



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
TEHNOLOŠKI FAKULTET NOVI SAD  
HEMIJSKO INŽENJERSTVO

**SIMULTANI UTICAJ ENERGIJE  
POVRŠINE VLAKANA, GEOMETRIJE  
SLOJA I PRIRODE ULJNE FAZE NA  
OBRADU ZAULJENIH VODA  
KOALESCENTNOM FILTRACIJOM**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor:

Prof. dr Tatjana Vulić

Doc. dr Dunja Sokolović

Kandidat:

Arpad Kiralj,

mast. inž. tehnol.

Novi Sad, 2016. godine

UNIVERZITET U NOVOM SADU



---

# ZAHVALNICA

Najtoplije se zahvaljujem mentorima prof. dr Tatjani Vulić i doc. dr Dunji Sokolović na velikoj pomoći, nesebičnoj podršci i razumevanju prilikom obrade rezultata i pisanja doktorske disertacije.

Zahvaljujem se prof. dr Vladi Veljkoviću, prof. dr Aleksandru Jokiću i prof. dr Draganu Govedarici na konstruktivnim sugestijama i učešću u komisiji, kao i dr Milici Handađev-Kostić, dipl. inž. Olgi Govedarici i prof. dr Snežani Sinadinović-Fišer na pomoći tokom izrade eksperimenata.

Posebnu zahvalnost dugujem prof. dr Radmili Šećerov-Sokolović na pomoći, podršci i razumevanju tokom mog celokupnog rada na Tehnološkom fakultetu, kao i prof. dr Radmili Marinković-Nedučin na velikoj podršci tokom studiranja.

Takođe, zahvaljujem se na nemerljivoj podršci svoje porodice, majci, ocu i supruzi Milici tokom svih ovih godina studiranja i rada na Tehnološkom fakultetu u Novom Sadu.

Želeo bih da se zahvalim kolegama i prijateljima na nezaboravnim trenucima tokom studija i izrade ovog rada.

UNIVERZITET U NOVOM SADU  
TEHNOLOŠKI FAKULTET NOVI SAD

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

REDNI BROJ (RBR):

IDENTIFIKACIONI BROJ (IBR):

TIP DOKUMENTACIJE (TD): Monografska publikacija

TIP ZAPISA (TZ): Tekstualni štampani materijal

VRSTA RADA (dipl., mag., dokt.)  
(VR): Doktorska disertacija

IME I PREZIME AUTORA (AU): Arpad Kiralj

MENTOR (titula, ime, prezime, zvanje) (MN): Prof. dr Tatjana Vulić, vanredni profesor  
Doc. dr Dunja Sokolović, docent

NASLOV RADA (NR): Simultani uticaj energije površine vlakana, geometrije sloja i prirode uljne faze na obradu zauljenih voda koalescentnom filtracijom

JEZIK PUBLIKACIJE (JZ): Srpski (latinica)

JEZIK IZVODA (JI): Srpski/Engleski

ZEMLJA PUBLIKOVANJA (ZP): Republika Srbija

UŽE GEOGRAFSKO PODRUČJE  
(UGP): AP Vojvodina

---

|   |  |
|---|--|
| GODINA (GO):                            | 2016.  |
| IZDAVAČ (IZ):                           | Autorski reprint   |
| MESTO I ADRESA (MA):                    | 21000 Novi Sad, Bulevar cara Lazara 1  |
| FIZIČKI OPIS RADA (FO):                 | 6 poglavlja, 128 strana, 30 tabela, 116 slika, 111 literaturnih navoda                         |
| NAUČNA OBLAST (OB):                     | Hemijsko-tehnološke nauke  |
| NAUČNA DISCIPLINA (ND):                 | Zaštita okoline u hemijskoj industriji, projektovanje tehnoloških procesa, separacione tehnike |
| PREDMETNA ODREDNICA, KLJUČNE REČI (PU): | Koalescencija, vlaknasti sloj, materijal visoke i niske energije površine                      |
| UDK:                                    |  |
| ČUVA SE (ČU):                           | Biblioteka Tehnološkog fakulteta Novi Sad u Novom Sadu, 21000 Novi Sad, Bulevar cara Lazara 1  |
| VAŽNA NAPOMENA (VN):                    | Nema   |

IZVOD/APSTRAKT (I/A):

Cilj istraživanja doktorske disertacije je bio ispitivanje mogućnosti primene vlakana od nerđajućeg čelika za koalescenciju kapi mineralnih ulja različite polarosti pri različitoj permeabilnosti sloja. Pored toga cilj je bio i komparativna analiza efikasnosti separacije ispitivanih ulja vlaknima visoke i niske energije površine. Postavljena je i modifikovana metoda kinetike upijanja tečnosti za ocenu sklonosti ulja ka odabranim vlaknima od kojih se formira sloj. Po prvi put je primenjena i metoda veštačkih neuronskih mreža za simulaciju koalescentne filtracije.

Eksperimentalni program koalescentne filtracije je realizovan na model emulziji dispergovanog ulja u vodi konstantne ulazne koncentracije 500 mg/l, pri konstantnoj temperaturi od 20°C, horizontalnoj orijentaciji toka fluida i prosečnoj veličini kapi ulja od 10 μm. Uticaj geometrije sloja ispitivan je variranjem permeabilnosti u opsegu od  $0,18 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  do  $5,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  za konstantnu debljinu sloja od 5 cm. Testirana su tri uzorka mineralnog ulja velikog raspona viskoznosti i polarosti. Svi ogledi su realizovani pri konstantnoj brzini fluida

---

u intervalu od 10 m/h do 80 m/h. Izlazna koncentracija dispergovane faze određivana je FTIR spektrofotometrijom.

Značajan doprinos u istraživanju fenomena koalescencije u sloju vlakana ogleđa se u utvrđivanju mogućnosti primene vlakana nerđajućeg čelika na separaciju kapi mineralnih ulja, razumevanju simultanog uticaja energije površine, geometrije sloja i prirode uljne faze, kao i uvođenju nove veličine izo-izlazne koncentracije. Test određivanja kinetike upijanja tečnosti je pokazao da odnos liofilno-liofobne kvašljivosti materijala adekvatno opisuje sklonost nekog filtarskog materijala ka separaciji ulja mineralnog porekla. Ovako sveobuhvatna analiza uticaja različitih parametara na efikasnost koalescentne filtracije, data u ovoj disertaciji, nije zabeležena u dostupnim literaturnim navodima. Rezultati doktorske disertacije omogućiće skraćivanje vremena i materijalnih troškova neophodnih za projektovanje koalescera, jer smanjuju potreban obim eksperimentalnih istraživanja potrebnih za uspešno projektovanje.

Odabrani uslovi rada, prvenstveno prečnik vlakana materijala u odnosu na ulaznu veličinu kapi, kao i način njihovog pakovanja, uz obezbeđivanje poznate i definisane permeabilnosti, obezbedili su željenu separaciju, čija se efikasnost separacije kapi ispitivanih ulja vlaknima od nerđajućeg čelika kreće u opsegu od 91% do 99% za opseg brzina fluida od 10 m/h do 50 m/h. Kod sloja vlakana od nerđajućeg čelika efikasnija separacija je zapažena pri niskim vrednostima permeabilnosti, dok je kod polimernog materijala obrnut slučaj. Zaključeno je da, u postojećim okolnostima, kod posmatranih materijala dominiraju različiti mehanizmi koalescencije u sloju. Oblik zavisnosti izlazne koncentracije od brzine i permeabilnosti za oba ispitivana materijala, nerđajući čelik i polipropilen, je sličan. Polipropilen ima veći radni opseg brzina u odnosu na nerđajući čelik. Međutim, nerđajući čelik uspešnije separiše ulje najniže viskoznosti u oblasti niskih vrednosti permeabilnosti i pri niskim radnim brzinama u odnosu na polipropilen. Zadovoljavajući kvalitet separacije se kod polipropilena ostvaruje pri najvišoj permeabilnosti i u širokom opsegu brzina, dok se kod nerđajućeg čelika najviše vrednosti kritične brzine za ceo opseg ispitivane viskoznosti ostvaruju pri najnižoj permeabilnosti sloja.

DATUM PRIHVATANJA TEME OD 21.04.2016.

STRANE SENATA (DP):

DATUM ODBRANE TEME (DO):

---

ČLANOVI KOMISIJE (KO)

(ime i prezime, titula, zvanje, naziv organizacije, status)

- PREDSEDNIK: Prof. dr Vlada Veljković, redovni profesor,  
Tehnološki fakultet, Univerzitet u Leskovacu
- ČLAN/MENTOR: Prof. dr Tatjana Vulić, vanredni profesor,  
Tehnološki fakultet Novi Sad,  
Univerzitet u Novom Sadu
- ČLAN/MENTOR: Doc. dr Dunja Sokolović, docent,  
Fakultet tehničkih nauka,  
Univerzitet u Novom Sadu
- ČLAN: Prof. dr Aleksandar Jokić, vanredni profesor,  
Tehnološki fakultet Novi Sad,  
Univerzitet u Novom Sadu
- ČLAN: Prof. dr Dragan Govedarica, vanredni profesor,  
Tehnološki fakultet Novi Sad,  
Univerzitet u Novom Sadu

---

UNIVERSITY OF NOVI SAD  
FACULTY OF TECHNOLOGY

KEY WORDS DOCUMENTATION

ACCESSION NUMBER (AN):

IDENTIFICATION NUMBER (IN):

DOCUMENT TYPE (DT): Monographic Publisher

TYPE OF RECORD (TR): Textual printed material

CONTENTS CODE (CC): Ph.D. thesis

AUTHOR (AU): Arpad Kiralj

MENTHOR  
(MN): Prof. dr Tatjana Vulić  
associate professor  
Doc. dr Dunja Sokolović,  
assistant professor

TITLE (TI): Simultaneous influence of fiber surface  
energy, bed geometry and nature of the  
oil phase on the oily water treatment by  
coalescence filtration

LANGUAGE OF TEXT (LT): Serbian (latin)

LANGUAGE OF ABSTRACT (LA): Serbian/English

COUNTRY OF PUBLICATION  
(CP): Republic of Serbia



---

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| LOCALITY OF PUBLICATION (LP): | AP Vojvodina  |
| PUBLICATION YEAR (PY):        | 2016.   |
| PUBLISHER (PB):               | Author reprint  |
| PUBLICATION PLACE (PP):       | 21000 Novi Sad, Bulevar cara Lazara 1                                   |
| PHISICAL DESCRIPTION (PD):    | 6 chapters, 128 pages, 30 tables, 116 figures, 111 references           |
| SCIENTIFIC FIELD (SF):        | Chemical-Technological Sciences   |
| SCIENTIFIC DISCIPLINE (SD):   | Enviromental Protection, Process Design, Separation Technics            |
| SUBJECT / KEY WORDS (SXW):    | Coalescence, fiber bed, material of high and low surface energy         |
| UC:                           |   |
| HOLDING DATA (HD):            | Library of Faculty of Technology, 21000 Novi Sad, Bulevar cara Lazara 1 |
| NOTE (N):                     | No notes  |

ABSTRACT (AB):

The aim of the doctoral thesis was to investigate the possibility of the stainless steel fibers application for the coalescence of mineral oil drops with different polarity varying also the bed permeability. Additional aim was the comparative analysis of the tested oil separation efficiency with fibers that have high and low surface energy. The method for the evaluation of the fiber-liquid wetting kinetic was set up and modified in order to assess the affinity of oil to the selected fiber that was used to form the filtration bed. For the first time, the method of artificial neural networks was applied to simulate the coalescence filtration.

Experimental program of coalescence filtration was performed on oil-in-water model emulsion with constant inlet concentration of 500 mg/l, at a constant temperature of 20°C, horizontal fluid flow orientation and average oil drop size of 10  $\mu\text{m}$ . The influence of bed geometry was studied varying bed permeability in the range from  $0,18 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  to  $5,510 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  for the constant layer

---

thickness of 5 cm. Three samples of mineral oil that have large range of viscosity and polarity were tested. All experiments were carried out at constant fluid velocity in the range from 10 m/h to 80 m/h. The output dispersed phase concentration was determined by FTIR spectrophotometry.

A significant contribution to the research of the coalescence phenomenon in a fiber bed was achieved by determining the possibility to use stainless steel fibers for the separation of mineral oil drops, broadening the apprehension of the simultaneous influence of surface energy, bed geometry and oil phase nature, as well as the introduction of an iso-output concentration as a new parameter. The evaluation of the fiber-liquid wetting kinetic showed that the lipophilic-lyophobic wettability ratio of the material adequately describes the tendency of a filter material for the mineral oil separation. Such comprehensive analysis of the various parameters impact on the efficiency of coalescence filtration, presented in this thesis, was not found in available literature. The results of the doctoral thesis will enable the reduction of time and material cost needed for the design of coalescer, by decreasing the extent of experimental research necessary for successful design.

Selected working conditions, primarily the fiber diameter in relation to the input drop size, as well as bed packaging, while ensuring the known and defined bed permeability, provided the desired separation, with the oil drop separation efficiency of tested stainless steel fibers in the range from 91% to 99% for a fluid velocity range from 10 m/h to 50 m/h. When stainless steel was used, more efficient separation was observed for the low bed permeability, whereas for the polymer fibers the reverse order was identified. It was concluded that, in the existing circumstances, different mechanisms of oil drop coalescence dominate for these materials. The dependence of output concentration from the velocity and bed permeability for both tested materials, stainless steel and polypropylene, was similar. Polypropylene has a higher operating velocity range in comparison to stainless steel. However, when compared to polypropylene, stainless steel separates more successfully the oil with the lowest viscosity in the low bed permeability and at low fluid velocity domain. Satisfactory quality of separation with polypropylene is achieved at the highest bed permeability and in a wide fluid velocity range, whereas, with the stainless steel, the highest values of critical velocity, for the entire range of tested viscosity, are realized at the lowest bed permeability.

ACCEPTED ON SENATE ON 21.04.2016.

(ABS):

DEFENDED ON (DE):

---

THESIS DEFENDED BOARD (DB)

- PRESIDENT: Prof. dr Vlada Veljković, full professor,  
Faculty of Technology, University of Leskovac
- MEMBER/MENTHOR: Prof. dr Tatjana Vulić, associate professor,  
Faculty of Technology Novi Sad,  
University of Novi Sad
- MEMBER/MENTHOR: Doc. dr Dunja Sokolović, assistant professor,  
Faculty of Technical Science,  
University of Novi Sad
- MEMBER: Prof. dr Aleksandar Jokić, associate professor,  
Faculty of Technology Novi Sad,  
University of Novi Sad
- MEMBER: Prof. dr Dragan Govedarica, associate professor,  
Faculty of Technology Novi Sad,  
University of Novi Sad

---

# SADRŽAJ

|  |             |
|--|-------------|
| <b>LISTA SLIKA</b>   | <b>XIII</b> |
| <b>LISTA TABELA</b>  | <b>XIX</b>  |
| <b>1. UVOD I CILJ</b>  | <b>1</b>    |
| <b>2. TEORIJSKI DEO</b>  | <b>3</b>    |
| 2.1 Uvod u kvašljivost čvrste površine . . . . .                     | 4           |
| 2.2 Separacija kapi vlaknima koja nisu kvašljiva dispergovanom fazom | 7           |
| 2.3 Značaj geometrije sloja pri separaciji kapi . . . . .            | 32          |
| 2.4 Uticaj osobina tečnosti na koalescenciju . . . . .               | 48          |
| 2.5 Primena veštačkih neuronskih mreža na koalescentnu filtraciju .  | 55          |
| <b>3. EKSPERIMENTALNI DEO</b>  | <b>58</b>   |
| 3.1 Eksperimentalni program . . . . .                                | 59          |
| 3.2 Metode rada i eksperimentalne tehnike . . . . .                  | 60          |
| 3.2.1 Osobine sloja . . . . .  | 60          |
| 3.2.2 Osobine filtarskog materijala . . . . .                        | 60          |
| 3.2.3 Osobine ulja . . . . .   | 60          |
| 3.2.4 Osobine emulzije . . . . .                                     | 61          |
| 3.2.5 Radne promenljive . . . . .                                    | 62          |
| 3.3 Eksperimentalni uređaj i uslovi rada . . . . .                   | 63          |
| 3.4 Prikaz rezultata . . . . .                                       | 66          |
| 3.4.1 Osobine sloja . . . . .  | 66          |
| 3.4.2 Osobine filtarskog materijala . . . . .                        | 66          |
| 3.4.3 Osobine dispergovane faze . . . . .                            | 67          |
| 3.4.4 Osobina emulzije . . . . .                                     | 67          |
| 3.4.5 Eksperimentalni podaci dobijeni koalescentnom filtracijom      | 67          |

---

|  |            |
|--|------------|
| <b>4. ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA</b>  | <b>73</b>  |
| 4.1 Morfologija površine vlakana ispitivanih materijala . . . . .  | 74         |
| 4.2 Separacija kapi ulja primenom vlakana od nerđajućeg čelika . . .   | 76         |
| 4.3 Simultani uticaj geometrije sloja i prirode ulja za sloj od nerđajućeg<br>čelika . . . . .   | 85         |
| 4.4 Uticaj energije površine na koalescenciju u vlaknastom sloju . . .   | 93         |
| 4.5 Simultani uticaj energije površine, geometrije sloja i prirode uljne<br>faze na koalescenciju u sloju vlakana primenom veštačkih neuron-<br>skih mreža . . . . . | 99         |
| 4.6 Modifikovana metoda kinetike upijanja tečnosti i njena primena na<br>ispitivane filtarske materijale . . . . .   | 114        |
| <b>5. ZAKLJUČAK</b>  | <b>118</b> |
| <b>6. LITERATURA</b>   | <b>120</b> |

