- **Fluidizacija**

Fluidizacija je operacija kojom se nastoji ostvariti što prisniji kontakt između čvrstog materijala i fluida. Fluid protječe kroz sloj čvrstih čestica u smjeru odozdo prema gore. Postupno povećavanje brzine protjecanja fluida uzrokuje širenje sloja čvrstih čestica, odnosno porast poroznosti sloja. Takav sloj, čije su čestice gibaju poprima svojstva fluida. Stoga se sloj čestica koje se nalaze u ovakvom stanju naziva fluidizirani sloj, a dovedena kapljevina ili plin fluidizator. Fluidizacija se inače provodi u cilindričnoj koloni. Sloj čvrstih čestica se nalazi na razdjelnoj ploči koja služi kao nosač sloja, ali ima i važnu ulogu u ravnomjernoj distribuciji fluida po porečnom presjeku kolone. Za operaciju fluidizacije su važne minimalna brzina fluidizacije i brzina odnošenja. Kada se postigne minimalna brzina fluidizacije znači da čestice koje se nalaze u sloju pružaju najmanji otpor strujanju fluida. Daljnjim povećanjem brzine strujanja fluida čestice se kreću kaotičnije, te pojedine čestice bivaju izbačene iz sloja, ali se ponovno vrata u sloj. Čestice se tako gibaju dok se ne postigne brzina odnošenja kada dolazi do odnošenja čvrstih čestica strujom fluida iz uređaja za fluidizaciju (Slika 3)<sup>12, 13</sup>.

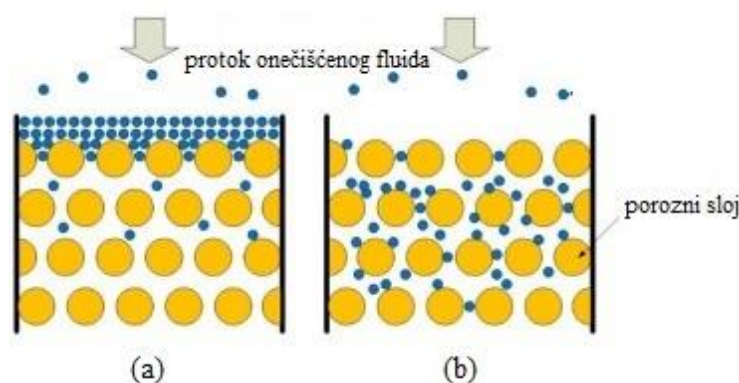


**Slika 3.** Princip operacije fluidizacije – mirujući sloj (A), minimalna brzina fluidizacije (B), brzina odnošenja čvrstih čestica (C)<sup>14</sup>.



- **Filtracija**

Filtracija je operacija separacije čvrstih čestica iz suspenzije pomoću poroznog sredstva koje propušta samo kapljevину. Ovisno o koncentraciji čvrstih čestica u suspenziji razlikuju se dva načina djelovanja filtarskog sredstva, a time i dva postupka: filtracija kroz kolač i filtracija kroz filtarsko sredstvo. Kod koncentriranijih suspenzija, na filtarskom sredstvu, se stvara “kolač“ koji također predstavlja određenu vrstu filtarskog sredstva. Takav tip filtracije se naziva filtracija kroz kolač. Drugi tip filtracije je filtracija kroz filtarsko sredstvo ili dubinska filtracija. Ona se primjenjuje za jako razrijeđene suspenzije gdje se čvrste čestice zaustavljaju unutar filtarskog sredstva. Dubinska filtracija je jedna od najvažnijih operacija za obradu voda pri čemu se kao filtarsko sredstvo obično koristi pijesak različite granulacije. Navedeni tipovi filtracije su prikazani na Slici 4.



**Slika 4.** Tipovi filtracije – filtracija kroz kolač (a) i dubinska filtracija (b) <sup>15</sup>.

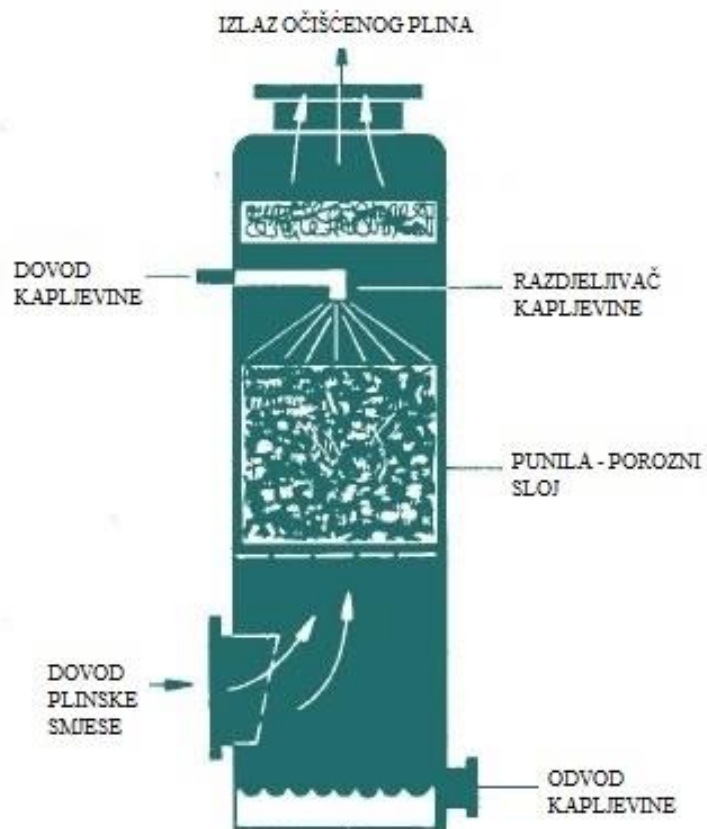
Najvažnija značajka operacije filtracije je brzina filtriranja koja se iskazuje učinkom filtra. Učin filtra predstavlja količinu filtrata koja se u jedinici vremena može odijeliti po jedinici filtarske površine. Talog na filtru se često sabije, te nastali kolač pruža veliki otpor prolasku kapljevine čime se smanjuje brzina filtracije. Da bi se povećala brzina filtracije potrebno je dovoljno ostvarenom razlikom tlakova (pokretačka sila) savladati otpor što ga pruža porozni sloj, tj. “filtarski kolač“. U pravilu je brzina filtracije vrlo mala zbog velikih otpora kolača (poroznog sloja) i nemogućnosti postavljanja velike razlike tlakova ispred

i iza filtarskog sredstva. Da bi se otpor sveo na najmanju mjeru u praksi se upotrebljavaju filtarski uređaji sa stalnim uklanjanjem kolača <sup>16</sup>.

- **Apsorpcija**

Apsorpcija je također primjer operacije u kojoj je nazočno strujanje fluida kroz porozni sloj. Plinska smjesa dolazi u kontakt s kapljevnom, tj. selektivnim otapalom kako bi se iz nje uklonila jedna ili više komponenti. Tijekom ove operacije prisutan je prijenos tvari iz plinovite u kapljevitu fazu gdje se pojedina komponenta prenosi na osnovi njene topljivosti u kapljevini. Apsorpcija se primjenjuje za uklanjanje neželjenih komponenti dimnih plinova, zatim u Solvayevom postupku dobivanja natrijevog hidrogenkarbonata, pri proizvodnji kiselina itd.

Pri apsorpciji se vrlo često koriste kolone s punilima. Punila predstavljaju porozni sloj koji služi za povećanje kontaktne površine između plinovite i kapljevite faze, pa se apsorpcija događa brzo i potpuno. Najčešće su punila izrađena od keramike, plastike i metala. Na vrhu takvih kolona izlazi plin koji je oslobođen nepoželjne komponente, dok na dnu izlazi kapljevina u kojoj je otopljena ta komponenta (Slika 5) <sup>17, 18</sup>.



*Slika 5.* Apsorpcijska kolona s punilima <sup>19</sup>.

## **2. EKSPERIMENTALNI DIO**

## 2.1. Opis aparature

Ekperimentalni dio rada provodio se u aparaturi prikazanoj na Slici 6. Osnovni dio aparature je kolona visine 0,98 m i unutarnjeg promjera 0,034 m, izrađena od pleksiglasa čime je omogućeno promatranje strujanja fluida kroz porozni sloj.



*Slika 6.* Aparatura za provedbu eksperimentalnih ispitivanja.

Na krajevima kolone nalaze se cijevi za dovod i odvod kapljevine te priključci za živin U-manometar kojim se određuje vrijednost pada tlaka u sustavu. Materijal od kojeg je načinjen porozni sloj usipa se u kolonu s njezinog vrha. U donjem dijelu kolone nalazi se mrežica, tj. nosač poroznog sloja, čiji promjer očica onemogućava “propadanje” čestica poroznog sloja. Mrežica je pričvršćena uz pomoć prirubnice koja spaja glavni dio kolone i dio kolone u kojem se odvija stabilizacija toka fluida. Voda se iz vodovodne mreže dovodi u kolonu preko rotametra. Protok vode reguliran je ventilom i određivan je uz pomoć rotametra koji je prethodno trebao biti izbaždaren. Visina poroznog sloja mjerila se mjernom trakom koja se nalazila na samoj koloni. Za provedbu eksperimenta korišten je šljunak veličine čestica 0,0025; 0,0035 i 0,0045 m izrazito nepravilnog oblika, a koje su prikazane na Slici 7. Svi eksperimenti su se odvijali na sobnoj temperature ( $T = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) pri kojoj je voda imala sljedeće fizikalne karakteristike: viskoznost ( $\mu$ ) od 0,001 Pa s i gustoću ( $\rho$ ) 998,6 kg m<sup>-3</sup>.



**Slika 7.** Šljunčane čestice korištene tijekom eksperimenta.

(a –  $d_{\check{c},ekv} = 0,0025 \text{ m}$ ; b –  $d_{\check{c},ekv} = 0,0035 \text{ m}$ ; c –  $d_{\check{c},ekv} = 0,0045 \text{ m}$ )

Korištene klase čestica dobivene su prosijavanjem pomoću serije standardiziranih sita uz uporabu tresilice tipa *Retsch AS 200* prikazane na Slici 8. Prosijavanje se vršilo u trajanju od 10 minuta, pri amplitudi trešnje od 3 mm.



*Slika 8.* Tresilica tipa *Retsch AS 200*.

Pad tlaka u sustavu tijekom strujanja fluida kroz porozne slojeve očitavan je na skali živinog U-manometra u milimetrima žive (mm Hg), da bi se potom vrijednost preračunala u Pascale (Pa) uz pomoć relacije:

$$\Delta p = H \text{ mm Hg} \cdot \frac{\gamma_{\text{Hg}} - \gamma_{\text{H}_2\text{O}}}{\gamma_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot 9,81 \text{ (Pa)}$$

$$\Delta p = H \text{ mm Hg} \cdot \frac{133416 - 9810}{9810} \cdot 9,81 = H \text{ mm Hg} \cdot 12,6 \cdot 9,81 \text{ (Pa)}$$

## 2.2. Baždarenje rotametra

Rotametar je površinsko mjerilo protoka koje se sastoji od staklene konusne cijevi i plovka (Slika 9). U njemu kroz prstenasti prostor između plovka i cijevi struji fluid odozdo prema gore.



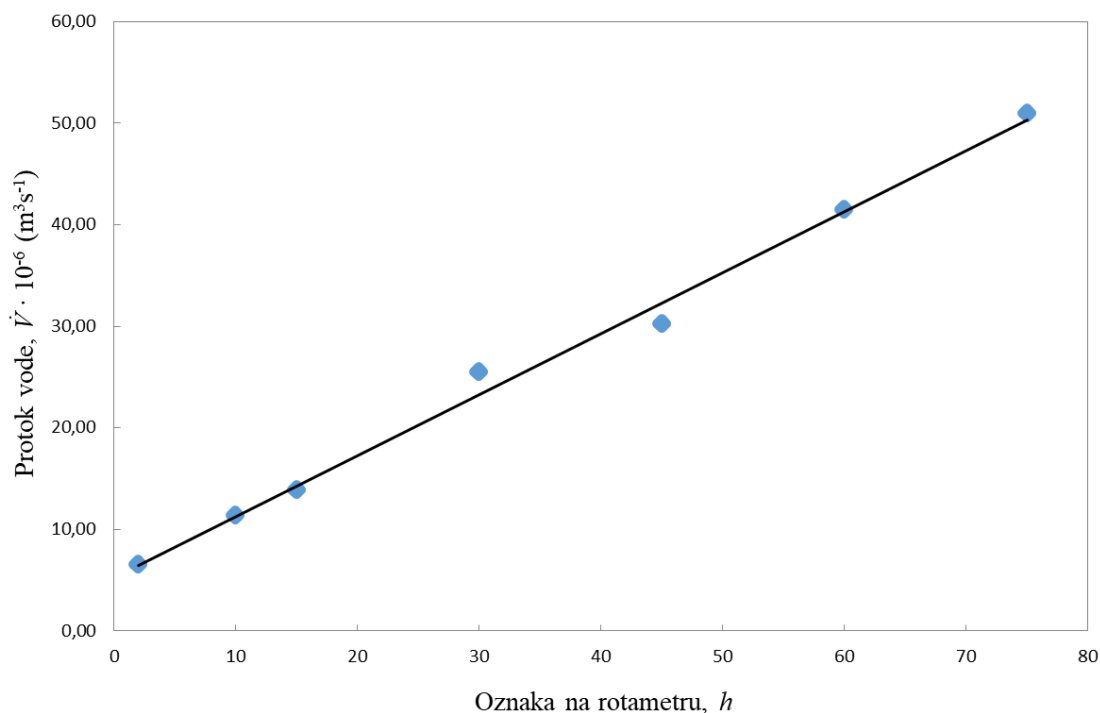
**Slika 9.** Rotametar.

