

Strujanje fluida kroz porozni sloj

Babić, Neva

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:167:180285>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-02**

Repository / Repozitorij:

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



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO – TEHNOLOŠKI FAKULTET

STRUJANJE FLUIDA KROZ POROZNI SLOJ

ZAVRŠNI RAD

NEVA BABIĆ

Matični broj: 1275

Split, rujan 2022.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO – TEHNOLOŠKI FAKULTET
PREDDIPLOMSKI STUDIJ KEMIJSKE TEHNOLOGIJE
KEMIJSKO INŽENJERSTVO

STRUJANJE FLUIDA KROZ POROZNI SLOJ

ZAVRŠNI RAD

NEVA BABIĆ

Matični broj: 1275

Split, rujan 2022.

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

FLUID FLOW THROUGH THE POROUS LAYER

BACHELOR THESIS

NEVA BABIĆ

Parent number: 1275

Split, September 2022.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

ZAVRŠNI RAD

Sveučilište u Splitu
Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu
Preddiplomski studij Kemijska tehnologija
Smjer: Kemijsko inženjerstvo

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Kemijsko inženjerstvo

Tema rada je prihvaćena na 25. sjednici Fakultetskog vijeća Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu održanoj dana 18. ožujka 2022.

Mentor: prof. dr. sc. Nenad Kuzmanić

STRUJANJE FLUIDA KROZ POROZNI SLOJ

Neva Babić, 1275

Sažetak: Cilj ovog rada bio je ispitivanje utjecaja strukture poroznih slojeva, kao i površinske brzine strujanja fluida na vrijednosti pada tlaka u sustavu. Pad tlaka direktna je posljedica otpora koji se pojavljuju tijekom strujanja fluida kroz određeni porozni sloj. Zbog značajnog utjecaja strukture sloja na hidrodinamička zbivanja unutar njega izvršena je detaljna karakterizacija triju ispitivanih slojeva. Za kvantitativan opis koristile su se lako mjerljive veličine te su se tako indirektnim putem dobile određene karakteristike sloja. Eksperimentalno je uočeno da se povećanjem visine poroznog sloja pad tlaka u sustavu značajno povećava. Pri nižim vrijednostima površinskih brzina strujanja fluida ($v_a < 0,019 \text{ m s}^{-1}$) pad tlaka raste linearno s povećanjem visine, dok je za veće vrijednosti v_a taj porast eksponencijalan. Također je uočeno da povećanje površinske brzine strujanja, pri konstantnoj visini poroznog sloja, uzrokuje porast energetske gubitaka. Vrijednost pada tlaka kroz porozni sloj u tom slučaju raste eksponencijalno s povećanjem v_a . Usporedbom eksperimentalno dobivenih vrijednosti pada tlaka za ispitivane porozne slojeve s vrijednostima određenim teorijskim jednadžbama, uočava se da su odstupanja najmanja pri korištenju Ergunove i/ili Burke-Plummerove jednadžbe, no za pouzdaniji zaključak sugerira se provedba daljnjih istovjetnih ispitivanja u kojima bi se obuhvatili porozni slojevi većeg raspona veličina čestica.

Ključne riječi: pad tlaka, porozni sloj, poroznost, površinska brzina fluida, visina poroznog sloja

Rad sadrži: 58 stranica, 30 slika, 10 tablica, 17 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.

Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u knjižnici Kemijsko-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
Study orientation: Chemical Engineering

Scientific area: Technical Sciences

Scientific field: Chemical Engineering

Thesis subject was approved by Faculty Council of Faculty of Chemistry and Technology, Session no. 25 on March 18, 2022.

Mentor: Nenad Kuzmanić, PhD, Full prof.

FLUID FLOW THROUGH THE POROUS LAYER

Neva Babić, 1275

Abstract: The purpose of this work was to examine the influence of the structure of the porous layers, as well as the surface velocity of the fluid flow on the values of the pressure drop in the system. The pressure drop is a direct consequence of the resistance that appears during the fluid flow through a specific porous layer. Due to the significant influence of the structure of the layer on the hydrodynamic conditions within it, a detailed characterization of the three examined layers was carried out. For the quantitative description, easily measurable quantities were used, thus indirectly obtaining certain characteristics of the layer. It was experimentally observed that by increasing the height of the porous layer, the pressure drop in the system increases significantly. At lower values of surface fluid flow velocities ($v_a < 0,019 \text{ m s}^{-1}$), the pressure drop increases linearly with increasing height, while for higher values of v_a , this increase is exponential. It was also observed that an increase in surface flow velocity, at a constant height of the porous layer, causes an increase in energy losses. The value of the pressure drop through the porous layer in that case increases exponentially with increasing v_a . By comparing the experimentally obtained pressure drop values for the examined porous layers with the values determined by theoretical equations, it is observed that the deviations are the smallest when using the Ergun and/or Burke-Plummer equation, but for a more reliable conclusion, it is suggested to conduct further identical tests in which the porous layers would be included a larger range of particle sizes.

Keywords: pressure drop, porous layer, porosity, fluid superficial velocity, porous layer height

Thesis contains: 58 pages, 30 figures, 10 tables, 17 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, 2022.

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

Rad je izrađen u laboratoriju Zavoda za kemijsko inženjerstvo Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu pod vodstvom prof. dr. sc. Nenada Kuzmanića u razdoblju od 01. ožujka do 01. lipnja 2022. godine.

Najiskrenije se zahvaljujem svom mentoru prof. dr. sc. Nenadu Kuzmaniću na velikoj pomoći i vremenu koje mi je posvetio tijekom izrade ovog rada.

Također zahvaljujem tehničaru Juri Škrapiću na pruženoj pomoći tijekom izrade eksperimentalnog dijela završnog rada.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

1. Sastaviti i uputiti u rad aparaturu pomoću koje će se analizirati strujanje fluida kroz porozni sloj određenih karakteristika.
2. Izvršiti detaljnu karakterizaciju triju različitih poroznih slojeva, čiji su ekvivalentni promjeri čestica $d_{\text{e,ekv}} = 0,0055 \text{ m}$; $0,0065 \text{ m}$ i $0,012 \text{ m}$.
3. Ispitati utjecaj visine poroznih slojeva na vrijednost pada tlaka pri različitim površinskim brzinama strujanja fluida kroz taj sloj.
4. Eksperimentalno analizirati utjecaj površinske brzine strujanja fluida na pad tlaka pri različitim visinama poroznih slojeva.
5. Odrediti odnos modificiranog koeficijenta trenja o modificiranoj Reynoldsovoj značajci za analizirane porozne slojeve.
6. Usporediti eksperimentalno određene vrijednosti pada tlaka kroz porozni sloj s onima određenim teorijskim jednadžbama iz literature.

SAŽETAK

STRUJANJE FLUIDA KROZ POROZNI SLOJ

Cilj ovog rada bio je ispitivanje utjecaja strukture poroznih slojeva, kao i površinske brzine strujanja fluida na vrijednosti pada tlaka u sustavu. Pad tlaka direktna je posljedica otpora koji se pojavljuju tijekom strujanja fluida kroz određeni porozni sloj. Zbog značajnog utjecaja strukture sloja na hidrodinamička zbivanja unutar njega izvršena je detaljna karakterizacija triju ispitivanih slojeva. Za kvantitativan opis koristile su se lako mjerljive veličine te su se tako indirektnim putem dobile određene karakteristike sloja. Eksperimentalno je uočeno da se povećanjem visine poroznog sloja pad tlaka u sustavu značajno povećava. Pri nižim vrijednostima površinskih brzina strujanja fluida ($v_a < 0,019 \text{ m s}^{-1}$) pad tlaka raste linearno s povećanjem visine, dok je za veće vrijednosti v_a taj porast eksponencijalan. Također je uočeno da povećanje površinske brzine strujanja, pri konstantnoj visini poroznog sloja, uzrokuje porast energetske gubitaka. Vrijednost pada tlaka kroz porozni sloj u tom slučaju raste eksponencijalno s povećanjem v_a . Usporedbom eksperimentalno dobivenih vrijednosti pada tlaka za ispitivane porozne slojeve s vrijednostima određenim teorijskim jednadžbama, uočava se da su odstupanja najmanja pri korištenju Ergunove i/ili Burke-Plummerove jednadžbe, no za pouzdaniji zaključak sugerira se provedba daljnjih istovjetnih ispitivanja u kojima bi se obuhvatili porozni slojevi većeg raspona veličina čestica.

Ključne riječi: pad tlaka, porozni sloj, poroznost, površinska brzina fluida, visina poroznog sloja

SUMMARY

FLUID FLOW THROUGH THE POROUS LAYER

The purpose of this work was to examine the influence of the structure of the porous layers, as well as the surface velocity of the fluid flow on the values of the pressure drop in the system. The pressure drop is a direct consequence of the resistance that appears during the fluid flow through a specific porous layer. Due to the significant influence of the structure of the layer on the hydrodynamic conditions within it, a detailed characterization of the three examined layers was carried out. For the quantitative description, easily measurable quantities were used, thus indirectly obtaining certain characteristics of the layer. It was experimentally observed that by increasing the height of the porous layer, the pressure drop in the system increases significantly. At lower values of surface fluid flow velocities ($v_a < 0,019 \text{ m s}^{-1}$), the pressure drop increases linearly with increasing height, while for higher values of v_a , this increase is exponential. It was also observed that an increase in surface flow velocity, at a constant height of the porous layer, causes an increase in energy losses. The value of the pressure drop through the porous layer in that case increases exponentially with increasing v_a . By comparing the experimentally obtained pressure drop values for the examined porous layers with the values determined by theoretical equations, it is observed that the deviations are the smallest when using the Ergun and/or Burke-Plummer equation, but for a more reliable conclusion, it is suggested to conduct further identical tests in which the porous layers would be included a larger range of particle sizes.

Keywords: pressure drop, porous layer, porosity, fluid superficial velocity, porous layer height

SADRŽAJ

UVOD	
1. OPĆI DIO	1
1.1. STRUJANJE FLUIDA	2
1.2. OPTJECANJE FLUIDA	8
1.3. Strujanje fluida kroz porozni sloj	11
1.3.1. Karakterizacija poroznog sloja	11
1.3.2. Određivanje pada tlaka kroz porozni sloj	14
2. EKSPERIMENTALNI DIO	17
2.1. Opis aparature za provedbu eksperimenta	18
2.2. Provedba eksperimenta	22
2.2.1. Karakterizacija poroznog sloja	23
2.2.2. Određivanje pada tlaka kroz porozni sloj	27
3. REZULTATI	28
3.1. Karakterizacija poroznog sloja	29
3.2. Utjecaj visine poroznog sloja na pad tlaka pri različitim brzinama strujanja fluida	33
3.3. Utjecaj površinske brzine fluida na pad tlaka kroz porozni sloj pri različitim visinama sloja	36
3.4. Ovisnost pada tlaka o poroznosti sloja	39
3.5. Odnos modificiranog koeficijenta trenja i modificirane Reynoldsove značajke za analizirane porozne sustave	40
3.6. Usporedba eksperimentalno određenih vrijednosti pada tlaka kroz porozni sloj s teorijski određenim vrijednostima	41
4. RASPRAVA	47
5. ZAKLJUČAK	53
6. LITERATURA	56

UVOD

Strujanje fluida kroz porozni sloj, zbog geometrijskih karakteristika samog sloja, predstavlja izrazito kompleksan sustav. Takvi slojevi načinjeni su od čestica različitih veličina i oblika, koje slučajnim slaganjem tvore nepravilne kanale različitog promjera i duljine kroz koje pod utjecajem pokretačke sile struji fluid.¹

Tijekom strujanja fluida kroz porozni sloj uočavaju se efekti karakteristični za protjecanje, ali i optjecanje fluida kroz nakupinu čestica. I u ovom slučaju pokretačka sila strujanja fluida je razlika tlakova, dok su nazočni otpori posljedica viskoznog trenja i otpora uslijed oblika čestica. Samo objašnjenje ove pojave je vrlo složeno upravo zbog karakteristika poroznog sloja, koje je vrlo teško definirati. Stoga se za kvantitativan opis obično koriste lako mjerljive veličine te se tako indirektnim putem dolazi do određenih karakteristika sloja.

Ovisno o veličini čestica od kojih je sačinjen porozni sloj, unutar njega se mogu formirati uži ili širi kanali kroz koje fluid struji. U slučaju da su finije čestice u pitanju, kanali su uski i pružaju veliki otpor strujanju fluida pa on obično struji laminarno. Kod krupnijih čestice pore su šire, a otpori manji tako da fluid može strujati i laminarno i turbulentno.

Važnost razumijevanja navedenog fenomena za kemijsku industriju je od velikog značaja iz razloga što se ova se vrsta strujanja susreće u brojnim tehnološkim operacijama. Tipični primjer su: npr. Operacija filtracije, apsorpcije, taloženja, ali i fluidizacije, u kojoj fluid nastružava čvrste čestice s ciljem ostvarenja što boljeg kontakta između njih.

Cilj ovog rada je ispitivanje utjecaja strukture poroznih slojeva, kao i površinske brzine strujanja fluida na vrijednost pada tlaka u takvim sustavima. Brzine fluida tijekom ispitivanja će biti takve da ne remete geometrijsku strukturu poroznih slojeva. Drugim riječima, visina poroznih slojeva tijekom protjecanja fluida kroz njih će se održavati konstantnom. Zbog značajnog utjecaja strukture sloja na hidrodinamička zbivanja unutar njega, izvršit će se detaljna karakterizacija ispitivanih poroznih slojeva. Dobiveni eksperimentalni rezultati bit će uspoređeni s onima dobivenim teorijskim izrazima iz literature.

1. OPĆI DIO

1.1. STRUJANJE FLUIDA

Fluidi su tvari koje se zbog djelovanja smičnog naprezanja neprestano deformiraju. Takav oblik deformacije je nepovratan i naziva se strujanje. Fluidi se dijele na kapljevine i plinove. Razlika je u tome što se kapljevine smatraju nestlačivima jer promjenom tlaka neznatno mijenjaju volumen. U posudi koju djelomično ispunjavaju, oblikovat će slobodnu površinu, za razliku od plinova koji zauzimaju cijeli volumen. Osim toga, plinovi su stlačivi i povećanjem tlaka im se smanjuje volumen.²

S obzirom na promjenu procesnih parametara i varijabli s vremenom razlikuju se dvije vrste strujanja – stacionarno i nestacionarno. Kod stacionarnog strujanja brzina, protok i smjer strujanja fluida, kao i ostale fizikalne karakteristike (npr. temperatura, sastav, gustoća...) ne pokazuju promjenu s vremenom u određenim točkama sustava pa iskazivanjem procesnih veličina s oznakom „U“ vrijedi:

$$\frac{dU}{dt} = 0 \quad (1)$$

Kod nestacionarnog strujanja vrijedi da se vrijednosti procesnih veličina mijenjaju s vremenom, što se iskazuje na sljedeći način:

$$\frac{dU}{dt} \neq 0 \quad (2)$$

Tijekom strujanja fluida kroz neku cijev fluid je neprestano u kontaktu sa čvrstom stijenkom, što uzrokuje pojavu trenja. U tom slučaju nazočne su se dvije vrste trenja, unutrašnje (trenje između slojeva fluida) i trenje između slojeva fluida i čvrste površine koju fluid dodiruje.