---

# LISTA SLIKA

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Slika 1.  | Kvašljivost čvrste površine: a) nekvašljiva, b) dobro kvašljiva i c) potpuno kvašljiva površina . . . . .                         | 4  |
| Slika 2.  | Dijagram zavisnosti kosinusa ugla kvašenja od površinskog napona tečnosti (Zisman metoda) . . . . .                               | 5  |
| Slika 3.  | Koalescencija kapi u sloju formiranom od pletene žice nerđajućeg čelika i polipropilena . . . . .                                 | 8  |
| Slika 4.  | Metalne mreže nikla za ispitivanje mogućnosti separacije sistema ulja u vodi . . . . .  | 9  |
| Slika 5.  | Izgled izlaznih kapi kada sloj nije kvašljiv uljem pri velikoj brzini tečnosti . . . . .  | 11 |
| Slika 6.  | Izgled izlaznih kapi kada je sloj kvašljiv dispergovanom fazom . . . . .  | 11 |
| Slika 7.  | Zavisnost izlazne koncentracije dispergovane faze od brzine za različite debljine sloja . . . . .                                 | 12 |
| Slika 8.  | Zavisnost efikasnosti separacije od brzine za slojeve različite geometrije . . . . .  | 13 |
| Slika 9.  | Zavisnost kritične brzine od pH vrednosti pri različitim debljinama sloja . . . . .   | 15 |
| Slika 10. | Grafički prikaz slaganja eksperimentalnih i računatih podataka . . . . .  | 17 |
| Slika 11. | Sadržaj ulja na izlazu iz sloja u funkciji veličine kapi i prirode vlakana . . . . .  | 18 |
| Slika 12. | Akumulacija dispergovane faze na površini diska što će omogućiti otkidanja velike kapi . . . . .                                  | 19 |
| Slika 13. | Pogled na unutrašnjost sloja vlakana pri dvofaznom proticanju . . . . .   | 20 |
| Slika 14. | Formirani film vodene faze kada je površina staklenog štapa kvašljiva vodom, netretirana površina (najveća kvašljivost) . . . . . | 21 |
| Slika 15. | Kapi vode kada je površina staklenog štapa nekvašljiva vodom, tretirana površina silanom (najmanja kvašljivost) . . . . .         | 21 |
| Slika 16. | Uticaj odnosa površine polimernih nanovlakana i površine staklenih vlakana na efikasnost separacije . . . . .                     | 22 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Slika 17. | Kapi ulja i vode na četiri različite čvrste površine . . . . .  | 23 |
| Slika 18. | SEM snimak komercijalnih staklenih vlakana ( $5 \mu m$ ) presvučenih nanovlaknima najlona (250 nm). . . . .   | 24 |
| Slika 19. | Šematski prikaz mehanizama separacije kapi ulja na hidrofobnoj površini . . . . .   | 25 |
| Slika 20. | Šematski prikaz mehanizama separacije kapi ulja na hidrofilnoj površini . . . . .   | 25 |
| Slika 21. | Šematski poprečni prikaz kapi koja delimično kvasi čvrstu sferu .   | 26 |
| Slika 22. | Poređenje uticaja odnosa prečnika kapi i prečnika cilindra na ugao kvašenja određenih eksperimentalnim i računskim putem . . . . .  | 26 |
| Slika 23. | Mikro hrapavost površine dva različita uzorka tekstila . . . . .  | 27 |
| Slika 24. | Izgled vlakana i njihove površine sa nanetim nanočesticama pri različitim uvećanjima . . . . .  | 27 |
| Slika 25. | Kapi izooktana na čvrstoj površini: a) površinska filtracija (membrane), b) dubinska filtracija (koalescer). . . . .  | 28 |
| Slika 26. | Uticaj energije površine na adheziju i kvašljivost izooktana i vode   | 28 |
| Slika 27. | Izgled sloja slobodnih i povezanih vlakana. . . . .   | 29 |
| Slika 28. | Filtarski materijali korišćeni u eksperimentima: a) vlakna polimera, b) vlakna nerđajućeg čelika. . . . .   | 31 |
| Slika 29. | Šematski prikaz sastava ispitivanih slojeva. . . . .  | 33 |
| Slika 30. | Veličina izlaznih kapi iz različitih slojeva. . . . .   | 35 |
| Slika 31. | Uticaj prečnika vlakana na efikasnost separacije za tri različita vlaknasta sloja . . . . .   | 35 |
| Slika 32. | Zarobljavanje i koalescencija kapi u sloju vlakana: a) kap u sloju vlakana jednakih prečnika, b) kap u nasumično pomešanim vlaknima dva prečnika, c) kap u sendvič sistemu gde prečnik vlakna raste od ulaza prema izlazu . . . . . | 36 |
| Slika 33. | Zavisnost kritične brzine od permeabilnosti sloja za različite debljine sloja pri horizontalnoj orijentaciji . . . . .  | 37 |
| Slika 34. | Zavisnost kritične brzine od viskoznosti dispergovanog ulja i permeabilnosti sloja. . . . .   | 38 |
| Slika 35. | Uticaj debljine sloja i prirode vlakana na izlaznu veličinu kapi . . .  | 39 |
| Slika 36. | Izgled i dimenzije korišćenih filtarskih materijala . . . . .   | 40 |
| Slika 37. | Filtarski medijum: a) granule, b) trake, c) cilindri . . . . .  | 40 |
| Slika 38. | Zavisnost poroznosti od permeabilnosti . . . . .  | 42 |
| Slika 39. | 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije od permeabilnosti sloja i brzine fluida. . . . .   | 43 |
| Slika 40. | 3D dijagrami zavisnosti kritične brzine od debljine sloja i permeabilnosti za orijentacije toka (a) vertikalno nagore i (b) horizontalno  |    |
|           | 44  |    |
| Slika 41. | Uticaj poroznosti sloja na izlaznu koncentraciju pri različitim debljinama . . . . .  | 45 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Slika 42. | Uticaj veličine pora na efikasnost separacije . . . . .   | 46 |
| Slika 43. | 3D dijagrami zavisnosti kritične brzine, $v_{kr}$ , od viskoznosti ulja i permeabilnosti sloja za (a) sloj PE i (b) sloj PP. . . . .              | 49 |
| Slika 44. | Konturni dijagrami sa izokritičnim brzinama za sloj (a) PU i (b) PE   | 50 |
| Slika 45. | Zavisnost efikasnosti separacije od razlike gustina tečnosti koje grade emulziju . . . . .  | 50 |
| Slika 46. | Zavisnost efikasnosti separacije od gustine za (a) V/U, (b) U/V. .  | 51 |
| Slika 47. | 3D dijagram zavisnosti efikasnosti separacije od brzine fluida i gustine dispergovane uljne faze pri horizontalnoj orijentaciji toka . .          | 51 |
| Slika 48. | 3D dijagram zavisnosti efikasnosti separacije od brzine fluida i molske mase dispergovane uljne faze pri horizontalnoj orijentaciji toka. . . . . | 52 |
| Slika 49. | Mineralno ulje P1 nakon separacije prolaskom kroz sloj polipropilena. . . . .   | 53 |
| Slika 50. | Mineralno ulje A nakon separacije prolaskom kroz sloj polipropilena. . . . .  | 54 |
| Slika 51. | Mineralno ulje A4 nakon separacije prolaskom kroz sloj polipropilena . . . . .  | 54 |
| Slika 52. | Struktura jedne jedinice (neurona) u veštačkoj neuronskoj mreži .   | 55 |
| Slika 53. | Grafik sigmoidne transferne funkcije . . . . .  | 56 |
| Slika 54. | 3D prikaz eksperimentalne aparature za koalescentnu filtraciju . .  | 63 |
| Slika 55. | 3D prikaz koalescera . . . . .  | 64 |
| Slika 56. | Aparatura za ispitivanje kinetike upijanja tečnosti. . . . .  | 64 |
| Slika 57. | Snimak vlakana materijala SS (SEM×100) . . . . .  | 74 |
| Slika 58. | Snimak vlakana materijala SS (SEM×20000) . . . . .  | 75 |
| Slika 59. | Snimak vlakana materijala PP (SEM×100). . . . .   | 75 |
| Slika 60. | Prikaz zavisnosti izlazne koncentracije ulja A4 od brzine za sve permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika . . . . .                                 | 76 |
| Slika 61. | Prikaz zavisnosti izlazne koncentracije ulja A od brzine za sve permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika . . . . .                                  | 77 |
| Slika 62. | Prikaz zavisnosti izlazne koncentracije ulja P1 od brzine za sve permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika . . . . .                                 | 77 |
| Slika 63. | 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A4 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika . . . . .                                 | 78 |
| Slika 64. | 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika . . . . .                                  | 78 |
| Slika 65. | 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja P1 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika . . . . .                                 | 79 |
| Slika 66. | Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A4 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika. . . . .                            | 79 |
| Slika 67. | Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika. . . . .                             | 80 |



---

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Slika 68. | Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja P1 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika. . . . .        | 80 |
| Slika 69. | 3D dijagram zavisnosti efikasnosti separacije ulja A4 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika. . . . .             | 81 |
| Slika 70. | 3D dijagram zavisnosti efikasnosti separacije ulja A od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika. . . . .              | 82 |
| Slika 71. | 3D dijagram zavisnosti efikasnosti separacije ulja P1 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika. . . . .             | 82 |
| Slika 72. | Konturni dijagram zavisnosti efikasnosti separacije ulja A4 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika. . . . .       | 83 |
| Slika 73. | Konturni dijagram zavisnosti efikasnosti separacije ulja A od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika. . . . .        | 83 |
| Slika 74. | Konturni dijagram zavisnosti efikasnosti separacije ulja A od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika. . . . .        | 84 |
| Slika 75. | Pad pritiska po jedinici debljine sloja pri proticanju vode kroz sloj od nerđajućeg čelika pri različitim brzinama . . . . .  | 86 |
| Slika 76. | Zavisnost kritične brzine od permeabilnosti sloja za sva ispitivana ulja . . . . .  | 87 |
| Slika 77. | Zavisnost kritične brzine od viskoznosti ulja za sve permeabilnosti sloja od nerđajućeg čelika . . . . .                      | 88 |
| Slika 78. | 3D dijagram zavisnosti kritične brzine od viskoznosti ulja i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika. . . . .                  | 88 |
| Slika 79. | Konturni dijagram zavisnosti kritične brzine od viskoznosti ulja i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika. . . . .            | 89 |
| Slika 80. | Uljna faza posle sloja za ulje A4 pri najmanjoj permeabilnosti. . . . .   | 89 |
| Slika 81. | Uljna faza posle sloja za ulje A4 pri najvećoj permeabilnosti . . . . .   | 90 |
| Slika 82. | Uljna faza posle sloja za ulje A pri najmanjoj permeabilnosti. . . . .  | 90 |
| Slika 83. | Uljna faza posle sloja za ulje A pri najvećoj permeabilnosti . . . . .  | 90 |
| Slika 84. | Dijagrami zavisnosti $v_k$ od neutralizacionog broja za sve permeabilnosti za materijal SS. . . . .                           | 91 |
| Slika 85. | 3D dijagrami zavisnosti $v_k$ od permeabilnosti i neutralizacionog broja za materijal SS. . . . .                             | 91 |
| Slika 86. | Konturni dijagrami zavisnosti $v_k$ od permeabilnosti i neutralizacionog broja za materijal SS. . . . .                       | 92 |
| Slika 87. | 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A4 od brzine i permeabilnosti: (a) materijal SS i (b) materijal PP. . . . . | 93 |
| Slika 88. | 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A od brzine i permeabilnosti: (a) materijal SS i (b) materijal PP. . . . .  | 94 |
| Slika 89. | 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja P1 od brzine i permeabilnosti: (a) materijal SS i (b) materijal PP. . . . . | 94 |
| Slika 90. | Dijagrami zavisnosti $v_k$ od permeabilnosti za sva ispitivana ulja: (a) materijal SS i (b) materijal PP . . . . .            | 95 |

---

---

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| Slika 91.  | 3D dijagrami zavisnosti $v_k$ od permeabilnosti i viskoznosti ispitivanih ulja: (a) materijal SS i (b) materijal PP . . . . .  | 95  |
| Slika 92.  | Fotografije uljne faze posle sloja: (a) materijal PP i (b) materijal SS  | 96  |
| Slika 93.  | 3D dijagrami zavisnosti $v_k$ od permeabilnosti i neutralizacionog broja ispitivanih ulja: (a) materijal PP i (b) materijal SS. . . . .  | 97  |
| Slika 94.  | Konturni dijagrami zavisnosti $v_k$ od permeabilnosti i neutralizacionog broja ispitivanih ulja: (a) materijal PP i (b) materijal SS. . . . .  | 97  |
| Slika 95.  | Konturni dijagram izlazne koncentracije, $C_i=15$ mg/l, od permeabilnosti i brzine za oba ispitivana materijala . . . . .  | 98  |
| Slika 96.  | Arhitektura veštačke neuronske mreže testirane za eksperimentalne podatke koalescentne filtracije . . . . .  | 100 |
| Slika 97.  | Dijagram regresije za (a) nerđajući čelik i (b) polipropilen . . . . .   | 104 |
| Slika 98.  | Dijagram zavisnosti (a) koeficijenta korelacije i (b) srednje kvadratne greške od broja neurona u skrivenom sloju za materijal od nerđajućeg čelika . . . . .                        | 105 |
| Slika 99.  | Dijagram zavisnosti (a) koeficijenta korelacije i (b) srednje kvadratne greške od broja neurona u skrivenom sloju za materijal od polipropilena. . . . .                             | 105 |
| Slika 100. | 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A4 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom. . . . .       | 106 |
| Slika 101. | Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A4 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom. . . . . | 106 |
| Slika 102. | 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom. . . . .        | 107 |
| Slika 103. | Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom. . . . .  | 107 |
| Slika 104. | 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja P1 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom. . . . .       | 108 |
| Slika 105. | Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja P1 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom. . . . . | 108 |
| Slika 106. | 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A4 od brzine i permeabilnosti sloja polipropilena za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom . . . . .          | 109 |
| Slika 107. | Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A4 od brzine i permeabilnosti sloja polipropilena za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom . . . . .    | 109 |

---

---

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| Slika 108. | 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A od brzine i permeabilnosti sloja polipropilena za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom . . . . .        | 110 |
| Slika 109. | Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A od brzine i permeabilnosti sloja polipropilena za (a) eksperimentalne podatke (b) podatke dobijene modelom. . . . .     | 110 |
| Slika 110. | 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja P1 od brzine i permeabilnosti sloja polipropilena za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom . . . . .       | 111 |
| Slika 111. | Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja P1 od brzine i permeabilnosti sloja polipropilena za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom . . . . . | 111 |
| Slika 112. | Uticaj ulaznih parametara na izlazni parametar (izlaznu koncentraciju dispergovane faze) za nerđajući čelik po (a) Garson-ovom modelu i (b) Yoon-ovom modelu. . . . .             | 112 |
| Slika 113. | Uticaj ulaznih parametara na izlaznu koncentraciju dispergovane faze za polipropilen po (a) Garson-ovom modelu i (b) Yoon-ovom modelu. . . . .                                    | 113 |
| Slika 114. | Dijagram kinetike upijanja ispitivanih ulja vlaknima SS. . . . .  | 114 |
| Slika 115. | Dijagram linearnog dela kinetike upijanja tečnosti za vlakna SS. . . . .  | 115 |
| Slika 116. | Zavisnost kritične brzine od promene L/L odnosa . . . . .   | 117 |

---

# LISTA TABELA

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Tabela 1.  | Kritični površinski napon za neke materijale .....                                      | 6  |
| Tabela 2.  | Ugao kvašenja vodom i efikasnost separacije .....                                       | 22 |
| Tabela 3.  | Karakteristike testiranih vlakana .....   | 31 |
| Tabela 4.  | Sastav i osobine ispitivanih slojeva .....  | 34 |
| Tabela 5.  | Prečnici testiranih vlakana i granula za koalescentnu filtraciju ...                    | 39 |
| Tabela 6.  | Osobine testiranih materijala za koalescentnu filtraciju .....                          | 41 |
| Tabela 7.  | Osobine poliuretanskog sloja za različite nasipne gustine .....                         | 43 |
| Tabela 8.  | Fizičke osobine ispitivanih materijala .....  | 46 |
| Tabela 9.  | Osobine sloja .....   | 66 |
| Tabela 10. | Osobine filtarskog materijala .....   | 66 |
| Tabela 11. | Osobine dispergovane faze .....   | 67 |
| Tabela 12. | Osobine emulzije .....  | 67 |
| Tabela 13. | Eksperimentalni rezultati izlazne koncentracije $C_i$ (mg/l) za sloj SS i ulje A .....  | 68 |
| Tabela 14. | Eksperimentalni rezultati izlazne koncentracije $C_i$ (mg/l) za sloj SS i ulje A4 ..... | 68 |
| Tabela 15. | Eksperimentalni rezultati izlazne koncentracije $C_i$ (mg/l) za sloj SS i ulje P1 ..... | 68 |
| Tabela 16. | Eksperimentalni rezultati izlazne koncentracije $C_i$ (mg/l) za sloj PP i ulje A .....  | 69 |
| Tabela 17. | Eksperimentalni rezultati izlazne koncentracije $C_i$ (mg/l) za sloj PP i ulje A4 ..... | 69 |
| Tabela 18. | Eksperimentalni rezultati izlazne koncentracije $C_i$ (mg/l) za sloj PP i ulje P1 ..... | 69 |
| Tabela 19. | Vrednosti efikasnosti separacije $E_i$ (%) za sloj SS i ulje A .....                    | 70 |
| Tabela 20. | Vrednosti efikasnosti separacije $E_i$ (%) za sloj SS i ulje A4 .....                   | 70 |
| Tabela 21. | Vrednosti efikasnosti separacije $E_i$ (%) za sloj SS i ulje P1 .....                   | 70 |
| Tabela 22. | Vrednosti efikasnosti separacije $E_i$ (%) za sloj PP i ulje A .....                    | 71 |
| Tabela 23. | Vrednosti efikasnosti separacije $E_i$ (%) za sloj PP i ulje A4 .....                   | 71 |

---

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 24. Vrednosti efikasnosti separacije $E_i$ (%) za sloj PP i ulje P1 . . . . .  | 71  |
| Tabela 25. Vrednosti kritičnih brzina za sloj SS, sva ulja i sve permeabilnosti   | 72  |
| Tabela 26. Vrednosti kritičnih brzina za sloj PP, sva ulja i sve permeabilnosti   | 72  |
| Tabela 27. Vrednosti koeficijenta korelacije, determinacije i srednje kvadratne greške za različit maksimalan broj testiranih veštačkih neuronskih ćelija u skrivenom sloju za SS. . . . .  | 102 |
| Tabela 28. Vrednosti koeficijenta korelacije, determinacije i srednje kvadratne greške za različit maksimalan broj testiranih veštačkih neuronskih ćelija u skrivenom sloju za PP . . . . . | 103 |
| Tabela 29. Vrednosti ostvarenih nagiba za sva ulja i vodu sa standardnom devijacijom . . . . .  | 115 |
| Tabela 30. Vrednosti $L/H$ odnosa i $L/L$ za sva ulja. . . . .  | 116 |

---

# 1. UVOD I CILJ

Emulzije ulje u vodi i voda u ulju široko su rasprostranjene, kako u industriji, tako i u prirodi. Izbor postupka separacije dispergovane faze za dostizanje potrebnog nivoa prečišćavanja zavisi od osobina emulzije, poput stabilnosti emulzije i koncentracije faza, pri čemu i veličina kapi ima značajan uticaj. Ukoliko se radi o relativno nestabilnim emulzijama koje imaju kapi sitnije od  $100\ \mu\text{m}$  jedna od ekonomski prihvatljivih separacionih tehnika jeste koalescentna filtracija.

Koalescentna filtracija se zasniva na tome da sloj filtarskog materijala, može biti izgrađen od granula ili vlakana, obezbedi uslove za ukрупnjavanje kapi dispergovane faze, posle čega one mogu da se istalože. Adekvatno odabrani uslovi obezbeđuju formiranje kapilarno-provodne faze koja dalje omogućava utapanje novih dolazećih kapi u njenu zapreminu, dok se krupne kapi od nje otkidaju i izlaze iz sloja. Makroskopski se ova pojava manifestuje kao da u sloj ulaze male kapi, a izlaze velike, koje se mogu separisati taloženjem.

Veliki broj parametara utiče na fenomene koalescentne filtracije i koalescenciju u sloju. Debljina sloja, priroda filtarskog materijala, brzina strujanja tečnosti, orijentacija toka tečnosti, osobine obe tečnosti, geometrija sloja i još dosta drugih pojava uslovljava te fenomene.

Interakcija kapi dispergovane faze sa površinom materijala filtracionog sloja dominantno zavisi od njihove hemijske prirode i geometrije. Lokalna geometrija površine odnosi se na njenu hrapavost, dok je globalna geometrija uslovljena njenim oblikom, da li je ravna ili zakrivljena.

U literaturi se često navodi da se polimerni materijali upotrebljavaju za separaciju ulja iz vode zbog svoje oleofilne površine i oni predstavljaju materijale sa niskom energijom površine. Međutim, za separaciju kapi vode iz ulja obično se koriste materijali visoke energije površine poput staklenih, čeličnih ili keramičkih vlakana.

Neki autori ukazuju da se ne pridaje dovoljan značaj geometriji sloja formiranog od vlakana, a da geometrija sloja predstavlja bitnu osobinu u samom procesu koalescentne filtracije. Upravo geometrija sloja može da promeni čak i efekat po-

---

voljne hemijske prirode filtarskog materijala. U literaturi nisu definisane veličine koje jednoznačno određuju geometriju vlaknastog sloja.

Cilj ove doktorske disertacije je utvrđivanje simultanog uticaja energije površine vlakana, geometrije sloja i prirode uljne faze na obradu zauljenih voda koalescentnom filtracijom. Iz tih razloga ispitivana je mogućnost primene vlakana nerđajućeg čelika kao materijala visoke energije površine za separaciju kapi ulja različite prirode iz vode variranjem geometrije sloja promenom nasipne gustine materijala. Pored toga, izvršeno je i poređenje efikasnosti separacije vlakana čelika sa vlaknima polipropilena ekvivalentnih osobina sloja, uslova orijentacije toka fluida, ulazne koncentracije, veličine kapi i prirode uljne faze. Ispitivana su ulja mineralnog porekla različite viskoznosti i polarnosti. Takođe, izvršena je modifikacija metode koja ocenjuje kvašljivost vlakana uljima mineralnog porekla.

Pored grafičke analize, komparacija separacije odabranih vlakana visoke i niske energije površine uspešno je realizovana i primenom veštačkih neuronskih mreža kao simulacione metode. Date tehnike se mogu koristiti za utvrđivanje optimalnih oblasti vrednosti geometrije sloja i prirode uljne faze radi optimizacije rada koalescera.

---

## 2. TEORIJSKI DEO

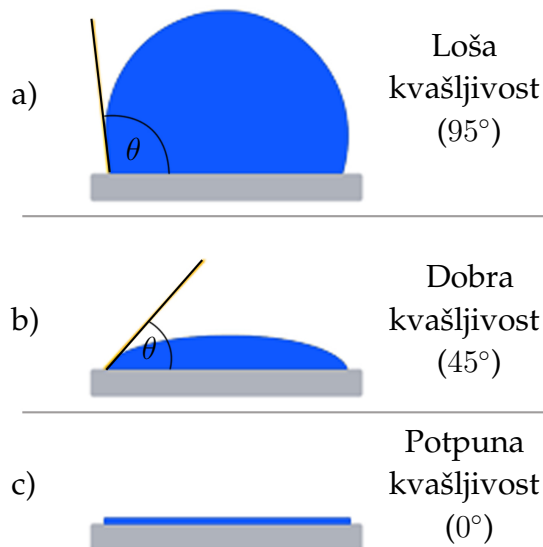


## 2.1 Uvod u kvašljivost čvrste površine

Kvašljivost je jedna od najbitnijih osobina filtarskog medijuma, koja značajno utiče na efikasnost koalescencije u sloju do sada još nedovoljno poznatim mehanizmima. U literaturi postoje različiti stavovi o tome (Govedarica i Sokolović 2014). Prilikom proučavanja fenomena koalescencije kapi u sloju vlakana dešava se čitav niz simultanih pojava. Veoma je važno izvršiti adekvatnu postavku eksperimenata, jer u suprotnom, ukoliko istraživači to ne učine, efekat kvašljivosti može biti prikriven nekom drugom promenom (Sharifi i Shaw 1996; Mullins i saradnici 2007; Yang i Chang 2008; Mullins i Braddock 2012; Mead-Hunter i saradnici 2012). U novije vreme naučnici razvijaju čvrste površine koje su potpuno nekvašljive, fobne površine. Primena takvih materijala za separaciju sistema tečno-tečno je u samom povoju (Lee i saradnici 2011; Yao i saradnici 2011; Chu i saradnici 2015).

Kvašljivost neke čvrste površine tečnom fazom se obično izražava preko ugla kvašenja. Ugao kvašenja, za ravne površine, nije problem odrediti. Međutim, kada se radi o zakrivljenim površinama kao što su granule i vlakna postoje poteškoće pouzdanog određivanja ugla kvašenja. Iz tih razloga naučnici rade na razvoju posrednih metoda koje bi mogle da ocene sklonost neke tečnosti ka kvašenju čvrste površine koja je zakrivljena (Kulkarni i saradnici 2012).

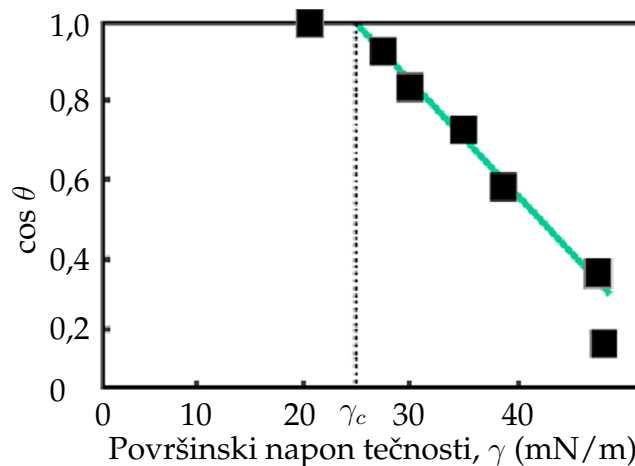
Na slici 1 dat je šematski prikaz ugla kvašenja čvrste površine tečnom fazom. Kada se na površini formira tečnost u obliku kapi tada tečnost loše kvasi tu površinu, a ugao kvašenja ima veću vrednost (na slici 1 obeležen sa  $\theta$ ). Što je manje vidljiva tečnost na čvrstoj površini ona bolje prijanja uz nju i bolje je kvasi, slika 1b i c.