Kada se izjednače sile sila uzgona i gravitacijska sila plovak zauzme određeni položaj, odnosno visinu u staklenoj cijevi ( $h$ ). Baždarenjem se dovodi u vezu visina plovka i odgovarajući volumni protok fluida ( $\dot{V}$ ). Voda se pusti kroz rotametar te se plovak zaustavi na određenoj visini. Na skali rotametra se očita visina, a iz odvodne cijevi rotametra se u menzuru hvata voda koja je u određenom vremenu protekla kroz rotametar. Vrijednost protoka vode se odredi tako da se volumen vode u menzuri podijeli s vremenom koje je određeno štopericom. Da bi se umanjila eksperimentalna pogreška, za određenu visinu plovka mjerenja se vrše tri puta, te se uzima srednja vrijednost određenih protoka. Protok fluida se postupno povećava i mjerenja se vrše kod svake nove vrijednosti protoka dok se ne obuhvati cijela skala korištenog rotametra. Po završetku mjerenja konstruira se baždarna krivulja  $\dot{V} - h$ , te se dobije korelacijska jednadžba uz pomoć koje je moguće izračunati protok za bilo koju visinu plovka u staklenoj cijevi rotametra. U ovom slučaju dobivena jednadžba glasi:

$$\dot{V} = 0,601 \cdot h + 5,271$$

Na Slici 10 prikazana je dobivena baždarna krivulja korištenog rotametra.





**Slika 10.** Baždarni dijagram korištenog rotametra.

### 2.3. Provedba eksperimenta

Kolona se do određene visine napuni česticama koje tvore porozni sloj. Za sve ispitivane veličine čestica provedena su mjerenja pri 5 različitih visina poroznog sloja ( $l = 0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7$  m). Površina poprečnog presjeka poroznog sloja određivana je relacijom:

$$A_{sl} = \frac{d_{kol}^2 \cdot \pi}{4}$$

Visina poroznog sloja mjerena je skalom koja se nalazila na samoj koloni. Iz vodovodne mreže pusti se voda, te se pri određenim protocima vode, tj. pri određenim površinskim brzinama strujanja fluida ( $v_a = 0,007 - 0,046 \text{ m s}^{-1}$ ) očitaju padovi tlaka u sustavu uz pomoć živinog U-manometra.

## 2.4. Karakterizacija poroznog sloja

Prije početka provedbe eksperimenta potrebno je izvršiti karakterizaciju poroznog sloja. Geometrijske karakteristike poroznog sloja je veoma teško direktno mjeriti, pa se pri njihovom definiranju koriste mjerljive veličine pomoću kojih se onda indirektno određuju karakteristike poroznog sloja. Osnovne karakteristike poroznog sloja određene u ovom radu su:

- **Poroznost sloja,  $\varepsilon$**

Poroznost sloja je određena tzv. metodom zasićenja uz pomoć aparature prikazane na Slici 11.



**Slika 11.** Aparatura za određivanje poroznosti sloja.

Pomoću nje se određuje volumen pora, na način da se u čašu stavi određeni volumen čestica, te se iz birete lagano doljeva voda u sloj, tako da prodire kroz sve šupljine sloja istiskujući ujedno zrak iz tih šupljina (Slika 12). Doljevanje vode se završava

kada se voda pojavi na površini poroznog sloja. U tom trenutku se očitava volumen vode koji se dolio u sloj iz birete. Taj volumen predstavlja u biti volumen pora u sloju,  $V_p$ . Poroznost se potom određuje iz relacije<sup>20</sup>:

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_{sl}} \quad (/)$$

gdje je:

$V_p$  – volumen pora ( $m^3$ )

$V_{sl}$  – volumen sloja ( $m^3$ )



*Slika 12.* Određivanje poroznosti metodom zasićenja.

- *Volumen poroznog sloja,  $V_{sl}$ :*

$$V_{sl} = A_{sl} \cdot l \quad (m^3)$$

- *Volumen čestica u poroznom sloju,  $V_{\check{c}}$ :*

$$V_{\check{c}} = (1 - \varepsilon) \cdot V_{sl} \quad (m^3)$$

- *Volumen pora,  $V_p$ :*

$$V_p = V_{sl} \cdot \varepsilon \quad (m^3)$$

- **Broj čestica u poroznom sloju,  $n$  :**

$$n = \frac{A_{sl} \cdot l \cdot (1 - \varepsilon)}{\frac{d_{\check{c},ekv}^3 \cdot \pi}{6}} \quad (/)$$

- **Ekvivalentni promjer pora poroznog sloja,  $d_{p,ekv}$  :**

$$d_{p,ekv} = \frac{4}{6} \cdot \frac{\varepsilon \cdot d_{\check{c},ekv}}{1 - \varepsilon} \quad (m)$$

- **Specifična površina pora u poroznom sloju,  $S_v$  :**

$$S_v = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d_{\check{c},ekv}} \quad (m^{-1})$$

- **Površinska brzina strujanja fluida,  $v_a$  :**

$$v_a = \frac{4 \cdot \dot{V}}{d_{kol}^2 \cdot \pi} \quad (m \ s^{-1})$$

- **Brzina strujanja fluida kroz porozni sloj,  $v_p$  :**

$$v_p = \frac{v_a}{\varepsilon} \quad (m \ s^{-1})$$

- **Modificirana Reynoldsova značajka,  $Re_p$  :**

$$Re_p = \frac{v_a \cdot d_{\check{c},ekv} \cdot \rho}{\mu \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (/)$$

- **Modificirani koeficijent trenja,  $f_p$  :**

$$f_p = \frac{\Delta p}{l} \cdot \frac{d_{\check{c},ekv}}{\rho \cdot v_a^2} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)} \quad (/)$$

### **3. REZULTATI**

### 3.1. Karakterizacija poroznih slojeva

U prvom dijelu rada izvršena je karakterizacija triju poroznih slojeva čije se veličine čestica značajno razlikuju. Postupak karakterizacije kao i izrazi pomoću kojih su određene karakteristične veličine poroznog sloja prikazani su u poglavlju 2.4. dok su rezultati tih karakterizacija predočeni u Tablicama 1 – 4.

**Tablica 1.** Karakteristike poroznog sloja čija je veličina čestica  $d_{\zeta,ekv} = 0,0025$  m.

| Ekvivalentni promjer čestica u poroznom sloju, $d_{\zeta,ekv}$<br>(m) | Poroznost sloja, $\varepsilon$<br>(/) | Površina poprečnog presjeka poroznog sloja, $A_{sl}$<br>(m <sup>2</sup> ) | Visina poroznog sloja, $l_{sl}$<br>(m) | Volumen poroznog sloja, $V_{sl}$<br>(m <sup>3</sup> ) | Volumen čestica u poroznom sloju, $V_{\zeta}$<br>(m <sup>3</sup> ) | Volumen pora, $V_p$<br>(m <sup>3</sup> ) | Broj čestica u poroznom sloju, $n$<br>(/) | Ukupna slobodna površina unutar poroznog sloja, $S_{slk}$<br>(m <sup>2</sup> ) | Specifična površina pora, $S_v$<br>(m <sup>-1</sup> ) | Ekvivalentni promjer pora u poroznom sloju, $d_{p,ekv}$<br>(m) |
|---|---------------------------------------|---|--|---|--|--|---|--|---|--|
| 0,0025  | 0,345                                 | $9,07 \cdot 10^{-4}$  | 0,2                                    | $1,81 \cdot 10^{-4}$                                  | $1,19 \cdot 10^{-4}$   | $6,26 \cdot 10^{-5}$                     | 14538                                     | 0,285  | 1572,00   | 0,0009   |
|   |                                       |   | 0,4                                    | $3,63 \cdot 10^{-4}$                                  | $2,38 \cdot 10^{-4}$   | $1,25 \cdot 10^{-4}$                     | 29076                                     | 0,571  |   |  |
|   |                                       |   | 0,5                                    | $4,54 \cdot 10^{-4}$                                  | $2,97 \cdot 10^{-4}$   | $1,57 \cdot 10^{-4}$                     | 36345                                     | 0,713  |   |  |
|   |                                       |   | 0,6                                    | $5,44 \cdot 10^{-4}$                                  | $3,57 \cdot 10^{-4}$   | $1,88 \cdot 10^{-4}$                     | 43614                                     | 0,856  |   |  |
|   |                                       |   | 0,7                                    | $6,35 \cdot 10^{-4}$                                  | $4,16 \cdot 10^{-4}$   | $2,19 \cdot 10^{-4}$                     | 50882                                     | 0,999  |   |  |

**Tablica 2.** Karakteristike poroznog sloja čija je veličina čestica  $d_{\xi,ekv} = 0,0035$  m.

| Ekvivalentni promjer čestica u poroznom sloju, $d_{\xi,ekv}$<br>( m ) | Poroznost sloja, $\varepsilon$ | Površina poprečnog presjeka poroznog sloja, $A_{sl}$<br>( m <sup>2</sup> ) | Visina poroznog sloja, $l_{sl}$<br>( m ) | Volumen poroznog sloja, $V_{sl}$<br>( m <sup>3</sup> ) | Volumen čestica u poroznom sloju, $V_{\xi}$<br>( m <sup>3</sup> ) | Volumen pora, $V_p$<br>( m <sup>3</sup> ) | Broj čestica u poroznom sloju, $n$ | Ukupna slobodna površina unutar poroznog sloja, $S_{uk}$<br>( m <sup>2</sup> ) | Specifična površina pora, $S_v$<br>( m <sup>-1</sup> ) | Ekvivalentni promjer pora u poroznom sloju, $d_{p,ekv}$<br>( m ) |
|---|--------------------------------|--|--|--|---|---|------------------------------------|--|--|--|
| 0,0035  | 0,338                          | $9,07 \cdot 10^{-4}$   | 0,2                                      | $1,81 \cdot 10^{-4}$                                   | $1,2 \cdot 10^{-4}$   | $6,13 \cdot 10^{-5}$                      | 5355                               | 0,206  | 1134,86  | 0,0012   |
|   |                                |  | 0,4                                      | $3,63 \cdot 10^{-4}$                                   | $2,4 \cdot 10^{-4}$   | $1,23 \cdot 10^{-4}$                      | 10709                              | 0,412  |  |  |
|   |                                |  | 0,5                                      | $4,54 \cdot 10^{-4}$                                   | $3 \cdot 10^{-4}$   | $1,53 \cdot 10^{-4}$                      | 13387                              | 0,515  |  |  |
|   |                                |  | 0,6                                      | $5,44 \cdot 10^{-4}$                                   | $3,6 \cdot 10^{-4}$   | $1,84 \cdot 10^{-4}$                      | 16064                              | 0,618  |  |  |
|   |                                |  | 0,7                                      | $6,35 \cdot 10^{-4}$                                   | $4,21 \cdot 10^{-4}$  | $2,15 \cdot 10^{-4}$                      | 18741                              | 0,721  |  |  |

**Tablica 3.** Karakteristike poroznog sloja čija je veličina čestica  $d_{\check{c},ekv} = 0,0045$  m.

| Ekvivalentni promjer čestica u poroznom sloju, $d_{\check{c},ekv}$ | ( m ) | Poroznost sloja, $\varepsilon$ | ( / ) | Površina poprečnog presjeka poroznog sloja, $A_{sl}$ | ( m <sup>2</sup> ) | Visina poroznog sloja, $l_{sl}$ | ( m )                   | Volumen poroznog sloja, $V_{sl}$ | ( m <sup>3</sup> ) | Volumen čestica u poroznom sloju, $V_{\check{c}}$ | ( m <sup>3</sup> ) | Volumen pora, $V_p$ | ( m <sup>3</sup> ) | Broj čestica u poroznom sloju, $n$ | ( / ) | Ukupna slobodna površina unutar poroznog sloja, $S_{uk}$ | ( m <sup>2</sup> ) | Specifična površina pora, $S_v$ | ( m <sup>-1</sup> ) | Ekvivalentni promjer pora u poroznom sloju, $d_{p,ekv}$ | ( m ) |
|--|-------|--------------------------------|-------|--|--------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------------|---|--------------------|---------------------|--------------------|------------------------------------|-------|--|--------------------|---------------------------------|---------------------|---|-------|
| 0,0045   |       | 0,312                          |       | 9,07 · 10 <sup>-4</sup>                              | 0,2                | 1,81 · 10 <sup>-4</sup>         | 1,25 · 10 <sup>-4</sup> | 5,66 · 10 <sup>-5</sup>          | 2618               | 0,166   | 917,33             | 0,0014              |                    |                                    |       |  |                    |                                 |                     |   |       |
|  |       |                                |       |  | 0,4                | 3,63 · 10 <sup>-4</sup>         | 2,5 · 10 <sup>-4</sup>  | 1,13 · 10 <sup>-4</sup>          | 5237               | 0,333   |                    |                     |                    |                                    |       |  |                    |                                 |                     |   |       |
|  |       |                                |       |  | 0,5                | 4,54 · 10 <sup>-4</sup>         | 3,12 · 10 <sup>-4</sup> | 1,42 · 10 <sup>-4</sup>          | 6546               | 0,416   |                    |                     |                    |                                    |       |  |                    |                                 |                     |   |       |
|  |       |                                |       |  | 0,6                | 5,44 · 10 <sup>-4</sup>         | 3,75 · 10 <sup>-4</sup> | 1,70 · 10 <sup>-4</sup>          | 7855               | 0,499   |                    |                     |                    |                                    |       |  |                    |                                 |                     |   |       |
|  |       |                                |       |  | 0,7                | 6,35 · 10 <sup>-4</sup>         | 4,37 · 10 <sup>-4</sup> | 1,98 · 10 <sup>-4</sup>          | 9164               | 0,583   |                    |                     |                    |                                    |       |  |                    |                                 |                     |   |       |