Isaac Newton je definirao silu trenja pomoću izraza (3), iz kojeg je razvidno da se ona definira kao sila koja djeluje između paralelnih slojeva fluida, međusobno udaljenih za Δy , koji se gibaju različitim brzinama Δv . Sila trenja je proporcionalna relativnoj brzini i

površini slojeva A , a obrnuto proporcionalna međusobnoj udaljenosti slojeva Δy . Negativan predznak upućuje na smjer djelovanja sile. Naime, ona djeluje suprotno od djelovanja sile inercije zbog koje fluid struji.³

$$F_{tr} = \mu \cdot A \cdot \left(-\frac{\Delta v}{\Delta y} \right) \quad (3)$$

gdje je:

F_{tr} – sila trenja (N)

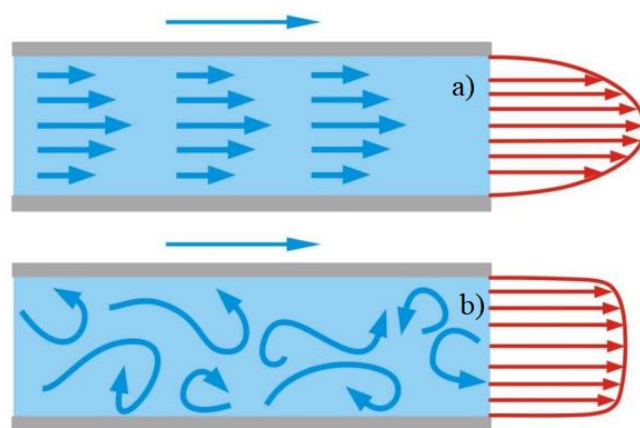
μ – dinamička viskoznost (Pa·s)

A – površina slojeva (m²)

Δy – udaljenost između slojeva (m)

Δv – brzina kretanja slojeva (m s⁻¹)

Analizirajući strujanje fluida kroz cijev *Osborne Reynolds* je uočio postojanje dviju vrsta strujanja fluida. Kod manjih brzina strujanja slojevi fluida se gibaju paralelno i međusobno se ne miješaju. Takvo strujanje je okarakterizirano kao **laminarno ili slojevito**. Druga vrsta strujanja je prisutna kada su brzine gibanja fluida veće, pri čemu je slojevitost strukture fluida značajno narušena te se tada govori o **turbulentnom ili vrtložnom strujanju**.⁴



Slika 1. a) Laminarno i b) turbulentno strujanje fluida.⁵

Na temelju ovih istraživanja *Reynolds* je dokazao da vrsta strujanja fluida ovisi o brzini strujanja v (m s^{-1}), promjeru cijevi d (m), gustoći fluida ρ (kg m^{-3}) i dinamičkoj viskoznosti μ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$). Dimenzijskom analizom dobio je tzv. **Reynoldsovu značajku** koja za strujanje fluida kroz okrugle cijevi ima sljedeći oblik:

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad (4)$$

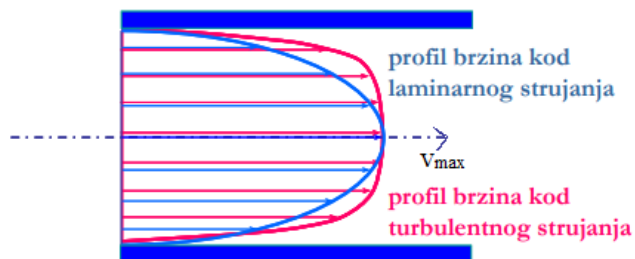
Ova bezdimenzijska veličina zapravo predstavlja omjer sila koje se javljaju pri protjecanju fluida, tj. omjer sile inercije F_i (sila koja potiče strujanje fluida) i sile trenja F_{tr} (sila koja se opire strujanju fluida):

$$Re = \frac{F_i}{F_{tr}} \quad (5)$$

Numerička vrijednost Reynoldsove značajke govori o vrsti strujanja fluida, a za $d, \mu, \rho = \text{konst.}$ ona ovisi isključivo o brzini strujanja fluida. Pri manjim vrijednostima Re – značajke imamo manje brzine strujanja, odnosno laminarno strujanje, a pri većim vrijednostima utjecaj sile inercije je veći i strujanje ima turbulentan karakter. Eksperimentalno je određena kritična vrijednost Reynoldsovog broja koja se javlja pri prijelazu iz laminarnog u turbulentno strujanje, tj. pri kritičnoj brzini kod strujanja fluida kroz glatku cijev:

$$Re_{kritični} = \frac{v_{kritični} \cdot d \cdot \rho}{\mu} = 2320 \quad (6)$$

Laminarno i turbulentno strujanje značajno se razlikuju, a jedna od takvih razlika je i raspodjela lokalnih brzina fluida po presjeku cijevi (*Slika 2.*).



Slika 2. Usporedba profila brzina pri laminarnom i turbuletnom strujanju.⁶

U oba slučaja maksimalna brzina fluida je u osi cijevi. Međutim, kod laminarnog strujanja odnos maksimalne i srednje brzine strujanja fluida je:

$$\frac{v_{srednja}}{v_{maksimalna}} = 0,5 \quad (7)$$

dok odnos pri turbulentnom strujanju iznosi:

$$\frac{v_{srednja}}{v_{maksimalna}} = 0,7 \text{ do } 0,9 \quad (8)$$

Za niži intenzitet turbulencije taj odnos je 0,7, dok za više vrijednosti Reynoldsove značajke on iznosi 0,9.

Kako bi pri strujanju fluid nadvladao trenje, on treba potrošiti određenu količinu energije. Ta utrošena energija predstavlja nepovrativi **gubitak energije uslijed trenja** u cjevovodu i očituje se kao pad tlaka Δp . On se u praksi obično izražava kao gubitak visine h_w :

$$h_w = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} \quad (9)$$

Pad tlaka uzrokovan trenjem eksperimentalno se može odrediti pomoću piezometrijskih cijevi, ali se njegova vrijednost može procijeniti i korištenjem određenih jednadžbi.

Za **laminarno** strujanje *Hagen* i *Poiseuille* su izveli jednadžbu pomoću koje se određuje gubitak energije uslijed trenja h_w kroz ravnu cijev:

$$h_w = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} = \frac{32 \cdot \pi \cdot l}{d^2 \cdot g} \cdot v \quad (10)$$

gdje je

h_w – gubitak energije uslijed trenja (m)

l – dužina cijevi (m)

d – promjer cijevi (m)

g – gravitacijsko ubrzanje ($g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$)

Primjenom dimenzijske analize i pomoću eksperimentalnih podataka *Darcy* i *Weissbach* su izveli izraz za gubitak energije uslijed trenja h_w kroz ravnu cijev, koji se koristi za sve vrste strujanja⁷:

$$h_w = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (11)$$

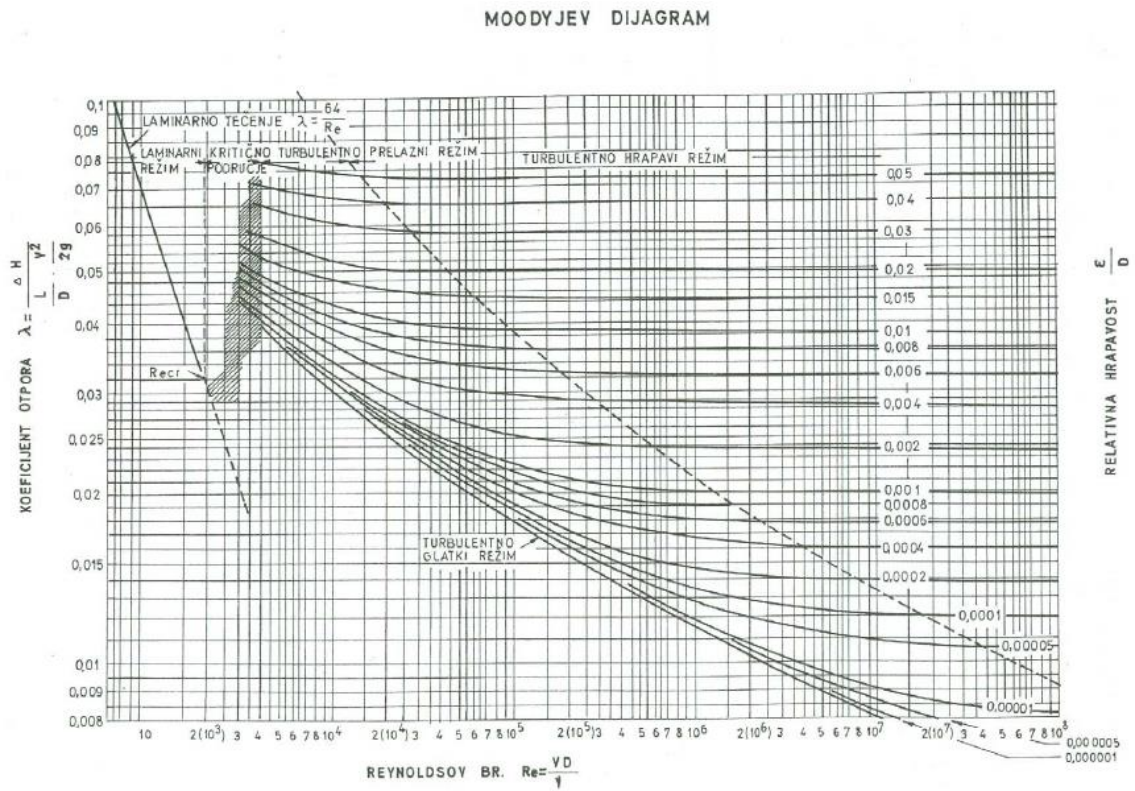
gdje je:

λ – faktor trenja (/)

Ako se Δp želi izraziti u *Pascalima*, ista jednadžba poprima sljedeći oblik:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{\mu} \quad (12)$$

Faktor trenja λ je promjenjiva veličina i ona upućuje na utjecaj sile trenja, sile inercije i geometrijskih karakteristika cjevovoda na strujanje fluida, a ovisnost faktora trenja o vrsti strujanja fluida i relativnoj hrapavosti prikazana je **Moodyjevim dijagramom** (Slika 3.).



Slika 3. – Moodyjev dijagram.⁸

1.2. OPTJECANJE FLUIDA

Optjecanje predstavlja strujanje fluida oko čvrstog tijela. Slučaj kada je tijelo uronjeno u fluid koji se giba je u pravilu isti kao kada se tijelo giba u mirujućem fluidu jer se sagledava relativna brzina između tijela i fluida. U obje varijante imamo **silu trenja** koja je posljedica otpora oblika i viskoznog trenja. Kod optjecanja Reynoldsova značajka poprima oblik:

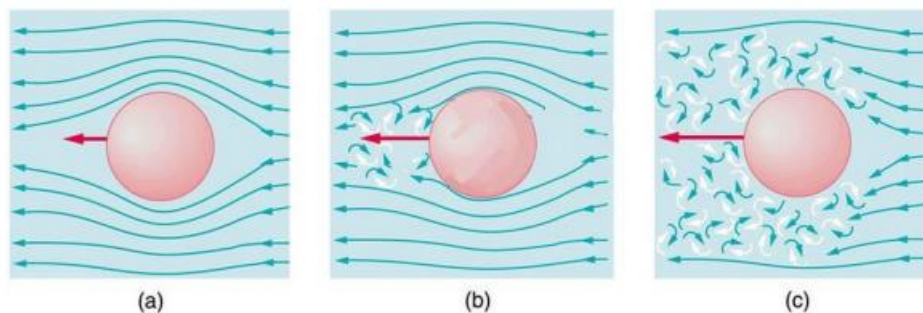
$$Re = \frac{v_r \cdot d_\xi \cdot \rho}{\mu} \quad (13)$$

gdje je:

d_ξ - promjer promatrane čestice oko koje struji fluid (m)

v_r - relativna brzina (m s^{-1})

Optjecanje također može biti laminarno, prijelazno ili turbulentno (*Slika 4.*). **Laminarno optjecanje** obuhvaća sporo gibanje sitnih čestica kroz fluid, pri čemu se ne remeti struktura fluida. Kod takvih uvjeta navedena Reynoldsova značajka ima vrijednosti $Re < 1$. **Turbulentno optjecanje** je prisutno kada se velike čestice gibaju brzo kroz fluid i iznad njih se stvaraju vrtlozi (tzv. mrtve zone). Struktura fluida je u tom slučaju kompletno poremećena. Odvija se pri $Re > 1000$. Prijelazno optjecanje se pojavljuje u području $1 < Re < 1000$ i u tom slučaju prisutne su karakteristike obje vrste optjecanja.⁹



Slika 4. Optjecanje u a) laminarnim, b) prijelaznim i c) turbulentnim uvjetima.¹⁰

Kod optjecanja se također pojavljuju određeni otpori objedinjeni u sili hidrodinamičkog otpora F_D . Ta sila u sebi sadrži otpor uslijed viskoznog trenja i otpor uslijed oblika čestice:

$$F_D = F_{uk} = F_{tr} + F_i \quad (14)$$

Sila trenja F_{tr} nastaje zbog viskoznog trenja (trenje između slojeva fluida te fluida i površine uronjenog tijela) koje uzrokuje gubitak energije (pad tlaka), a očituje se kao rezultanta sila koja djeluje na tijelo u smjeru strujanja fluida. **Sila otpora uslijed oblika F_i** uzrokovana je oblikom samog tijela.¹¹

Pri malim vrijednostima Re – značajke uglavnom prevladava viskozno trenje, ali prisutan je i otpor uslijed oblika, s obzirom da fluid nestrujava na čvrstu tvar. Pri većim vrijednostima Reynoldsove značajke dominira otpor oblika, pogotovo ako je oblik izrazito nepravilan.

Kod laminarnog optjecanja sila otpora je prema *Stokesu* definirana kao:

$$F_D = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_\xi \cdot v \quad (15)$$

Izraz za silu otpora, određen dimenzijskom analizom, a koji vrijedi za sva područja Reynoldsove značajke ima oblik:

$$F_D = C_D \cdot A \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2} \quad (16)$$

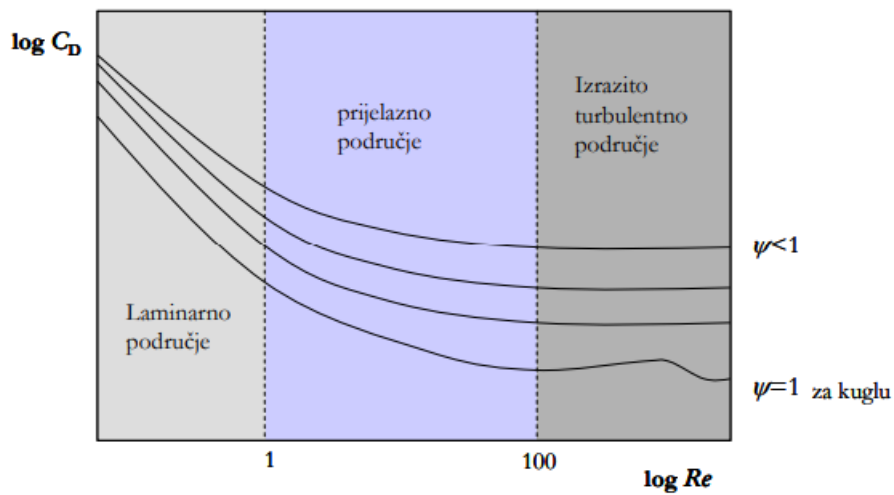
gdje je:

C_D – faktor otpora koji ovisi o Reynoldsovoj značajci i sfericitetu (/)

A – površina tijela okomita na smjer strujanja fluida (m²)

Faktor otpora C_D određuje se pomoću dijagrama $C_D - Re$ gdje se na apscisi nalaze vrijednosti Reynoldsove značajke Re , a na ordinatama faktor otpora C_D i sfericitet ψ , tj.

odnos površine kugle i površine tijela nepravilnog oblika istog volumena.¹² Na *Slici 5.* je shematski prikazana ovisnost faktora otpora o Reynoldsovoj značajci i sfericitetu.