Slika 1. Kvašljivost čvrste površine: a) nekvašljiva, b) dobro kvašljiva i c) potpuno kvašljiva površina

Određeni broj autora (Voyutskii i saradnici 1953; Shin i Chase 2004a; Kulkarni 2011; Patel i saradnici 2012; Govedarica i Sokolović 2014; Lu i saradnici 2016), smatra da u uslovima kada kontinualna faza kvasi i opkoljava vlakno, dispergovana faza ne može da priđe čvrstoj površini, te da je neophodno da čvrsta površina bude kvašljiva dispergovanom fazom da bi se postigla visoka efikasnost koalescencije u sloju. To bi značilo da je za separaciju organskih kapi potreban materijal koji je njome kvašljiv tj. oleofilan (vlakna polimera), dok je za otklanjanje kapi vode potreban materijal koji je hidrofilan (staklena i čelična vlakna). Međutim, istraživanja često ne potvrđuju ove tvrdnje. Uzrok tome može biti simultani uticaj neke druge veličine koja prikriva manifestaciju kvašljivosti.

Kritični površinski napon je jedna od veličina koja numerički ukazuje na energiju površine. Kritični površinski napon se određuje Zismanovom metodom koja predstavlja izradu dijagrama zavisnosti kosinusa ugla kvašenja u funkciji površinskog napona tečnosti, slika 2 (Kabza i saradnici 2000). Kritični površinski napon je onaj površinski napon pri kome kosinus ugla kvašenja dostiže vrednost jednak 1. To je zapravo prelaz iz oblasti površinskog napona tečnosti koje kvase površinu u oblast tečnosti koje ne kvase datu površinu (Moorthy 2007).



Slika 2. Dijagram zavisnosti kosinusa ugla kvašenja od površinskog napona tečnosti (Zisman metoda)

Vrednosti kritičnog površinskog napona za neke materijale date su u tabeli 1 (Sharifi i Shaw 1996).

Iz prikazanih podataka može se zaključiti da su vlakna polimera niske energije površine dok su vlakna metala, keramike i stakla visoke energije površine. Kritični površinski napon za polipropilen iznosi 30,5 mN/m, dok je za nerđajući čelik 108,0 mN/m. Ove vrednosti se odnose na glatke površine.

Tabela 1. Kritični površinski napon za neke materijale

| Materijal            | $\gamma_k$<br>(mN/m) | Materijal           | $\gamma_k$<br>(mN/m) |
|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Teflon               | 18,5                 | Polietilen, PE      | 31,0-33,0            |
| Polipropilen, PP     | 30,5                 | Nerđajući čelik, SS | 108,0                |
| Polivinilhlorid, PVC | 39,0                 | Keramika            | 123,0                |
| Poliamid, PA         | 46,0                 | Aluminijum          | 500,0                |
| Polisulfon           | 41,0                 | Bakar               | 1000,0               |
| Polistiren, PS       | 33,0-43,0            | Staklo              | 76,0-120,0           |

## 2.2 Separacija kapi vlaknima koja nisu kvašljiva dispergovanom fazom

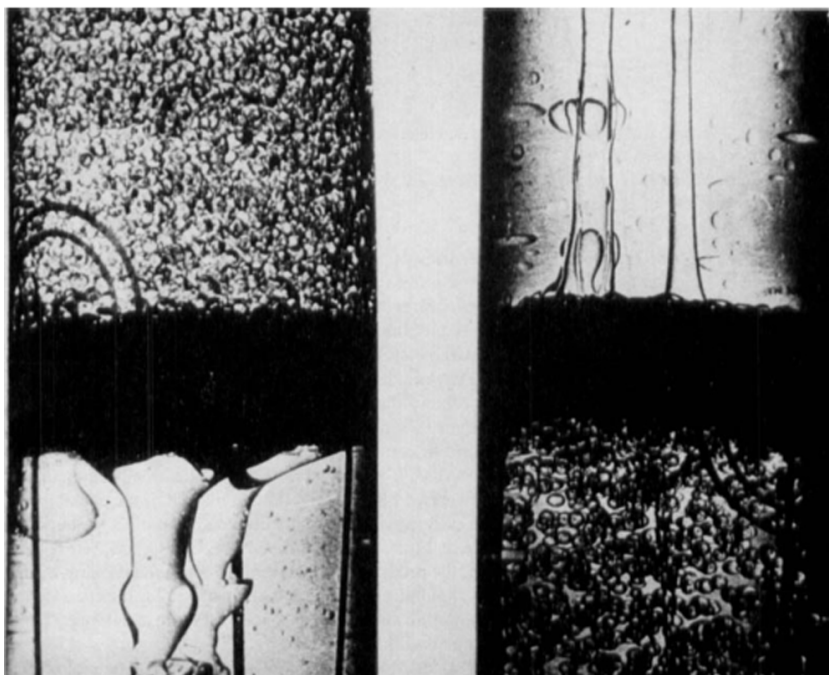
Još su Sareen i saradnici (1966) proučavali mogućnost primene materijala i niske i visoke energije za separaciju, kako kapi ulja iz vode, tako i kapi vode iz ulja. Kao filtarske materijale su koristili: medicinski pamuk, dajnel (eng. *dynel*), staklo, poliuretan, polipropilen i teflon. Ispitivali su i kombinacije materijala: pamuk-staklo, pamuk-teflon i pamuk-dajnel. Pošto vlakna pamuka imaju nisku mehaničku otpornost date kombinacije su trebale da prevaziđu ove mane. Autori su kao organsku fazu koristili niz čistih hemikalija i jednu multikomponentnu smešu-kerozin. Prečnici vlakana su bili od  $8,85 \mu\text{m}$  do  $46,5 \mu\text{m}$ . Autori tvrde da za sistem ulje u vodi najbolje rezultate separacije pokazuje sloj vlakana pamuka, zatim staklenih vlakana, dok najmanje pogoduje upotreba dajnela i polietilena. Slojevi vlakana pamuka i stakla su najuspešniji i prilikom separacije kapi vode iz organske kontinualne faze. Neophodno je istaći da navedena istraživanja imaju ozbiljne nedostatke. Korišćena su vlakna različitih prečnika, kao i vlakna različite hrapavosti. Pored toga nepoznata je količina materijala u sloju, nisu dati podaci o poroznosti ili permeabilnosti sloja, već su dati opisno kao gusto pakovan sloj. Vlakna pamuka bila su prečnika  $14,05 \mu\text{m}$ , vlakna stakla  $8,85 \mu\text{m}$ , dok su vlakna polimera imala prečnik preko  $40 \mu\text{m}$ . Vlakna pamuka su izrazito hrapava dok su ostala vlakna prevashodno glatka. Pošto su u istraživanjima korišćena vlakna polimera čiji je prečnik bio značajno veći od prečnika vlakana stakla i pamuka nisu obezbeđeni adekvatni uslovi za poređenje efikasnosti separacije dispergovanih kapi.

Hazlett (1969a,b) je ispitivao uticaj kvašljivosti vlakana na separaciju kapi vode iz kontinualne organske faze i to kerozina i još nekih formulacija avio goriva kao predstavnika multikomponentnih smeša. Testirane su tri vrste materijala: niske, srednje i visoke energije površine. Geometrija sloja i debljina vlakana je održavana bliskom u svim ogledima pošto je energija površine menjana hemijskim ili fizičkim tretmanom vlakana stakla. Vlakna niske energije dobijena su nanošenjem rastvora polietilena, vlakna srednje energije dobijena su povezivanjem sa fenolnom smolom, dok su vlakna visoke energije bila čista, nepovezana staklena vlakna. Kapi vode su najefikasnije uklanjala vlakna netretiranog stakla pošto ih voda najbolje kvasi. Autor je ispitivao i uticaj prečnika vlakna na efikasnost separacije kapi vode i zaključio da se smanjivanjem prečnika vlakna efikasnost povećava, što potvrđuje greške u zaključivanju kod Sareena i saradnika.

Davies, Austin i Jefreys (1970, 1981) su ispitivali uticaj prirode vlakana na separaciju kako izooktana iz vode, tako i vode iz izooktana. U slučaju kada je voda bila dispergovana faza najveća efikasnost separacije je postignuta korišćenjem vlakana od stakla, pa nešto niža sa nerđajućim čelikom, još niža sa vlaknima najlona i najniža sa vlaknima teflona. Utvrđeno je da je efikasnost separacije obr-

nuto proporcionalna vrednosti energije površine materijala. Međutim, kada je voda bila kontinualna faza, a izooktan dispergovana, zavisnost efikasnosti separacije u odnosu na energiju površine se nije promenila. Moglo bi se istaći da odabrani polimeri, najlon i teflon, nisu dobri reprezentivi polimernih vlakana pošto su vlakna neelastična i oštra i sličnije se ponašaju vlaknima čelika i stakla u uslovima proticanja fluida. To potvrđuje i činjenica da se u današnjim istraživanjima ovi polimeri više ne koriste. Pored toga, tokom eksperimenata, poroznost sloja i prečnik vlakana nisu bili konstantni. Autori tvrde da su ove karakteristike bitne u određivanju ukupne efikasnosti sistema, ali da razlike u ispitivanim slojevima nisu tolike da bi bile od značaja za efikasnost separacije. Na osnovu ovih istraživanja, sa svim ukazanim nedostacima, autori su zaključili da kvašljivost vlakana dispergovanom fazom koju treba da separišu nije bitna. Smatra se da hrapavost površine ima mnogo veći uticaj.

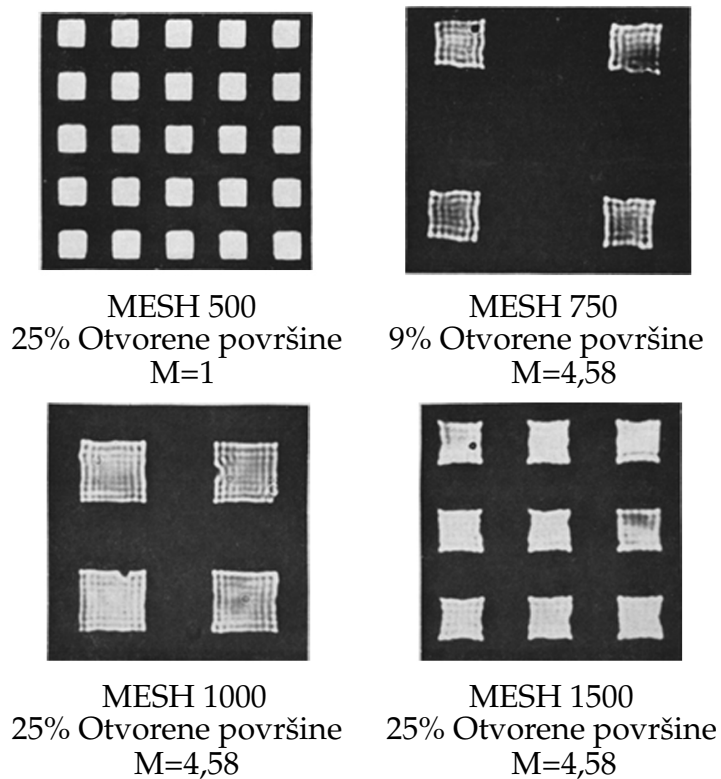
Ovi autori su ispitivali koalescenciju u sloju formiranom od pletene žice nerđajućeg čelika i upletenih niti od polipropilena, slika 3. Posmatrali su oba sistema i vodu u ulju i ulje u vodi. Konstatovali su da je efikasnost koalescencije dominantna na granici ova dva materijala nevezano koji je tip emulzije u pitanju, i da prisutni čvorovi u tkanju pospešuju koalescenciju.



Slika 3. Koalescencija kapi u sloju formiranom od pletene žice nerđajućeg čelika i polipropilena

Vinson i saradnici (1965, 1970) su ispitivali mogućnost primene sloja formiranog od niza metalnih mreža izrađenih od nikla za separaciju cikloheksana, kao i smeše cikloheksana sa glicerolom i mineralnim uljem iz vode, slika 4. Cilj rada je bio da se kvantitativno opiše proces uklanjanja kapi variranjem nekih promenljivih. Površina metala je pripremljena da bude kvašljiva u odnosu na disper-

govanu fazu, tako što se materijal potapao u zasićeni rastvor oktadecilamina u heptanu. Varirana je i geometrija sloja o čemu će biti reči kasnije.



Slika 4. Metalne mreže nikla za ispitivanje mogućnosti separacije sistema ulja u vodi

Pored frakcije uklonjenih kapi  $f$ , praćena je i distribucija veličine kapi kao funkcija brzine fluida, fizičkih osobina emulzije i geometrije sloja. Istraživači su dali matematičku relaciju čijom se primenom dobijaju rezultati sa zadovoljavajućim slaganjem sa eksperimentima. Relacija koja opisuje uklanjanje kapi veličine  $3 \mu\text{m}$  sa tri ekvivalentna sloja data je korelacijom (1):

$$f = -0.089 + 0.128 \left( U_0 \cdot d_f \cdot \mu_c \right)^{-0.4} \quad (1)$$

gde su:

- $f$  - udeo uklonjenih kapi,
- $U_0$  - mesna brzina,
- $d_f$  - širina metala u mreži,
- $\mu_c$  - viskoznost kontinualne faze.

Vinson i saradnici ukazuju na međusobnu interakciju kvašljivosti čvrste površine i međupovršinskog napona dispergovane tečnosti. Kombinacija visoke vrednosti međupovršinskog napona dispergovane tečnosti i površine nikla tretirane oktadecialminom daju najvišu efikasnost separacije. Koalescencija kapi je moguća

i pri niskim vrednostima međupovršinskog napona dispergovane faze sve dok je površina materijala kvašljiva dispergovanom fazom. Kada dispergovana faza ne kvasi čvrstu površinu efikasnost separacije značajno opada.

Spielman je jedan od najznačajnijih autora koji je proučavao strujanje dve nemešljive tečnosti kroz sloj vlakana i koalescenciju kapi u njemu (1968, 1970, 1972, 1977). On prvi uočava i objašnjava tri oblika dispergovane faze u sloju vlakana: kapilarno-provodnu, globule dispergovane faze i sitne kapi. Opisao je proces zasićenja sloja. Utvrdio je da količina zasićene uljne faze ili kapilarno-provodne faze u sloju materijala koji nije kvašljiv uljem iznosi maksimalno 30% pornog prostora. Ta količina zasićenja je nezavisna od debljine sloja, prečnika vlakana i viskoznosti ulja. On prvi uočava da na pad pritiska kroz sloj utiče samo kapilarno-provodna faza. Pored toga shvata ulogu te faze u sloju, jer se zapravo dolazeće sitne kapi u nju utapaju, a od nje se otkidaju krupne globule koje napuštaju sloj. Isto tako je utvrdio da količina kapilarno-provodne faze u sloju dominantno zavisi od brzine strujanja tečnosti kroz sloj, tj. od intenziteta hidrodinamičkih sila. Detaljno je proučavao ulogu i kvašljive i nekvašljive faze u sloju, kao i mehanizme njihovog međusobnog istiskivanja što su fenomeni od neprocenjivog značaja za proizvodnju nafte. Njegove rukom crtane skice situacija na izlazu iz sloja apsolutno su potvrđene kasnijim digitalnim snimcima od strane drugih autora.

Spielman i Goren (1972) su ispitivali mogućnost separacije sistema ulje u vodi kroz sloj staklenih vlakana, kao i tretiranih staklenih vlakana koja postaju kvašljiva. Varirali su prečnik vlakana, debljinu sloja i brzinu fluida. Kao dispergovanu fazu su koristili rastvor silikonskog ulja u acetonu. Dva su razloga što su izabrali ovu dispergovanu fazu: prvi što se radi o njutnovskoj tečnosti koja ne menja viskoznost brzinom smicanja i drugi što je minimizovan uticaj gravitacione sile na separaciju, pošto je razlika gustine ovog rastvora i vode zanemarljiva. Prečnik kapi na ulazu u sloj bio je od  $1 \mu\text{m}$  do  $7 \mu\text{m}$ . Prečnik staklenih vlakana je bio u domenu veličine kapi i to  $3,5 \mu\text{m}$ ,  $6 \mu\text{m}$  i  $12 \mu\text{m}$ . Udeo čvrstog u sloju je bio 5 vol%.

Autori su uočili, da kada se separacija obavlja staklenim vlaknima, koja nisu kvašljiva uljnom fazom, iz sloja izlaze delimično ukрупnjene kapi ulja koje individualno putuju ne formirajući svoju fazu na izlazu iz sloja, slika 5.

Kada se za separaciju koriste tretirana staklena vlakna koja su kvašljiva uljnom fazom tada se iza sloja formira kontinualna uljna faza od koje se povremeno otkidaju krupne kapi ulja, slika 6.

Pored toga Spielman (1972) daje bezdimenzione jednačine (2) i (3) kao model koalescencije u sloju u kojoj figuriše koeficijent filtracije  $\lambda$ :

- Za materijal nekvašljiv uljnom fazom, jednačina (2):

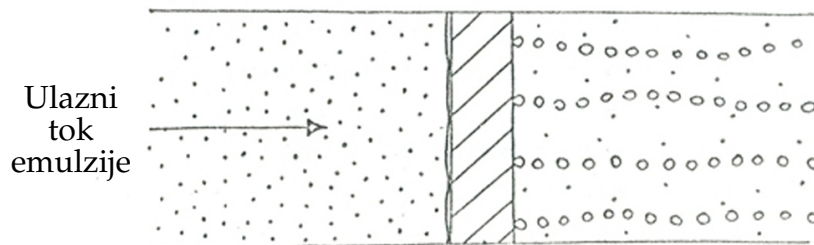
$$\frac{\lambda d_F^3}{d_P^2} = 0.29 \left( \frac{Q d_F^2}{\mu_1 q_1 d_P^4} \right)^{0.25} \quad (2)$$

- Za materijal kvašljiv uljnom fazom, jednačina (3):

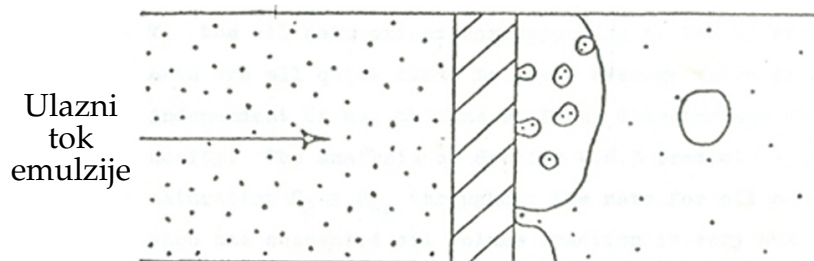
$$\frac{\lambda d_F^3}{d_P^2} = 0.08 \left( \frac{Q d_F^2}{\mu_1 q_1 d_P^4} \right)^{0.20} \quad (3)$$

gde su:

- $\lambda$  - koeficijent filtra,
- $d_F$  - prečnik vlakna,
- $d_P$  - prečnik kapi,
- $Q$  - Hamaker konstanta,
- $\mu_1$  - viskoznost kontinualne (vodene) faze,
- $q_1$  - brzina fluida.



Slika 5. Izgled izlaznih kapi kada sloj nije kvašljiv uljem pri velikoj brzini tečnosti

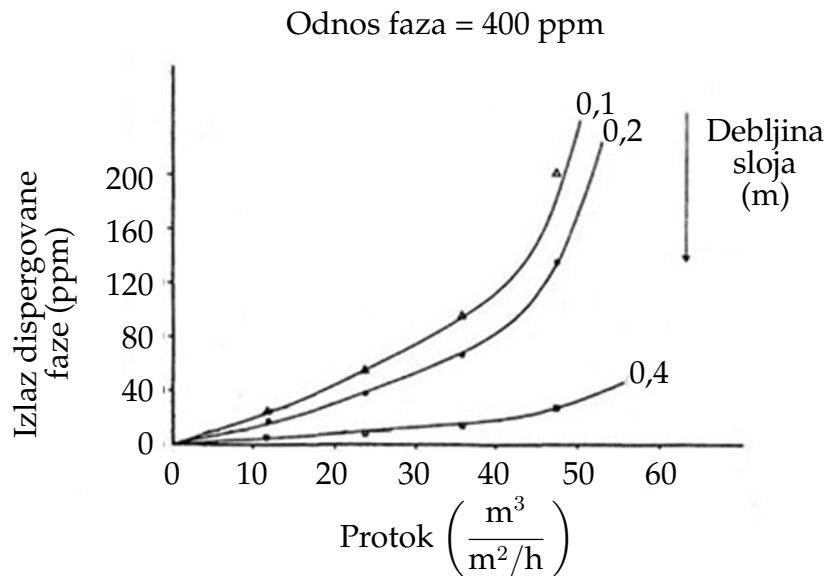


Slika 6. Izgled izlaznih kapi kada je sloj kvašljiv dispergovanom fazom

Fahim i Akbar (1984) su koristili sloj mešavine staklenih vlakana i vlakana nerđajućeg čelika za separaciju kerozina iz vode. Ispitali su uticaj brzine fluida, debljine sloja i ulazne koncentracije kerozina na pad pritiska i efikasnost separacije. Koncentracija kerozina je varirana od 100 do 1000 mg/l. Srednji prečnik kapi dispergovane faze na ulazu bio je od 20  $\mu\text{m}$  do 25  $\mu\text{m}$ . Korišćena su staklena vlakana prečnika 15  $\mu\text{m}$  i nerđajućeg čelika prečnika 180  $\mu\text{m}$ . Debljina sloja je bila od 0,1 do 0,4 m. Poroznost sloja je iznosila 95%. Tokom eksperimenata je praćen sadržaj ulja, kao i distribucija veličine kapi dispergovane faze na izlazu iz sloja. Autori su limitirali sadržaj kerozina na izlazu iz sloja na 20 mg/l. Na slici 7 dat je dijagram zavisnosti izlazne koncentracije od brzine fluida za različite



debljine sloja. Potrebno je istaći da su eksperimenti realizovani za širok opseg brzine fluida do postizanja eksponencijalnog oblika zavisnosti, što je redak slučaj u literaturi.