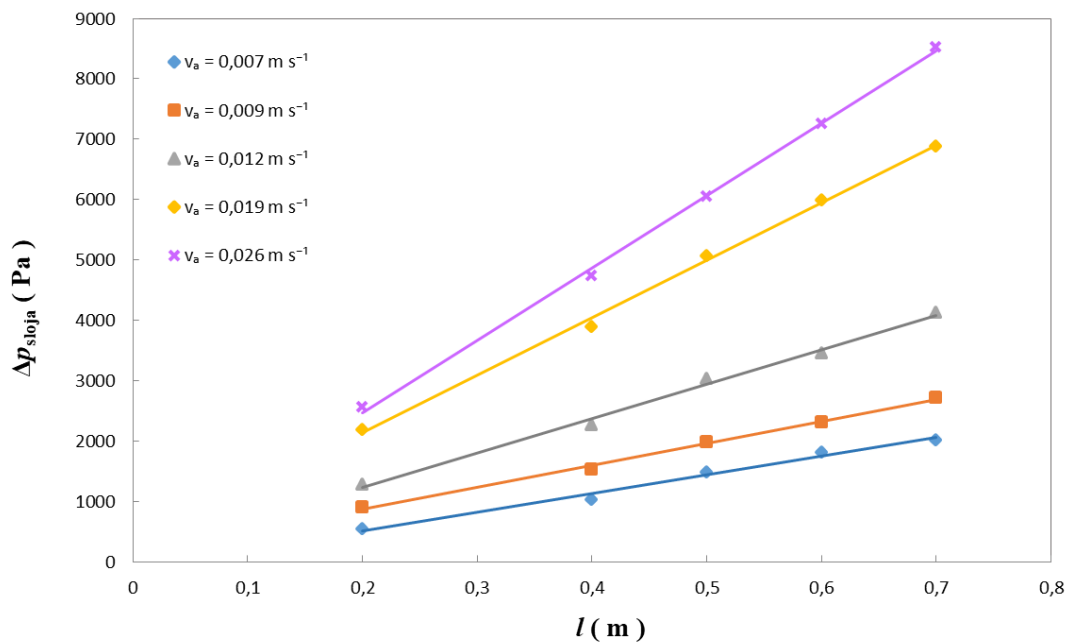


**Tablica 4.** Karakteristike strujanja fluida kroz ispitivane porozne slojeve.

| Ekvivalentni promjer čestica u poroznom sloju, $d_{\check{c},\text{ekv}}$ | Visina poroznog sloja, $l_{sl}$ | Poroznost sloja, $\varepsilon$ | Površinska brzina fluida, $v_a$ | Brzina strujanja fluida kroz porozni sloj, $v_p$ | Modificirana Reynoldsova značajka, $Re_p$ |
|---|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--|---|
| ( m )   | ( m )                           | ( / )                          | ( $\text{m s}^{-1}$ )           | ( $\text{m s}^{-1}$ )                            | ( / )                                     |
| 0,0025  | 0,2-0,7                         | 0,345                          | 0,007                           | 0,021  | 27,19                                     |
|   |                                 |                                | 0,009                           | 0,026  | 34,76                                     |
|   |                                 |                                | 0,012                           | 0,036  | 47,38                                     |
|   |                                 |                                | 0,019                           | 0,055  | 72,62                                     |
|   |                                 |                                | 0,026                           | 0,074  | 97,85                                     |
| 0,0035  | 0,2-0,7                         | 0,338                          | 0,007                           | 0,021  | 37,66                                     |
|   |                                 |                                | 0,009                           | 0,027  | 48,15                                     |
|   |                                 |                                | 0,012                           | 0,037  | 65,63                                     |
|   |                                 |                                | 0,019                           | 0,056  | 100,59                                    |
|   |                                 |                                | 0,026                           | 0,076  | 135,55                                    |
|   |                                 |                                | 0,032                           | 0,096  | 170,51                                    |
|   |                                 |                                | 0,039                           | 0,115  | 205,47                                    |
| 0,0045  | 0,2-0,7                         | 0,312                          | 0,007                           | 0,023  | 46,59                                     |
|   |                                 |                                | 0,009                           | 0,029  | 59,56                                     |
|   |                                 |                                | 0,012                           | 0,040  | 81,19                                     |
|   |                                 |                                | 0,019                           | 0,061  | 124,44                                    |
|   |                                 |                                | 0,026                           | 0,082  | 167,69                                    |
|   |                                 |                                | 0,032                           | 0,104  | 210,94                                    |
|   |                                 |                                | 0,039                           | 0,125  | 254,19                                    |
|   |                                 |                                | 0,046                           | 0,146  | 297,44                                    |

### 3.2. Ovisnost pada tlaka o visini poroznog sloja

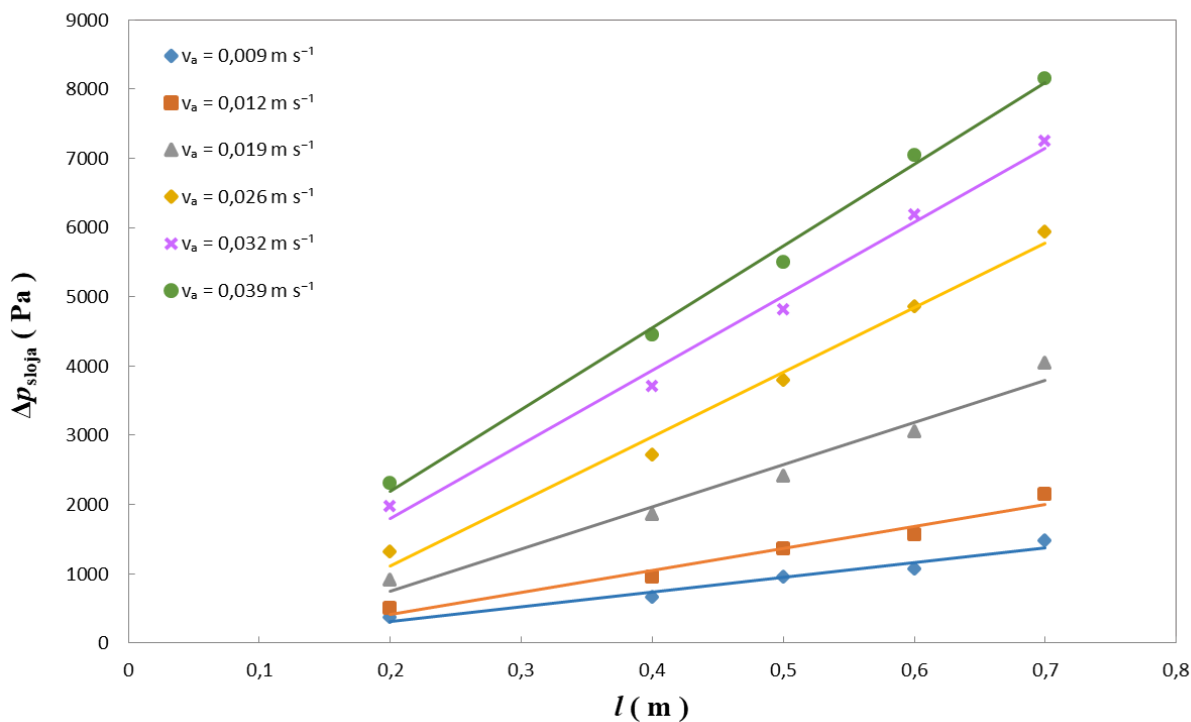
Za sva tri ispitivana porozna sloja analizirana je ovisnost pada tlaka kroz sloj ( $\Delta p_{\text{sloja}}$ ) o visini poroznih slojeva ( $l$ ) pri različitim površinskim brzinama strujanja fluida ( $v_a$ ). Visine poroznih slojeva bile su u rasponu 0,2 – 0,7 m, dok su pri navedenim analizama površinske brzina strujanja fluida iznosile od 0,007 – 0,046 m s<sup>-1</sup>. Postupak određivanja detaljno je opisan u poglavlju 2.3., dok su rezultati ispitivanja prikazani na Slikama 13 – 15 i u Tablicama 5 – 7.



**Slika 13.** Ovisnost pada tlaka o visini poroznog sloja pri različitim površinskim brzinama fluida ( $d_{\check{c},\text{ekv}} = 0,0025$  m;  $\varepsilon = 0,345$ ).

**Tablica 5.** Korelacijske jednadžbe dobivene pri ispitivanju ovisnosti pada tlaka o visini poroznog sloja pri različitim površinskim brzinama fluida ( $d_{\check{c},\text{ekv}} = 0,0025$  m;  $\varepsilon = 0,345$ ).

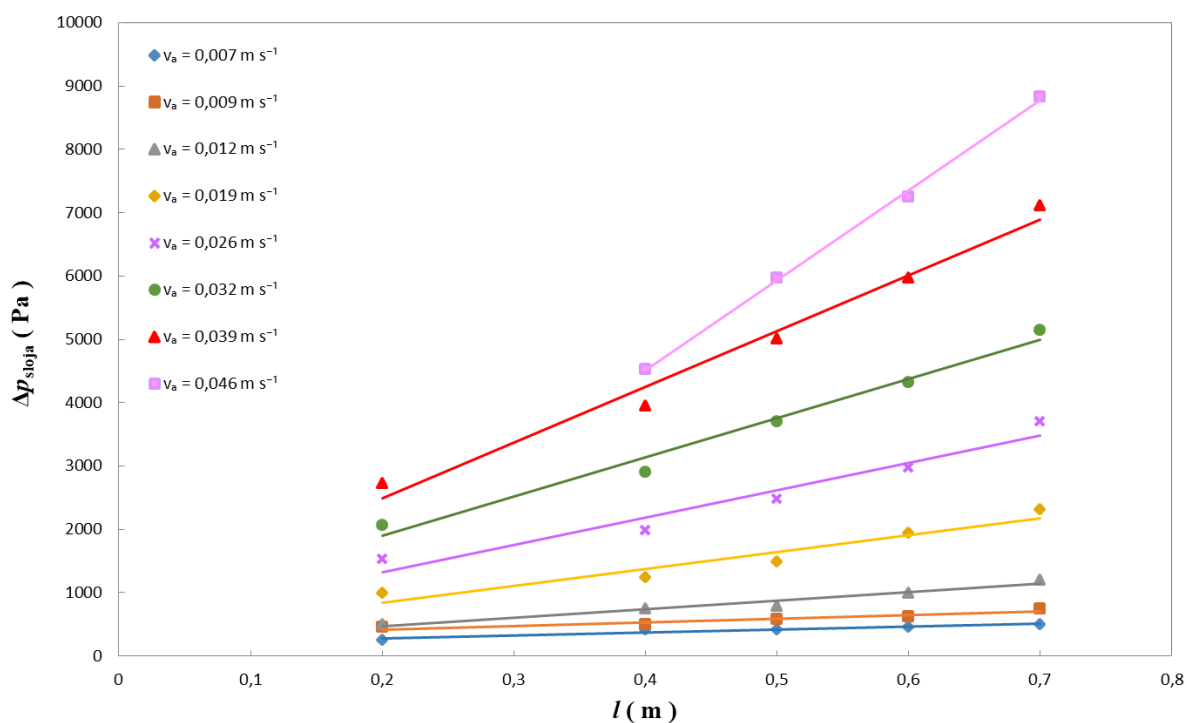
| $v_a$ (m s <sup>-1</sup> ) | $Re_p$ (/) | Korelacijska jednadžba | Koeficijent korelacije, $R^2$                       |       |
|----------------------------|------------|------------------------|---|-------|
| ◆                          | 0,007      | 27,19                  | $\Delta p_{\text{sloja}} = 3101,3 \cdot l - 112,62$ | 0,987 |
| ■                          | 0,009      | 34,76                  | $\Delta p_{\text{sloja}} = 3641,4 \cdot l + 139$    | 0,996 |
| ▲                          | 0,012      | 47,38                  | $\Delta p_{\text{sloja}} = 5698,7 \cdot l + 94,942$ | 0,995 |
| ◆                          | 0,019      | 72,62                  | $\Delta p_{\text{sloja}} = 9537,7 \cdot l + 225,64$ | 0,998 |
| ✕                          | 0,026      | 97,85                  | $\Delta p_{\text{sloja}} = 11982 \cdot l + 74,055$  | 0,999 |



**Slika 14.** Ovisnost pada tlaka o visini poroznog sloja pri različitim površinskim brzinama fluida ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0035$  m;  $\varepsilon = 0,338$ ).