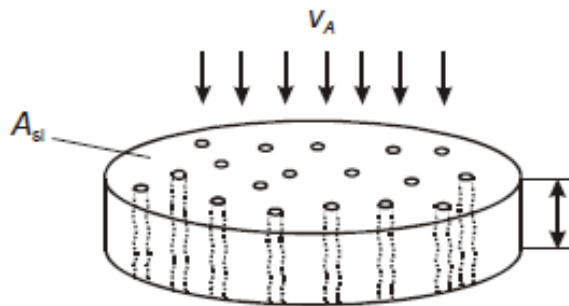
Slika 5. Ovisnost faktora otpora o Reynoldsovoj značajci i sfericitetu.¹³

1.3. Strujanje fluida kroz porozni sloj

Strujanje fluida kroz porozni sloj čestica osnova je mnogih jediničnih operacija u kemijskom inženjerstvu kao što su fluidizacija, filtracija, apsorpcija, itd. Porozni sloj se uglavnom sastoji od velikog broja čestica različitih oblika i veličina koje između sebe formiraju nepravilne pore kroz koje struji fluid. Ovisno o prisutnoj pokretačkoj sili (razlici tlakova) i otporima koje sloj pruža, fluid može strujati brže ili sporije kroz pore. U slučaju da su finije čestice u pitanju, pore su uske i pružaju veliki otpor strujanju fluida pa se i on giba sporo, odnosno struji laminarno. Za krupnije čestice, pore su šire i otpor je manji tako da fluid može strujati i laminarno i turbulentno.¹⁴

1.3.1. Karakterizacija poroznog sloja

Kada se analizira strujanje fluida kroz porozni sloj, nužno je poznavanje karakteristika samog sloja.



Slika 6. Shematski prikaz strujanja fluida kroz porozni sloj.¹

Zbog specifične strukture poroznog sloja, veoma je teško direktno odrediti njegove osnovne karakteristike. Stoga se koriste lako mjerljive veličine pomoću kojih se indirektno određuju karakteristike sloja. Osnovne karakteristike poroznog sloja koje je moguće odrediti na takav način su¹⁵:

- **Poroznost sloja, ε** , koja predstavlja udio pora u poroznom sloju, a definira se kao:

$$\varepsilon = \frac{V_{SL} - V_{\check{c}}}{V_{SL}} = \frac{V_{\check{s}}}{V_{SL}} = \frac{V_P}{V_{SL}} \quad (17)$$

odakle slijedi:

$$1 - \varepsilon = \frac{V_{\check{c}}}{V_{SL}} \quad (18)$$

$$V_{\check{c}} = (1 - \varepsilon) \cdot V_{SL} \quad (19)$$

gdje je:

V_{SL} – volumen sloja (m^3)

$V_{\check{c}}$ – volumen čestica (m^3)

$V_{\check{s}}$ – volumen šupljina (m^3)

V_P – volumen pora (m^3)

- **Broj čestica u sloju, n** , moguće je dobiti iz omjera volumena svih čestica u poroznom sloju i volumena jedne čestice:

$$n = \frac{\text{Volumen svih čestica}}{\text{Volumen jedne čestice}} \quad (20)$$

$$n = \frac{(1 - \varepsilon) \cdot V_{SL}}{V_{\check{c}estice}} = \frac{A_{SL} \cdot l \cdot (1 - \varepsilon)}{\frac{d_{\check{c}}^3 \cdot \pi}{6}} \quad (21)$$

gdje je:

$V_{\check{c}estice}$ – volumen čestice (m^3)

A_{SL} – površina poprečnog presjeka poroznog sloja (m^2)

l – visina poroznog sloja (m)

$d_{\check{c}}$ – promjer čestice (m)

- **Ekvivalentni promjer pora u poroznom sloju, $d_{p,ekv}$, određuje se izrazom:**

$$d_{p,ekv} = 4 \cdot \frac{A_P}{O} = 4 \cdot \frac{A_P}{O} \cdot \frac{l}{l} = 4 \cdot \frac{V_P}{S_{UK}} = 4 \cdot \frac{\frac{V_P}{V_{SL}}}{\frac{S_{UK}}{V_{SL}}} \quad (22)$$

$$d_{p,ekv} = 4 \cdot \frac{\varepsilon}{S_V} \quad (23)$$

gdje je:

A_P – površina poprečnog presjeka pora (m^2)

O – nakvašeni opseg pore, tzv. nakvašeni perimetar (m)

S_{UK} – površina plašta pore (m^2)

S_V – specifična površina pora ($m^2 m^{-3}$)

- **Specifična površina pora, S_V , predstavlja slobodnu površinu čvrstih čestica unutar sloja, koja je izražena po jedinici volumena sloja:**

$$S_V = \frac{S_{UK}}{V_{SL}} = \frac{n \cdot S_{jedne\ čestice}}{V_{SL}} = \frac{\frac{A_{SL} \cdot l \cdot (1 - \varepsilon)}{d_{\check{c}}^3 \cdot \pi} \cdot d_{\check{c}}^2 \cdot \pi}{A_{SL} \cdot l} \quad (24)$$

$$S_V = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d_{\check{c}}} \quad (25)$$

gdje je:

$S_{jedne\ čestice}$ – površina jedne čestice (m^2)

- **Brzina strujanja fluida kroz porozni sloj, v_p , može se odrediti pomoću površinske brzine strujanja fluida v_a , primjenjujući jednadžbu kontinuiteta na strujanje fluida kroz porozni sloj:**

$$\dot{V}_P = \dot{V}_{SL} \quad (26)$$

$$\dot{V} = v_p \cdot A_p = v_a \cdot A_{SL} \quad (27)$$

$$v_p = v_a \cdot \frac{A_{SL} \cdot l}{A_p \cdot l} = v_a \cdot \frac{V_{SL}}{V_p} \quad (28)$$

$$v_p = \frac{v_a}{\varepsilon} \quad (29)$$

gdje je:

\dot{V}_p – volumni protok fluida kroz pore poroznog sloja ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

\dot{V}_{SL} – volumni protok fluida kojim fluid nastrojava porozni sloj ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

v_p – brzina strujanja fluida kroz pore (m s^{-1})

v_a – brzina kojom fluid dostrujava na površinu poroznog sloja (m s^{-1})

A_p – površina poprečnog presjeka pora (m^2)

A_{SL} – površina poprečnog presjeka poroznog sloja (m^2)

1.3.2. Određivanje pada tlaka kroz porozni sloj

Režim strujanja fluida kroz porozni sloj određuje se pomoću modificirane Reynoldsove značajke Re_p , koju je definirao *Sabri Ergun*. Ta značajka uzima u obzir, osim fizikalnih svojstava fluida, i kompleksne karakteristike poroznog sloja kroz koji taj fluid struji:

$$Re_p = \frac{v_a \cdot d_{\check{c},ekv} \cdot \rho}{(1 - \varepsilon) \cdot \mu} \quad (30)$$

pri čemu je:

$d_{\check{c},ekv}$ – ekvivalentni promjer čestica poroznog sloja (m)

Kako bi se odredio pad tlaka, odnosno energetski gubitak kroz porozni sloj pri protjecanju fluida, uvodi se bezdimenzijski **modificirani koeficijent trenja, f_p** :

$$f_p = \frac{\Delta p}{l} \cdot \frac{d_{\xi}}{\rho \cdot v_a^2} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)} \quad (31)$$

gdje je:

$\Delta p/l$ – pad tlaka po jedinici visine poroznog sloja (Pa m⁻¹)

Kod strujanja fluida kroz porozni sloj, pad tlaka se određuje ovisno o tome radi li se o laminarnim ili turbulentnim uvjetima:

Za laminarno strujanje kada je $Re_p < 5$ utvrđen je odnos:

$$f_p = \frac{150}{Re_p} \quad (32)$$

Iz tog je izraza moguće dobiti jednadžbu za procjenu pada tlaka po jedinici visine poroznog sloja čestica pri laminarnom strujanju – tzv. **Carman-Kozenyjevu jednadžbu**:

$$\frac{\Delta p}{l} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{v_a \cdot \mu}{d_{\xi}^2} \quad (33)$$

Ako je porozni sloj sastavljen od većih čestica, te je brzina strujanja fluida veća

($Re > 2000$) modificirani koeficijent trenja f_p poprima konstantnu vrijednost:

$$f_p = 1,75 \quad (34)$$

A pad tlaka se u tom slučaju određuje preko **Burke-Plummerove jednadžba**:

$$\frac{\Delta p}{l} = 1,75 \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{v_a^2 \cdot \rho}{d_{\xi}} \quad (35)$$

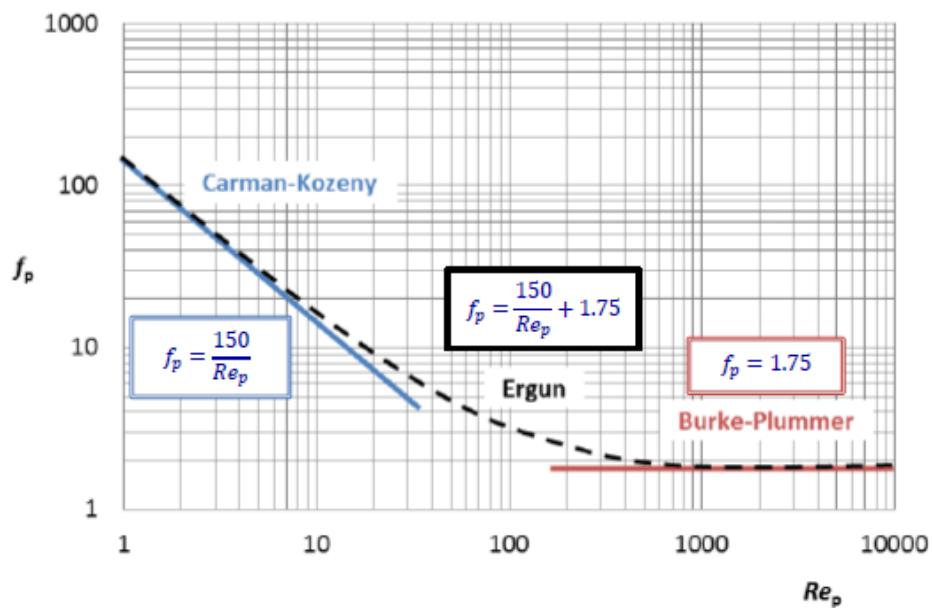
U praksi se uglavnom, radi nepravilnih čestica u poroznom sloju, istovremeno pojavljuju obje vrste strujanja, pa se ukupan pad tlaka dobiva objedinjavanjem Carman-Kozenyjeve i Burke-Plummerove jednadžbe. Taj izraz se naziva **Ergunovom jednadžbom**:

$$\frac{\Delta p}{l} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{v_a \cdot \mu}{d_\zeta^2} + 1,75 \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{v_a^2 \cdot \rho}{d_\zeta} \quad (36)$$

Navedena jednadžba vrijedi za sve vrijednosti modificirane Reynoldsove značajke Re_p , a faktor otpora se može izraziti kao:

$$f_p = \frac{150}{Re_p} + 1,75 \quad (37)$$

Ovakav oblik Ergunove jednadžbe vrlo je pogodan za grafičku prezentaciju, što je vidljivo iz *Slike 7.*:



Slika 7. Grafički prikaz Ergunove jednadžbe.¹⁶

2. EKSPERIMENTALNI DIO

2.1. Opis aparature za provedbu eksperimenta

Eksperimentalni dio rada se provodio u aparaturi, izrađenoj u Zavodu za kemijsko inženjerstvo, a koja je prikazana na *Slici 8*.



Slika 8. Aparatura za provedbu eksperimentalnih ispitivanja.

Osnovni dio aparature je kolona u kojoj nalazi porozni sloj. Kolona je izrađena od pleksiglasa kako bi se moglo što detaljnije sagledati protjecanje fluida kroz ispitivani sloj. Visina kolone je 0,98 m, dok je njen unutarnji promjer 0,034 m (*Slika 9.*).



Slika 9. Kolona s poroznim slojem čestica.

Na donjem i gornjem dijelu kolone nalaze se cijevi za dovod i odvod kapljevine, kao i priključci za U-manometar (*Slika 10.*).



a)



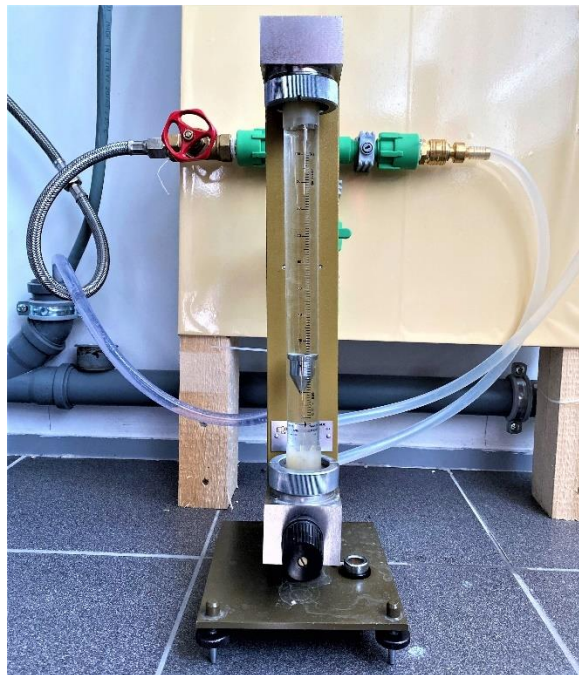
b)

Slika 10. Donji (a) i gornji dio kolone (b) s odgovarajućim priključcima.

Donji dio kolone ujedno služi za stabilizaciju toka fluida prije nego što on dostruji u centralni dio kolone u kojem se nalazi porozni sloj. Kao fluid je korištena voda iz vodovodne mreže, čija je temperatura iznosila 18 °C. Pri toj temperaturi voda je imala sljedeće fizikalne karakteristike: viskoznost $\mu = 0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ i gustoću $\rho = 998,6 \text{ kg m}^{-3}$. Protok vode reguliran je ventilom i mjerjen rotametrom koji je prethodno izbaždaren. Korelacijska jednadžba, proizišla iz baždarenja rotametra, koja je korištena u ovom radu je:

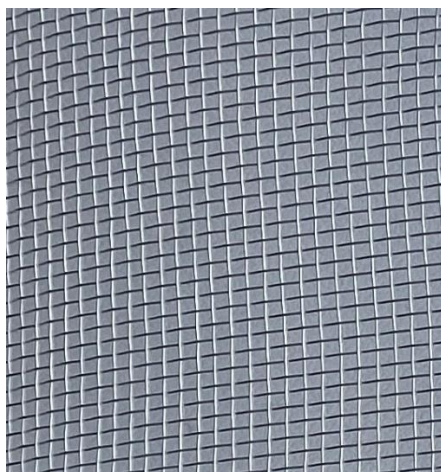
$$\dot{V} = 0,601 \cdot h + 5,271 \quad (38)$$

gdje h predstavlja visinu plovka u staklenoj cijevi rotametra, dok je \dot{V} odgovarajući volumni protok. Korišteni rotametar i ventil su prikazani na *Slici 11*.



Slika 11. Sustav za regulaciju i mjerenje protoka vode.

Na spoju donjeg i centralnog dijela kolone pričvršćena je mrežica koja je služila kao nosač poroznog sloja. Veličina očica mrežice bila je takva da onemogućuje propadanje čestica poroznog sloja, tj. očice mrežice su bile manjeg promjera od promjera čestica poroznog sloja (*Slika 12.*).



Slika 12. Mrežica – nosač poroznog sloja u koloni.

Visina poroznog sloja određivala se mjernom trakom koja se nalazila na samoj koloni. Analizirani porozni slojevi načinjeni su od šljunka zadanih veličina čestica. Frakcije čestica određivane su prosijavanjem, a veličine koje su se koristile u ovom radu su bile sljedeće: $d_{\check{c},ekv} = 0,0055\text{ m}$; $0,0065\text{ m}$ i $0,012\text{ m}$. Čestice su izrazito nepravilnog oblika pa je kao ekvivalentni promjer korišten promjer sita. Korištene klase čestica dobivene su prosijavanjem pomoću serije standardiziranih sita. Na *Slici 13.* prikazane su odabrane klase čestica od kojih su načinjeni porozni slojevi.



a)



b)



c)

Slika 13. Čestice analiziranih poroznih slojeva: $d_{\check{c},ekv} = 0,0055\text{ m}$ (a) ; $d_{\check{c},ekv} = 0,0065\text{ m}$ (b) ; $d_{\check{c},ekv} = 0,012\text{ m}$ (c).