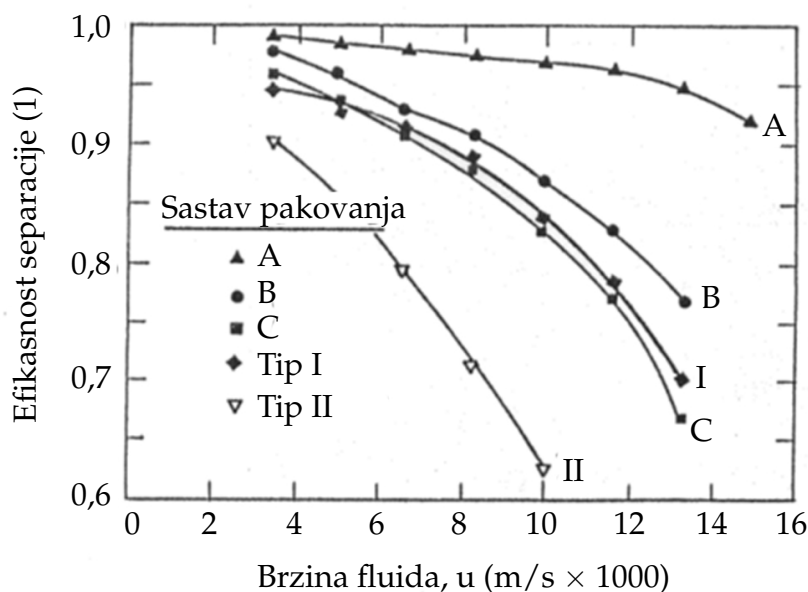


Slika 7. Zavisnost izlazne koncentracije dispergovane faze od brzine za različite debljine sloja

Fahim i Akbar su efikasnost separacije definisali preko promene veličine prečnika kapi. Kao rezultat vizuelnog ispitivanja koalescencije unutar sloja, uočeno je da se kapi dispergovane faze na ulazu u sloj prvo hvataju na površinu staklenih vlakana. Nakon toga, kada se kapi dispergovane faze ukupne prelaze na vlakna nerđajućeg čelika. Na taj način se formira kapilarno-provodna faza. Autori smatraju da je površina staklenih vlakana različite kvašljivosti kerozinom u odnosu na čelična vlakna, pošto se na njima ranije formira uljna opna. Potpuno zanemaruju činjenicu da su staklena vlakna bila mnogo manjeg prečnika od vlakana čelika i da to može biti uzrok njihovog bržeg kvašenja.

Fahim i Othman (1987) su proučavali mogućnost separacije kapi ulja iz vode kombinacijom materijala visoke i niske energije varirajući istovremeno i prečnik vlakana. Materijali visoke energije površine su bili staklena vlakna prečnika vlakna  $6 \mu\text{m}$  i  $25 \mu\text{m}$ , kao i mreža od nerđajućeg čelika. Kao materijal niske površinske energije testirana su polipropilenska vlakna prečnika  $400 \mu\text{m}$ . Ispitivano je pet slojeva od čega su dva sloja predstavljala čista staklena vlakna različitog prečnika, dok su preostala tri sloja formirana od kombinacije sva tri materijala. Orijentacija toka fluida je bila vertikalno naviše. Kao uljna dispergovana faza korišćen je toluen. Efikasnost separacije je i u ovim istraživanjima praćena preko promene koncentracije ulja na ulazu i izlazu kao i preko porasta veličine kapi. Zaključeno je da je najefikasnija kombinacija sloja A, koja na ulazu sadrži najtanja vlakna, zatim vlakna srednjeg prečnika, dok su na izlazu iz sloja vlakna najvećeg prečnika. Bitno je napomenuti da se najviša efikasnost postigla vlaknima stakla

koja nisu kvšljiva uljem. Na slici 8 može se uočiti velika razlika u efikasnosti ispitivanih slojeva. Potpuno je zanemarena činjenica da su kod sloja A prisutna i polipropilenska vlakna na izlazu iz sloja koja su nesumnjivo značajno doprinela porastu efikasnosti separacije što se jasno vidi poređenjem sa efikasnosti slojeva I i II. Slojevi I i II su slojevi od čistih staklenih vlakana. Iako sloj sadrži staklena vlakna malog prečnika, efikasnost separacije ulja ima niske vrednosti za sloj I. Upravo je istovremena kombinacija sloja visoke i niske energije adekvatno odabranih prečnika, što se desilo slučajno, obezbedila efikasnu separaciju. Autori u svojim razmatranjima to nisu uočili i razumeli.



Slika 8. Zavisnost efikasnosti separacije od brzine za slojeve različite geometrije

Grilc i saradnici (1984) su ispitivali mogućnost separacije, kako vode iz ulja, tako i ulja iz vode primenom sloja od staklenih vlakana. Prečnik vlakana stakla je bio  $12\ \mu\text{m}$ ,  $20\ \mu\text{m}$  i  $35\ \mu\text{m}$ . Ispitivani sloj staklenih vlakana je formiran sa približno konstantnom poroznošću koja je iznosila od 92% do 94%, sa tim da je uvek u sloju bila jednaka površina vlakana. Neophodno je istaći da je uočeno kako je važno držati nepromenjenu geometriju sloja, ali je više nego očigledno da nisu imali adekvatnu veličinu koju bi mogli usvojiti za to. Nedostatak usvajanja poroznosti sloja kao opisa geometrije sloja ogleda se u tome što su u vrednosti poroznosti uključene sve pore i one koje su protočne i one koje nisu. Međutim, neprotočne pore ne učestvuju aktivno u zbivanjima u sloju. Kao kontinualnu organsku fazu koristili su etilacetat i butilacetat. Za dispergovanu uljnu fazu koristili su još i parafinsko ulje, kerozin i Shell Sol K. Izabrali su ove organske rastvarače i ulja, kako bi mogli da porede tipove dispergovane faze kada su u pitanju alifatični i aromatični ugljovodonici. Koncentracija dispergovane faze je bila konstantna i iznosila 1,0 %vol. Debljina sloja je varirana od 5 mm do 30 mm.

Cilj njihovog rada je bio pronalazjenje matematičke korelacije koja povezuje kritičnu brzinu i fizičke osobine sistema. Definisali su da je kritična brzina ona brzina fluida pri kojoj je postignuta zadata koncentracija dispergovane faze na izlazu iz sloja. Eksperimenti su praćeni preko koncentracije dispergovane faze na izlazu iz sloja i na osnovu tih rezultata određivana je kritična brzina. U analizi rezultata efikasnost separacije definisali su i preko koeficijenta filtracije u cilju dobijanja numeričkih vrednosti koeficijenta  $a$ , jednačina (4). Modifikovali su Spielmanovu bezdimenzionu jednačinu datu jednačinom (5) i dali svoju (4) u koju su zapravo uveli veličinu kritične brzine:

$$\frac{d_f^3}{d_{ps}^2 \cdot L} = K \left( \frac{\gamma \cdot d_f^2}{\mu_d \cdot U_{cr} \cdot d_{ps}^2} \right)^a \quad (4)$$

$$\frac{\lambda d_f^3}{d_p^2} = C \left( \frac{A \cdot d_f^2}{\mu_c \cdot U \cdot d_p^2} \right)^a \quad (5)$$

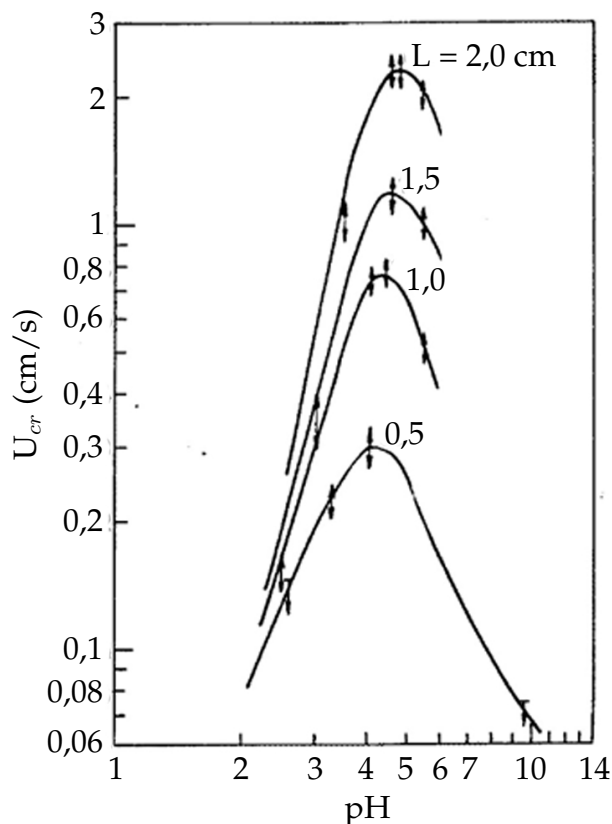
gde su:

- $d_f$  - prečnik vlakana,
- $d_{ps}$  - srednji prečnik kapi po Sauteru,
- $L$  - debljina sloja,
- $K, C$  - koeficijenti,
- $\gamma$  - međupovršinski napon,
- $\mu_d$  - viskoznost dispergovane faze,
- $U_{cr}$  - kritična brzina,
- $a$  - koeficijent koji zavisi od koeficijenta filtracije,
- $\lambda$  - koeficijent filtera,
- $d_p$  - prečnik kapi,
- $A$  - Hamaker konstanta,
- $\mu_c$  - viskoznost kontinualne faze,
- $U$  - brzina fluida.

Ustanovljeno je da data jednačina važi za oba ispitivana sistema i kod dispergovanog ulja u vodi i kod dispergovane vode u ulju. Vrednost koeficijenta,  $K$ , je deset puta manja za sistem ulje u vodi. Data činjenica ukazuje na mogućnost primene ove relacije u analizi efekata prirode faza koje grade sistem bez obzira koji je njihov odnos. Potrebno je istaći da su u eksperimentima korišćena staklena vlakna, što je nepovoljan izbor za separaciju kapi ulja iz vode.

Grilc i saradnici (1986) nastavljaju svoja istraživanja opisana radom iz 1984. godine. Proširuju ispitivanja sa uticajem promene pH vrednosti i konstatuju da je pH vrednost bitna samo kada je voda kontinualna faza. Tada su vrednosti kritične brzine različite za različite pH vrednosti i javlja se optimana vrednost pH pri kojoj kritična brzina dostiže svoj maksimum, slika 9. Vrednost pH utiče na količinu jona u vodi, te time i na debljinu jonskih oblaka dvojnog električnog sloja koji opasuju kapi ulja, pa na taj način utiču na koalescenciju. U datim okolnostima

relacija (4) važi samo kada se odrede koeficijeti  $K$  i  $a$  za vrednost kritične brzine pri optimalnoj vrednosti pH. Nije nađeno objašnjenje zašto navedena relacija pri ostalim uslovima ne važi. Ističe se ponovo da možda ne bi bila takva situacija da je korišćen neki drugi materijal za separaciju kapi ulja umesto staklenih vlakana.



Slika 9. Zavisnost kritične brzine od pH vrednosti pri različitim debljinama sloja

Clayfield i saradnici (1985a) su ispitivali separaciju emulzije ulje u vodi kroz sloj staklenih vlakana modifikovane površine sa ciljem da utvrde uticaj energije površine na efikasnost separacije. Prečnici staklenih vlakana su bili  $1,5 \mu\text{m}$  i  $7,5 \mu\text{m}$ , dok je poroznost sloja iznosila 99,2% i 95,8%. Tretiranje površine stakla je vršeno korišćenjem niza organskih supstanci. Kao dispergovano ulje korišćeni su kerozin, o-ksilen, dekanol, cikloheksanol i izobutanol. Efikasnost separacije je praćena određivanjem distribucije veličine kapi i sadržaja ulja. Promenu energije površine korišćenim tretmanima istraživači su pratili određivanjem ugla kvašenja i kritičnog površinskog napona. Vrednosti kritičnog površinskog napona tretiranih površina vlakana stakla su bile od  $16 \text{ mN/m}$  do  $39,2 \text{ mN/m}$ .

Dobijeni rezultati efikasnosti koalescencije nisu pokazali nikakvu korelaciju sa uglom kvašenja niti sa kritičnim površinskim naponom. U ovim istraživanjima variran je veliki broj promenljivih: tretman vlakana, organske tečnosti koje su bile dispergovana faze, debljina sloja i prečnik vlakana. Ovakav način istraživanja onemogućava sistematičnu analizu rezultata. Pored toga, može se postaviti sumnja u dobijene vrednosti uglova kvašenja vlakana pošto još ni danas nisu razvijene pouzdane tehnike za to određivanje.

Clayfield i saradnici (1985b) su zatim promenili pristup u odnosu na prethodni rad. Istraživanja su realizovali samo sa jednom uljnom fazom, jednom debljinom sloja i jednim prečnikom vlakana stakla. Ispitivan sloj je formiran od staklenih vlakana prečnika  $7,5 \mu\text{m}$  i debljine sloja od 10 mm. Efikasnost separacije kapi kerozina je praćena preko njegove koncentracije i distribucije veličine kapi. U ovom radu su autori dali rezultate merenja elektrokinetičkog (zeta) potencijala kapi ulja i tretiranih površina materijala. Zaključeno je da je elektrokinetički potencijal veza između energije površine i efikasnosti koalescentne filtracije. Kapi kerozina su negativno naelektrisane, dok su tretirane površine bile pozitivno i negativno naelektrisane. Uočili su da ukoliko su električni naboj kapi i vlakna istog znaka, tada to direktno smanjuje efikasnost koalescentne filtracije. Ukoliko ne postoji elektrostatičko odbijanje efikasnost koalescentne filtracije raste do određene vrednosti kada se javlja ograničenje zbog hidrodinamičkih sila usled proticanja fluida kroz vlaknast sloj. Za materijale čija je površina pozitivno naelektrisana efikasnost separacije je iznosila od 89,8% do 99,8%, dok je za negativno naelektrisane iznosila od 51,0% do 59,2%. Za efikasnost separacije kapi kerozina pomoću čistih netretiranih vlakana stakla dobili su vrednost od 51,2%.

Akagi i saradnici (1988) su ispitivali efikasnost separacije mineralnih ulja iz vode pri različitim eksperimentalnim uslovima kroz sloj staklenih vlakana. Koncentracija dispergovane faze je bila 1000 mg/l. Brzina fluida je varirana od 0,2 cm/s do 0,88 cm/s, dok je srednji prečnik kapi iznosio  $1,8 \mu\text{m}$ . Prečnik staklenih vlakana bio je  $5,3 \mu\text{m}$  i  $19 \mu\text{m}$ . Poroznost sloja vlakana manjeg prečnika je iznosila 0,935, a većeg prečnika 0,920. Debljina sloja je varirana i iznosila je 0,2 cm, 0,5 cm i 0,7 cm. Praćena je efikasnost separacije preko učestalosti broja kapi pre i posle sloja.

Ovi autori su predložili modifikaciju Spielmanove jednačine prikazane relacijom (6), koja je dala zadovoljavajuća slaganja za sve eksperimentalne rezultate, slika 10. Oni u jednačinu uvode međupovršinski napon kao bitnu osobinu dve konstitutivne tečnosti. Data jednačina glasi:

$$\frac{Y_f \cdot d_f^3}{L \cdot d_p^2} = K \left( \frac{\gamma \cdot d_f^2}{\mu \cdot u \cdot d_p^2} \right)^b \quad (6)$$

gde su:

$Y_f$  - efikasnost separacije kapi ulja, [-]

$d_f$  - prečnik vlakna,

$d_p$  - prečnik kapi ulja,

$L$  - debljina sloja,

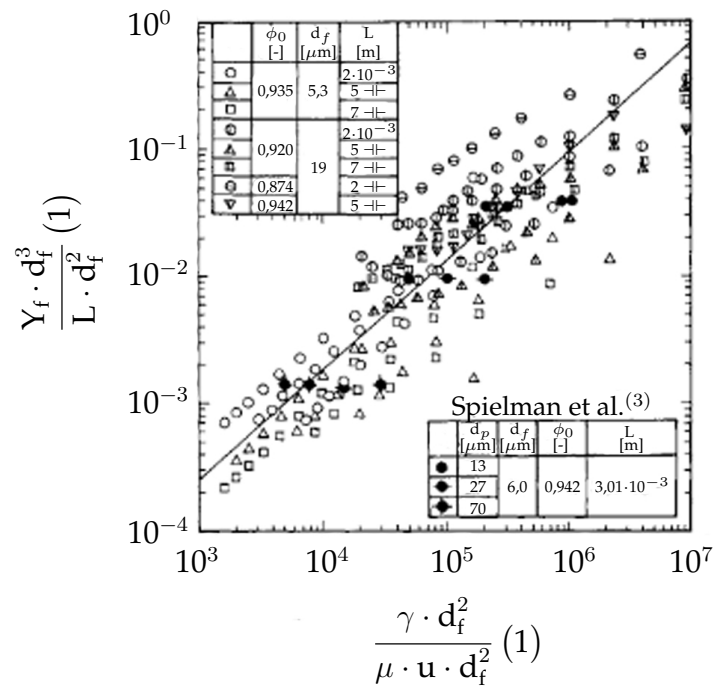
$\gamma$  - međupovršinski napon,

$\mu$  - viskoznost vode,

$u$  - brzina fluida,

$K$  - konstanta,

$b$  - konstanta.



Slika 10. Grafički prikaz slaganja eksperimentalnih i računatih podataka

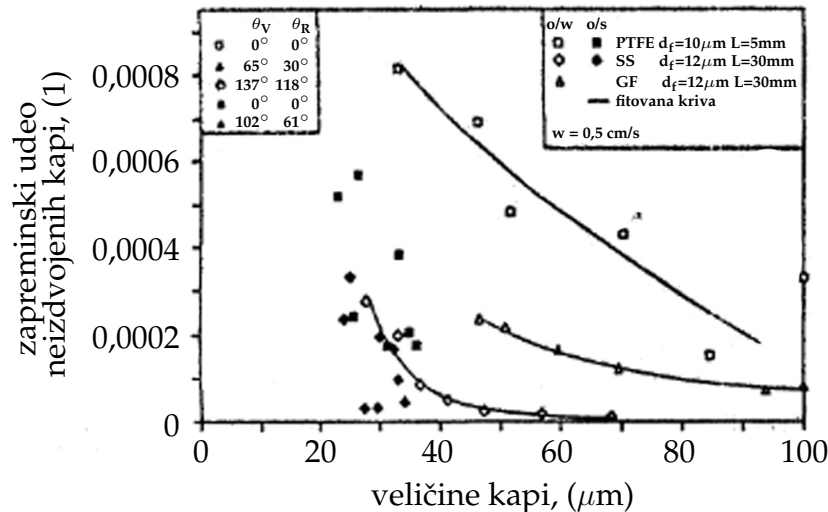
Akagi i saradnici (1990) su istraživali uticaj kvašljivosti površine vlakana na efikasnost separacije ulja iz vode i predstavili jednačinu za korelaciju dobijenih rezultata. Kao dispergovana faza korišćena su tri mineralna ulja. Koncentracija dispergovane faze je iznosila 1000 mg/l. Srednji prečnici kapi na ulazu u sloj su bili 1,5  $\mu\text{m}$ , 1,8  $\mu\text{m}$  i 2  $\mu\text{m}$ . Sloj je formiran od vlakana stakla prečnika 5,3  $\mu\text{m}$ , 9  $\mu\text{m}$  i 19  $\mu\text{m}$ . Poroznost sloja je iznosila 0,935, 0,92 i 0,92 za navedeni redosled prečnika vlakana. Debljina sloja varirana je od 2 mm do 7 mm, a brzina fluida je bila od 0,2 cm/s do 0,88 cm/s. Površina vlakana je presvlačena sa dva tipa silana radi menjanja njihove kvašljivosti. Kvašljivost površine vlakana autori su iskazivali određivanjem kritičnog površinskog napona. Kritični površinski napon vlakana tretiranih silanima je iznosio 22 mN/m i 17 mN/m, dok je vrednost za čisto staklo bila 85 mN/m.

Površeno je da kvašljivost značajno utiče na efikasnost separacije kapi dispergovanog ulja iz vode. Sloj formiran od vlakana koja su presvučena silanom daje efikasnost separacije koja je skoro konstantna i ne opada ispod 60%, nekad bude čak i preko 70%, dok čista vlakna stakla imaju značajno nižu efikasnost.

Rebelein i Blass (1990) su ispitivali uticaj prirode dispergovane faze, prečnika kapi, prirode vlakana materijala, debljine sloja, kao i brzine fluida na separaciju, kako emulzije ulje u vodi, tako i emulzije voda u ulju. Prečnik dispergovanih kapi je bio između 10  $\mu\text{m}$  i 100  $\mu\text{m}$ , dok je zapreminski udeo dispergovane faze na ulazu iznosio manje od 2%. Testirani materijali su bili: vlakna stakla i nerđajućeg čelika kao i politetrafluoroetilen (PTFE). Prečnici staklenih vlakana su bili 12  $\mu\text{m}$ , a nerđajućeg čelika 5  $\mu\text{m}$  i 12  $\mu\text{m}$ . Dok su vlakna PTFE bila debljine

40  $\mu\text{m}$ . Debljina sloja je varirana od 5 mm do 60 mm. Brzina fluida je varirana od 0,166 cm/s do 1,33 cm/s. Pored testa za koalescentnu filtraciju, autori su vršili ispitivanje ugla kvašenja na površini materijala optičkom metodom koja nije detaljnije objašnjena.