**Tablica 6.** Korelacijske jednadžbe dobivene pri ispitivanju ovisnosti pada tlaka o visini poroznog sloja pri različitim površinskim brzinama fluida ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0035$  m;  $\varepsilon = 0,338$ ).

| $v_a$ ( m s <sup>-1</sup> ) | $Re_p$ ( / ) | Korelacijska jednadžba | Koeficijent korelacije, $R^2$                |       |
|-----------------------------|--------------|------------------------|--|-------|
| ◆                           | 0,009        | 48,15                  | $\Delta p_{sloja} = 2143,9 \cdot l - 122,74$ | 0,958 |
| ■                           | 0,012        | 65,63                  | $\Delta p_{sloja} = 3190,7 \cdot l - 229,73$ | 0,968 |
| ▲                           | 0,019        | 100,59                 | $\Delta p_{sloja} = 6083,4 \cdot l - 468,77$ | 0,975 |
| ◆                           | 0,026        | 135,55                 | $\Delta p_{sloja} = 9310,1 \cdot l - 744,56$ | 0,989 |
| ✕                           | 0,032        | 170,51                 | $\Delta p_{sloja} = 10697 \cdot l - 347,2$   | 0,991 |
| ●                           | 0,039        | 205,47                 | $\Delta p_{sloja} = 11813 \cdot l - 178,67$  | 0,995 |

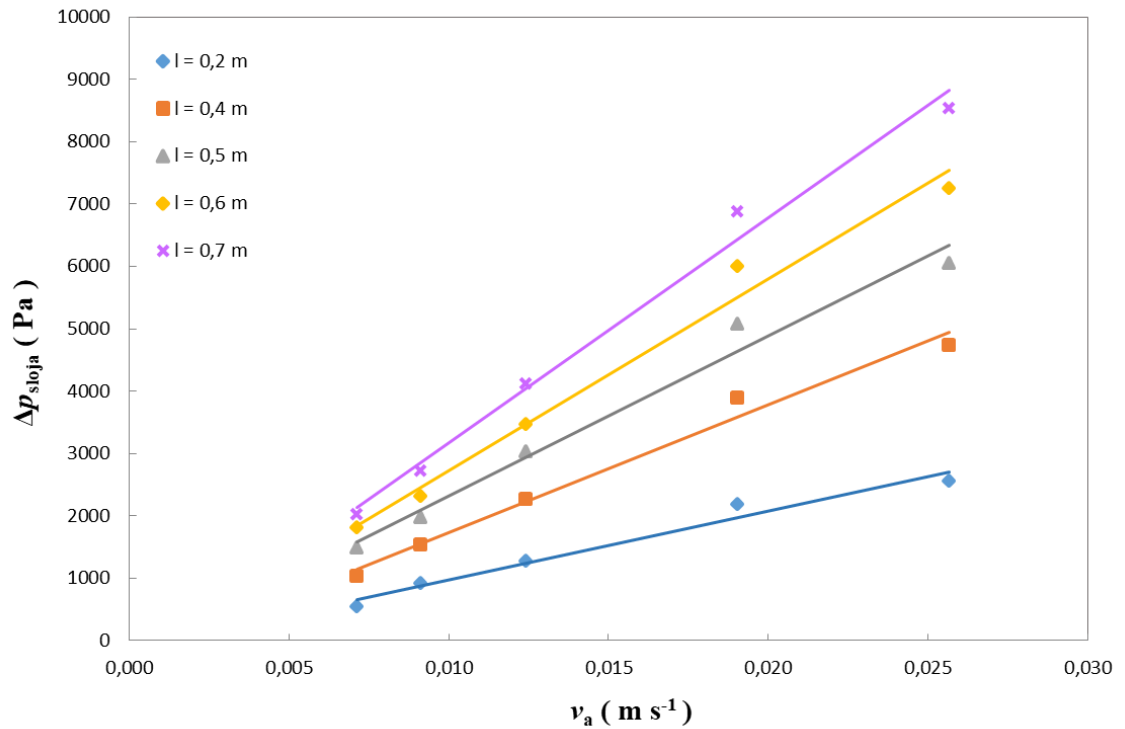


**Slika 15.** Ovisnost pada tlaka o visini poroznog sloja pri različitim površinskim brzinama fluida ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0045$  m;  $\varepsilon = 0,312$ ).

**Tablica 7.** Korelacijske jednadžbe dobivene pri ispitivanju ovisnosti pada tlaka o visini poroznog sloja pri različitim površinskim brzinama fluida ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0035$  m;  $\varepsilon = 0,312$ ).

| $v_a$ ( m s <sup>-1</sup> ) | $Re_p$ ( / ) | Korelacijska jednadžba | Koeficijent korelacije, $R^2$                |       |
|-----------------------------|--------------|------------------------|--|-------|
| ◆                           | 0,007        | 46,59                  | $\Delta p_{sloja} = 467,7 \cdot l + 179,13$  | 0,917 |
| ■                           | 0,009        | 59,56                  | $\Delta p_{sloja} = 556,78 \cdot l + 309,37$ | 0,901 |
| ▲                           | 0,012        | 81,19                  | $\Delta p_{sloja} = 1347,4 \cdot l + 193,49$ | 0,958 |
| ◆                           | 0,019        | 124,44                 | $\Delta p_{sloja} = 2661,4 \cdot l + 312,5$  | 0,926 |
| ✕                           | 0,026        | 167,69                 | $\Delta p_{sloja} = 4298,4 \cdot l + 466,03$ | 0,944 |
| ●                           | 0,032        | 210,94                 | $\Delta p_{sloja} = 6197 \cdot l + 654,64$   | 0,981 |
| ▲                           | 0,039        | 254,19                 | $\Delta p_{sloja} = 8802,8 \cdot l + 726,32$ | 0,983 |
| ■                           | 0,046        | 297,44                 | $\Delta p_{sloja} = 14194 \cdot l - 1158,8$  | 0,998 |

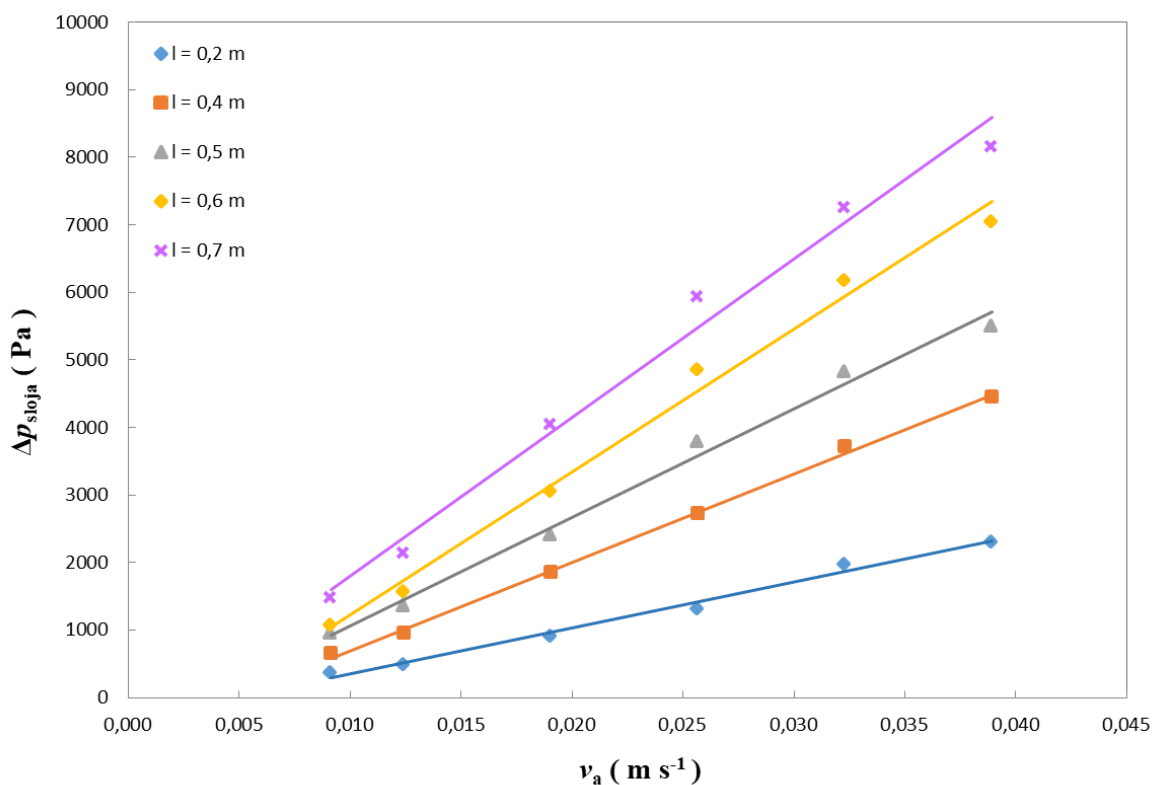
### 3.3. Ovisnost pada tlaka o površinskoj brzini fluida



**Slika 16.** Ovisnost pada tlaka o površinskoj brzini fluida pri različitim visinama poroznog sloja ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0025$  m;  $\varepsilon = 0,345$ ).

**Tablica 8.** Korelacijske jednadžbe dobivene pri ispitivanju ovisnosti pada tlaka o površinskoj brzini fluida pri različitim visinama poroznog sloja ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0025$  m;  $\varepsilon = 0,345$ ).

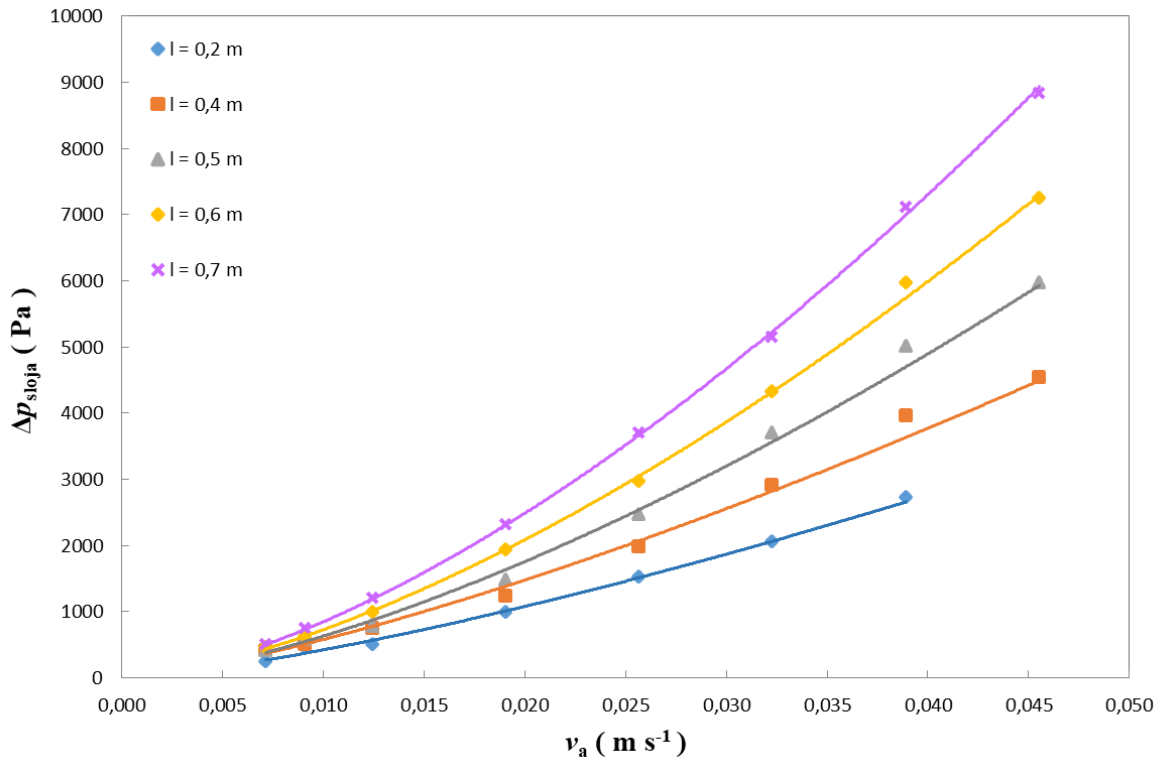
| $l$ ( m ) |     | Korelacijska jednadžba                         | Koeficijent korelacije, $R^2$ |
|-----------|-----|--|-------------------------------|
| ◆         | 0,2 | $\Delta p_{sloja} = 110155 \cdot v_a - 126,07$ | 0,971                         |
| ■         | 0,4 | $\Delta p_{sloja} = 204952 \cdot v_a - 318,88$ | 0,985                         |
| ▲         | 0,5 | $\Delta p_{sloja} = 256328 \cdot v_a - 240,87$ | 0,981                         |
| ◆         | 0,6 | $\Delta p_{sloja} = 307375 \cdot v_a - 347,58$ | 0,985                         |
| ×         | 0,7 | $\Delta p_{sloja} = 361386 \cdot v_a - 452,48$ | 0,989                         |



**Slika 17.** Ovisnost pada tlaka o površinskoj brzini fluida pri različitim visinama poroznog sloja ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0035$  m;  $\varepsilon = 0,338$ ).

**Tablica 9.** Korelacijske jednadžbe dobivene pri ispitivanju ovisnosti pada tlaka o površinskoj brzini fluida pri različitim visinama poroznog sloja ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0035$  m;  $\varepsilon = 0,338$ ).

| $l$ ( m ) |     | Korelacijska jednadžba                         | Koeficijent korelacije, $R^2$ |
|-----------|-----|--|-------------------------------|
| ◆         | 0,2 | $\Delta p_{sloja} = 67928 \cdot v_a - 327,86$  | 0,989                         |
| ■         | 0,4 | $\Delta p_{sloja} = 130906 \cdot v_a - 610,33$ | 0,998                         |
| ▲         | 0,5 | $\Delta p_{sloja} = 160536 \cdot v_a - 540,74$ | 0,992                         |
| ◆         | 0,6 | $\Delta p_{sloja} = 211680 \cdot v_a - 888,59$ | 0,991                         |
| ✕         | 0,7 | $\Delta p_{sloja} = 234560 \cdot v_a - 540,71$ | 0,986                         |

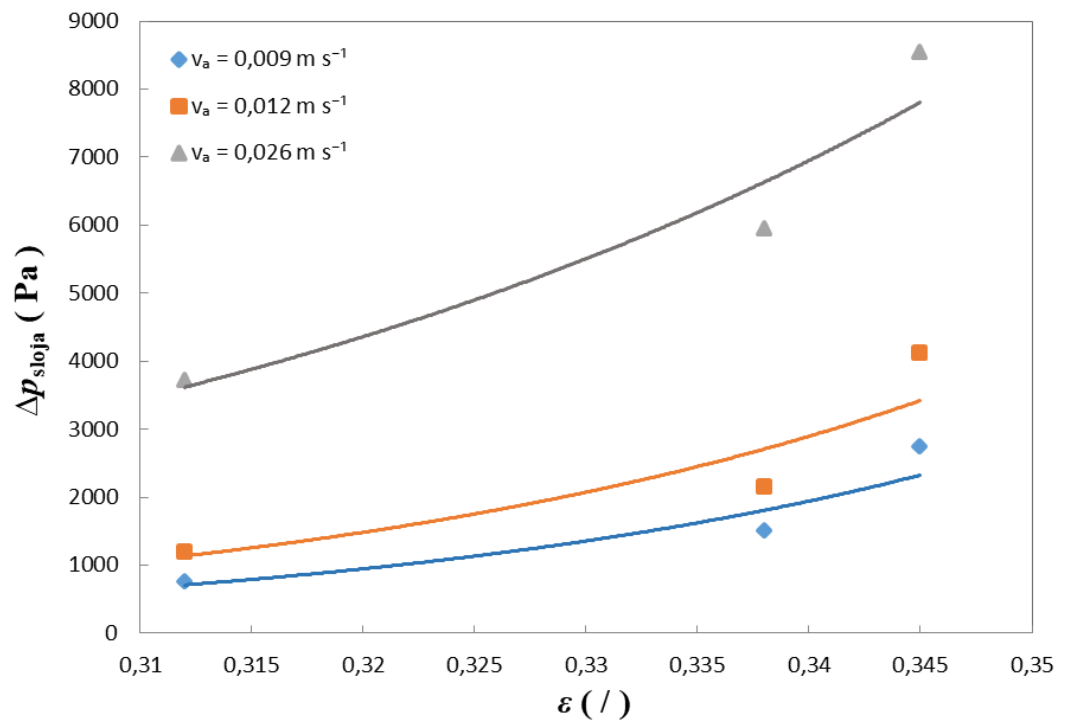


**Slika 18.** Ovisnost pada tlaka o površinskoj brzini fluida pri različitim visinama poroznog sloja ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0045 \text{ m}$ ;  $\varepsilon = 0,312$ ).