Pad tlaka tijekom strujanja fluida kroz porozni sloj određivan je pomoću U-manometra, prikazanog na *Slici 14*. U ovom slučaju pad tlaka mjerio se u mm Hg i ta se vrijednost potom preračunavala u *Pascale* (Pa).



Slika 14. U-manometar za mjerenje pada tlaka kroz porozni sloj.

2.2. Provedba eksperimenta

Čestice od kojih je načinjen porozni sloj se uvode u kolonu s njenog vrha. Kolona se napuni česticama do određene visine. Visina poroznog sloja je mjerena skalom koja se nalazila na samoj koloni. Ventilom se regulirao dovod vode koja je strujala kroz porozni sloj, te se pri određenim protocima, tj. pri određenim površinskim brzinama strujanja fluida ($v_a = 0,007 - 0,046 \text{ m s}^{-1}$) očitavao pad tlaka u sustavu pomoću živinog U-manometra.

2.2.1. Karakterizacija poroznog sloja

U prvom dijelu rada je izvršena karakterizacija poroznog sloja, s obzirom na to da geometrija poroznih struktura značajno utječe na hidrodinamičke karakteristike sustava. Karakteristike poroznih struktura vrlo je teško direktno odrediti te se stoga koriste lako mjerljive veličine, pomoću kojih se onda indirektno određuju tražene karakteristike. Temeljne veličine koje je pri karakterizaciji potrebno poznavati su:

- **Promjer čestica poroznog sloja, d_{ξ}**

Promjer čestica poroznog sloja određen je metodom prosijavanja. Prosijavanje je provedeno sitima tipa *Fisher Scientific*, otvora očica od 4,5-5,5 mm, 5,5-6,5 mm te 6,5-1,2 mm (*Slika 15.*) uz uporabu tresilice tipa *Retsch AS 200*. Kao ekvivalentni promjer prosijanih čestica $d_{\xi, \text{ekv.}}$ uzeta je srednja vrijednost dvaju susjednih sita. Vrijeme trajanja prosijavanja je iznosilo 10 minuta, dok je amplituda trešnje bila 3 mm.



Slika 15. Aparatura za prosijavanje čestica.

- **Poroznost sloja, ε**

Poroznost je u ovom radu određena tzv. metodom zasićenja korištenjem aparature prikazane na *Slici 16*. Određeni volumen čestica stavio bi se u čašu (V_{SL}), a pomoću birete se postupno dodavala voda koja bi ispunila sve šupljine poroznog sloja. Dolijevanje vode se završava u trenutku kada se voda pojavi na vrhu poroznog sloja. U tom trenutku se na bireti očitava volumen vode, koji u biti predstavlja volumen pora u sloju V_P .¹⁷

Poroznost se potom određuje pomoću relacije:

$$\varepsilon = \frac{V_P}{V_{SL}} \quad (/) \quad (36)$$



Slika 16. Aparatura za određivanje poroznosti metodom zasićenja.

- **Površina poprečnog presjeka poroznog sloja, A_{SL} :**

$$A_{SL} = \frac{d_{kol.}^2 \cdot \pi}{4} \quad (m^2) \quad (39)$$

gdje $d_{kol.}$ predstavlja promjer kolone u kojoj se nalazi porozni sloj.

- **Volumen poroznog sloja, V_{SL} :**

$$V_{SL} = A_{SL} \cdot l \quad (m^3) \quad (40)$$

gdje je l visina poroznog sloja.

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

$$n = \frac{A_{SL} \cdot l \cdot (1 - \varepsilon)}{\frac{d_{\check{c},ekv.}^3 \cdot \pi}{6}} \quad (/) \quad (41)$$

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

$$S_v = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d_{\check{c},ekv.}} \quad (m^{-1}) \quad (42)$$

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

$$d_{p\ ekv.} = \frac{4}{6} \cdot \frac{\varepsilon \cdot d_{\check{c},ekv.}}{1 - \varepsilon} \quad (m) \quad (43)$$

- **Površinska brzina strujanja fluida, v_A :**

$$v_A = \frac{4 \cdot \dot{V}}{d_{kol.}^2 \cdot \pi} \quad (m \ s^{-1}) \quad (44)$$

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

$$v_p = \frac{v_A}{\varepsilon} \quad (m \ s^{-1}) \quad (45)$$

- **Modificirana Reynoldsova značajka, Re_p :**

$$Re_p = \frac{v_A \cdot d_{\check{c},ekv.} \cdot \rho}{(1 - \varepsilon) \cdot \mu} \quad (/) \quad (46)$$

- **Modificirani koeficijent trenja, f_p :**

$$f_p = \frac{\Delta p}{l} \cdot \frac{d_{\check{c},ekv.}}{\rho \cdot v_a^2} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)} \quad (/) \quad (47)$$

2.2.2. Određivanje pada tlaka kroz porozni sloj

Pad tlaka tijekom strujanja fluida kroz porozni sloj zadanih karakteristika određivan je živinim U-manometrom u milimetrima žive (mm Hg), a zatim je ta vrijednost preračunata u *Pascale* (Pa) na sljedeći način:

$$\Delta p = H \text{ mm Hg} \cdot \frac{\gamma \text{ Hg} - \gamma \text{ H}_2\text{O}}{\gamma \text{ H}_2\text{O}} \cdot 9,81 \text{ (Pa)} \quad (48)$$

$$\Delta p = H \text{ mm Hg} \cdot \frac{\gamma \text{ Hg} - \gamma \text{ H}_2\text{O}}{\gamma \text{ H}_2\text{O}} \cdot 9,81 = H \text{ mm Hg} \cdot 12,6 \cdot 9,81 \text{ (Pa)} \quad (49)$$

gdje je:

Δp – pad tlaka kroz porozni sloj (Pa)

H mm Hg – razlika visine stupaca u manometru izražena u mm Hg

γ (Hg) – specifična težina žive (N m^{-3})

γ (H_2O) – specifična težina vode (N m^{-3})

Tijekom eksperimenta pad tlaka određivan je za porozne slojeve sljedećih visina:

- $l = 0,2$ m
- $l = 0,4$ m
- $l = 0,5$ m
- $l = 0,6$ m
- $l = 0,7$ m

Površinske brzine strujanja fluida su bile takve da nisu remetile geometrijsku strukturu poroznog sloja, tj. visina proznog sloja je tijekom ispitivanja bila konstantna. Drugim riječima, u svim slučajevima je izbjegnuta eventualna pojava fluidizacije sloja.

Sva su mjerenja ponovljena tri puta pa su u radu prikazane srednje vrijednosti tih triju mjerenja.

3. REZULTATI

3.1. Karakterizacija poroznog sloja

U ovom dijelu rada izvršena je karakterizacija ispitivanih poroznih slojeva različitih veličina čestica. Karakterizacija je izvršena postupkom koji je detaljno opisan u *Poglavlju* 2.2.1. uz primjenu izraza navedenim u istom poglavlju. Rezultati karakterizacija analiziranih poroznih slojeva prezentirani su u *Tablicama* 1. – 4.

Tablica 1. Rezultati karakterizacije poroznog sloja čija je veličina čestica $d_{\epsilon \text{ ekv.}} = 0,0055 \text{ m}$.

Promjer čestica u sloju, $d_{\epsilon \text{ ekv.}}$ (m)	Poroznost, ϵ (/)	Površina poprečnog presjeka sloja, A_{sl} (m^2)	Visina sloja, l_{sl} (m)	Volumen sloja, V_{sl} (m^3)	Volumen čestica, V_{ϵ} (m^3)	Broj čestica u sloju, n (/)	Površina čestica unutar sloja, S_{uk} (m^2)	Specifična površina pora, S_v (m^{-1})	Promjer pora u sloju, $d_{p \text{ ekv.}}$ (m)
0,0055	0,305	$9,07 \cdot 10^{-4}$	0,2	$1,81 \cdot 10^{-4}$	$1,26 \cdot 10^{-4}$	1448	0,138	758,18	0,0016
			0,4	$3,63 \cdot 10^{-4}$	$2,52 \cdot 10^{-4}$	2896	0,275		
			0,5	$4,54 \cdot 10^{-4}$	$3,15 \cdot 10^{-4}$	3620	0,344		
			0,6	$5,44 \cdot 10^{-4}$	$3,78 \cdot 10^{-4}$	4344	0,413		
			0,7	$6,35 \cdot 10^{-4}$	$4,41 \cdot 10^{-4}$	5068	0,481		

Tablica 2. Rezultati karakterizacije poroznog sloja čija je veličina čestica $d_{\text{ekv.}} = 0,0065$ m.

Promjer čestica u sloju, $d_{\text{ekv.}}$	Poroznost, ε	Površina poprečnog presjeka sloja, A_{sl}	Visina sloja, l_{sl}	Volumen sloja, V_{sl}	Volumen čestica, $V_{\text{č}}$	Broj čestica u sloju, n	Površina čestica unutar sloja, S_{uk}	Specifična površina pora, S_v	Promjer pora u sloju, $d_{\text{p ekv.}}$
(m)	(/)	(m^2)	(m)	(m^3)	(m^3)	(/)	(m^2)	(m^{-1})	(m)
0,0065	0,3	$9,07 \cdot 10^{-4}$	0,2	$1,81 \cdot 10^{-4}$	$1,27 \cdot 10^{-4}$	884	0,117	646,15	0,0019
			0,4	$3,63 \cdot 10^{-4}$	$2,54 \cdot 10^{-4}$	1767	0,234		
			0,5	$4,54 \cdot 10^{-4}$	$3,17 \cdot 10^{-4}$	2209	0,293		
			0,6	$5,44 \cdot 10^{-4}$	$3,81 \cdot 10^{-4}$	2651	0,352		
			0,7	$6,35 \cdot 10^{-4}$	$4,44 \cdot 10^{-4}$	3092	0,41		

Tablica 3. Rezultati karakterizacije poroznog sloja čija je veličina čestica $d_{\text{ekv.}} = 0,012$ m.

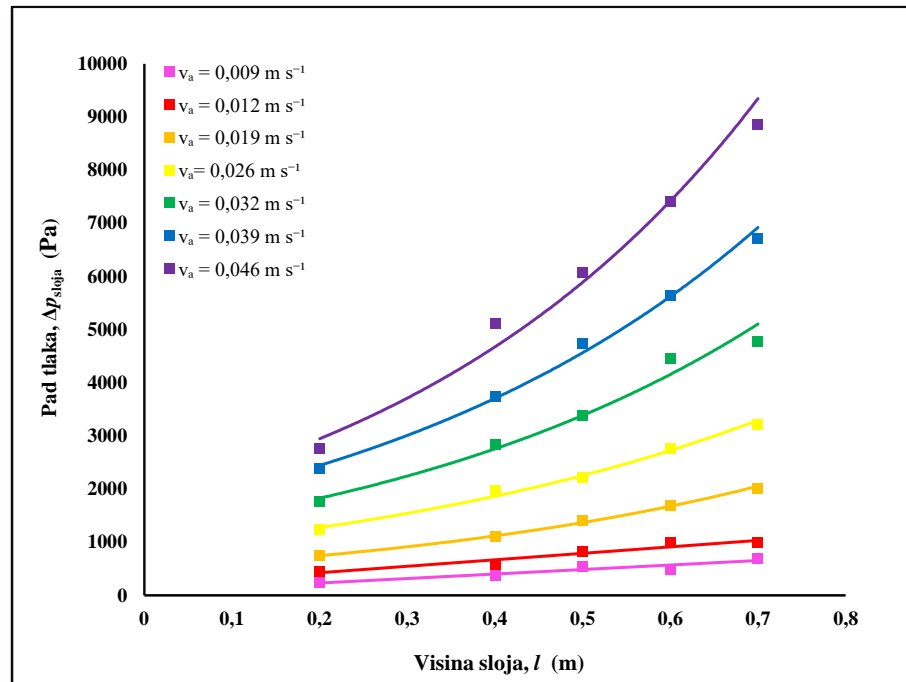
Promjer čestica u sloju, $d_{\text{ekv.}}$	Poroznost, ε	Površina poprečnog presjeka sloja, A_{sl}	Visina sloja, l_{sl}	Volumen sloja, V_{sl}	Volumen čestica, $V_{\text{č}}$	Broj čestica u sloju, n	Površina čestica unutar sloja, S_{uk}	Specifična površina pora, S_v	Promjer pora u sloju, $d_{\text{p ekv.}}$
(m)	(/)	(m^2)	(m)	(m^3)	(m^3)	(/)	(m^2)	(m^{-1})	(m)
0,012	0,295	$9,07 \cdot 10^{-4}$	0,2	$1,81 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-4}$	141	0,064	352,5	0,0033
			0,4	$3,63 \cdot 10^{-4}$	$2,56 \cdot 10^{-4}$	283	0,128		
			0,5	$4,54 \cdot 10^{-4}$	$3,20 \cdot 10^{-4}$	354	0,16		
			0,6	$5,44 \cdot 10^{-4}$	$3,84 \cdot 10^{-4}$	424	0,192		
			0,7	$6,35 \cdot 10^{-4}$	$4,48 \cdot 10^{-4}$	495	0,224		

Tablica 4. Karakteristike strujanja fluida kroz analizirane porozne slojeve.

Ekvivalentni promjer čestica u poroznom sloju, $d_{\varepsilon, \text{ekv.}}$	Visina poroznog sloja, l_{sl}	Poroznost sloja, ε (/)	Površinska brzina fluida, v_a	Brzina strujanja fluida kroz porozni sloj, v_p	Modificirana Reynoldsova značajka, Re_p
(m)	(m)	(/)	(m s^{-1})	(m s^{-1})	(/)
0,0055	0,2 - 0,7	0,305	0,007	0,023	55,32
			0,009	0,030	71,12
			0,012	0,039	94,83
			0,019	0,062	150,15
			0,026	0,085	205,47
0,0065	0,2 - 0,7	0,3	0,007	0,023	64,91
			0,009	0,030	83,45
			0,012	0,040	111,27
			0,019	0,063	176,18
			0,026	0,087	241,09
0,012	0,2 - 0,7	0,295	0,007	0,024	118,98
			0,009	0,031	152,98
			0,012	0,041	203,97
			0,019	0,064	322,95
			0,026	0,088	441,93

3.2. Utjecaj visine poroznog sloja na pad tlaka pri različitim brzinama strujanja fluida

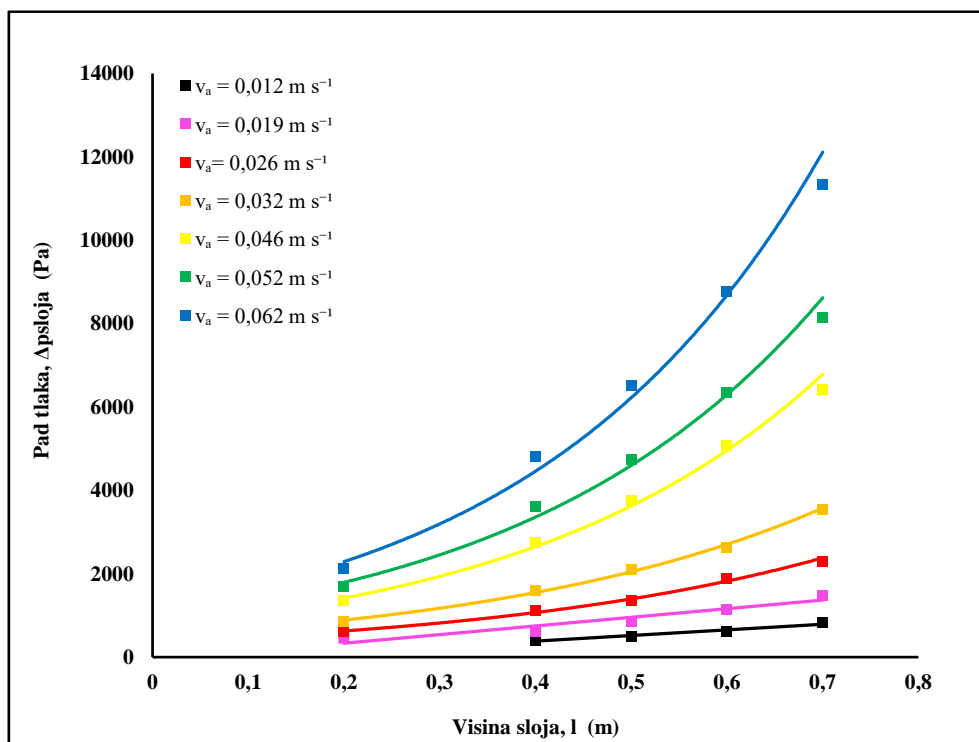
Za različite visine poroznog sloja određivan je pad tlaka pri različitim površinskim brzinama strujanja fluida. Detaljni postupak određivanja pada tlaka prikazan je u Poglavlju 2.2.