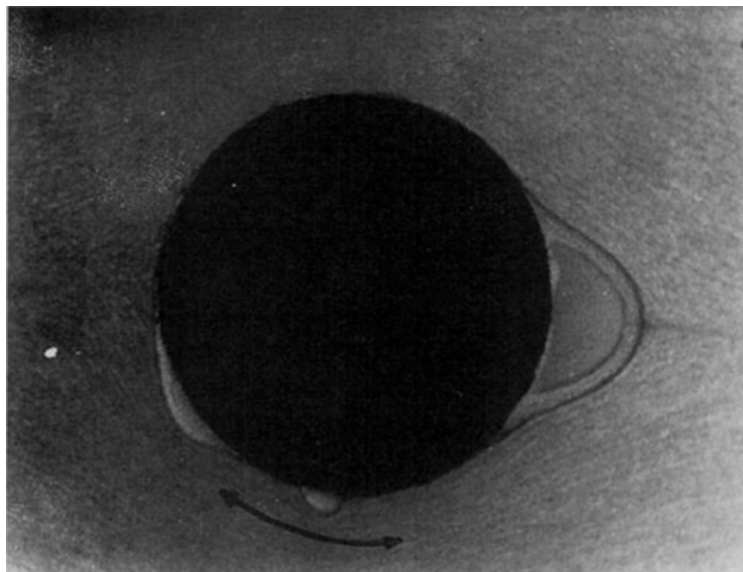
Na osnovu rezultata autori su zaključili da vlakna nerđajućeg čelika ostvaruju najvišu efikasnost separacije za sistem ulje u vodi, slika 11.



Slika 11. Sadržaj ulja na izlazu iz sloja u funkciji veličine kapi i prirode vlakana

Veliki propust autori su napravili analizirajući rezultate separacije kapi ulja iz vode vlaknima različite prirode, a istovremeno i različitog prečnika. Vlakna PTFE debljine 40  $\mu\text{m}$  upoređivana su sa vlaknima čelika i stakla prečnika 12  $\mu\text{m}$ . U isto vreme menjana je, kako priroda vlakna, tako i geometrija sloja. U ranijim ovde prikazanim istraživanjima istaknuto je da smanjenjem debljine vlakna raste efikasnost separacije kapi nevezano za njihovu prirodu. Iz tih razloga efikasnost separacije mnogo debljih vlakana polimera nisu mogla adekvatno da se porede sa vlaknima stakla i nerđajućeg čelika koja su bila značajno manjeg prečnika.

Basu (1993) je ispitivao uticaj kvašljivosti na mehanizam koalescencije kapi na površini stakla i teflona u test ćeliji za sisteme ulje u vodi i voda u ulju. Kao dispergovana faza korišćeno je pet organskih jedinjenja od kojih su četiri bila polarna, a jedno nepolarano. Basu je jedan od retkih autora koji uočava potrebu proučavanja uticaja polarnosti dispergovane faze na koalescenciju. Brzina fluida je varirana od  $8 \cdot 10^{-3}$  m/s do  $3 \cdot 10^{-2}$  m/s. Pošto je staklo poznato kao hidrofilni materijal, autor je očekivao da neće doći do koalescencije organskih kapi na njegovim vlaknima. Međutim anilin, cikloheksan i etil acetat dispergovani u vodi su ipak koalescirali, slika 12. Uveden je pojam dinamičkog ugla kvašenja koji se realizuje u uslovima kada tečnost protiče pored čvrste površine, ne miruje, kao kada se određuje statički ugao kvašenja. Svoju analizu rezultata daju pokušavajući da povežu fenomen hidrofilnosti, hidrofobnosti i dinamički ugao kvašenja.



Slika 12. Akumulacija dispergovane faze na površini diska što će omogućiti otkidanja velike kapi

Magiera i Blass (1997) su ispitivali uticaj prirode ulja, prečnika kapi dispergovane faze, prečnika vlakana, debljine sloja i prirode vlakana na separaciju sistema, kako ulje u vodi, tako i vode u ulju. Kao dispergovana faza bila su ispitivana neka organska jedinjenja. Veličina kapi varirana je između  $10\ \mu\text{m}$  i  $100\ \mu\text{m}$ . Proučavan je sloj vlakana stakla prečnika  $2,5\ \mu\text{m}$  i  $12\ \mu\text{m}$ , nerđajućeg čelika prečnika  $2,8\ \mu\text{m}$  i  $12\ \mu\text{m}$  i teflona prečnika  $60\ \mu\text{m}$ . Debljina sloja bila je  $5\ \text{mm}$ ,  $10\ \text{mm}$  i  $30\ \text{mm}$ . Eksperimenti su realizovani pri horizontalnoj orijentaciji toka fluida. Brzina fluida je varirana između  $0,21\ \text{cm/s}$  i  $1,26\ \text{cm/s}$ . Poroznost sloja se kretala između  $90\%$  i  $97,5\%$ . Treba istaći da geometrija sloja u ogledima nije bila ekvivalentna. Autori su određivali ugao kvašenja ispitivanih tečnosti na ravnoj površini materijala od kojeg su izrađena vlakna i konstatovali da ovaj ugao kvašenja nije adekvatan i da se ne može povezati sa efikasnošću koalescencije i separacije. Zaključeno je da vlakna visoke energije površine efikasnije vrše separaciju dispergovanih kapi od vlakana niske energije površine. Kako se ne navodi da li je u pitanju sistem ulje u vodi ili voda u ulju, može se konstatovati da se zaključak odnosi na oba sistema. Napravljena je greška koja se ponavlja u literaturi jer su poređena vlakna različite energije površine koja imaju istovremeno drastično različit prečnik. Vlakna stakla i čelika su bila prečnika  $12\ \mu\text{m}$ , a vlakna teflona prečnika  $60\ \mu\text{m}$ . Pošto prečnik vlakana drastično utiče na efikasnost sloja tako što tanja vlakna daju bolje rezultate, istaknuti zaključak treba uzeti s rezervom.

Speth i saradnici (2002) su prvi uspjeli da snime unutrašnja zbivanja u vlaknastom sloju povezujući CCD (eng. *Charge Coupled Devices*) kameru endoskopom za aparaturu, slika 13.





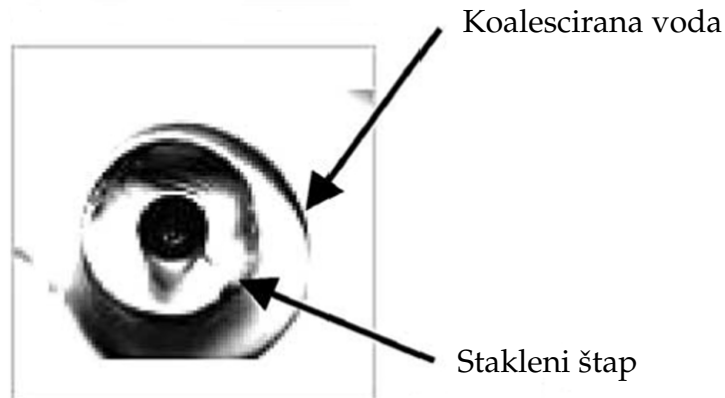
Slika 13. Pogled na unutrašnjost sloja vlakana pri dvofaznom proticanju

Ustanovili su da su najdinamičnija zbivanja koalescencije na samom ulazu u sloj. Koristili su vlakna od nerđajućeg čelika prečnika  $8\ \mu\text{m}$ , dok je debljina sloja iznosila 13 mm, a poroznost 96,6%. Vršili su separaciju kapi butilestra sirćetne kiseline dispergovane u vodi. Srednji prečnik kapi bio je  $2\ \mu\text{m}$ . Brzina fluida nije bila veća od 20 mm/s kako bi se zadržali laminarni uslovi proticanja. Ori-jentacija toka fluida je bila horizontalna. Autori su želeli da daju svoj doprinos isključenju potrebe pilot ispitivanja pri projektovanju koalescentih filtera, te su dali jednačinu promene pada pritiska pri dostizanju stacionarnih uslova u sloju pomoću koje može da se prognozira pad pritiska koji će se ostvariti zasićenjem sloja. Pored toga ispitivali su efikasnost koalescencije vizuelnim proučavanjem zbivanja u sloju.

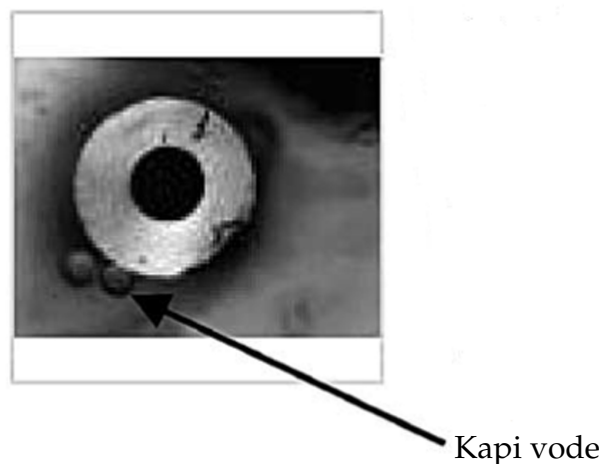
Vizuelno proučavanje fenomena koalescencije u kontrolisanim uslovima je vršilo nekoliko autora (Dimov i saradnici, 2000; Shin i Chase, 2004a). Shin i Chase (2004a) su vizuelno proučavali fenomen koalescencije kapi na štapu različite kvašljivosti. Koristili su stakleni štap debljine 0,14 cm i stakleni štap presvučen sa tri vrste silana. Proučavali su sistem voda u ulju. Varirali su i prirodu kontinualne uljne faze. Kontinualna faza su bili petroleter i Viscor 1487. Ori-jentacija toka fluida je bila horizontalna. Mereni su uglovi kvašenja svih ispitivanih tečnosti na ravnim čvrstim površinama. Pretpostavljeno je da je kvašljivost staklenih vlakana jednaka kvašljivosti ravne površine stakla, što novija istraživanja opovrgavaju.

Uočeno je da se koalescencija kapi vode javlja na površini vlakana stakla samo pri upotrebi petroletra kao kontinualne faze. Shin i Chase objašnjavaju ovu pojavu na osnovu izmerenih uglova kvašenja. Ugao kvašenja ulja Viscor 1487 na površini stakla je manji od ugla koji formira kap vode. Zapaženo je da na površini materijala, slika 14, koji je kvašljiv dispergovanom fazom dolazi do formiranja filma oko vlakna. Kada je površina vlakna nekvašljiva dispergovanom fazom

tada se kapi vode teško mogu zakačiti na površinu i bivaju uklonjene strujanjem fluida, slika 15.



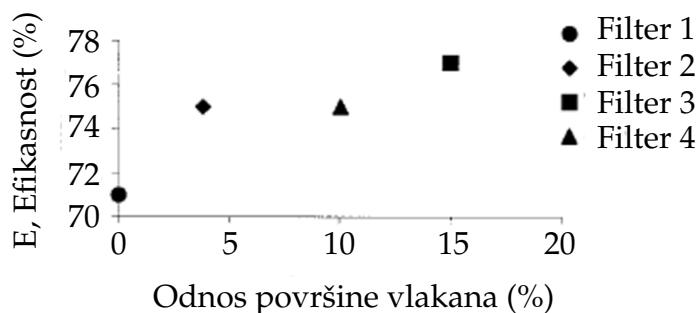
Slika 14. Formirani film vodene faze kada je površina staklenog štapa kvašljiva vodom, netretirana površina (najveća kvašljivost)



Slika 15. Kapi vode kada je površina staklenog štapa nekvašljiva vodom, tretirana površina silanom (najmanja kvašljivost)

Shin i Chase (2004b) su istraživali uticaj i značaj kvašljivosti vlakana na separaciju kapi vode. Kao vlakna su korišćena staklo i mešavina stakla sa nanovlaknima polimera. Prečnik staklenih vlakana je bio  $1,5 \mu\text{m}$ . Testirane su tri vrste polimernih nanovlakana: poliakrilonitril (PAN) prečnika 500 nm, poliamid prečnika 150 nm i najlon prečnika 250 nm. Testirani slojevi su bili debljine 3 mm i 5 mm. Određen je ugao kvašenja vlakana vodom.

Zaključeno je da dodatak male količine nanovlakana povećava efikasnost zadržavanja kapi u sloju i utiče na porast efikasnosti separacije kapi vode. Međutim, kao što je i očekivano, istovremeno se povećava i pad pritiska kroz sloj, slika 16. Na prikazanoj slici 16 kao filter 1 označen je sloj čistih staklenih vlakana bez nanovlakana, kao filter 2 označen je sloj staklenih vlakana sa nanovlaknima PAN, filter 3 je sloj staklenih vlakana sa poliamidom i filter 4 predstavljaju



Slika 16. Uticaj odnosa površine polimernih nanovlakana i površine staklenih vlakana na efikasnost separacije

staklena vlakna sa najlonom. Dodatak nano vlakana povećao je efikasnost za nekoliko procenata u opsegu od 71% do 77%.

Ovde opisana istraživanja uvela su istovremeno tri promenljive: vlakno polimera koje je nekvašljivo vodom, vlakno nano debljine i različite debljine tih nanovlakana. Pored toga je varirana i debljina sloja. U takvim okolnostima teško je prosuđivati o doprinosu kvašljivosti na koalescenciju i efikasnost separacije kapi vode.

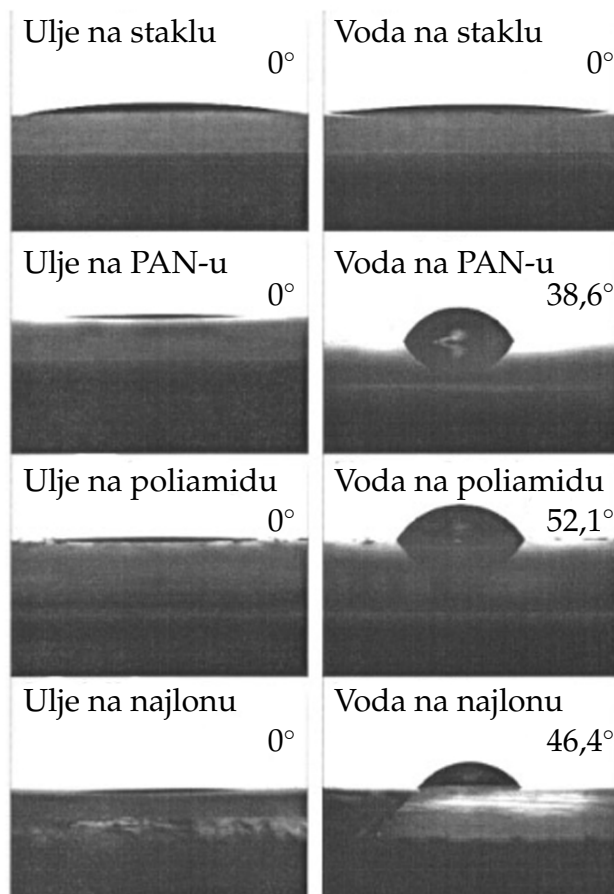
U nedostatku pouzdane metode za određivanje ugla kvašenja vlakana, Shin i Chase su indirektno opisali kvašljivost vlakana. Odredili su ugao kvašenja na ravnoj staklenoj površini koju su presvukli materijalom od kog je napravljeno vlakno. Na taj način autori smatraju da kod svih merenja prave jednaku grešku te im ta činjenica omogućava poređenje ispitivanih materijala.

Ukoliko je ugao kvašenja jednak  $0^\circ$ , tada je površina u potpunosti kvašljiva ispitivanom tečnosti, a ukoliko je jednak  $180^\circ$  tada je potpuno nekvašljiva, slika 17.

Kao rezultat merenja ugla kvašenja poredili su efikasnost separacije za testirane slojeve, tabela 2. Vrlo je važno ukazati da je raspon efikasnosti za sloj debljine 3 mm od 71% do 77%, za raspon ugla kvašenja od 0 do  $52,1^\circ$ . Izmereni uglovi kvašenja za staklena vlakna sa polimerima objektivno su i dalje u domenu dobre kvašljivosti, te to može biti uzrok malih razlika u vrednostima efikasnosti.

Tabela 2. Ugao kvašenja vodom i efikasnost separacije

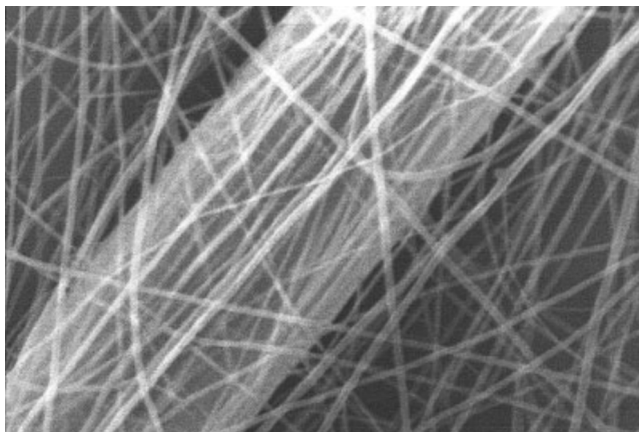
| Materijal                  | Ugao kvašenja ( $^\circ$ ) | Efikasnost separacije, 3 mm | Efikasnost separacije, 5 mm |
|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Staklena vlakna            | 0,0                        | 71                          | 92                          |
| Staklena vlakna + PAN      | 38,6                       | 75                          | -                           |
| Staklena vlakna + poliamid | 52,1                       | 77                          | -                           |
| Staklena vlakna + najlon   | 45,2                       | 75                          | -                           |



Slika 17. Kapi ulja i vode na četiri različite čvrste površine

Shin i saradnici (2005) su uočili nedostatke svojih prethodnih istraživanja i nastavili sa ispitivanjem uticaja nanovlakana jednake prirode i jedne nano debljine varirajući samo njihovu masu. U tim istraživanjima koristili su nanovlakna najlona prečnika 250 nm i dodavali je masi staklenih vlakana, prečnika 5  $\mu\text{m}$ , slika 18. Proučavali su efekat takve modifikacije geometrije sloja. Pored uticaja mase nanovlakana na efikasnost separacije kapi vode iz ulja, proučavali su i njihov uticaj na pad pritiska. Kao kontinualna faza je korišćeno Viscor 1487 ulje. Brzina fluida je bila konstantna (100 ml/min) tokom eksperimenata. Masa staklenih vlakana bila je konstantna u svih šest eksperimentalnih smeša i iznosila je 0,5 g. Masa nanovlakana je varirana od 0 g do 0,039 g. Efikasnost separacije je praćena preko prirasta prečnika kapi vode. Zaključili su da dodavanje polimernih nanovlakana u masu staklenih vlakana daje bolje rezultate pri separaciji, međutim daje i veliki pad pritiska kroz sloj. Iz tog razloga su predložili da se mora usvojiti optimalna masa nanovlakana koja realizuje prihvatljiv pad pritiska, koja je u ovom slučaju iznosila 1,6% od mase filtera. Međutim, nije komentarisana činjenica da su vlakna najlona manje kvašljiva vodom od vlakana stakla i da se i u ovom slučaju radi o smeši gde je pored debljine varirana i kvašljivost vlakana u isto vreme.

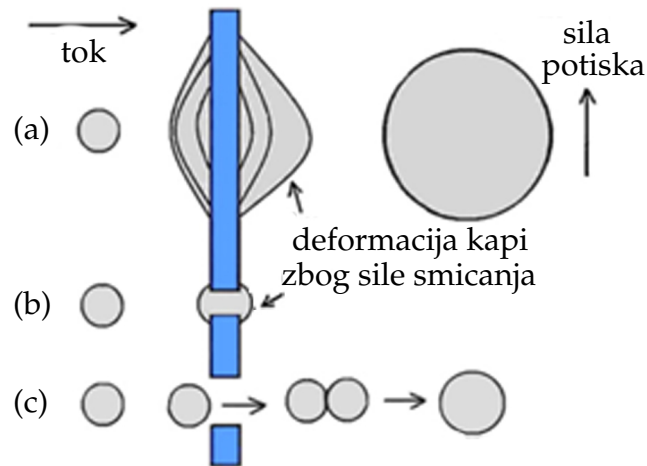
Bansal i saradnici (2011) su ispitivali uticaj energije površine, veličine pora i poroznosti sloja na separaciju emulzije izooktana u vodi. Srednji prečnik kapi di-



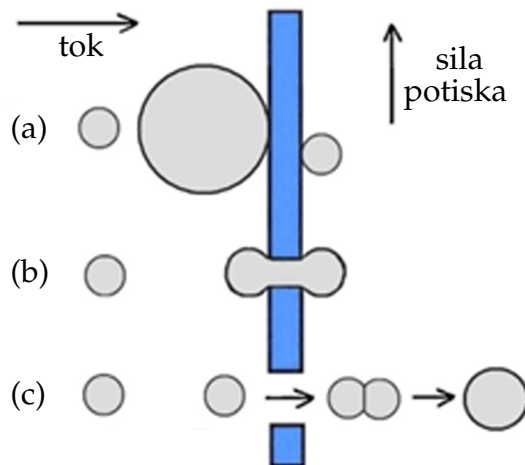
Slika 18. SEM snimak komercijalnih staklenih vlakana ( $5 \mu\text{m}$ ) presvučenih nanovlaknima najlona ( $250 \text{ nm}$ )

spergovane faze je bio manji od  $6 \mu\text{m}$ , dok je 50% kapi dispergovane faze imalo prečnik manji od  $2 \mu\text{m}$ . Vlakna su bila izrađena od poliestera, polibutilen teraftalata i celuloze. Različitu kvašljivost sloja autori su postigli nanošenjem hidrofobnih i hidrofilnih nanočestica veličine  $25 \text{ nm}$  na vlakna. Na taj način omogućeno je povećanje hrapavosti i variranje energije površine. Ispitivano je pet uzoraka vlakana pri čemu je varirana veličina pora od  $2 \mu\text{m}$  do  $51 \mu\text{m}$ , energija površine od  $14 \text{ mN/m}$  do  $46 \text{ mN/m}$ , poroznost od 46% do 87% i debljina sloja od  $0,59 \text{ mm}$  do  $1,95 \text{ mm}$ . Orijentacija toka fluida tokom eksperimenata je bila vertikalna. Efikasnost separacije praćena je preko promene koncentracije izooktana pre i posle sloja. Koncentracija izooktana u vodi je iznosila 0,2 mas.% u prisustvu stabilizatora. Brzina fluida je varirana od  $0,6 \text{ m/min}$  do  $0,85 \text{ m/min}$ . Šematski prikaz mehanizama separacije kapi na hidrofobnoj površini dat je na slici 19, kao i na hidrofilnoj površini, slika 20. Na navedenim slikama pod (a) dat je prikaz adhezije i koalescencije kapi, deformacija kapi u porama pod uticajem napona smicanja prikazana je na slikama pod (b), dok je izlazak kapi iz pora i koalescencija prikazana na slikama pod (c).