**Tablica 10.** Korelacijske jednadžbe dobivene pri ispitivanju ovisnosti pada tlaka o površinskoj brzini fluida pri različitim visinama poroznog sloja ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0045 \text{ m}$ ;  $\varepsilon = 0,312$ ).

| $l \text{ ( m )}$ |     | <i>Korelacijska jednadžba</i>                               | <i>Koeficijent korelacije, <math>R^2</math></i> |
|-------------------|-----|---|---|
| ◆                 | 0,2 | $\Delta p_{\text{sloja}} = 217502 \cdot v_a^{1,3568}$       | 0,986   |
| ■                 | 0,4 | $\Delta p_{\text{sloja}} = 292137 \cdot v_a^{1,3515}$       | 0,994   |
| ▲                 | 0,5 | $\Delta p_{\text{sloja}} = 571537 \cdot v_a^{1,4788}$       | 0,995   |
| ◆                 | 0,6 | $\Delta p_{\text{sloja}} = 801757 \cdot v_a^{1,5213}$       | 0,999   |
| ×                 | 0,7 | $\Delta p_{\text{sloja}} = 1 \cdot 10^6 \cdot v_a^{1,5538}$ | 0,999   |

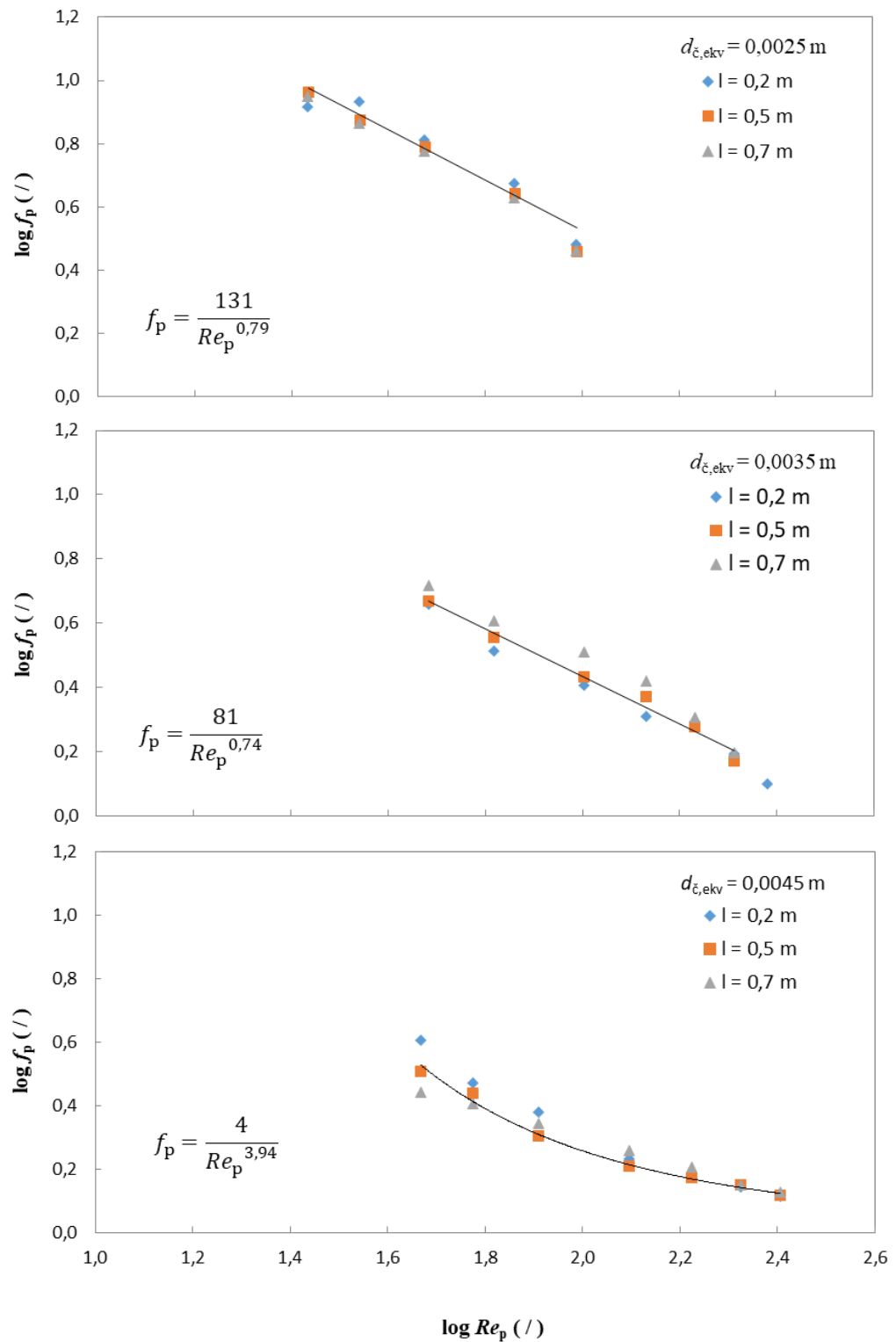
### 3.4. Odnos pada tlaka o poroznosti sloja pri različitim površinskim brzinama strujanja fluida



**Slika 19.** Ovisnost pada tlaka kroz sloj ( $\Delta p_{\text{sloja}}$ ) o poroznosti sloja ( $\varepsilon$ ) pri različitim površinskim brzinama strujanja fluida ( $l = 0,7 \text{ m}$ ).



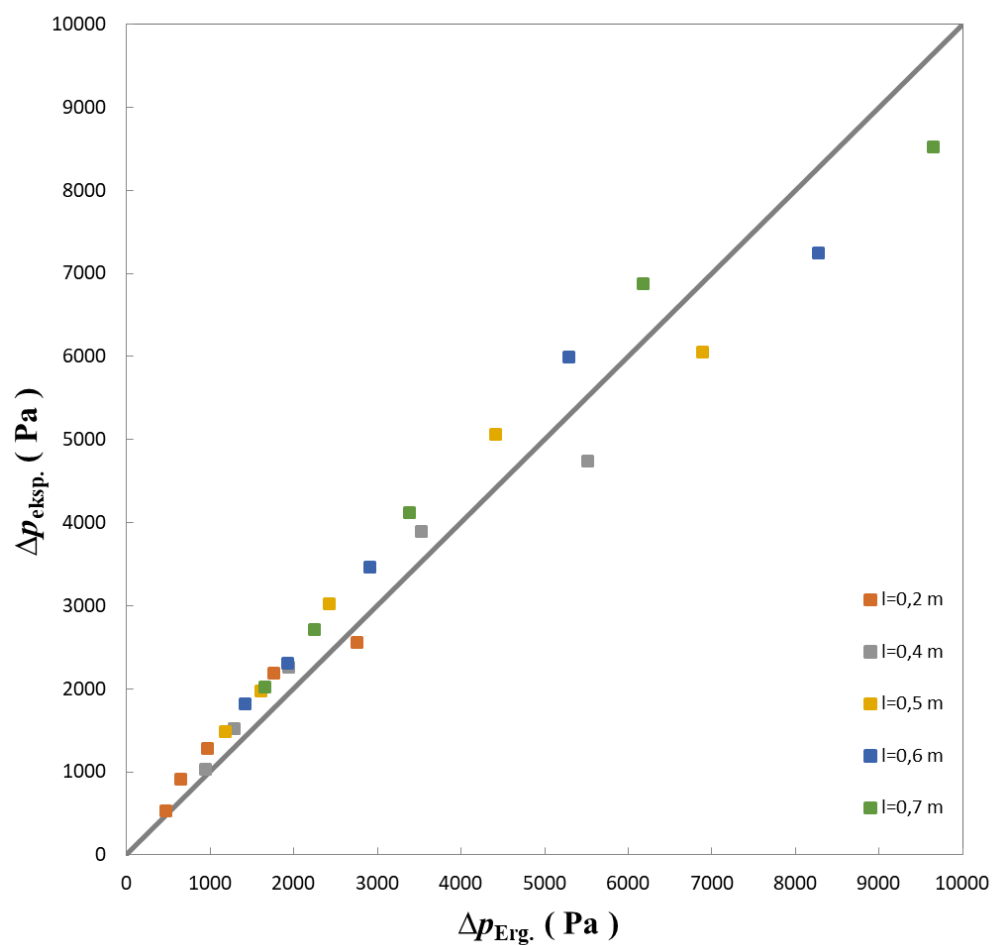
### 3.5. Ovisnost modificiranog koeficijenta trenja o modificiranoj Reynoldsovoj značajci za ispitivane porozne slojeve



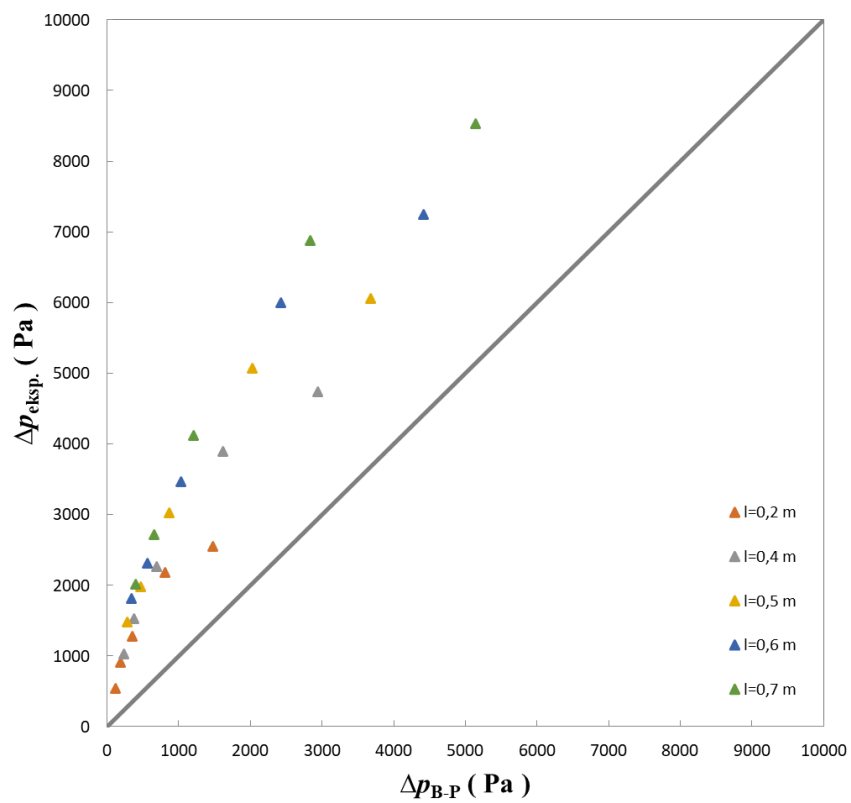
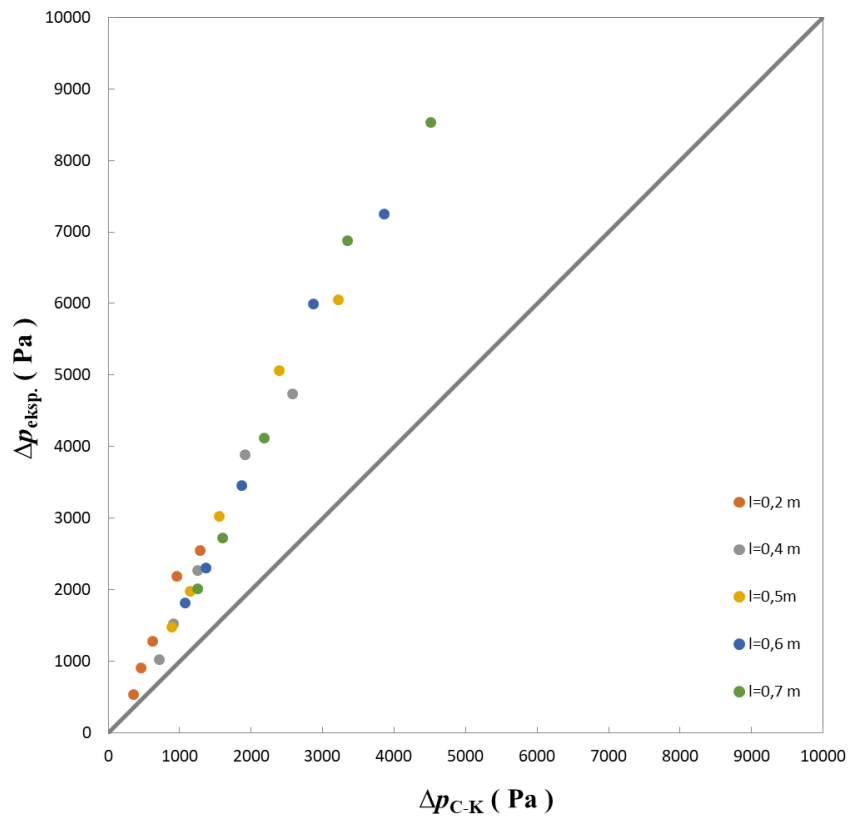
**Slika 20.** Ovisnost modificiranog koeficijenta trenja ( $f_p$ ) o modificiranoj Reynoldsovoj značajci ( $Re_p$ ) za ispitivane porozne slojeve različitih karakteristika.