Slika 17. Ovisnost pada tlaka o visini poroznog sloja pri različitim površinskim brzinama strujanja fluida ($d_{\check{c},ekv.} = 0,0055$ m; $\varepsilon = 0,305$).

Tablica 5. Korelacijske jednadžbe dobivene pri ispitivanju ovisnosti pada tlaka o visini poroznog sloja pri različitim površinskim brzinama strujanja fluida ($d_{\check{c},ekv.} = 0,012$ m; $\varepsilon = 0,305$).

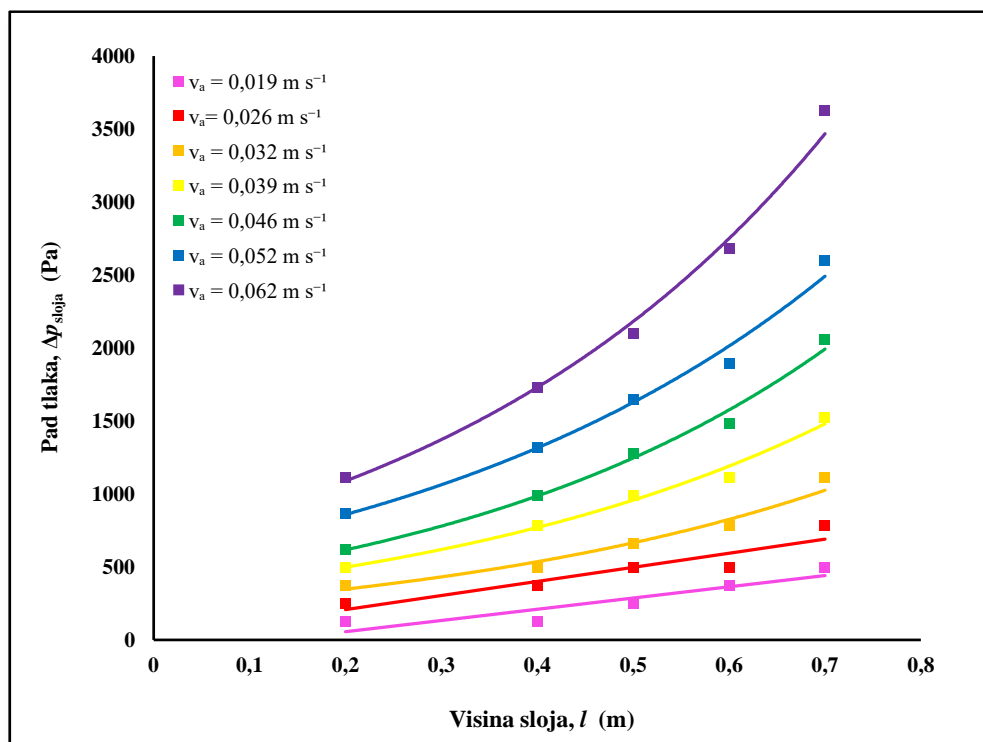
v_a (m s ⁻¹)	Re_p (l)	Korelacijska jednadžba	Koeficijent korelacije, R^2 (l)
0,009	61,76	$\Delta p_{sloja} = 846,31 l + 63,276$	$R^2 = 0,9024$
0,012	84,18	$\Delta p_{sloja} = 1214,3 l + 183,01$	$R^2 = 0,9221$
0,019	129,03	$\Delta p_{sloja} = 497,91 e^{2,0236 l}$	$R^2 = 0,9978$
0,026	173,87	$\Delta p_{sloja} = 872,92 e^{1,8978 l}$	$R^2 = 0,9909$
0,032	218,71	$\Delta p_{sloja} = 1211,8 e^{2,054 l}$	$R^2 = 0,9684$
0,039	263,56	$\Delta p_{sloja} = 1611,2 e^{2,0824 l}$	$R^2 = 0,9941$
0,046	308,4	$\Delta p_{sloja} = 1856,4 e^{2,3087 l}$	$R^2 = 0,9823$



Slika 18. Ovisnost pada tlaka o visini poroznog sloja pri različitim površinskim brzinama strujanja fluida ($d_{\check{c},ekv.} = 0,0065$ m; $\varepsilon = 0,300$).

Tablica 6. Korelacijske jednadžbe dobivene pri ispitivanju ovisnosti pada tlaka o visini poroznog sloja pri različitim površinskim brzinama strujanja fluida ($d_{\check{c},ekv.} = 0,012$ m; $\varepsilon = 0,300$).

v_a (m s ⁻¹)	Re_p (l)	Korelacijska jednadžba	Koeficijent korelacije, R^2 (l)
■	101,11	$\Delta p_{sloja} = 1360 l - 161,03$	$R^2 = 0,9595$
■	154,97	$\Delta p_{sloja} = 2066,2 l - 77,353$	$R^2 = 0,9236$
■	208,83	$\Delta p_{sloja} = 368,03 e^{2,6664 l}$	$R^2 = 0,9927$
■	262,69	$\Delta p_{sloja} = 508,54 e^{2,786 l}$	$R^2 = 0,9975$
■	370,41	$\Delta p_{sloja} = 757,46 e^{3,1314 l}$	$R^2 = 0,9925$
■	424,28	$\Delta p_{sloja} = 955,78 e^{3,1415 l}$	$R^2 = 0,9918$
■	505,07	$\Delta p_{sloja} = 1175,8 e^{3,3321 l}$	$R^2 = 0,9895$



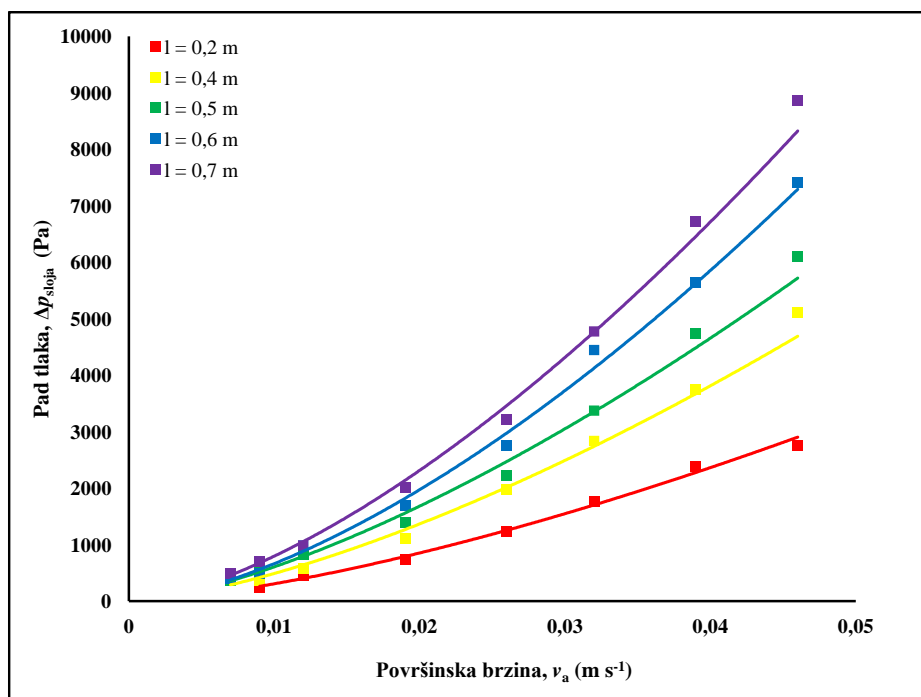
Slika 19. Ovisnost pada tlaka o visini poroznog sloja pri različitim površinskim brzinama strujanja fluida ($d_{\check{c},ekv.} = 0,012$ m; $\varepsilon = 0,295$).

Tablica 7. Korelacijske jednadžbe dobivene pri ispitivanju ovisnosti pada tlaka o visini poroznog sloja pri različitim površinskim brzinama strujanja fluida ($d_{\check{c},ekv.} = 0,012$ m; $\varepsilon = 0,295$).

v_a (m s ⁻¹)	Re_p (l)	Korelacijska jednadžba	Koeficijent korelacije, R^2 (l)
0,019	228,30	$\Delta p_{sloja} = 768,36 l - 97,291$	$R^2 = 0,8410$
0,026	307,65	$\Delta p_{sloja} = 963,24 l + 15,036$	$R^2 = 0,8679$
0,032	387,01	$\Delta p_{sloja} = 225,37 e^{2,1637 l}$	$R^2 = 0,9700$
0,039	466,36	$\Delta p_{sloja} = 321,98 e^{2,1788 l}$	$R^2 = 0,9844$
0,046	545,71	$\Delta p_{sloja} = 385,58 e^{2,3458 l}$	$R^2 = 0,9882$
0,052	625,06	$\Delta p_{sloja} = 560,89 e^{2,1299 l}$	$R^2 = 0,9855$
0,062	744,08	$\Delta p_{sloja} = 684,61 e^{2,3174 l}$	$R^2 = 0,9913$

3.3. Utjecaj površinske brzine fluida na pad tlaka kroz porozni sloj pri različitim visinama sloja

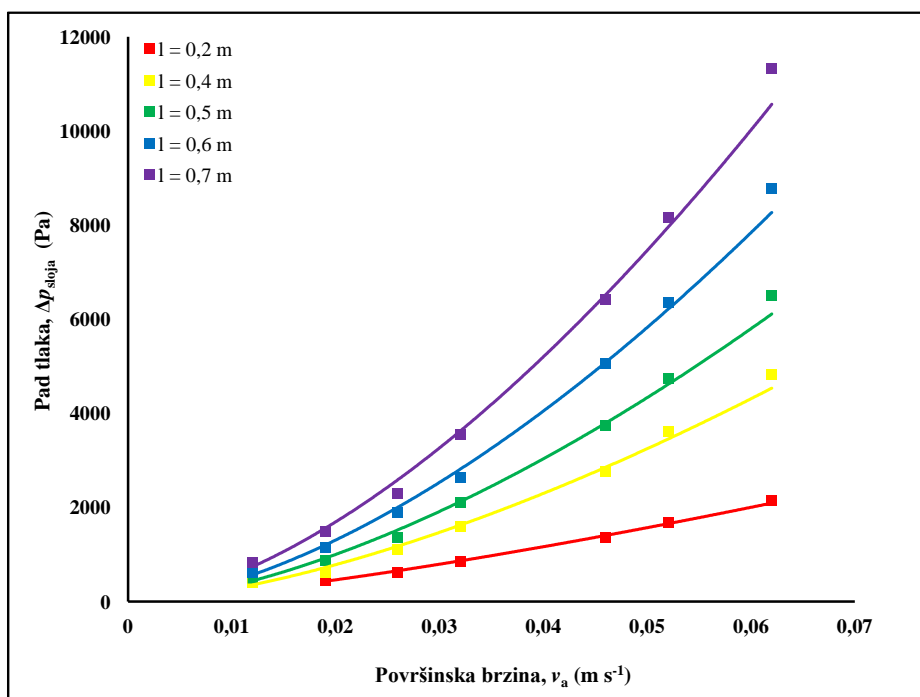
Za različite površinske brzine strujanja fluida određivan je pad tlaka pri različitim visinama poroznog sloja. Detaljni postupak određivanja prikazan je u *Poglavlju 2.2.*



Slika 20. Ovisnost pada tlaka o površinskoj brzini strujanja fluida pri različitim visinama sloja čestica ($d_{\check{c},ekv.} = 0,0055$ m; $\varepsilon = 0,305$).

Tablica 8. Korelacijske jednadžbe dobivene pri ispitivanju ovisnosti pada tlaka o visini poroznog sloja ($d_{\check{c},ekv.} = 0,0055$ m; $\varepsilon = 0,305$).

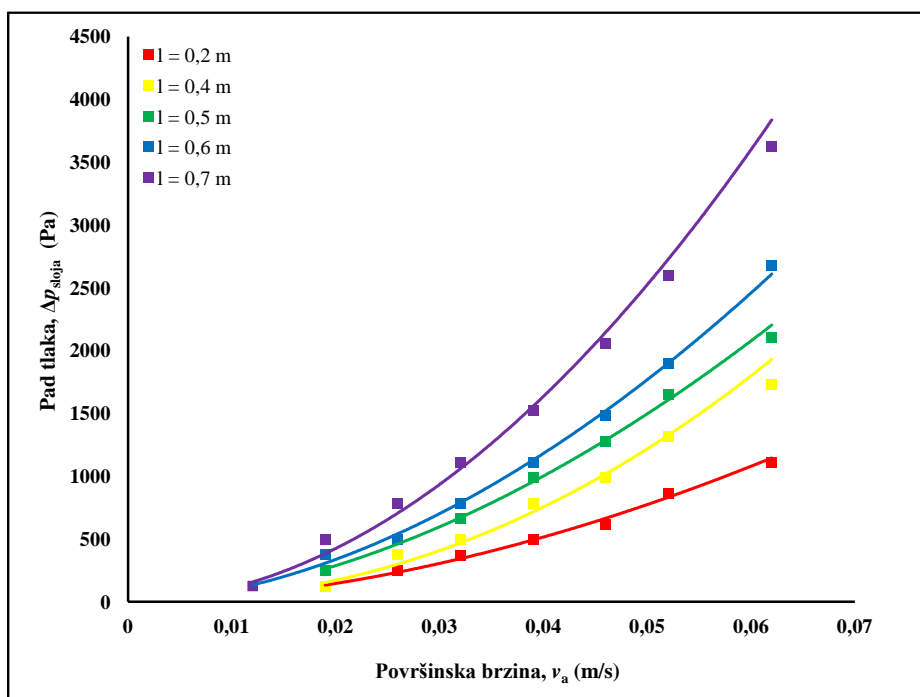
l (m)	Korelacijska jednadžba	Koeficijent korelacije, R^2 (l)
0,2	$\Delta p_{sloja} = 268122 v_a^{1,4696}$	$R^2 = 0,9926$
0,4	$\Delta p_{sloja} = 445500 v_a^{1,4789}$	$R^2 = 0,9956$
0,5	$\Delta p_{sloja} = 526246 v_a^{1,4685}$	$R^2 = 0,9948$
0,6	$\Delta p_{sloja} = 914249 v_a^{1,569}$	$R^2 = 0,9963$
0,7	$\Delta p_{sloja} = 943105 v_a^{1,5361}$	$R^2 = 0,9970$



Slika 21. Ovisnost pada tlaka o površinskoj brzini strujanja fluida pri različitim visinama sloja čestica ($d_{\check{c},ekv.} = 0,0065$ m; $\varepsilon = 0,300$).