Pri sličnoj vrednosti brzina fluida napon smicanja koji deluje na kap na površini materijala je približno jednak i kod vlakna niske i kod vlakna visoke energije površine. U tim okolnostima adhezijska sila je, za organsku kap na hidrofobnoj/oleofilnoj površini (površina niske energije), mnogo veća nego na površini visoke energije. Iz tih razloga kap ima veliku površinu kontakta sa površinom vlakna, te se tu zadržava povećavajući svoju zapreminu i omogućavajući u nekom momentu otkidanje velike kapi od svoje zapremine. Dok je na hidrofilnoj površini potpuno suprotno. Kontakt kapi je sa površinom mali, često samo u jednoj tački. Iz tih razloga dolazi do lakog otkidanja kapi sa te i takve površine što usporava/omete koalescenciju u sloju. Zaključeno je da je za efikasnu separaciju izooktana u vodi neophodno da vlakna budu kvašljiva izooktanom.



Slika 19. Šematski prikaz mehanizama separacije kapi ulja na hidrofobnoj površini



Slika 20. Šematski prikaz mehanizama separacije kapi ulja na hidrofilnoj površini

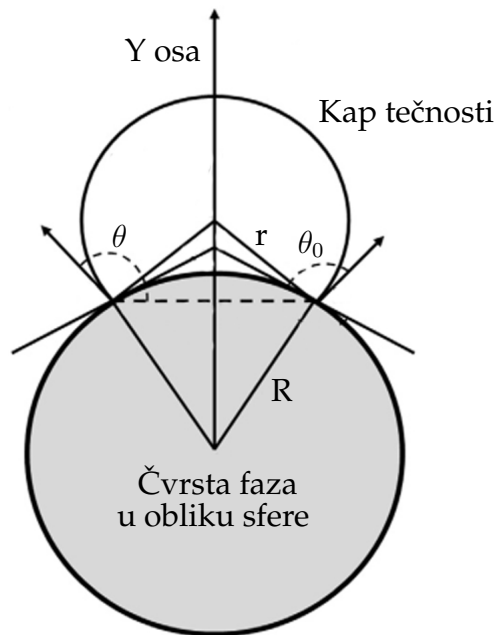
Viswanadam i Chase (2012) su izveli matematičku relaciju na osnovu teorije, koja daje vrednost ugla kvašenja kapi vode na zakrivljenoj sferičnoj i cilindričnoj površini. Izvedena jednačina (7), daje vezu između poluprečnika kapi,  $r$ , i poluprečnika zakrivljene površine,  $R$ , kako bi se odredio kontaktni ugao na toj zakrivljenoj površini:

$$\theta = \text{ArcTan} \left( \frac{\sin(\theta_0)}{\cos(\theta_0) - \frac{r}{R}} \right) \quad (7)$$

gde su:

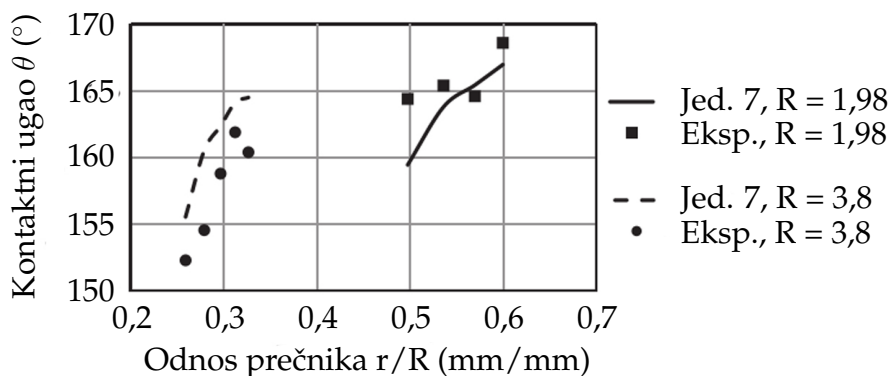
- $\theta$  - prividni ugao kvašenja,
- $\theta_0$  - stvarni ugao kvašenja,
- $r$  - poluprečnik kapi,
- $R$  - poluprečnik cilindra.

Na šematskom prikazu, slika 21, dat je izgled poprečnog preseka čvrste sfere i kapi koja ga delimično kvasi, a naznačeni su i uglovi kvašenja.



Slika 21. Šematski poprečni prikaz kapi koja delimično kvasi čvrstu sferu

Testirane su superhidrofobne zakrivljene površine formirane od polipropilena, dok je zapremina (prečnika) kapi vode varirana od  $4 \mu\text{l}$  do  $7 \mu\text{l}$ . Teorijska predviđanja uglova kvašenja su direktna funkcija zapremine kapi i daju zadovoljavajuća poklapanja sa eksperimentalnim merenjima, slika 22.

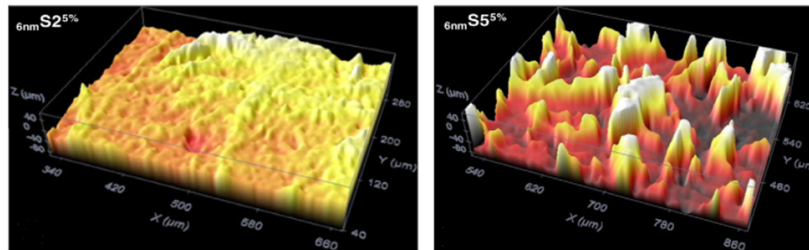


Slika 22. Poređenje uticaja odnosa prečnika kapi i prečnika cilindra na ugao kvašenja određenih eksperimentalnim i računskim putem

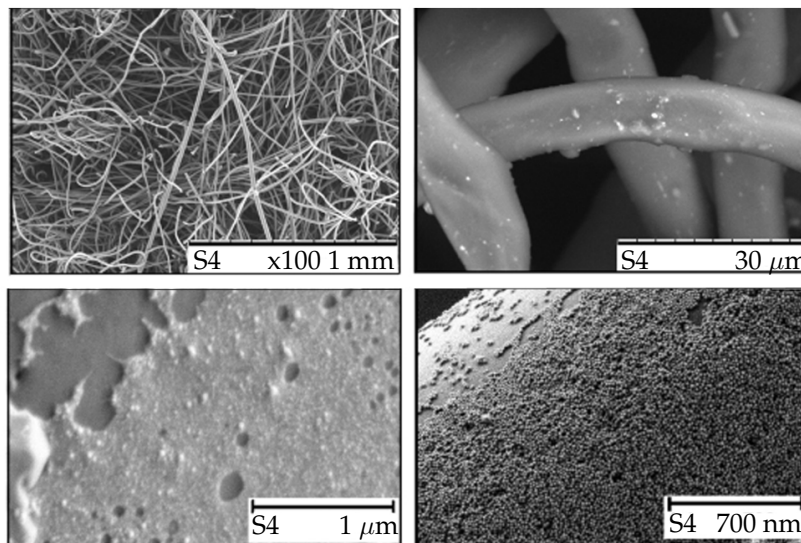
Neophodno je napomenuti da ovaj rad predstavlja bitan doprinos u definisanju tehnike za određivanje kvašljivosti kapi na zakrivljenim površinama.

Agarwal i saradnici (2013a) su ispitali uticaj promene energije površine u intervalu od  $14 \text{ mN/m}$  do  $43 \text{ mN/m}$ , kao i mikro i nano promene hrapavosti površine upletenih i slobodnih vlakana na kvašljivost, mobilnost i koalescen-

ciju kapi izooktana dispergovanog u vodi, prosečne veličine  $5 \mu\text{m}$  i koncentracije 0,2%. Ispitali su efikasnost vlakana: poliester, PET, celuloze i polibutilen teraftalata, PBT. Srednji prečnik vlakana uzorka je iznosio od  $11 \mu\text{m}$  do  $35 \mu\text{m}$ . Hrapavost površine je varirana nanošenjem nanočestica od  $6 \text{ nm}$  do  $125 \text{ nm}$  na površinu vlakana, pri čemu nije došlo do promene faktora hrapavosti na mikronskom nivou, dok se hrapavost na nano nivou kretala posmatrano preko indeksa hrapavosti od 1,5 do 3,4. Najniža i najviša nano hrapavost prikazana je na slici 23. Dok je izgled površine vlakana sa nanetim nanočesticama dat na slici 24.



Slika 23. Mikro hrapavost površine dva različita uzorka tekstila



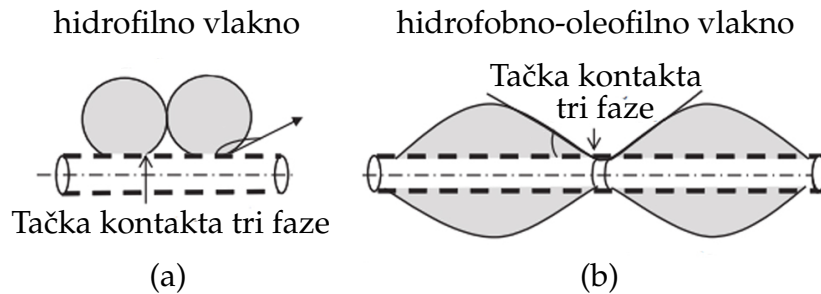
Slika 24. Izgled vlakana i njihove površine sa nanetim nanočesticama pri različitim uvećanjima

Debljina sloja je varirana od  $0,59 \text{ mm}$  do  $1,95 \text{ mm}$ , a poroznost od 46% do 87%. Testirana orijentacija sloja bila je horizontalna i vertikalna.

Cilj istraživanja je bio ispitivanje mogućnosti selekcije materijala za površinsku i dubinsku filtraciju kapi ulja iz vode tako što su varirane veličine pora vodeći računa da budu manje i veće od prečnika kapi. Ove dve primene filtracije odnose se na membransku separaciju, koja je površinska i dubinsku filtraciju gde kapi zalaze u zapreminu pora sloja. Šematski prikaz oblika kontakta kapi i površine čvrstog materijala dat je na slici 25a, za slučaj površinske filtracije kada je u pitanju hidrofилna površina, gde kapi izooktana ne kvase datu površinu. Ukazano je



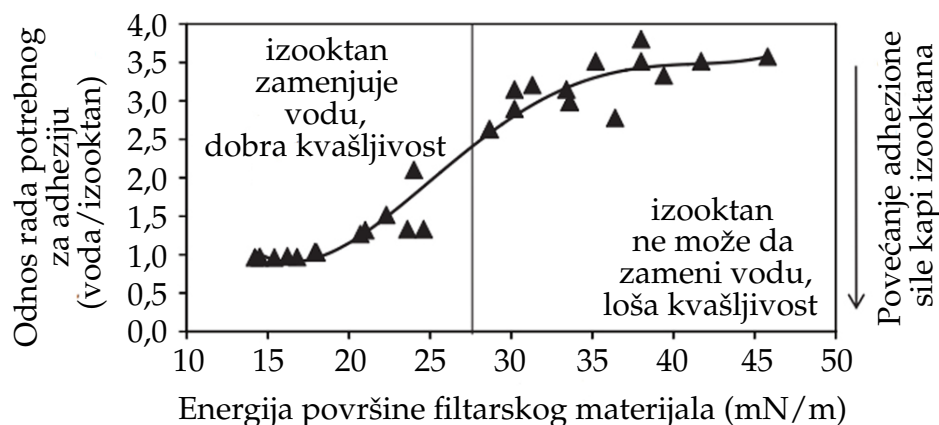
na tačku kontakta tri faze: čvrste faze i dve tečnosti. Za membransku separaciju upravo je potrebna takva situacija da površina membrane odbije kapi izooktana. Time će separacija biti izvršena. Na slici 25b data je situacija kod dubinske filtracije za slučaj hidrofobne površine, kada izooktan kvasi datu površinu. Ukazano je, takođe, i na mesto kontakta tri faze koje učestvuju u procesu. Jasno je uočljivo



Slika 25. Kapi izooktana na čvrstoj površini: a) površinska filtracija (membrane), b) dubinska filtracija (koalescer)

da je u ovom slučaju površina kontakta čvrste površine i dispergovane organske faze neuporedivo veća nego u prethodnom slučaju. Da bi bila izvršena separacija kapi izooktana dubinskom filtracijom ili koalescencijom u sloju upravo je potrebna prikazana situacija. Znači i metoda koja se primenjuje za separaciju uslovljava da li je poželjno da dispergovana faza kvasi ili ne kvasi površinu vlakana.

Zavisnost adhezije vode i izooktana od energije površine materijala prikazana je na slici 26. Pri niskim vrednostima energije od 15 mN/m do 28 mN/m izooktan istiskuje vodu i dobro kvasi ove površine, dok pri većim energijama izooktan nije u stanju da istisne vodu, te takve površine slabije kvasi.

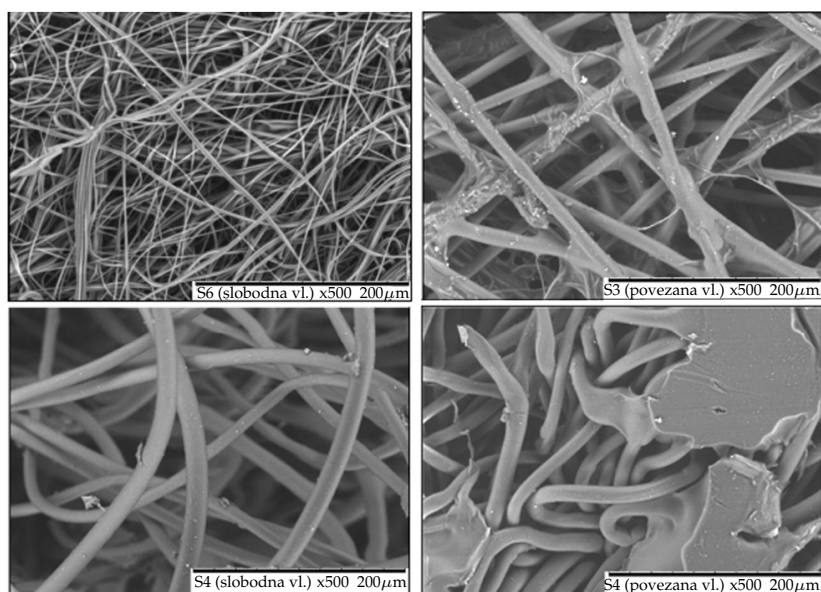


Slika 26. Uticaj energije površine na adheziju i kvašljivost izooktana i vode

Agarwal i saradnici su zaključili da je za efikasno izdvajanje izooktana iz vode potrebno da filterna površina bude hidrofobno-oleofilna i vertikalno orijenti-

sana, dok bi u slučaju separacije vode iz izooktana bilo neophodno da sloj bude superhidrofilne površine kada je reč o koalescentnoj filtraciji.

Agarwal i saradnici (2013b) su ispitali uticaj geometrije sloja i uticaj radnih parametara na separaciju emulzije izooktana iz vode. Poredili su tri tipa koalescera: horizontalni, vertikalni i radijalni. Od radnih parametara varirali su: brzinu fluida od 0,6 m/min do 1,8 m/min, prečnik vlakana, prirodu vlakana, hrapavost i orijentaciju vlakana. Koncentracija dispergovane faze je bila 1% dok je prosečan prečnik kapi iznosio 5  $\mu\text{m}$ . Koristili su dve geometrije sloja: slobodna nasuta vlakna i povezana vlakna, slika 27.



Slika 27. Izgled sloja slobodnih i povezanih vlakana

Kao filtarski materijal korišćena su vlakna polibutilen teraftalata, PBT i poliestera, PET, kao i njihove smeše. Prečnici vlakana PBT su iznosili 2–3  $\mu\text{m}$ , a poliestera 10–12  $\mu\text{m}$  i 12–14  $\mu\text{m}$ . Vlakna su presvučena nanočesticama koje su hidrofobne/oleofilne. Na taj način je menjana njihova kvašljivost dispergovanom fazom, a istovremeno i njihova hrapavost. Dimenzije tih nanočestica su bile od 5 nm do 125 nm.

Zaključeno je da efikasnost separacije ne zavisi od orijentacije ulaznog toka fluida za odabrane uslove rada, ali da pad pritiska zavisi. Agarwal i saradnici tvrde da kvašljivost vlakana ne utiče na hvatanje kapi dispergovane faze u sloju. Posle ovih konstatacija daju zaključak da se za efikasnu separaciju kapi izooktana iz vode najbolji rezultati postižu ukoliko se koristi filter vertikalne orijentacije gde su vlakna kvašljiva dispergovanom fazom. Filtarski sloj je potrebno da sadrži mikro- i nanočestice koje povećavaju hrapavost površine. Najbolja efikasnost separacije, za dati sistem, je postignuta pri brzini emulzije od 1 m/min i iznosi 80%.

Krasinski i Wierzba (2015) su ispitali efikasnost separacije vlakana polipropilena za separaciju vode iz dizela. Autori ističu da se obično za dehidrataciju

dizela ne koriste materijali koji su hidrofobni, ali su njihova istraživanja pokazala da se pažljivim odabirom uslova rada i formiranja sloja ovakvi materijali mogu uspešno koristiti za tu namenu. U svom radu izvršili su poređenje efikasnosti polipropilenskih vlakana sa vlaknima stakla na osnovu teorijski dostupnih podataka, ali ne i eksperimentalno. Srednji prečnik vlakana stakla je bio  $1,89 \mu\text{m}$  i imao je poroznost 87,2%. Testirana su dva prečnika polipropilenskih vlakana od  $1,75 \mu\text{m}$  i  $15,2 \mu\text{m}$ , a poroznost njihovih slojeva je iznosila 79,3% i 91,5%. Slojevi su formirani od vlakana dva različita prečnika. Filtracija je vršena sa vertikalnom orijentacijom toka fluida odozgo nadole. Varirana je brzina fluida (opseg protoka do 50 l/h do 159 l/h). Ulazna koncentracija dispergovane faze je bila konstantna, 2500 mg/l. Srednji prečnik kapi vode je bio  $6,2 \mu\text{m}$ .

Istaknuto je da prilikom dehidratacije dizela vlaknima stakla velika količina vode koja se zadržava u porama sloja prouzrokuje visok pad pritiska. Primenom vlakana polipropilena ostvaruje se zadovoljavajuća efikasnost separacije, a pad pritiska je mnogo niži. Autori u svom radu prikazuju dijagrame zavisnosti izlazne koncentracije vode u funkciji vremena pri različitim uslovima rada, i ne daju numeričke vrednosti efikasnosti, te se navedene tvrdnje ne očitavaju sa dijagrama i nije ih moguće proveriti.

Ma i saradnici (2014) su ispitivali uticaj geometrije sloja, kao i radnih uslova na separaciju kapi dizela srednjeg prečnika  $7 \mu\text{m}$  pomoću sloja vlakana stakla debljine  $4 \mu\text{m}$ . Praćen je efekat promene poroznosti sloja (85–92,5%) i debljine sloja (2–20 mm). Takođe, varirana je i brzina fluida (1–20 ml/s). Na osnovu eksponencijalne zavisnosti izlazne koncentracije dispergovane faze od brzine fluida datih u radu Ma i saradnici (2014), može se konstatovati da su eksperimenti uključivali predeo kritične brzine, što je redak slučaj u literaturi. Ulazna koncentracija dispergovane faze je bila od 200 mg/l do 3000 mg/l. Orijentacija toka fluida bila je vertikalno naviše. Autori daju jasne prikaze rezultata u dijagramima na kojima se fokusiraju na bitne veličine, što im je omogućilo da izvedu validne zaključke.

Zaključeno je da efikasnost separacije dispergovane faze raste povećanjem ulazne koncentracije dispergovane faze, smanjenjem brzine fluida i smanjenjem poroznosti sloja. Kao optimalne uslove rada za posmatrani sistem dispergovanog dizela u vodi i sloja od vlakana stakla odredili su poroznost sloja 85%, debljinu sloja 8 mm, brzinu fluida 6 ml/s i ulaznu koncentraciju 3000 mg/l. Neophodno je istaći da nije svrsishodno usvajati optimalnu ulaznu koncentraciju pošto je ona kod realnih sistema promenljiva u vremenu i na nju ne može projektant da utiče, odnosno predstavlja nezavisnu promenljivu.