### 3.6. Usporedba eksperimentalno i teorijski određenih vrijednosti pada tlaka kroz porozni sloj

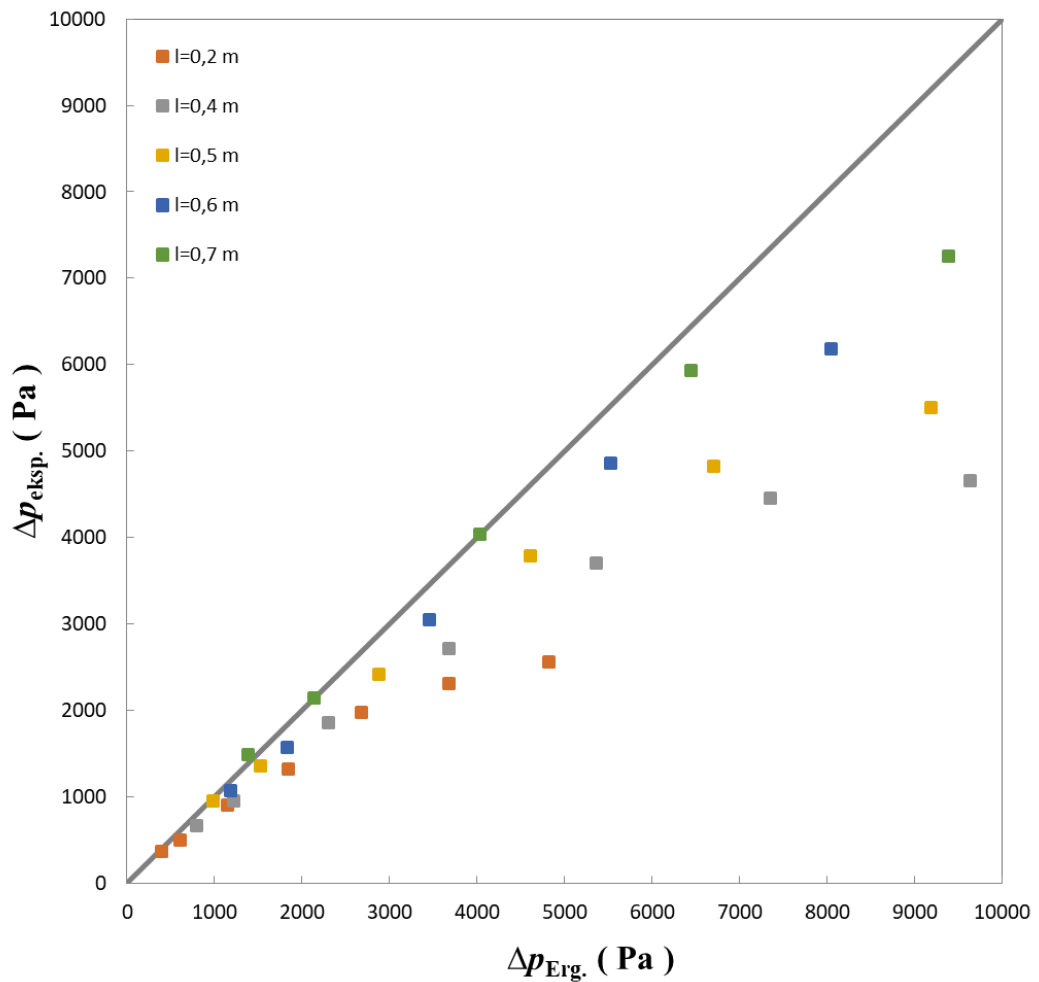
U ovom dijelu rada izvršena je usporedba eksperimentalno određenih vrijednosti pada tlaka pri strujanju fluida kroz porozni sloj ( $\Delta p_{\text{eksp.}}$ ) i vrijednosti pada tlaka određenih uz pomoć Ergunove ( $\Delta p_{\text{Erg.}}$ ), Carman-Kozenyjeve ( $\Delta p_{\text{C-K}}$ ) i Burke-Pulmmerove ( $\Delta p_{\text{B-P}}$ ) jednačbe. Rezultati usporedbe su prikazani na Slikama od 21 do 26.



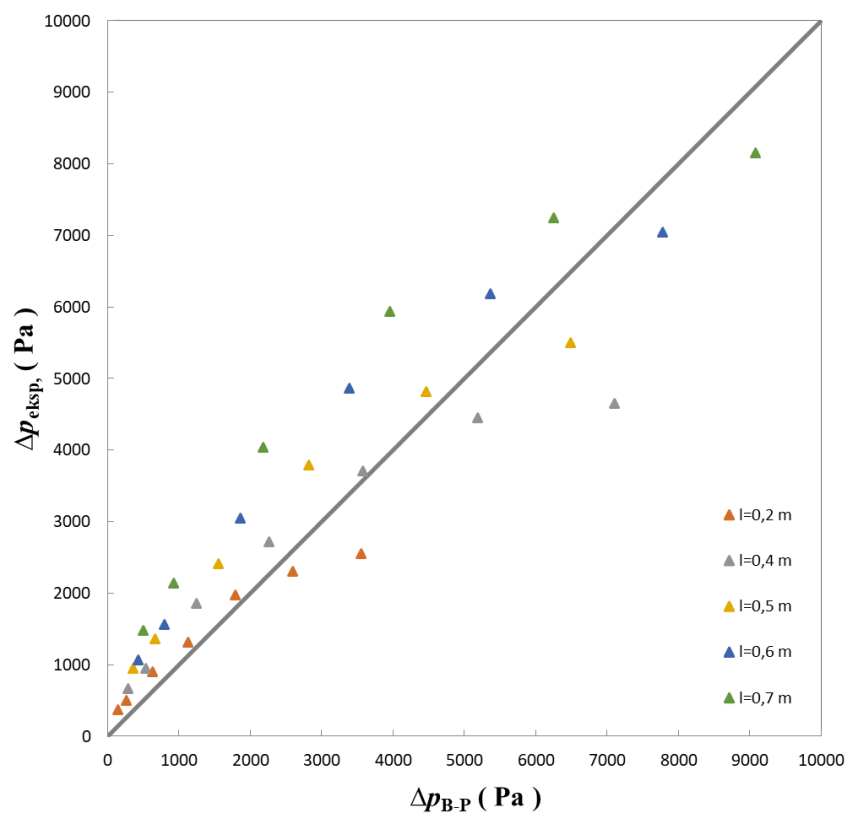
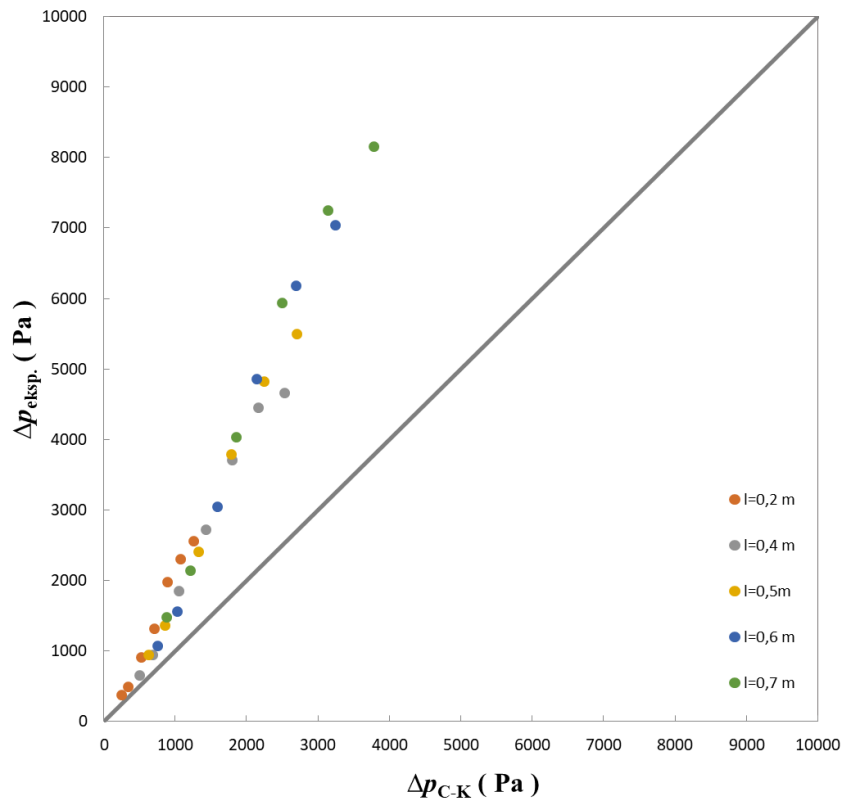
**Slika 21.** Usporedba eksperimentalno određenih vrijednosti pada tlaka pri strujanju fluida kroz porozni sloj s vrijednostima pada tlaka određenim Ergunovom jednačbom ( $d_{\check{c},\text{ekv}} = 0,0025 \text{ m}$ ;  $\varepsilon = 0,345$ ).



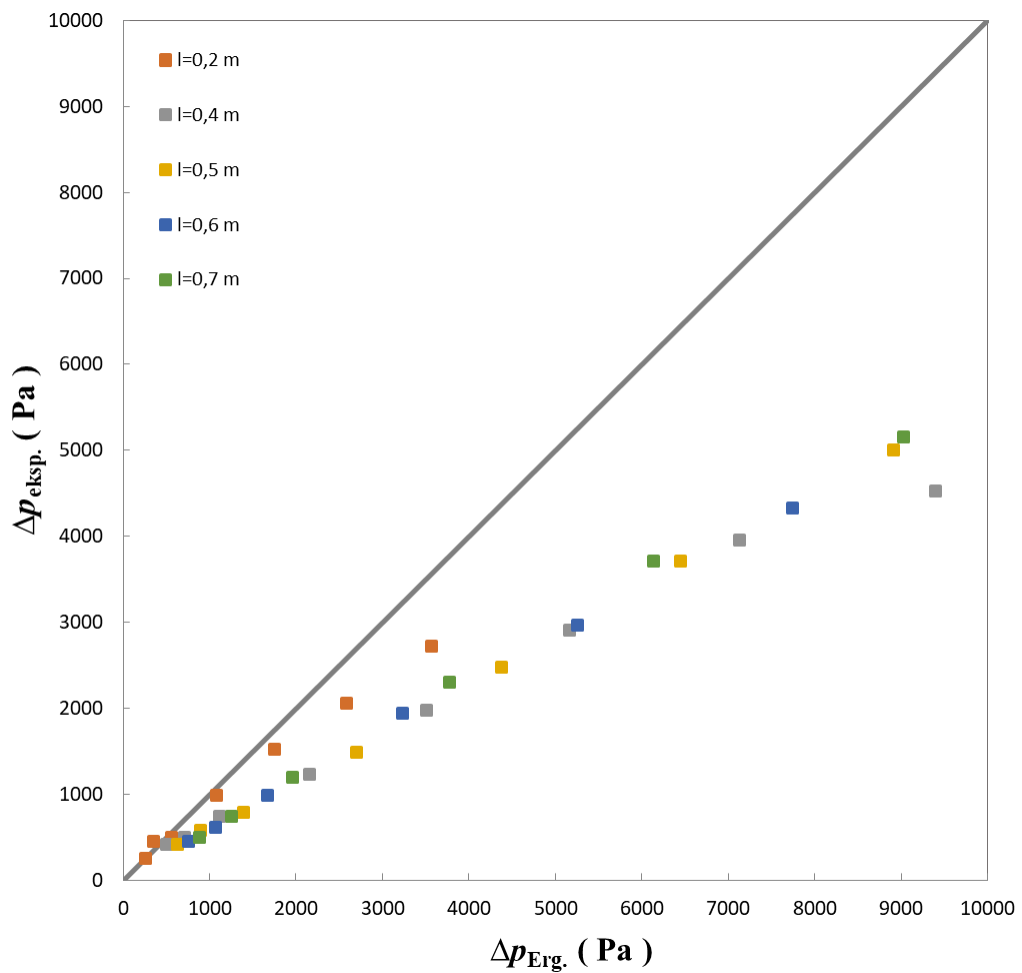
**Slika 22.** Usporedba eksperimentalno određenih vrijednosti pada tlaka pri strujanju fluida kroz porozni sloj s vrijednostima pada tlaka određenih Carman-Kozenyjevom i Burke-Pulmmerovom jednađžbom ( $d_{\check{c},\text{ekv}} = 0,0025$  m;  $\varepsilon = 0,345$ ).