Tablica 9. Korelacijske jednadžbe dobivene pri ispitivanju ovisnosti pada tlaka o visini poroznog sloja ($d_{\check{c},ekv.} = 0,0065$ m; $\varepsilon = 0,300$).

l (m)		Korelacijska jednadžba	Koeficijent korelacije, R^2 (/)
■	0,2	$\Delta p_{sloja} = 85802 v_a^{1,3356}$	$R^2 = 0,9972$
■	0,4	$\Delta p_{sloja} = 339017 v_a^{1,5516}$	$R^2 = 0,9960$
■	0,5	$\Delta p_{sloja} = 520162 v_a^{1,5983}$	$R^2 = 0,9971$
■	0,6	$\Delta p_{sloja} = 769896 v_a^{1,6305}$	$R^2 = 0,9976$
■	0,7	$\Delta p_{sloja} = 949824 v_a^{1,6179}$	$R^2 = 0,9966$

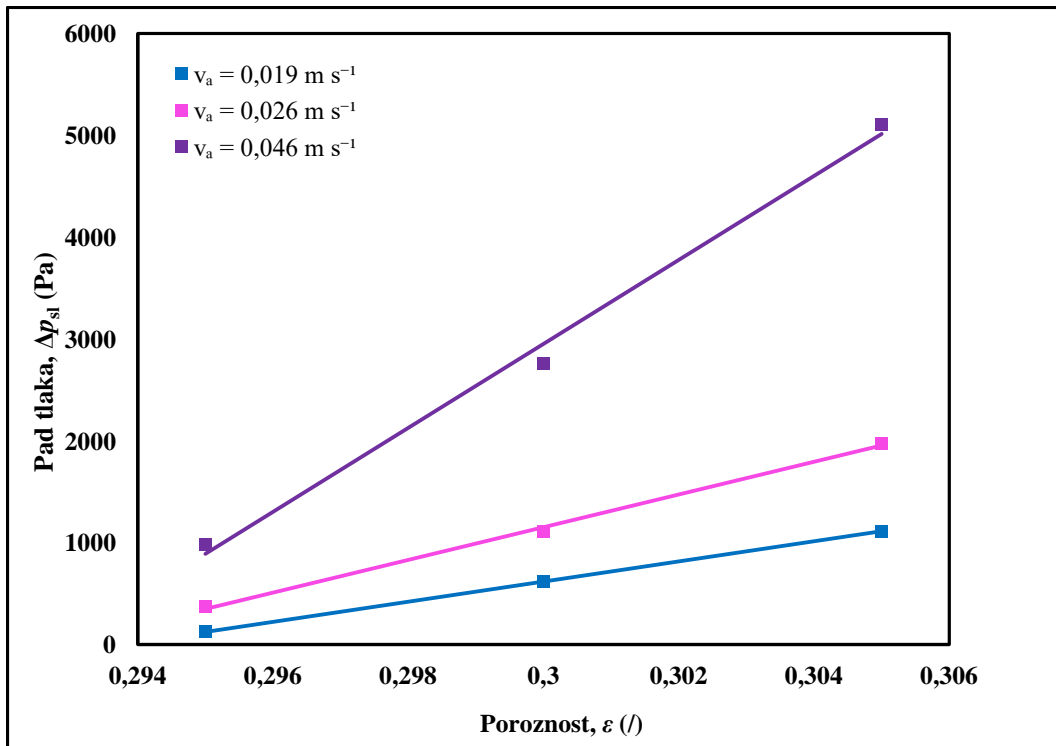


Slika 22. Ovisnost pada tlaka o površinskoj brzini strujanja fluida pri različitim visinama sloja čestica ($d_{\check{c},ekv.} = 0,012$ m; $\varepsilon = 0,295$).

Tablica 10. Korelacijske jednadžbe dobivene pri ispitivanju ovisnosti pada tlaka o visini poroznog sloja ($d_{\check{c},ekv.} = 0,012$ m; $\varepsilon = 0,295$).

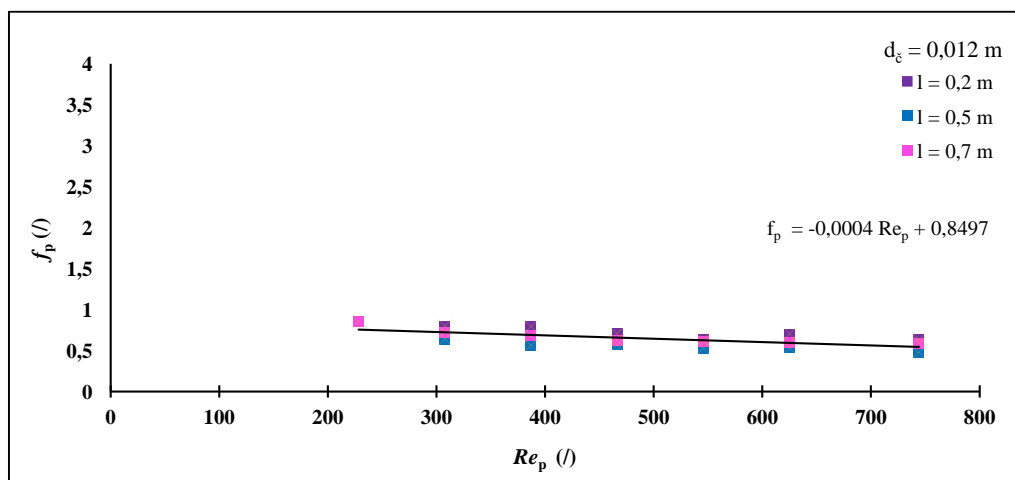
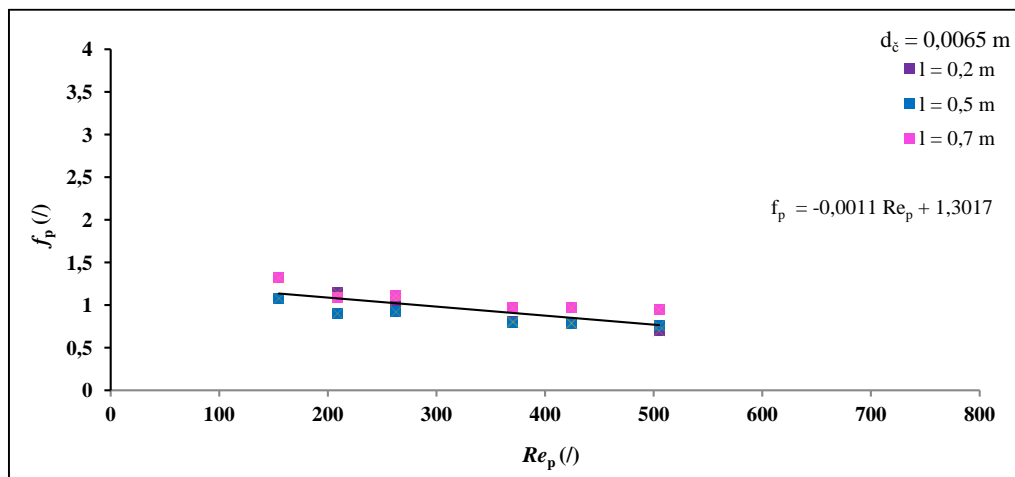
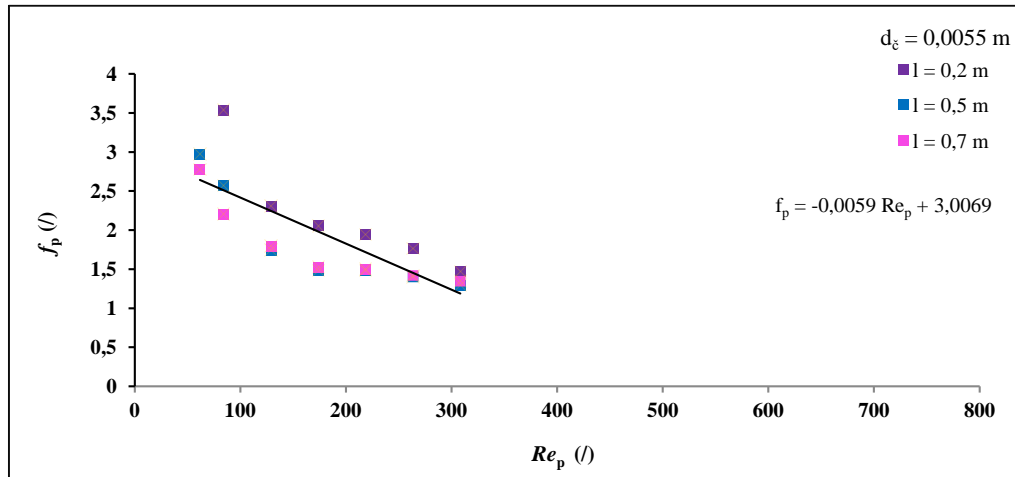
	l (m)	Korelacijska jednadžba	Koeficijent korelacije, R^2 (/)
■	0,2	$\Delta p_{sloja} = 183211 v_a^{1,8253}$	$R^2 = 0,9934$
■	0,4	$\Delta p_{sloja} = 751283 v_a^{2,1449}$	$R^2 = 0,9885$
■	0,5	$\Delta p_{sloja} = 330519 v_a^{1,802}$	$R^2 = 0,9958$
■	0,6	$\Delta p_{sloja} = 401680 v_a^{1,8113}$	$R^2 = 0,9978$
■	0,7	$\Delta p_{sloja} = 863781 v_a^{1,948}$	$R^2 = 0,9980$

3.4. Ovisnost pada tlaka o poroznosti sloja



Slika 23. Ovisnost pada tlaka kroz sloj o poroznosti sloja pri različitim površinskim brzinama fluida ($l = 0,4 \text{ m}$).

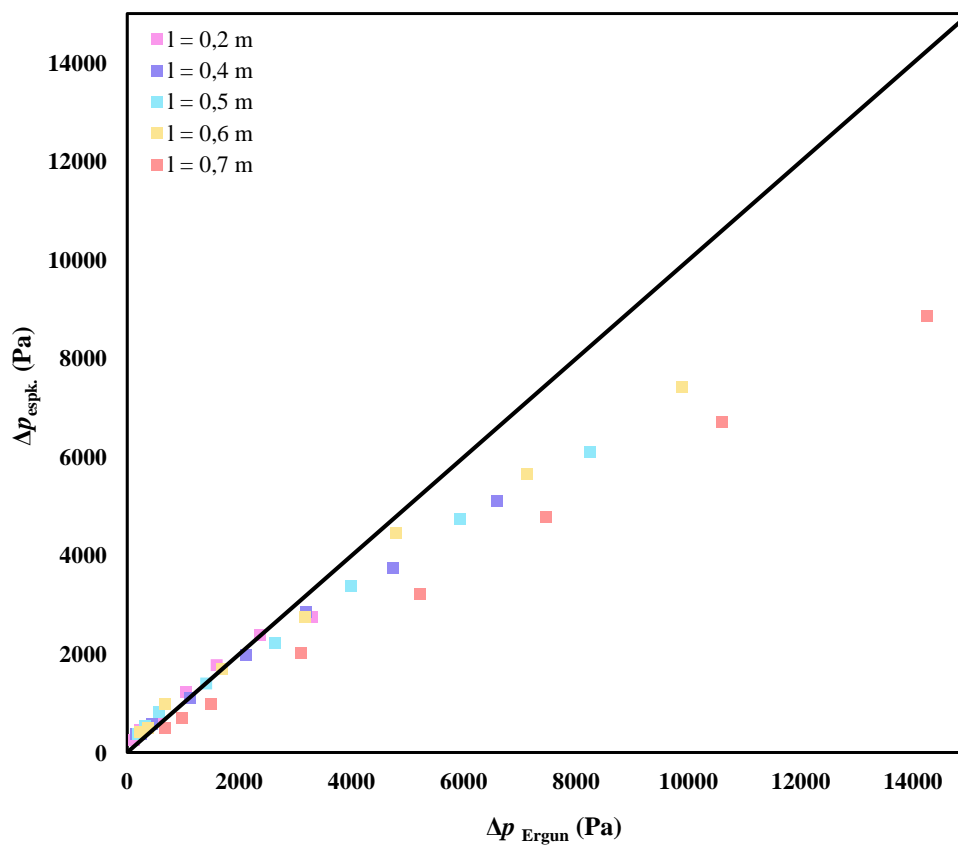
3.5. Odnos modificiranog koeficijenta trenja i modificirane Reynoldsove značajke za analizirane porozne sustave



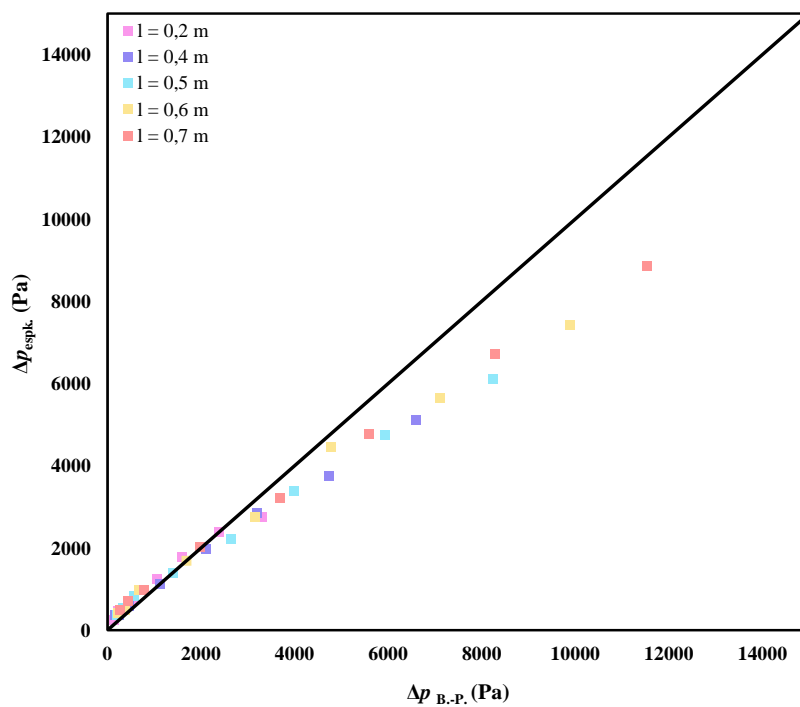
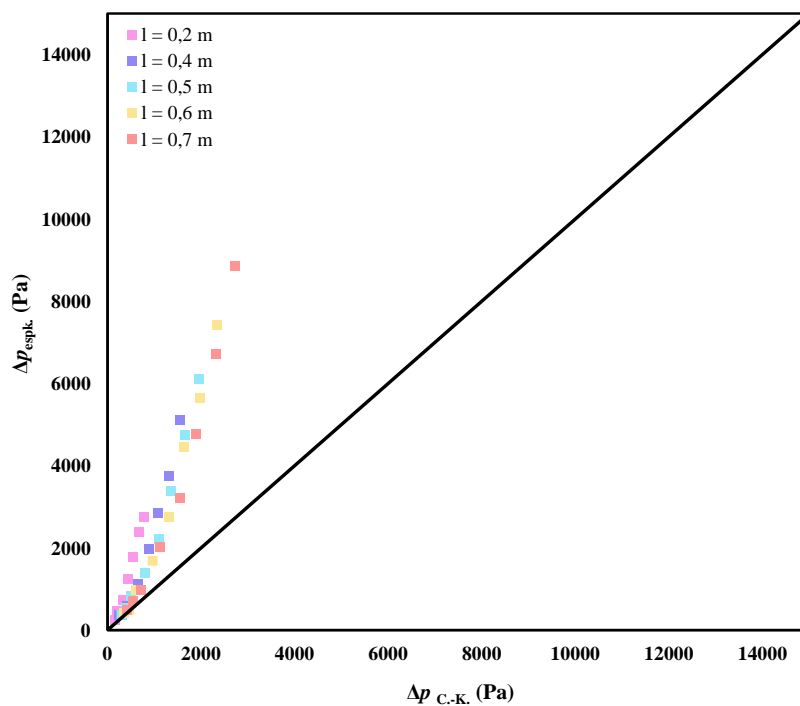
Slika 24. Ovisnost modificiranog koeficijenta trenja o modificiranoj Reynoldsovoj značajci pri različitim visinama poroznih slojeva za tri različite veličine čestica.