Painmanakul i saradnici (2009) su ispitivali uticaj debljine sloja, brzine fluida i prirode materijala na efikasnost separacije palminog ulja iz vode. Autori su testirali komercijalna vlakna od nerđajućeg čelika i polimera. Osobine materijala su određene na osnovu merenja ugla kvašenja materijala i kritičnog površinskog napona. Debljina sloja bila je 3,5, 5, 7, 10 i 14 cm. Poroznost sloja od vlakana polimera iznosila je 97%, dok je za čelična vlakna bila 91%. Koncentracija disper-

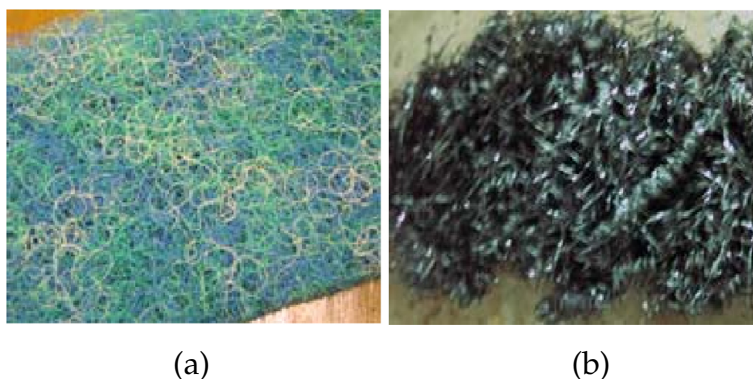
govane faze bila je 5000 mg/l, pri čemu je dodavan surfaktant zbog stabilizacije emulzije. Srednji prečnik kapi na ulazu u sloj bio je oko 2,5  $\mu\text{m}$ . Brzina fluida je bila 5 l/h, dok je orijentacija toka fluida bila vertikalna odozdo naviše. Autori su pratili efikasnost separacije određivanjem hemijske potrošnje kiseonika (HPK) u uzorku zauljene vode pre i posle sloja.

Analiza materijala pokazala je da je ugao kvašenja uzorka polimernih vlakana viši u odnosu na vlakna nerđajućeg čelika, tabela 3.

Tabela 3. Karakteristike testiranih vlakana

| Vrsta vlakna    | Kontakni ugao ( $\theta$ ) | Kritični površinski napon ( $\gamma_c$ ) | Poroznost sloja ( $\varepsilon$ ) |
|-----------------|----------------------------|--|-----------------------------------|
| Nerđajući čelik | 90,97°                     | 33,36 mN · m <sup>-1</sup>               | 0,91                              |
| Polimer         | 87,89°                     | 34,68 mN · m <sup>-1</sup>               | 0,97                              |

Na osnovu prikazanih rezultata može se konstatovati da su vrednosti, kako ugla kvašenja, tako i kritičnog površinskog napona bliske međusobno za oba materijala što može da ukaže da vrednosti nisu adekvatno određene. Autori ne daju nikakve karakteristike vlakana kao ni prečnik vlakana. Date su samo fotografije ispitivanih materijala, slika 28.



Slika 28. Filtarski materijali korišćeni u eksperimentima: a) vlakna polimera, b) vlakna nerđajućeg čelika

Testirana je efikasnost oba tipa vlakana testom koalescentne filtracije. Za vlakna polimera dobijena je efikasnost separacije od 44,4% što je izrazito niska vrednost.

Za nerđajući čelik, koji prema slici 28 liči više na opiljke nego na vlakna, realizovana je efikasnost separacije od 40,2%. Može se pretpostaviti da je osnovni uzrok tako niske efikasnosti separacije za oba materijala loše odabrana geometrija sloja. Pored toga autori su efikasnost pratili preko hemijske potrošnje kiseonika (HPK). U tu vrednost je uključen i rastvoreni deo organskih komponenata, te se može postaviti pitanje relevantnosti obavljenih istraživanja.

## 2.3 Značaj geometrije sloja pri separaciji kapi

Kada je reč o geometriji sloja vlakana, veličine koje ga određuju čine dve grupe osobina: osobine vlakana i osobine sloja (Šećerov Sokolović 2000, 2004, Govedarica i Sokolović 2011, 2014). Osobine vlakana mogu biti: debljina, dužina, poprečni presek, vijugavost i povezanost, kao i kvašljivost i hrapavost. Osobine sloja su: debljina sloja, njegova poroznost i permeabilnost, oblik i vijugavost pora, veličina pora, prostorni raspored vlakana, aktivna površina čvrstog materijala, gustina pakovanja vlakana.

Najveći problem pri pokušaju definisanja geometrije sloja je odsustvo reprezentativne veličine koja geometriju jednoznačno određuje. Iz tih razloga najveći broj autora ne daje dovoljno podataka i veličina o geometriji sloja, te se i ne znaju osobine sloja pri kojima su istraživanja realizovana. Autori najčešće daju debljinu sloja, nekada prečnik vlakana, vrlo retko permeabilnost sloja i/ili poroznost.

Što se tiče proučavanja efekata promene geometrije sloja, do sada su u literaturi najviše proučavani efekti prečnika vlakana i debljine sloja. U daljem tekstu dat je pregled literaturnih navoda proučavanja uticaja prečnika vlakana, a efekat promene debljine sloja biće isključen iz ovih razmatranja.

Proučavanje uticaja promene prečnika vlakana je najmasovnije zastupljen u literaturi. Sareen (1966), Hazlet (1969a), Spielman i Goren (1972), Fahim i Othman (1987), Grilc i saradnici (1984), Clayfield i saradnici (1985a,b), Akagi i saradnici (1988, 1990), Rebelein i Blass (1990), Magiera i Blass (1997), Agarwal i saradnici (2013a,b), Ma i saradnici (2014), Patel i Chase (2014), Krasinski i Wierzba (2015) ispitivali su efekte promene prečnika vlakana od kojih je formiran sloj.

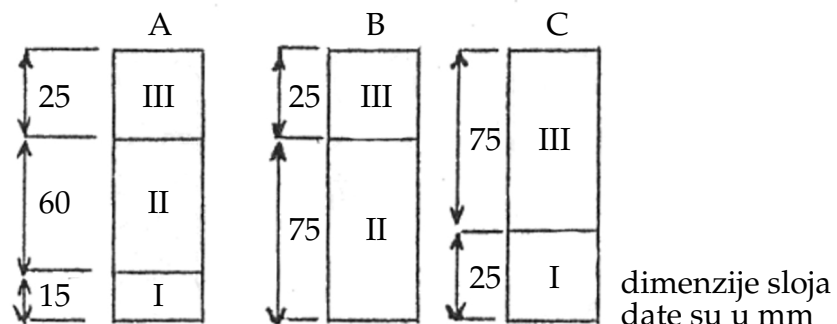
Njihova zapažanja su skoro potpuno identična i mogu se sumirati u sledeće: smanjenjem prečnika vlakana raste efikasnost separacije kapi iz kontinualne faze nezvezano da li se radi o emulziji ulja u vodi ili vode u ulju. Grilc i saradnici (1984), međutim, ističu da je potreban prečnik vlakana uslovljen veličinom kapi dispergovane faze i da te dve veličine treba da budu bliske. Ova konstatacija otvara novi problem i novi segment nesihronizovanosti istraživanja u ovoj oblasti. Ako je važan odnos veličine kapi i prečnika vlakana postavlja se pitanje koji su odnosi ovih veličina bili u određenim istraživanjima i da li je i to novi uticaj koji može da pokrije neki drugi efekat. Na osnovu dostupne literature, čini se, da ovaj fenomen do sada niko nije proučavao.

Nedostatak u pristupu izučavanju uticaja prečnika vlakana kod svih istraživača ogleđa se u tome što autori ne navode da li se promenom prečnika vlakana menja i udeo čvrste faze u sloju, što ne mora da se vidi iz vrednosti poroznosti ili da li se i koliko menja aktivna površina čvrstog materijala koja se nalazi u sloju. Pored toga, novija istraživanja ukazuju (Li 2003; Viswanadam i Chase 2012) da zakrivljenost površine koja je različita kod vlakana različitog prečnika ostvaruje i različit ugao kvašenja kapi sa vlaknom, tako da su u tim okolnostima potvrđene sumnje Grilca i saradnika da je bitan odnos debljine vlakana

i veličine kapi, jer taj odnos zapravo utiče na različitu kvašljivost. Ovako data razmatranja ilustruju stepen složenosti zbivanja sistema tečno-tečno u sloju vlakana. Kako vreme odmiče i otkrivaju se novi odnosi i međuzavisnosti, umesto da se neki fenomeni razjašnjavaju, zapravo se otvaraju novi, koji dalje usložnjavaju istraživanja i zaključivanja.

Hazlett (1969a) je dao originalni doprinos proučavanju geometrije sloja promenom prečnika vlakana. U svojim istraživanjima proučavao je sloj koji se sastojao od nekoliko segmenata staklenih vlakana različitog prečnika. Autor je koristio staklena vlakna manjeg prečnika  $0,75 \mu\text{m}$  i  $1 \mu\text{m}$  i staklena vlakna većeg prečnika  $2,8 \mu\text{m}$  i  $4,6 \mu\text{m}$ . Pri proticanju fluida vertikalno naniže formirao je sloj redosledom tako da su na vrhu najčešće bili segmenti tanjih vlakana, a zatim segmenti debljih vlakana. Autor je utvrdio da je redosled slaganja segmenata vlaknima različite debljine bitan, te da utiče na efikasnost koalescencije. Prema njegovim istraživanjima prečnik vlakana na izlazu iz sloja dominantno utiče na dimenzije otkinutih kapi. Vlakna manjeg prečnika na izlazu iz sloja mogu umanjiti postignutu koalescenciju i izazvati redisperziju kapi, te su zato bolje kombinacije gde su deblja vlakna na izlazu iz sloja. Kada prečnik vlakana izlaznog segmenta sloja nije adekvatno određen, svi pozitivni efekti zarobljavanja kapi i njihovog ukрупnjavanja mogu biti poništeni.

Fahim i Othman (1987) su ispitali efikasnost separacije vlakana stakla različitog prečnika  $6 \mu\text{m}$  (sloj I) i  $12 \mu\text{m}$  (sloj II), kao i vlakna polipropilena prečnika  $400 \mu\text{m}$  (sloj III). Koristili su, kako sloj formiran samo od stakla jednog prečnika, tako i sloj kombinacije stakla i polipropilena. Na slici 29 i u tabeli 4 data je šema sastava ispitivanih slojeva. Oni zaključuju da je kombinacija A najefikasnija za separaciju kapi kerozina iz vode ističući da ta kombinacija ima na ulazu u sloj staklena vlakna male debljine što smatraju da je ključno, potpuno zanemarujući da u toj kombinaciji imaju na izlazu iz sloja vlakna polipropilena debljine  $400 \mu\text{m}$ . Prema istraživanjima Hazletta ako su deblja vlakna na izlazu iz sloja ona značajno doprinose otkidanju velikih kapi od sloja, te je to moralo da doprinese porastu efikasnosti. U protivnom bi i sloj oznake I imao visoku efikasnost, slika 30. Uticaj prečnika vlakana na efikasnost separacije može se videti iz poređenja slojeva



Slika 29. Šematski prikaz sastava ispitivanih slojeva

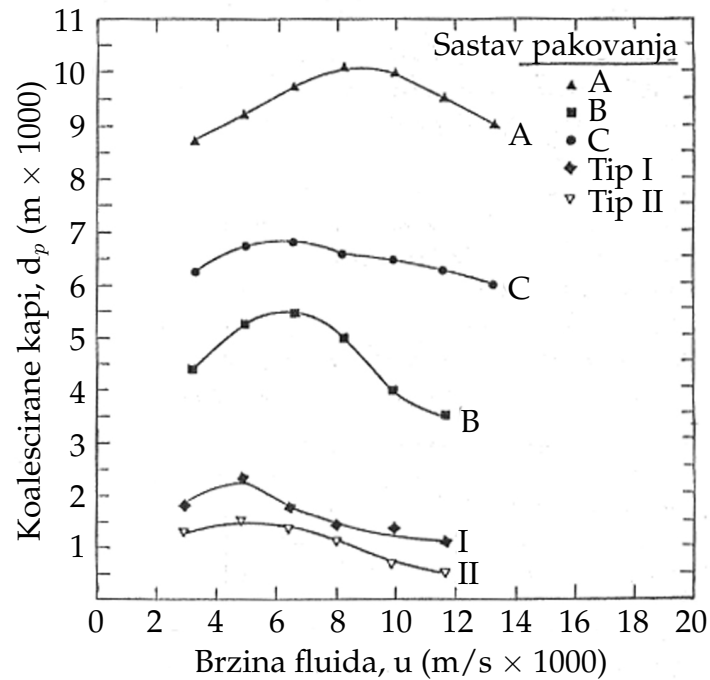
oznake I i II. Upečatljivo je da razlika u veličini izlaznih kapi nije velika između ova dva sloja u poređenju sa slojevima A, B i C.

Tabela 4. Sastav i osobine ispitivanih slojeva

|   |     |     |     |
|---|-----|-----|-----|
| <b>Tip I</b>  |     |     |     |
| Sintetička staklena vuna  |     |     |     |
| Srednji prečnik vlakna: 6 $\mu\text{m}$                         |     |     |     |
| Površina vlakna: 1500 $\text{ft}^2/\text{ft}^3$                 |     |     |     |
| Poroznost: 0,84–0,88  |     |     |     |
| Gustina: 150 $\text{kg}/\text{m}^3$                             |     |     |     |
| <b>Tip II</b>   |     |     |     |
| Disk od sintetičke staklene vune                                |     |     |     |
| Svaki disk je debljine 15 mm                                    |     |     |     |
| Srednji prečnik vlakna: 25 $\mu\text{m}$                        |     |     |     |
| Površina vlakna: 800 $\text{ft}^2/\text{ft}^3$                  |     |     |     |
| Poroznost: 0,88   |     |     |     |
| Gustina: 250 $\text{kg}/\text{m}^3$                             |     |     |     |
| <b>Tip III</b>  |     |     |     |
| Disk od polipropilena/mreža nerđajućeg čelika kao nosač         |     |     |     |
| Svaki disk je debljine 1,5 mm                                   |     |     |     |
| Srednji prečnik vlakna polipropilena: 400 $\mu\text{m}$         |     |     |     |
| Površina vlakna: 450 $\text{ft}^2/\text{ft}^3$                  |     |     |     |
| Poroznost: 0,95   |     |     |     |
| Veličina otvora: 0,1 mm/1,5 mm                                  |     |     |     |
| Oblik otvora: pravougaonik,<br>2700 $\times$ 2200 $\mu\text{m}$ |     |     |     |
| <b>Osobine testiranih slojeva</b>                               |     |     |     |
| Osobine sloja   | A   | B   | C   |
| Poroznost pri proticanju jedne faze (%)                         | 89  | 89  | 84  |
| Poroznost pri proticanju dve faze (%)                           | 86  | 87  | 83  |
| Srednja površina vlakna, $\text{ft}^2/\text{ft}^3$              | 950 | 600 | 800 |

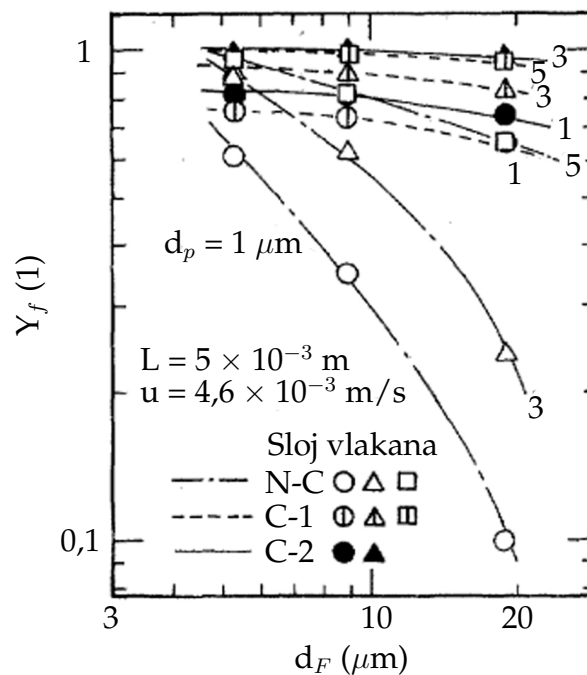
Slojevi A i C imaju na ulazu staklena vlakna najmanjeg prečnika. Potpuno odsustvo najtanjih vlakana tipa I u sloju B smanjuje značajno efikasnost, slika 30. Ako se posmatra sloj A preko rasporeda prečnika vlakana, tada se može ustanoviti da kod njega od ulaza prema izlazu raste prečnik vlakana. Nedostatak ovih istraživanja ogleda se u tome što su uključena vlakna različitog prečnika, a istovremeno i različite energije površine, te se ne mogu izvesti i izdvojiti zaključci vezani samo za doprinos prečnika vlakana.

Akagi i saradnici (1988, 1990) su istraživali uticaj prečnika vlakana stakla na efikasnost separacije ulja iz vode. Prečnici vlakana stakla su bili 5,3  $\mu\text{m}$ , 9  $\mu\text{m}$  i 19  $\mu\text{m}$ . Poroznost sloja je iznosila 93,5%, 92,0% i 92,0% za navedeni redosled



Slika 30. Veličina izlaznih kapi iz različitih slojeva

prečnika vlakana. Kao dispergovana faza korišćena su tri mineralna ulja. Koncentracija dispergovane faze je iznosila 1000 mg/l. Srednji prečnici kapi na ulazu u sloj su bili  $1,5 \mu\text{m}$ ,  $1,8 \mu\text{m}$  i  $2 \mu\text{m}$ . Debljina sloja varirana je od 2 mm do 7 mm, a brzina fluida je bila od 0,2 cm/s do 0,88 cm/s. Dat je grafički prikaz efekta uticaja prečnika vlakana stakla na efikasnost separacije kapi ulja iz vode, slika 31.



Slika 31. Uticaj prečnika vlakana na efikasnost separacije za tri različita vlaknasta sloja

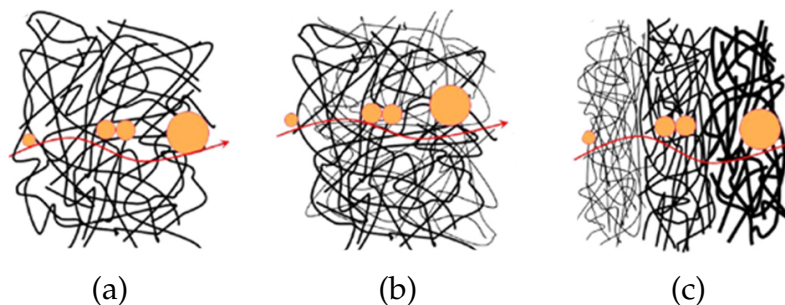


Njihovi rezultati pokazuju da sa porastom debljine vlakana stakla drastično opada efikasnost separacije kapi ulja samo pri određenim uslovima. Zapravo ova zavisnost je uslovljena time da li su vlakna kvašljiva dispergovanom fazom ili ne. Čista vlakna stakla, N-C, nisu kvašljiva uljem i kod njih je osetljivost na promenu njihove debljine drastična. Kod vlakana koja su kvašljiva uljem zbog prisustva organskih supstanci na svojoj površini ova zavisnost je čak i zanemarljiva. Pored toga autori u radu ne navode šta predstavljaju brojevi dati uz same krive 1, 3 i 5, te se može samo pretpostaviti da bi to mogla da bude prosečna veličina kapi.

Agarwal i saradnici (2013b) su ispitivali uticaj energije površine materijala, kao i prečnika vlakana i njihovog rasporeda na koalescentnu filtraciju. Eksperimente su realizovali pri brzini fluida od 0,6 m/min do 1,8 m/min i radialnoj i horizontalnoj orijentaciji toka fluida. Emulzija izooktana dispergovanog u vodi imala je srednji prečnik kapi 5  $\mu\text{m}$ . Koncentracija dispergovane faze na ulazu je bila 1%. Kao filtarski materijal korišćena su vlakna polibutilen tereftalata i poliester. Prečnici vlakana polibutilen tereftalata iznosili su 2  $\mu\text{m}$  do 3  $\mu\text{m}$ , a poliester od 10  $\mu\text{m}$  do 12  $\mu\text{m}$  i od 12  $\mu\text{m}$  do 14  $\mu\text{m}$ . Autori su koristili, kako slobodna, tako i povezana vlakna navedenih materijala. Formirano je ukupno 9 slojeva različite strukture i kombinacije odabranih materijala. Poroznost ispitivanih slojeva bila je u opsegu od 78% do 88%. Debljina slojeva je varirana od 0,32 mm do 5,87 mm. Kvašljivost površine vlakana menjana je nanošenjem nanočestica silikona i siloksana bez fluora. Autori su pratili i međusobno poredili efikasnost filtarskih slojeva preko faktora kvaliteta i efikasnosti separacije.

Kako bi se postigla visoka količina zarobljenih kapi dispergovane faze u sloju, neophodno je da se na ulaznom delu sloja nalaze vlakna najmanjeg prečnika, što je u skladu sa tvrdnjama i drugih autora. Kao što su neki autori uočili već ranije, ovde se potvrđuje da prečnici vlakana treba da se povećavaju od ulaza prema izlazu iz sloja. Najviša efikasnost separacije je iznosila 80%.

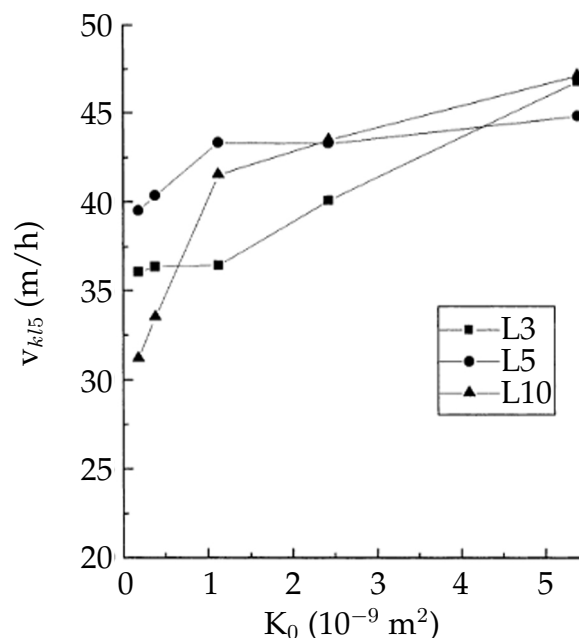
Uočeno je da se promenom geometrije sloja menjaju dominantni mehanizmi zarobljavanja i koalescencije kapi, slika 32.