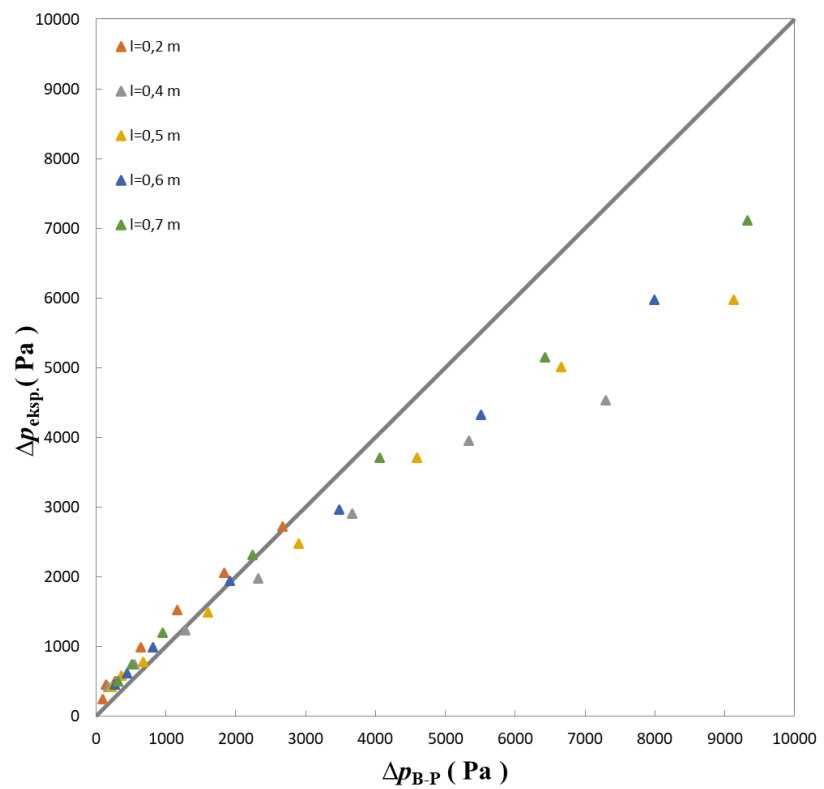
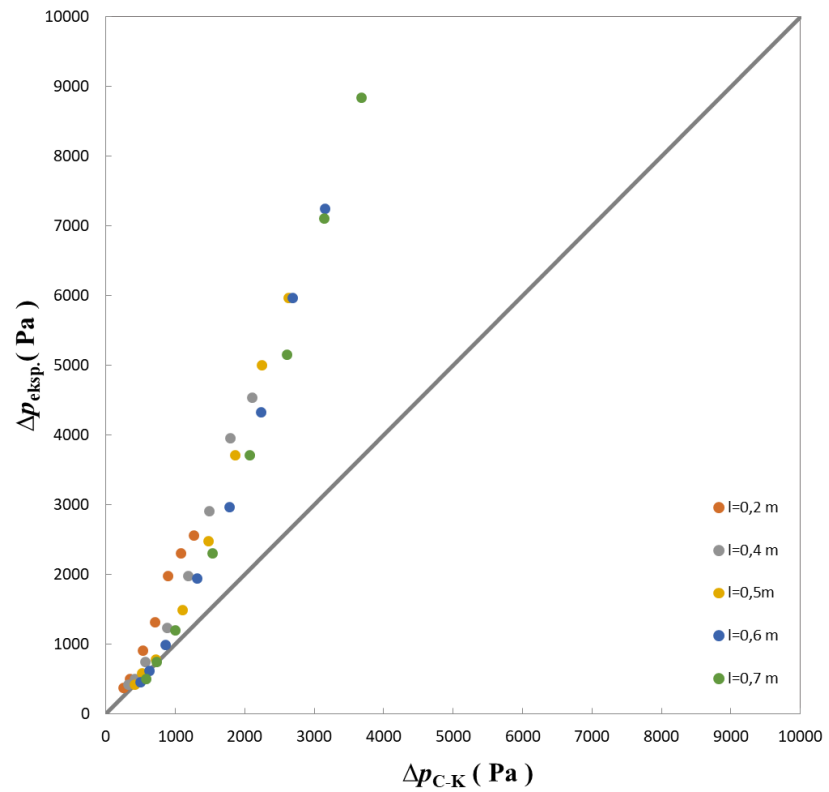
**Slika 23.** Usporedba eksperimentalno određenih vrijednosti pada tlaka pri strujanju fluida kroz porozni sloj s vrijednostima pada tlaka određenim Ergunovom jednadžbom ( $d_{\check{c},\text{ekv}} = 0,0035 \text{ m}$ ;  $\varepsilon = 0,338$ ).



**Slika 24.** Usporedba eksperimentalno određenih vrijednosti pada tlaka pri strujanju fluida kroz porozni sloj s vrijednostima pada tlaka određenih Carman-Kozenyjevom i Burke-Pulmmerovom jednađbom ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0035$  m;  $\varepsilon = 0,338$ ).



**Slika 25.** Usporedba eksperimentalno određenih vrijednosti pada tlaka pri strujanju fluida kroz porozni sloj s vrijednostima pada tlaka određenim Ergunovom jednadžbom ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0045 \text{ m}$ ;  $\varepsilon = 0,312$ ).



**Slika 26.** Usporedba eksperimentalno određenih vrijednosti pada tlaka pri strujanju fluida kroz porozni sloj s vrijednostima pada tlaka određenih Carman-Kozenyjevom i Burke-Pulmmerovom jednađžbom ( $d_{\check{c},\text{ekv}} = 0,0045 \text{ m}$ ;  $\varepsilon = 0,312$ ).

#### **4. RASPRAVA**



Strujanje fluida kroz porozni sloj temelj je brojnih jediničnih operacija u kemijskom inženjerstvu kao što su fluidizacija, filtracija, apsorpcija, taloženje itd. Ti porozni slojevi obično su sačinjeni od čestica različitih veličina i oblika pri čemu se njihovim slučajnim rasporedom formiraju nepravilne pore različitih dužina i promjera kroz koje fluid struji. U tim slučajevima mogu se opaziti efekti koji su karakteristični za protjecanje, ali i za optjecanje. Da li će strujanje fluida kroz pore sloja biti laminarno ili turbulentno ovisi prvenstveno o pokretačkoj sili koja uzrokuje strujanje, tj. razlici tlakova na krajevima sloja, ali i o otporu kojeg porozni sloj pruža strujanju fluida. Ako je sloj sastavljen od pretežno krupnijih čestica tada su pore relativno široke, te je otpor takvog sloja manji u usporedbi s onim kojeg pruža sloj sastavljen od sitnijih čestica, gdje su pore vrlo uske. Do gubitaka energije fluida dolazi zbog površinskog trenja i zbog otpora uslijed oblika čestica koje formiraju porozni sloj. Ukupan gubitak energije fluida manifestira se padom tlaka u sustavu kojeg je moguće eksperimentalno i računski odrediti.

Cilj ovih ispitivanja bio je analiza gubitaka energije fluida tijekom njegovog strujanja kroz porozne slojeve različitih karakteristika. Tijekom rada ispitivana su tri sloja čije su ekvivalentne veličine čestica bile sljedeće:  $d_{\text{č,ekv}} = 0,0025; 0,0035$  i  $0,0045$  m. Ispitivan je utjecaj različitih visina tih slojeva na pad tlaka i to pri različitim površinskim brzinama strujanja fluida koje su bile takve da nisu remetile geometrijsku strukturu poroznih slojeva, tj. visina poroznih slojeva je tijekom ispitivanja bila konstantna. Drugim riječima, u svim slučajevima je izbjegavana eventualna pojava fluidizacije sloja. Za sva ispitivanja korištena je aparatura vlastite izvedbe prikazana na Slici 6, a koja je detaljno opisana u poglavlju 2.1.

Prije provedbe navedenih eksperimentalnih mjerenja bilo je potrebno izvršiti što detaljniju karakterizaciju ispitivanih poroznih slojeva. Zbog njihove izrazito nepravilne strukture, karakterizacija se vršila indirektnim načinom i to pomoću relativno jednostavno mjerljivih veličina. Veličine koje karakteriziraju određeni porozni sloj definirane su u poglavlju 2.4., dok su vrijednosti dobivene u ovom radu prikazane u Tablicama 1 – 4.

Iz dobivenih rezultata uočava se da povećanjem veličine čestica sloja se smanjuje udio šupljina u sloju kroz koje fluid struji, a koji se inače definira kao poroznost sloja. Poroznost je u ovom radu određivana metodom zasićenja koja je detaljno opisana u

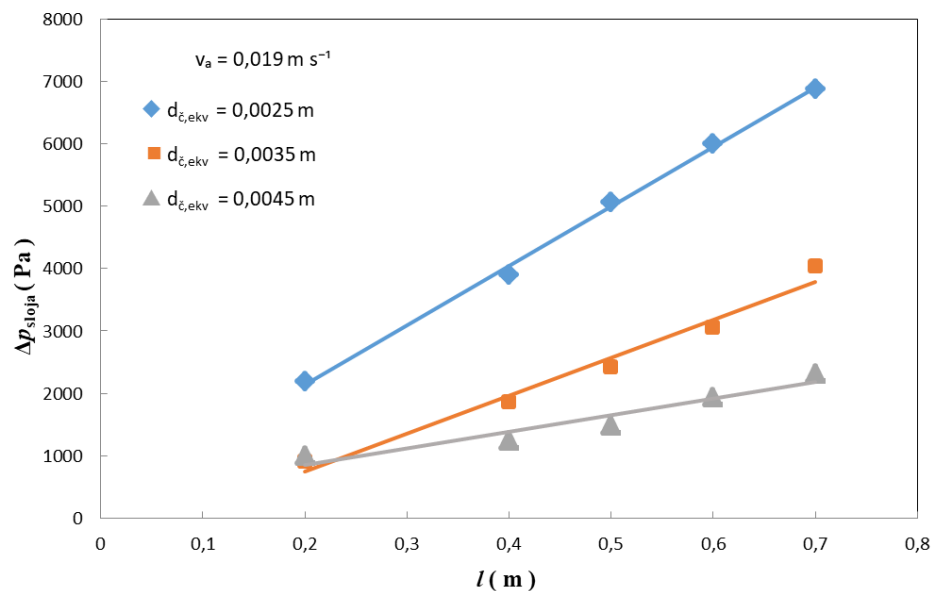
poglavlju 2.4., a rezultati prikazani u tablicama predstavljaju srednju vrijednost pet uzastopnih mjerenja. Tijekom preliminarnih određivanja poroznosti uočeno je da su rezultati reproducibilniji što je doljevanje vode u sloj sporije i ukoliko se tijekom doljevanja vrši lagano protresivanje čase u kojoj se nalaze čestice ispitivanog sloja. Međutim, metoda se može smatrati subjektivnom i preporučljivo je da mjerenja obavlja uvijek ista osoba. Za preciznije određivanje poroznosti definitivno je potrebno korištenje sofisticiranijih tehnika poput različitih vrsta porozimetra, te elektronske mikroskopije, bilo transmisijske (TEM) ili pretražne (SEM). Potrebno je napomenuti da primjenjena metoda zasićenja didaktički je vrlo korisna jer studentima uspješno predočava pojam poroznosti, tj. udio šupljina u sloju.

Nadalje, karakterizacijom se uočava da povećanjem veličine čestica u poroznom sloju se smanjuje cjelokupna slobodna površina čvrstih čestica unutar poroznog sloja izražena po jedinici volumena sloja, a koja se inače označava kao specifična površina pora u poroznom sloju ( $S_v$ ). Povećanje veličine čestica u sloju također utječe i na ekvivalentni promjer pora što se reflektira na brzinu strujanja fluida kroz porozni sloj, te i na vrijednosti modificirane Reynoldsove značajke (Tablica 4). Naime, povećanjem veličine čestice raste i ekvivalentni promjer pora, kao i modificirana Reynoldsova značajka. Vrijednosti modificiranih Reynoldsovih značajki kreću se u rasponu 27 – 300 što ukazuje na činjenicu da se strujanje fluida kroz ispitivane porozne slojeve može okarakterizirati kao prijelazno strujanje. To prijelazno područje strujanja prisutno je čak i kod sloja sastavljenog od najmanjih ispitivanih veličina čestica, gdje se intuitivno očekivalo da će strujanje imati laminaran karakter.

Nakon provedene karakterizacije poroznih slojeva izvršeno je određivanje pada tlaka za različite visine ispitivanih poroznih slojeva ( $l = 0,2 - 0,7$  m). Mjerenja su izvršena pri pet različitih površinskih brzina strujanja fluida ( $v_a = 0,007 - 0,046$  m s<sup>-1</sup>), a dobiveni rezultati su prikazani na Slikama 13 – 15 i u Tablicama 5 – 7. Iz rezultata se uočava da pri konstantnoj vrijednosti površinske brzine strujanja fluida povećanjem visine poroznog sloja raste i vrijednost pada tlaka. Za sve ispitivane visine poroznih slojeva povećanjem površinske brzine strujanja fluida vrijednost pada tlaka znatno raste. Primjetna je izrazito linerana ovisnost tih dviju veličina, što potvrđuju izvedene korelacijske jednadžbe, kao i pripadne vrijednosti koeficijenta korelacije,  $R^2$ . Korelacijske jednadžbe prikazane su u tablici 5, s tim da se uočava da vrijednost

koeficijenta korelacije raste povećanjem površinske brzine strujanja fluida. Istovjetna zapažanja su primjetna kod sva tri analizirana porozna sloja. Očito se, povećanjem visine poroznog sloja povećavaju i dužine pora, te njihove nepravilnosti u strukturi dolaze više do izražaja, što se manifestira povećanjem pada tlaka. To je posebno izraženo kod poroznog sloja sa najmanjom ispitivanom veličinom čestica.

Usporedbom rezultata dobivenih za iste visine slojeva i za istu površinsku brzinu strujanja fluida, uviđa se da porozni sloj sastavljen od najmanjih ispitivanih čestica pruža daleko najveći otpor strujanju fluida, odnosno uzrokuje najveći pad tlaka u sustavu. Na Slici 27 prikazan je primjer koji potvrđuje navedeni zaključak.

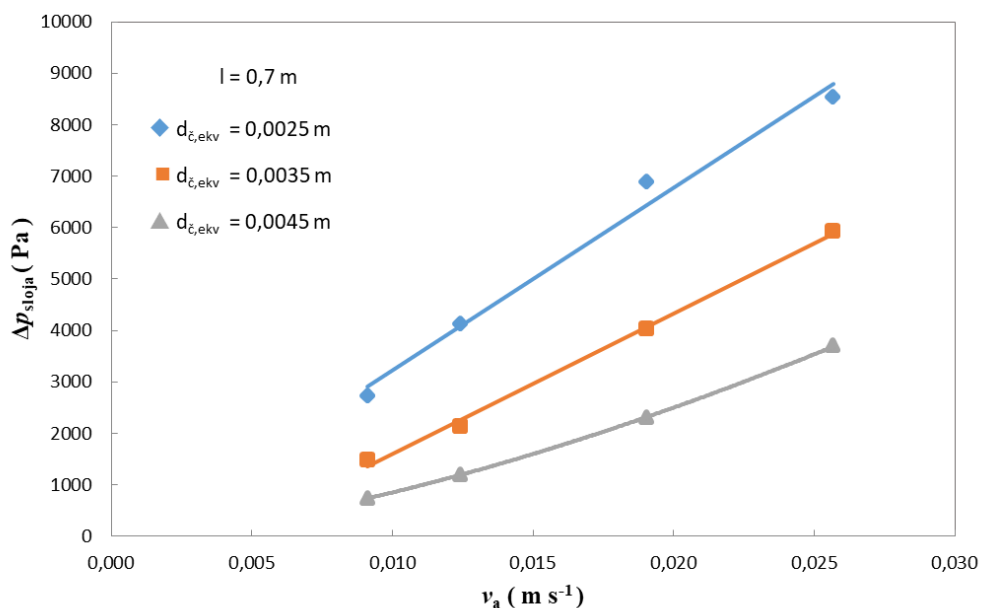


**Slika 27.** Ovisnosti pada tlaka o visini različitih poroznih slojeva pri konstantnoj površinskoj brzini strujanja fluida.