3.6. Usporedba eksperimentalno određenih vrijednosti pada tlaka kroz porozni sloj s teorijski određenim vrijednostima

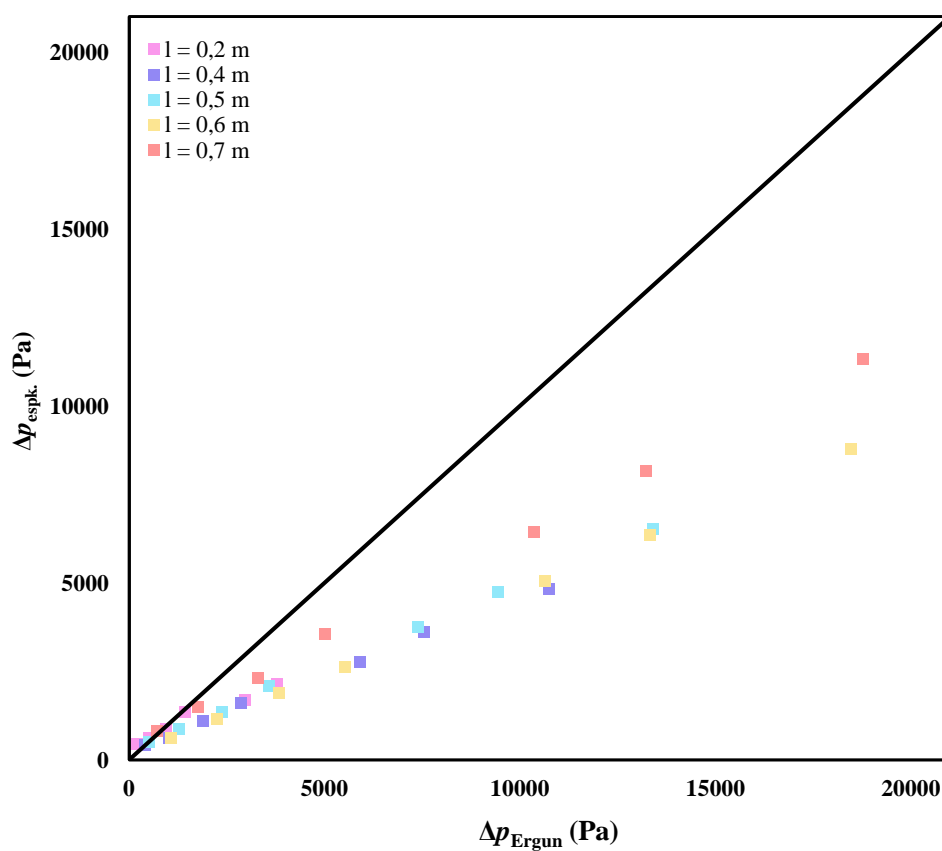
Eksperimentalno dobiveni rezultati pada tlaka kroz porozni sloj pri različitim površinskim brzinama strujanja fluida i visinama poroznog sloja uspoređivani su s teorijskim vrijednostima pada tlaka određenim Ergunovom, Carman-Kozenyevom i Burke-Plummerovom jednadžbom.



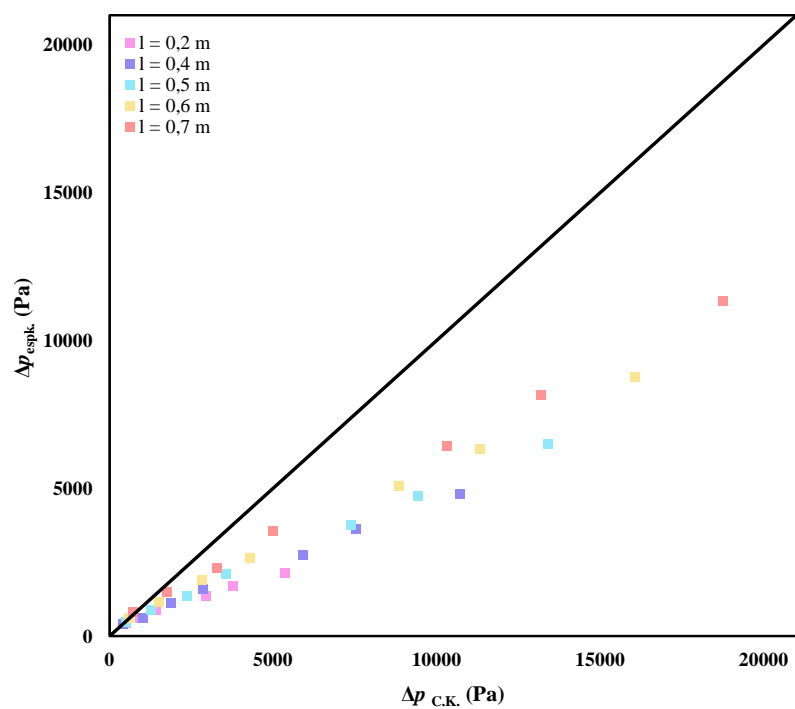
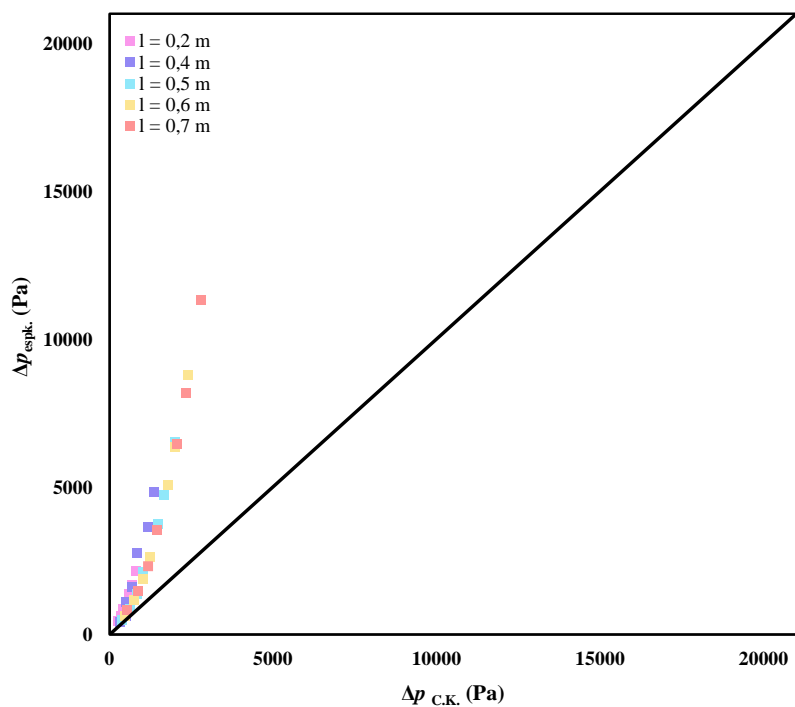
Slika 25. Usporedba eksperimentalno određenih vrijednosti pada tlaka kroz porozni sloj s vrijednostima određenim Ergunovom jednadžbom ($d_{\check{c},ekv.} = 0,0055 \text{ m}$, $\varepsilon = 0,305$).



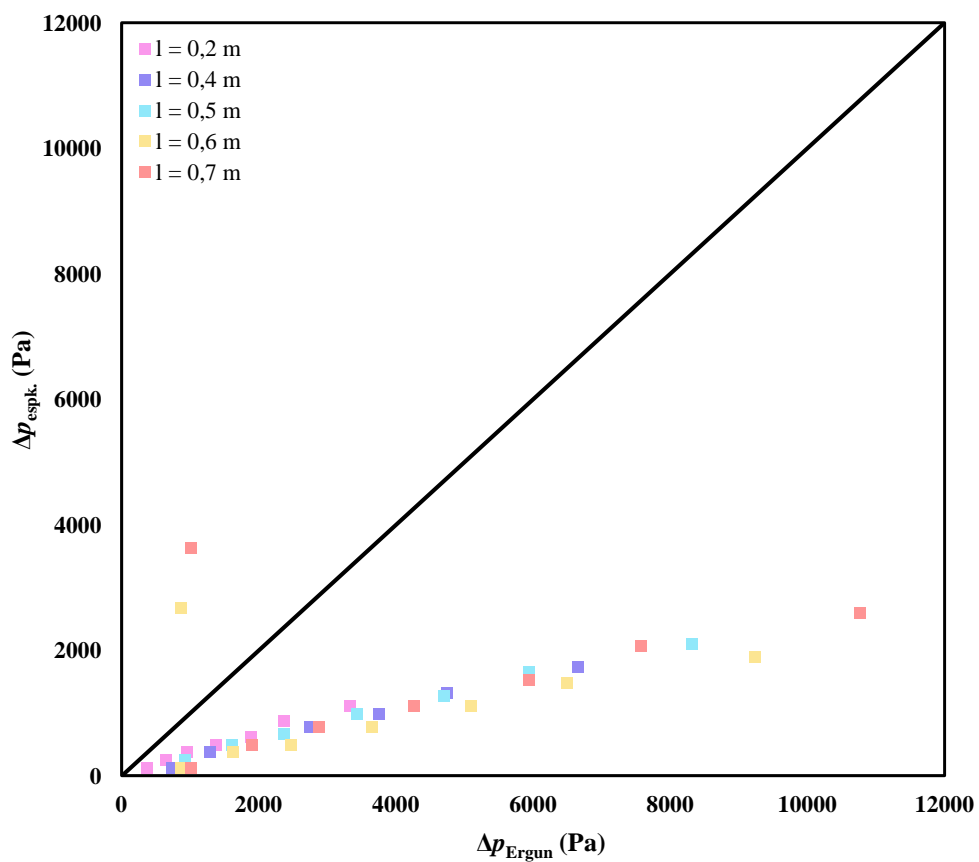
Slika 26. Usporedba eksperimentalno određenih vrijednosti pada tlaka kroz porozni sloj s vrijednostima određenim Carman-Kozenyevom i Burke-Plummerovom jednađbom ($d_{\check{c},ekv.} = 0,0055$ m, $\varepsilon = 0,305$).



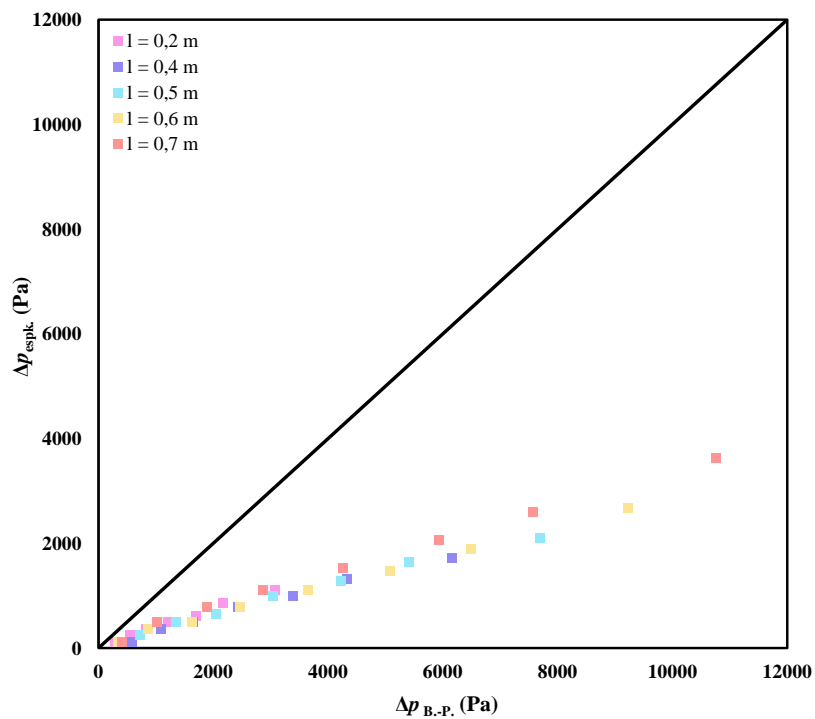
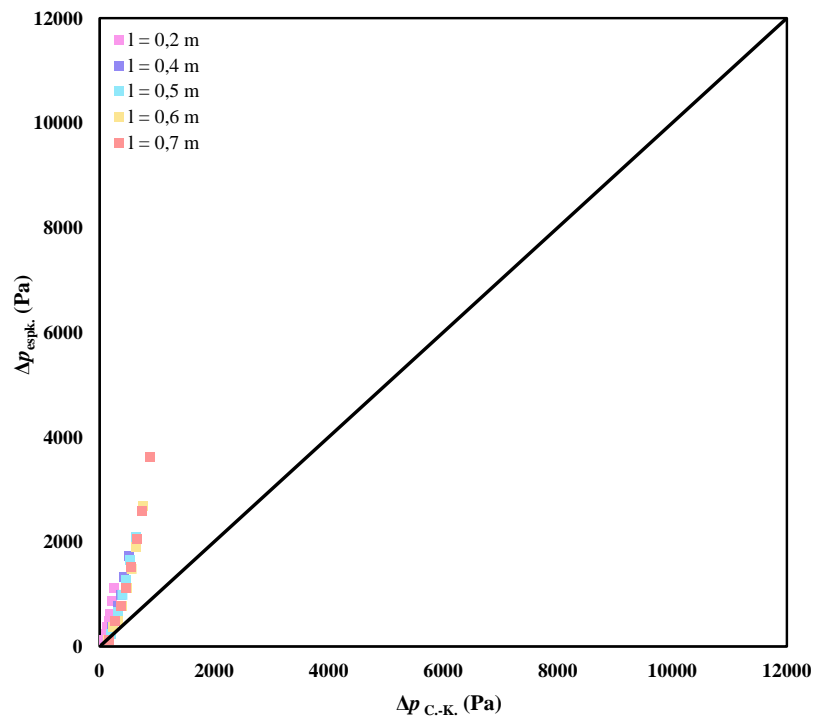
Slika 27. Usporedba eksperimentalno određenih vrijednosti pada tlaka kroz porozni sloj s vrijednostima određenim Ergunovom jednačbom ($d_{\check{e},\text{ekv.}} = 0,0065 \text{ m}$, $\varepsilon = 0,300$).



Slika 28. Usporedba eksperimentalno određenih vrijednosti pada tlaka kroz porozni sloj s vrijednostima određenim Carman-Kozenyevom i Burke-Plummerovom jednađbom ($d_{\check{c},\text{ekv.}} = 0,0065 \text{ m}$, $\varepsilon = 0,300$).



Slika 29. Usporedba eksperimentalno određenih vrijednosti pada tlaka kroz porozni sloj s vrijednostima određenim Ergunovom jednačzbon ($d_{\check{c},\text{ekv.}} = 0,012 \text{ m}$, $\varepsilon = 0,295$).



Slika 30. Usporedba eksperimentalno određenih vrijednosti pada tlaka kroz porozni sloj s vrijednostima određenim Carman-Kozenyevom i Burke-Plummerovom jednađbom ($d_{\check{c},\text{ekv.}} = 0,012 \text{ m}$, $\varepsilon = 0,295$).

4. RASPRAVA

Strujanje fluida kroz porozne slojeve se vrlo često susreće kod brojnih operacija u kemijskom inženjerstvu kao što su filtracija, taloženje, apsorpcija, itd. Ti slojevi obično su sastavljeni od čestica nesferičnih oblika i različitih veličina, pri čemu svojim slučajnim rasporedom formiraju pore nepravilnog oblika te različitih dužina i promjera. Brzina strujanja fluida kroz takav sloj ovisit će o razlici tlakova koja egzistira na krajevima poroznog sloja, a koja ujedno predstavlja pokretačku silu strujanju fluida. Međutim, brzina strujanja će ovisiti i o otporu kojim se sloj opire strujanju. Taj otpor, osim o površinskom trenju, ovisi i o obliku i veličini čestica od kojih se sastoji. Zbog tih otpora postoji realna mogućnost da strujanje unutar sloja ima laminaran ili turbulentan karakter.

Ukoliko je sloj sastavljen od isključivo finijih čestica, formirane pore su vrlo uske pa će pri tome i otpor strujanju fluida biti veći te se takvo strujanje može okarakterizirati kao laminarno. Porozni sloj načinjen od krupnijih čestica rezultira širim kanalima, manjim otporom i većom brzinom strujanja fluida pa je strujanje unutar sloja turbulentno. Ukupan gubitak energije fluida odražava se na vrijednost tlaka u sustavu, a taj pad tlaka moguće je odrediti eksperimentalno i računski.

Cilj ovog rada bio je sagledati kako struktura poroznog sloja, njegova visina, ali i brzina strujanja fluida kroz njega, utječe na energetske gubitke, odnosno na vrijednosti pada tlaka. Iz tog razloga je konstruirana aparatura vlastite izvedbe za provedbu navedenih ispitivanja. Osnovni dio aparature je kolona u kojoj se nalazi porozni sloj, a svi detalji i geometrijske karakteristike kolone prikazani su u *Poglavlju 2.1*. Tijekom rada analizirana su tri porozna sloja, čije su ekvivalentne veličine čestica bile: $d_{\text{č,ekv.}} = 0,0065$; $0,0055$ i $0,012$ m. Porozni slojevi su bili različitih visina l kako bi se sagledao utjecaj tih visina na pad tlaka u sustavu pri različitim površinskim brzinama strujanja fluida v_a . Kao fluid koji struji kroz porozni sloj korištena je vodovodna voda pri sobnoj temperaturi ($T = 18$ °C ; $\rho = 998,6$ kg m⁻³ ; $\mu = 0,001$ Pa s). Površinska brzina vode koja struji kroz sloj izračunata je iz volumnog protoka, određenog pomoću rotametra. Visine poroznih slojeva bile su u rasponu od 0,2 do 0,7 m, dok su ispitivane površinske brzine protjecanja imale vrijednost od 0,007 do 0,026 m s⁻¹.

Prije početka određivanja pada tlaka kroz porozni sloj izvršene su karakterizacije korištenih poroznih slojeva. Zbog složene geometrijske strukture slojeva vrlo je teško direktno odrediti njihove karakteristike pa se stoga koriste lako mjerljive veličine, pomoću kojih se onda one određuju indirektno. Karakterizacija je izvršena postupkom detaljno opisanim u *Poglavlju 2.2.1.*, dok su rezultati analiza prikazani u *Tablicama 1. –*

4. Ekvivalentni promjer čestica u sloju određen je metodom prosijavanja, dok je jedna od najbitnijih karakteristika poroznog sloja, njegova poroznost ε , određena metodom zasićenja. Princip ove metode detaljno je opisan u *Poglavlju 2.2.1*. Prilikom određivanja poroznosti, izvršeno je pet mjerenja te rezultati u navedenim tablicama predstavljaju srednju vrijednost. Iskustveno je utvrđeno da je metoda subjektivna te da bi za pouzdanije rezultate trebalo ipak koristiti sofisticiranije tehnike određivanja, tj. porozimetar ili transmisijsku, odnosno pretražnu mikroskopiju (*TEM* i *SEM*). Međutim, metoda zasićenja ima izrazito edukativan karakter jer jasno ukazuje na pojam volumena šupljina u poroznom sloju.

Iz rezultata prikazanih u *Tablicama 1. – 4.* uviđa se da povećanjem veličine čestica dolazi do smanjenja poroznosti. Povećanjem volumena sloja V_{SL} , sasvim logično, povećava se i volumen čestica u sloju $V_{\check{c}}$, a time i njihov broj n . Povećanjem broja čestica n raste ukupna slobodna površina unutar poroznog sloja S_{UK} . Karakterizacijom je također uočeno da ukoliko je porozni sloj sastavljen od većih čestica $d_{\check{c},ekv.}$, dolazi do smanjenja cjelokupne slobodne površine čvrstih čestica unutar poroznog sloja izražene po jedinici volumena sloja, a koja se inače označava kao specifična površina pora u poroznom sloju S_v . Kao što je već navedeno, porozni sloj je izrazito kompleksna tvorevina, a pore u njemu su nepravilnog oblika i različitog promjera. Iz dobivenih vrijednosti uočava se da što je veličina čestica manja, to je manji i ekvivalentni promjer pora u sloju, što se direktno odražava na brzinu strujanja fluida kroz porozni sloj i na vrijednosti modificirane Reynoldsove značajke. Vrijednosti modificiranih Reynoldsovih značajki za ispitivane porozne slojeve su bile u rasponu od 55 do 440, što ukazuje na to da se strujanje fluida kroz te slojeve ne može okarakterizirati ni kao laminarno ni kao turbulentno, već spada u izrazito prijelazno područje.

Nakon karakterizacije poroznih slojeva sagledan je utjecaj visine poroznog sloja na pad tlaka pri različitim brzinama strujanja fluida. Rezultati analiza prikazani su na *Slikama 17. – 19.* kao odnos visine poroznog sloja i pada tlaka. Eksperimenti su izvršeni pri osam različitih površinskih brzina v_a u rasponu od $v_a = 0,012 - 0,062 \text{ m s}^{-1}$. Za sva tri ispitivana sloja uočeno je da je pri najnižim ispitivanim vrijednostima površinskih brzina ($v_a < 0,019 \text{ m s}^{-1}$) nazočna linearna ovisnost pada tlaka o visini poroznog sloja, što direktno potvrđuju i vrijednosti koeficijenta korelacije R^2 , prezentirane u *Tablicama 5. – 7.* Međutim, povećanjem površinske brzine strujanja fluida kroz porozni sloj ($v_a > 0,019 \text{ m s}^{-1}$) ta linearna ovisnost se gubi i primjetno je da pad tlaka raste eksponencijalno s povećanjem

visine poroznog sloja. Dobivene korelacijske jednadžbe, također prikazane u *Tablicama* 5. – 7. potvrđuju ove navode. U svim ispitivanim slučajevima numeričke vrijednosti koeficijenta korelacije su izuzetno visoki. Istovjetna zapažanja primjetna su kod sva tri analizirana porozna sloja.

Sasvim sigurno, povećanjem visine, kompleksnost strukture poroznog sloja je veća, a time raste utrošak energije fluida pri strujanju kroz takav sloj. To se direktno odražava na vrijednosti pada tlaka. Analizirajući dobivene rezultate prikazane na *Slikama* 17. – 19. uočava se da uspoređujući iste visine poroznih slojeva, pad tlaka poprima nižu vrijednost kod slojeva sastavljenih od većih čestica.

Za sve ispitivane porozne slojeve sagledana je potom i ovisnost pada tlaka o površinskoj brzini strujanja fluida v_a . Mjerenja su izvršena pri pet različitih visina poroznog sloja, $l = 0,2 - 0,7$ m, s time što su površinske brzine strujanje fluida bile u rasponu od $v_a = 0,009 - 0,062$ m s⁻¹. Dobiveni rezultati prikazani na *Slikama* 20. – 22. i *Tablicama* 8. – 10. ukazuju na eksponencijalnu ovisnost pada tlaka o površinskoj brzini fluida, tj. povećanjem površinske brzine fluida, pad tlaka kroz porozni sloj raste. Dobivene korelacijske jednadžbe prikazane u *Tablicama* 8. – 10. ukazuju na eksponencijalni odnos, pri čemu je uočljivo da koeficijent korelacije pri svim ispitivanim visinama poroznog sloja i ispitivanim površinskim brzinama strujanja fluida ima izrazito visoku vrijednost. Visoke vrijednosti koeficijenta korelacije R^2 ukazuju na dobar analitički opis ovisnosti pada tlaka o površinskoj brzini strujanja fluida.

Usporedbom rezultata, dobivenih za iste visine slojeva i za istu površinsku brzinu strujanja fluida, uviđa se da porozni sloj, sastavljen od većih čestica, pruža znatno manji otpor strujanju fluida, odnosno uzrokuje manji pad tlaka u sustavu. Neophodno je naglasiti da su tijekom ispitivanja površinske brzine strujanja fluida bile takve da nisu remetile geometrijsku strukturu sloja, tj. visine poroznih slojeva su bile konstante. Drugim riječima, u svim slučajevima izbjegnuta je eventualna pojava fluidizacije slojeva.

Na *Slici* 23. prikazana je ovisnost pada tlaka kroz sloj o poroznosti sloja pri različitim površinskim brzinama fluida, pri čemu je visina poroznog sloja bila konstantna i iznosila je $l = 0,4$ m. Za sve analizirane površinske brzine fluida uočava se da, ukoliko je sloj sastavljen od finijih čestica, tj. ako je poroznost sustava veća, veći je i pad tlaka u sustavu.

Ovisnosti modificiranog koeficijenta trenja f_p , kojeg je definirao *Ergun* izrazom (37), o modificiranoj Reynoldsovoj značajci Re_p za ispitivane porozne slojeve prikazane su na

Slici 24. Obje te bezdimenzijske značajke u sebi objedinjuju karakteristike poroznog sloja, ali i vrijednost pada tlaka po jedinici visine poroznog sloja, kao i površinsku brzinu strujanja fluida. Ovisnosti dobivene u ovom radu ukazuju da se za sva tri ispitivana porozna sloja vrijednost modificiranog koeficijenta trenja, f_p , smanjuje s povećanjem Reynoldsove značajke. Također se uočava da ta ovisnost u svim slučajevima ima linearan oblik. Dobivene korelacijske jednadžbe također su prikazane na *Slici 24.* Iz dobivenih rezultata uočljivo je da ovisnost $f_p - Re_p$ ne poprima odnos karakterističan za laminarno ili turbulentno strujanje kakvi se susreću u literature (izrazi 32. i 34.). Razlog tim odstupanjima može se objasniti činjenicom da modificirana Reynoldsova značajka poprima vrijednosti $5 < Re_p < 2000$, što ukazuje na prijelazni režim strujanja, dok navedeni izrazi vrijede za izrazito laminarno, odnosno turbulentno strujanje unutar poroznih slojeva.

U završnom dijelu rada izvršena je usporedba eksperimentalnih vrijednosti pada tlaka kroz ispitivane porozne slojeve s teorijski određenim vrijednostima. Pod teorijski određenim vrijednostima smatraju se vrijednosti pada tlaka dobivene pomoću tri jednadžbe: Ergunovom jednadžbom, Carman-Kozenyijevom jednadžbom i Burke-Plummerovom jednadžbom.

Uspoređujući eksperimentalne vrijednosti pada tlaka za ispitivane porozne slojeve s vrijednostima dobivenim Ergunovom jednadžbom (*Slike 25., 27. i 29.*) uočava se da su odstupanja veća što je veličina čestica u poroznom sloju veća. Također je primjetno da su znatno manja odstupanja ukoliko se strujanje fluida provodi kroz porozne slojeve manjih visina.

Rezultati dobiveni primjenom Carman-Kozenyijeve jednadžbe (*Slika 26., 28. i 30.*) značajno odstupaju u svim analiziranim slučajevima od eksperimentalno dobivenih vrijednosti. Iz navedenog proizlazi da tu jednadžbu apsolutno nije moguće primjenjivati za ispitivane porozne slojeve. Vjerojatan razlog tome je taj što Carman-Kozenyijeva jednadžba vrijedi za izrazito laminarno područje kada modificirana Reynoldsova značajka poprima vrijednosti $Re_p < 5$, što u eksperimentima provedenim u ovom radu nije bio slučaj.

Odstupanja su primjetna i pri usporedbi eksperimentalnih i teorijski određenih vrijednosti pada tlaka dobivenih Burke-Plummerovom jednadžbom (*Slika 26., 28. i 30.*). Međutim, ta odstupanja su znatno manja u odnosu na ona dobivena Carman-Kozenyijevom te su

vrlo slična onima dobivenim Ergunovom jednađbom. Stoga bi se te dvije jednađbe, Ergunova i Burke-Plummerova, mogle sugerirati za korištenje pri ispitivanju poroznih slojeva sličnih geometrijskih karakteristika, tj. slojeva koje karakteriziraju manje čestice i relativno niže visine slojeva. Međutim, kako su u ovom radu ispitivana samo tri porozna sloja, za detaljnije zaključke trebalo bi provesti dodatna ispitivanja u kojima bi se obuhvatili porozni slojevi većeg raspona veličina čestica.

5. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih eksperimenata i obrade rezultata koji se odnose na strujanje fluida kroz porozne slojeve, mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- S obzirom na to da geometrija poroznih struktura značajno utječe na hidrodinamičke karakteristike sustava, prije same provedbe eksperimenata potrebno je izvršiti karakterizaciju analiziranih poroznih slojeva. Karakteristike poroznih struktura vrlo je teško direktno odrediti te je stoga moguće koristiti relativno lako mjerljive veličine, pomoću kojih se onda indirektno određuju željene karakteristike. Za detaljniju karakterizaciju poroznih slojeva ipak je potrebno primijeniti sofisticiranije tehnike.
- Karakterizacija poroznih slojeva, izvršena u ovom radu, ukazuje da povećanje veličine čestica uzrokuje smanjenje poroznosti, kao i smanjenje specifične površine pora u poroznom sloju, S_v . Također se uočava da što je promjer čestica veći, to je veći i ekvivalentni promjer pora u sloju. To rezultira većom brzinom strujanja fluida, pa su i vrijednosti modificirane Reynoldsove značajke u tom slučaju znatno veće.
- Za ispitivane porozne slojeve je utvrđeno da pad tlaka linearno raste s visinom poroznih slojeva, ali pri površinskim brzinama fluida nižim od $v_a = 0,019 \text{ m s}^{-1}$. Pri vrijednostima $v_a > 0,019 \text{ m s}^{-1}$ ta linearna ovisnost se gubi i pad tlaka eksponencijalno raste povećanjem visine poroznog sloja.
- Za određenu konstantnu visinu poroznog sloja povećanje površinske brzine strujanja uzrokuje porast energetske gubitaka. Vrijednost pada tlaka kroz porozni sloj u tom slučaju raste eksponencijalno povećanjem vrijednosti v_a .
- Za sve ispitivane porozne slojeve vrijednosti modificiranog koeficijenta trenja linearno se smanjuju povećanjem modificirane Reynoldsove značajke.
- Usporedbom eksperimentalno dobivenih vrijednosti pada tlaka za ispitivane porozne slojeve s vrijednostima određenim teorijskim jednadžbama iz literature, utvrđeno je da su odstupanja znatno manja kod primjene Ergunove i/ili Burke-

Plummerove jednadžbe. Za pouzdaniji zaključak sugerira se provedba daljnjih istovjetnih ispitivanja u kojima bi se obuhvatili porozni slojevi većeg raspona 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. R. S. Brodkey, H. C. Hershey, Transport Phenomena – Unified Approach, McGraw-Hill Book Company, New York, 1988, str. 600 – 637.
3. 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.
4. G. G. Brown et al., Unit Operations, John Wiley & Sons, Inc., 7th Edit., New York, 1960, str. 210 – 219.
5. URL: https://tf.unibl.org/wp-content/uploads/2017/09/Predavanje_Dinamika_Fluida.pdf (15.12.2017.)
6. URL: https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/skripta1%5B1%5D.pdf (18.07.2016.)
7. A. Glasnović, A. Sander, Prijenos tvari i energije (skripta za internu uporabu), Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2016, str. 43.
8. URL: https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/Moodyjev_dijagram%5B2%5D.pdf (15.11.2013.)
9. R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot, Transport Phenomena, John Wiley & Sons, Inc., 2nd Edit., 2006, str. 180 – 208.
10. N. Kuzmanić, A. Čelan, Prijenos tvari i energije – Priručnik za laboratorijske vježbe (skripta za internu uporabu), Kemijsko – tehnološki fakultet, Split, 2018, str. 36 – 54.
11. 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.

12. F. Zdanski et al., Tehnološke operacije – praktikum, Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, 5. izdanje, Beograd, 1987, str. 116 – 125.
13. URL: https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/skripta1%5B1%5D.pdf
(18.07.2016.)
14. A. J. Geankoplis, Transport Processes and Unit Operations, Prentice-Hall International, Inc., 3rd Edit., New Jersey, 1993, str. 114 – 127.
15. E. Mitrović Kessler, Prijenos tvari i energije (skripta za internu uporabu), Kemijsko – tehnološki fakultet, Split, 1985, str. 90 – 100.
16. N. Kuzmanić, Prijenos tvari i energije – Predavanja, PowerPoint prezentacija, Kemijsko – tehnološki fakultet, Split, 2021.
17. F. Andreola, C. Leonelli, M. Romagnoli, P. Miselli, Techniques Used to Determine Porosity, American Ceramic Society Bulletin, July 2000, str. 49 – 52.