U daljnjem dijelu rada analiziran je utjecaj površinske brzine strujanja fluida na pad tlaka u poroznom sloju. Mjerenja su izvršena za pet različitih visina poroznih slojeva, s tim da su pri svakoj visini izvršena mjerenja s pet različitih površinskih brzina strujanja fluida, koje su bile takve da nisu narušavale geometrijsku strukturu poroznih slojeva, tj. visina poroznih slojeva je tijekom ispitivanja bila konstantna. Rezultati analize prikazani su na Slikama 16 – 18 i Tablicama 8 – 10. Uočava se da za određenu visinu poroznog sloja povećanjem površinske brzine strujanja fluida raste vrijednost pad tlaka u sustavu. Istovjetni zaključak primjenjiv je za sve ispitivane visine poroznih slojeva. Iz

rezultata je razvidno da pri konstantnoj vrijednosti  $v_a$ , povećanjem visine poroznog sloja, se povećava i vrijednost pada tlaka. Za eksperimentalno dobivene ovisnosti također su izvedene korelacijske jednadžbe koje su prikazane u Tablicama 8 i 9. Dobivene jednadžbe ukazuju na linearan odnos ispitivanih veličina čestica ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0025$  i  $0,0035$  m). Međutim, kod poroznog sloja sastavljenog od najvećih ispitivanih čestica ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0045$  m) ovisnost  $\Delta p_{sloja} - v_a$  poprima eksponencijalan karakter i to za sve ispitivane visine poroznih slojeva. Razlog tome vjerovatno se može pripisati vrsti strujanja kroz njega. Analizirajući vrijednosti modificirane Reynoldsove značajke uočava se da su ta mjerenja izvršena u izrazito naglašenom prijelaznom području strujanja fluida. Eksponencijalna ovisnost dodatno je potvrđena izrazito visokim vrijednostima koeficijenta korelacije,  $R^2$  koji su također prikazani u Tablici 10.

Usporedbom rezultata dobivenih pri istim površinskim brzinama strujanja fluida i za istu visinu poroznog sloja može se uočiti da porozni sloj sastavljen od najmanjih ispitivanih čestica pruža najveći otpor strujanju fluida, odnosno uzrokuje najveće energetske gubitke u sustavu. Primjer te tvrdnje prikazan je na Slici 28.



**Slika 28.** Ovisnost pada tlaka o površinskoj brzini strujanja fluida za različite porozne slojeve pri konstantnoj visini poroznog sloja.

Na Slici 19 prikazana je ovisnost pada tlaka o poroznosti slojeva pri različitim površinskim brzinama strujanja fluida. Zaključci koji se mogu donjeti pomoću ove ovisnosti u uskoj su vezi sa prethodno iznjetim tvrdnjama. Iz tog grafa se uočava da povećanjem poroznosti sloja, za određenu vrijednost površinske brzine strujanja fluida, pad tlaka u sloju postaje izraženiji.

Nadalje, u radu je sagledana ovisnost modificiranog koeficijenta trenja u odnosu na modificiranu Reynoldsovu značajku. Modificirani koeficijent trenja kojeg je definirao Sabri Ergun, u sebi sadrži karakteristike poroznog sloja, ali i vrijednost pada tlaka po jedinici visine poroznog sloja. Eksperimentalno je Ergun definirao odnos tog koeficijenta,  $f_p$ , o modificiranoj Reynoldsovoj značajci za slučaj kada fluid struji kroz porozni sloj laminarno, turbulentno ili ako je u sustavu nazočan prijelazni režim strujanja (Jednadžbe 12, 14 i 17)

Iz ovisnosti dobivenih u ovom radu uočava se da za sva tri ispitivana porozna sloja vrijednosti modificiranog koeficijenta trenja se smanjuju povećanjem modificirane Reynoldsove značajke. Međutim, zapaža se i to da kod manjih ispitivanih čestica ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0025; 0,0035$  m) ovisnost je linearnog karaktera za razliku od sloja s najvećim ispitivanim česticama gdje ta ovisnost poprima eksponencijalni oblik. Tako različita ovisnost može se i ovdje pripisati činjenici da strujanje kod tog poroznog sloja ima izrazito prijelazan karakter, odnosno ima tendenciju približavanja turbulentnim uvjetima strujanja fluida ( $Re_p \approx 300$ ).

Za porozne slojeve sastavljene od čestica ( $d_{\check{c},ekv} \leq 0,0035$  m) dobivene korelacijske jednadžbe se približavaju teorijskom odnosu  $f_p$  i  $Re_p$  za laminarno područje ( $f_p = 150/Re_p$ ). Odstupanja se mogu objasniti činjenicom što modificirane Reynoldsove značajke imaju vrijednosti znatno veće od pet, tako da strujanje ipak nije bilo laminarno.

U završnom dijelu rada izvršena je usporedba eksperimentalno i teorijski određenih vrijednosti pada tlaka kroz ispitivane porozne slojeve. Dobivene eksperimentalne vrijednosti pada tlaka uspoređivane su s vrijednostima određenih Ergunovom, Carman-Kozenyjevom te Burke-Pulmmerovom jednadžbom. Prije analize rezultata potrebno je naglasiti da se modificirana Reynoldsova značajka kod svih provedenih eksperimentalnih ispitivanja nalazila u prijelaznom području ( $5 < Re_p < 2000$ ) zbog čega su uspoređivanja izvršena sa sve tri navedene jednadžbe.

Uspoređujući vrijednosti pada tlaka kroz ispitivane porozne slojeve određene teorijski, primjenom Ergunove jednadžbe, s eksperimentalno dobivenim vrijednostima primjetna su određena odstupanja (Slike 21, 23 i 25). Ta odstupanja rastu povećanjem veličine čestica poroznog sloja. Potrebno je naglasiti da je kod sloja s najmanjom ispitivanom veličinom čestica ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0025$  m) vidljivo izuzetno dobro slaganje vrijednosti pada tlaka određenih eksperimentalno i teorijski.

Primjenjujući Carman-Kozenyjevu jednadžbu primjetna su mnogo veća odstupanja teorijskih vrijednosti pada tlaka od onih određenih eksperimentalnim putem. Ta odstupanja su veća što je veličina čestica u sloju veća (Slika 22, 24 i 26). Zbog navedenog Carman-Kozenyjeva jednadžba ne bi se mogla sugerirati kao primjenjiva za ispitivane porozne slojeve.

Sličan zaključak mogao bi se donjeti i za primjenu Burke-Pulmmerove jednadžbe koja se inače upotrebljava pri turbulentnim uvjetima protjecanja fluida kroz porozni sloj. Iznimka je porozni sloj sastavljen od čestica ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0035$  m) gdje se uočava relativno dobro slaganje eksperimentalno i teorijski određenih vrijednosti pada tlaka. Međutim, povećanjem ili smanjenjem veličina čestica sloja odstupanja postaju značajna.

U svakom slučaju Ergunova jednadžba se pokazala najprimjerenijom za teorijsku procjenu pada tlaka pri strujanju fluida kroz analizirane porozne slojeve. Ta tvrdnja se posebno odnosi na porozne slojeve sastavljene od manjih veličina čestica, što je vrlo bitno za kemijsko inženjerstvo gdje su porozni slojevi uglavnom i sastavljeni od finijih čestica ( $d_{\check{c},ekv} \leq 0,0025$  m).

S obzirom na to da su u ovom radu ispitivana samo tri porozna sloja, tj. sloja s tri različite veličine čestica, ovu tvrdnju trebalo bi dodatno dokazati daljnim ispitivanjima koja bi obuhvatila porozne slojeve šireg raspona veličine čestica.

## **5. ZAKLJUČCI**

Na temelju provedenih eksperimenata i dobivenih rezultata koji se odnose na analizu pada tlaka pri strujanju fluida kroz porozni sloj, mogu se donjeti sljedeći zaključci:

- Prije analize pada tlaka pri strujanju fluida kroz porozni sloj neophodno je izvršiti karakterizaciju tog poroznog sloja. Karakterizaciju je orijentaciono moguće izvršiti koristeći mjerljive veličine ispitivanog sloja. Za precizniju karakterizaciju poroznog sloja ipak se zahtjeva uporaba sofisticiranijih tehnika.
- Karakterizacijom ispitivanih poroznih slojeva može se zaključiti da povećanjem veličine čestica se smanjuje poroznost sloja, dok se ekvivalentni promjeri pora u tim slojevima, kao i brzine strujanja fluida kroz pore slojeva značajno povećavaju.
- Pri konstantnoj vrijednosti površinske brzine strujanja fluida povećanjem visine poroznog sloja rastu i ukupni gubitci energije fluida. Ti gubitci se manifestiraju padom tlaka u sustavu. U svim analiziranim slučajevima primjetna je linerana ovisnost pada tlaka o visini poroznog sloja.
- Za određenu visinu poroznog sloja povećanjem površinske brzine strujanja fluida raste i vrijednost pad tlaka u sustavu. Taj odnos je također linearan za porozne slojeve čija je veličina čestica manja od 0,0035 m. Kod najvećih ispitivanih čestica ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0045$  m) ta ovisnost poprima eksponencijalan karakter.
- Za određenu konstantnu vrijednost površinske brzine strujanja fluida, povećanjem poroznosti sloja povećava se pad tlaka u sloju.
- Vrijednost modificiranog koeficijenta trenja se smanjuje s povećanjem modificirane Reynoldsove značajke. Kod manjih ispitivanih čestica ( $d_{\check{c},ekv} \leq 0,0035$  m) ta ovisnost je linearna, za razliku od sloja s najvećim ispitivanim česticama ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0045$  m) gdje ona poprima eksponencijalni oblik. Razlog tome je najvjerojatnije izrazito prijelazan karakter strujanja fluida u sloju s najvećim ispitivanim česticama.



- Usporedbom teorijski i eksperimentalno određenih vrijednosti pada tlaka najmanja odstupanja se uočavaju primjenom Ergunove jednadžbe. To je posebno naglašeno kod poroznog sloja sastavljenog od najmanjih ispitivanih čestica ( $d_{\check{c},ekv} = 0,0025$  m). Za vjerodostojniji zaključak sugerira se analiza strujanja fluida kroz porozne slojeve u većem rasponu veličina čestica.

## **6. LITERATURA**

1. A. Glasnović, Prijenos tvari i energije (skripta za internu uporabu), Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2007, str. 57 – 62.
2. E. Mitrović Kessler, Prijenos tvari i energije (skripta za internu uporabu), Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu, Split, 1991, str. 74 – 100.
3. A. Glasnović, A. Sander, Prijenos tvari i energije (skripta za internu uporabu), Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2016, str. 48.
4. R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot, Transport Phenomena, John Wiley & Sons, Inc., 2nd Edit., 2006, str. 180 – 208.
5. W. J. Beek, K. M. K. Muttzall, J. W. van Heuven, Transport Phenomena, John Wiley & Sons, Inc., 2nd Edit., New York, 1999, str. 104 – 125.
6. G. G. Brown et al., Unit Operations, John Wiley & Sons, Inc., 7th Edit., New York, 1960, str. 210 – 219.
7. A. Simonović, D. Vuković, S. Cvijović, S. Končar-Đurđević, Tehnološke operacije I – Mehaničke operacije, Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, 6. izdanje, Beograd, 1987, str. 198 – 208.
8. A. J. Geankoplis, Transport Processes and Unit Operations, Prentice-Hall International, Inc., 3rd Edit., New Jersey, 1993, str. 114 – 127.
9. J. P. Kardum, Procesi prijenosa i separacija, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2016, str. 43 – 46.
10. URL:[https://www.mdpi.com/fluids/fluids-04-00116/article\\_deploy/html/images/fluids-04-00116-g005.png](https://www.mdpi.com/fluids/fluids-04-00116/article_deploy/html/images/fluids-04-00116-g005.png) (09.08.2022)
11. F. Zdanski et al., Tehnološke operacije – praktikum, Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, 5. izdanje, Beograd, 1987, str. 116 – 125.
12. R. S. Brodkey, H. C. Hershey, Transport Phenomena – A Unified Approach, McGraw-Hill Book Company, New York, 1988, str. 600 – 637.
13. M. Maksimović, Tehnološke operacije, Tehnološki fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, 2. izdanje, Banja Luka, 2007, str. 243 – 251.
14. URL:<https://www.ajsonline.org/content/ajs/316/3/241/F10.large.jpg> (10.08.2022)

15. URL:<https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0032591020306033-gr3.jpg> (10.08.2022)
16. S. Rozgaj, A. Glasnović, Tehnološke operacije, Profil, 1. izdanje, Zagreb, 2007, str. 73 – 80.
17. M. Maksimović, Operacijski aparati u procesnoj industriji, Tehnološki fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, Banja Luka, 2002, str. 256.
18. J. D. Seader, E. J. Henley, D. K. Roper, Separation process principles – Chemical and Biochemical Operations, John Wiley & Sons, Inc., 3rd Edit., New York, 2011, str. 206 – 211.
19. URL:[https://www.crcleanair.com/wp-content/uploads/2013/12/air\\_library\\_technicalbulletins5\\_pic1.jpg](https://www.crcleanair.com/wp-content/uploads/2013/12/air_library_technicalbulletins5_pic1.jpg) (16.08.2022)
20. F. Andreola, C. Leonelli, M. Romagnoli, P. Miselli, Techniques Used to Determine Porosity, American Ceramic Society Bulletin, July 2000, str. 49 – 52.