Slika 32. Zarobljavanje i koalescencija kapi u sloju vlakana: a) kap u sloju vlakana jednakih prečnika, b) kap u nasumično pomešanim vlaknima dva prečnika, c) kap u sendvič sistemu gde prečnik vlakna raste od ulaza prema izlazu

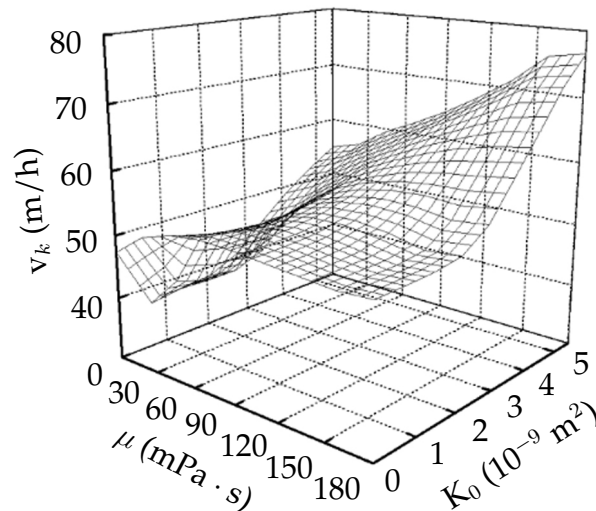
Na slici 32, pod (a) šematski je prikazan sloj vlakana jednakih prečnika, dok je pod (b) prikazan sloj vlakana dva prečnika nasumice pomešanih. Na slici 32, (c), prikazan je sendvič sistem u kome je sloj formiran od sloja manjeg prečnika vlakana na ulazu, a zatim je pridodat sloj većeg prečnika vlakana prema izlazu. U slučaju vlakana jednakog prečnika, kapi koalesciraju još na samom ulazu te su posle toga izložene velikom riziku od redisperzije. Na kapi deluju hidrodinamičke sile jednakog intenziteta i ako debljina sloja nije adekvatna dolazi do usitnjavanja kapi. Kada je sloj formiran od nasumično pomešanih vlakana različite debljine, tada je zadržavanje kapi još efikasnije, ali je i opasnost od redisperzije veća. U sloju koji ima manje pore na ulazu, a više na izlazu, kapi koje su koalescirale nastavljaju put kroz sloj i mogu i dalje da se uvećavaju pošto nailaze na pore većeg prečnika.

Potrebno je istaći da su opisani mehanizmi aktuelni kada je veličina pora bliska veličini kapi. Kada su pore značajno većeg prečnika od dolazećih kapi (Šećerov-Sokolović i saradnici (2003b; 2014)) tada se formira kapilarno-provodna uljna faza u pornom prostoru, u kom dolazeće kapi koalesciraju, a od nje se otkidaju krupne kapi. U tim okolnostima ne smeta da je sloj formiran od vlakana uniformnog prečnika i poželjno je da je sloj što veće permeabilnosti pošto se time povećava zapremina pora i udeo protočnih pora, a smanjuje se mesna brzina, tj. opada intenzitet hidrodinamičkih sila. Ovaj fenomen je nezavisan od debljine sloja u ispitivanom opsegu od 3 cm do 10 cm, slika 33, i od viskoznosti dispergovanog ulja, slika 34.



Slika 33. Zavisnost kritične brzine od permeabilnosti sloja za različite debljine sloja pri horizontalnoj orijentaciji

Krasinski (2014) je u svom radu ispitivao uticaj prirode dispergovane faze, prečnika vlakana, debljine sloja i brzine emulzije na efikasnost separacije ulja iz



Slika 34. Zavisnost kritične brzine od viskoznosti dispergovanog ulja i permeabilnosti sloja

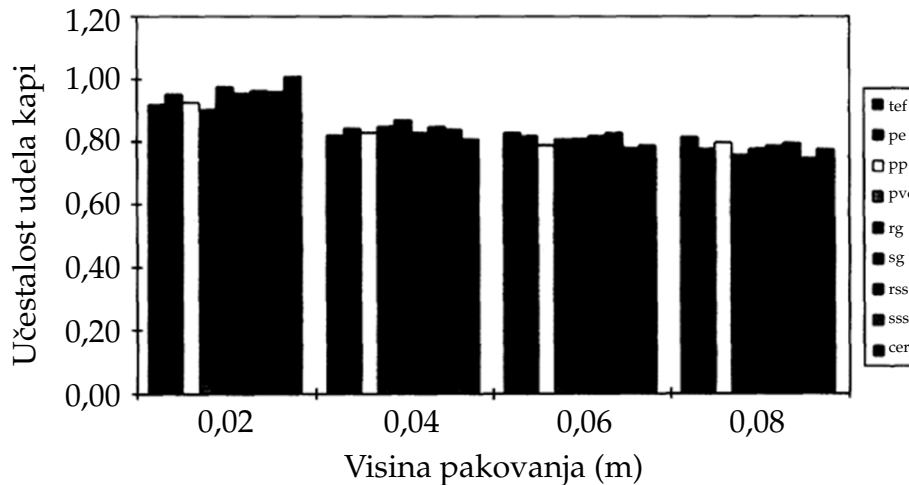
vode. Kao diskontinualna faza korišćeno je dizel gorivo sa niskim sadržajem sumpora i ulje Shell V-Oil 1404. Srednji prečnik kapi na ulazu u sloj za ulje Shell V-Oil 1404 je iznosio 3–4  $\mu\text{m}$ , dok je za dizel gorivo bio 5–7  $\mu\text{m}$ . Koncentracija dispergovane faze na ulazu u sloj je iznosila oko 1,45 vol%. Ispitivana vlakna su bila od polipropilena, pri čemu je srednji prečnik vlakana variran od 1,31  $\mu\text{m}$  do 59,5  $\mu\text{m}$ . Formirano je četiri debljine sloja u rasponu od 1 mm do 6 mm za pet različitih prečnika vlakana, gde je srednja poroznost sloja varirana od 79,3 % do 92,2%. Orijehtacija toka fluida je bila horizontalna. Brzina emulzije na ulazu u sloj je varirana od 2 mm/s do 10 mm/s. Efikasnost separacije je praćena preko promene koncentracije dispergovane faze na ulazu i izlazu iz sloja.

Potvrđeno je da prečnik vlakana utiče na veličinu kapi dispergovane faze na izlazu iz sloja usled čega, pri formiranju sloja, vlakna većeg prečnika formiraju veći porni prostor. Na taj način autor objašnjava zašto je za najmanji prečnik vlakana dobijena najviša efikasnost separacije. Takođe, potrebno je istaći da je najniža izlazna koncentracija zabeležena pri upotrebi sloja debljine 6 mm.

Nekolicina autora je ispitivala uticaj promene oblika filtarskog materijala na efikasnost koalescencije (Sharifi i Shaw 1996, Li i Gu 2005, Chawaloeshonsiya i Painmanakul 2014).

Sharifi i Shaw (1996) su ispitivali uticaj prirode filtarskog materijala kao i njegove geometrije na koalescenciju u sloju u uređaju vertikalne orijentacije toka fluida odozdo naviše. Brzina fluida je bila  $2,8 \cdot 10^{-4}$  m/s, dok je ulazna koncentracija emulzije ulje u vodi bila 0,1 %vol. Koristili su polipropilen, teflon, PVC, polietilen, hrapavo i glatko staklo, hrapav i gladak nerđajući čelik i keramiku. Svaki uzorak materijala imao je svoju geometriju ili svoj specifičan oblik i to šupalj i pun cilindar, hrapave i glatke sfere, Berlovo sedlo, mreže. Kao uljnu fazu istraživači su koristili toluen, motorno ulje, n-dekan i suncokretovo ulje. Sharifi i Shaw za-

ključuju da ni oblik, ni priroda materijala ne utiču na efikasnost separacije, što potvrđuje i zavisnost učestalosti udela kapi u funkciji visine pakovanja prikazana za različite materijale na slici 35. Pored toga zaključuju da na koalescenciju, zapravo utiču samo osobine uljne faze.



Slika 35. Uticaj debljine sloja i prirode vlakana na izlaznu veličinu kapi

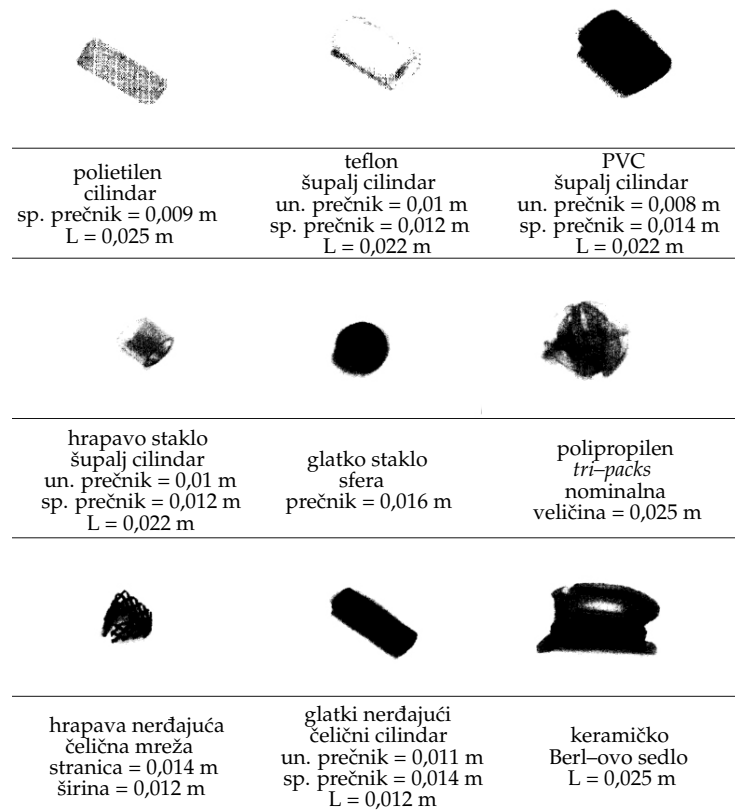
Izvedeni zaključak je krajnje neočekivan, a proistekao je iz činjenice da su korišćeni nepovoljni uslovi izvođenja eksperimenata, o čemu autori nisu vodili računa. Kada se detaljnije analiziraju uslovi pod kojima su eksperimenti realizovani može se konstatovati da je geometrija sloja zbog dimenzija odabranih punjenja, slika 36, u svim okolnostima, bila takva da su pore u sloju bile značajno veće od veličine kapi, te kapi, na taj način, i nisu imale prilike da dođu u kontakt sa odabranim materijalima. Koalescencija je realizovana u zapremini tečnosti kao da se radi o taložniku. Pored toga orijentacija toka fluida odozdo na više ne obezbeđuje niti minimalnu količinu kapilarno-provodne faze u sloju što je dodatna otežavajuća okolnost za realizaciju koalescencije.

Li i Gu (2005) su ispitali uticaj prečnika vlakana i geometrije filtarskog materijala na efikasnost separacije ulja iz vode. Testirali su vlakna i granule od polipropilena, kao i vlakna od najlona. Dimenzije odabranih materijala date su u tabeli 5.

Tabela 5. Prečnici testiranih vlakana i granula za koalescentnu filtraciju

| Medijum za koalescenciju         | Vlakna       |        | Granule      |
|----------------------------------|--------------|--------|--------------|
|                                  | Polipropilen | Najlon | Polipropilen |
| Prečnik vlakna ( $\mu\text{m}$ ) | 170          | 80     | 684          |

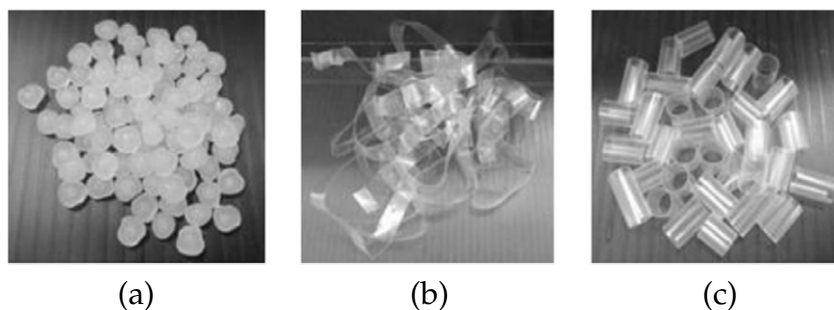
Kao diskontinualna faza korišćena je sirova nafta i mineralno ulje. Orijetacija toka fluida bila je horizontalna. Srednji prečnik kapi bio je u rasponu od  $5 \mu\text{m}$  do  $9 \mu\text{m}$ . Koncentracija dispergovane faze je iznosila  $2000 \text{ mg/l}$ ,  $5000 \text{ mg/l}$  i  $10000 \text{ mg/l}$ . Brzina fluida je bila od  $0,5 \text{ mm/s}$  do  $2,5 \text{ mm/s}$ . Autori zaključuju



Slika 36. Izgled i dimenzije korišćenih filtarskih materijala

da su vlakna polipropilena efikasnija od granula polipropilena. Tvrdi da se povećanjem aktivne površine materijala povećava efikasnost koalescencije, ali ne daju rezultate koji bi mogli da potkrepe ove tvrdnje ili da ukažu na kvantitativne pokazatelje ovog ogleada. Pored toga, autori ne ističu činjenicu da su ova dva sloja potpuno različite strukture i da nije razlika samo u aktivnoj površini, već postoji razlika i u veličini pora.

Chawaloeshphonsiya i Painmanakul (2014) su realizovali istraživanja koja su imala za cilj ispitivanje uticaja oblika materijala polipropilena na efikasnost separacije kapi ulja iz vode. Koristili su granule, trake i šuplje cilindre, slika 37. Na sli-



Slika 37. Filtarski medijum: a) granule, b) trake, c) cilindri

ci se jasno vidi da su u pitanju trake polipropilena, iako ih autori nazivaju vlaknima. Takođe je ispitivan uticaj debljine sloja i brzine fluida na efikasnost rada

koalescera. Koncentracija dispergovane faze iznosila je 1 g/l. Prečnik kapi dispergovane faze iznosio je  $1,52 \mu\text{m}$ .

Neke osobine materijala: poroznost, dimenzije i ugao kvašenja date su u tabeli 6. Autori su ugao kvašenja odredili matematičkim putem koristeći relaciju u kojoj egzistira samo međupovršinski napon između faza, te navode da za sva tri oblika imaju jednak ugao kvašenja. U tim okolnostima potpuno je zanemaren geometrijski oblik filtarskog materijala i njegov uticaj na kvašljivost. Na osnovu vrednosti ugla kvašenja autori utvrđuju da je polipropilen materijal koji je hidrofoban, te pogodan za koalescenciju kapi ulja.

Tabela 6. Osobine testiranih materijala za koalescentnu filtraciju

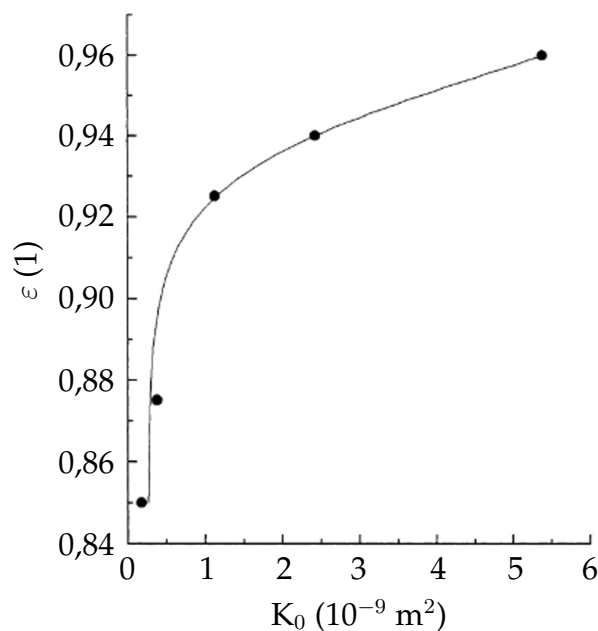
| Osobina              | Polipropilen        |   |  |
|----------------------|---------------------|---|--|
|                      | Granula             | Vlakno                                      | Cev  |
| Poroznost (%)        | 55                  | 90  | 82   |
| Dimenzija (mm)       | 4,5 – 5,5 (prečnik) | 10 × 280 × 0,5 (širina × dužina × debljina) | 5 × 8 (prečnik × dužina)<br>4 (unutrašnji prečnik) |
| $\theta_c(^{\circ})$ | 68,3                |   |  |

Na osnovu prikazanih vrednosti poroznosti slojeva formiranih od materijala različitog oblika polipropilena može se istaći sledeće: poroznost sloja granula je najniža i iznosi 55%, kod sloja formiranog od šupljih cilindara poroznost raste na 82%, dok sloj formiran od traka ima poroznost 90%. Ovako drastična razlika u poroznosti slojeva, prema Spielmanu, a uz potvrdu autora, omogućava formiranje značajno različite količine zasićene uljne faze u porama sloja. Autori su utvrdili računskim putem da je stepen zasićenja u njihovim ogledima za granule 0,12, za cilindre 0,26, dok je za trake 0,28 udela pornog prostora. Najveća efikasnost separacije od 43% ostvarena je kod sloja formiranog od šupljih cilindara pri brzini fluida od 2 cm/s i debljini sloja od 10 cm. Neophodno je istaći da je realizovana efikasnost izuzetno niska, s tim da treba istaći da je korišćen materijal koji je kvašljiv uljem. To ukazuje da su odabrani materijali formirali sloj neadekvatne geometrije za separaciju kapi ulja prosečnog prečnika od  $1,52 \mu\text{m}$ . To se moglo pretpostaviti na osnovu dimenzija odabranih materijala. Ova istraživanja (Chawaloeshonsiya i Painmanakul 2014) ponovo otvaraju diskusiju o uticaju odnosa veličine kapi i veličine pora na efikasnost koalescencije, čemu u poslednje vreme i druge grupe istraživača posvećuju pažnju.

Vulić (2000) i Šećerov Sokolović i saradnici (1997, 2003a, 2003b, 2009, 2014, 2016) daju svoj pristup izučavanju promene geometrije sloja na originalan način. Sva njihova istraživanja separacije kapi ulja iz vode realizovana su primenom vlakana mikronskog prečnika, od  $40 \mu\text{m}$  do  $50 \mu\text{m}$ . Eksperimenti su realizovani pri sve tri orijentacije toka fluida: horizontalnoj (H), vertikalnoj nadole (VD) i vertikalnoj nagore (VG). Koristili su vlakna poliuretana, a zatim i drugih polimera,

kao što su polietilen teraftalat i polipropilen. Kako je sloj vlakana kompresibilan, autori su menjali geometriju sloja njegovim sabijanjem ili razvlačenjem. Na taj način je smanjivan broj promenljivih, a priroda vlakana, geometrija sloja i prečnik vlakana su održavani konstantnim. Menjana je količina materijala u zapremini sloja, a pri tome do neke mere i vijugavost vlakana. Na taj način autori uvode odrednicu da geometriju sloja određuje zavisnost poroznosti od permeabilnosti, kao i prečnik vlakana. Usvojen je raspon permeabilnosti sloja od  $0,18 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  do  $5,39 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  pri kojem će biti realizovana sva njihova buduća istraživanja. Značaj permeabilnosti na proticanje jednofaznog sistema opisuju u preglednom radu Jackson i James (1986).

U radu Šećerov-Sokolović i saradnici (2003a, 2003b) detaljno se opisuju osobine sloja poliuretana koji ima heksagonalnu strukturu pora, dok su vlakna glatka trougaonog poprečnog preseka. Materijal izgrađuje sloj, koji ima raspon pora od 0,20 mm do 0,30 mm u zavisnosti od nasipne gustine, tj. količine materijala. Prosečna veličina kapi ulja iznosila je  $10 \mu\text{m}$ . Dijagram zavisnosti poroznosti sloja poliuretana od njegove permeabilnosti dat je na slici 38.



Slika 38. Zavisnost poroznosti od permeabilnosti

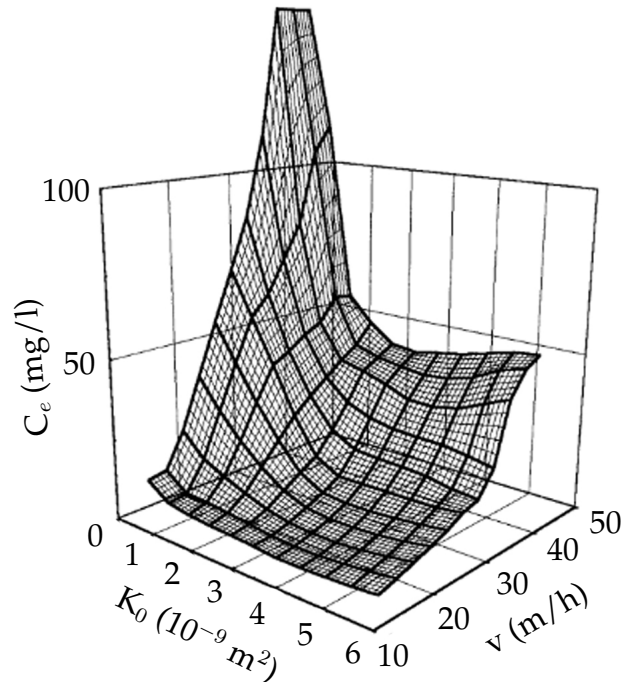
Osobine sloja u zavisnosti od nasipne gustine date su u tabeli 7.

Potrebno je naglasiti da je raspon poroznosti ispitivanih slojeva bio od 85% do 96% što ukazuje da se radi o sloju izrazito visoke poroznosti.

Pored toga autori ukazuju da postoji kritična permeabilnost u domenu niskih vrednosti, nezavisno od orijentacije toka fluida, ispod koje je sistem nestabilan, te je sa aspekta vrednosti permeabilnosti, opseg uspešnog rada iznad kritične vrednosti permeabilnosti. Autori smatraju da opseg ispod kritične permeabilnosti obezbeđuje uslove pri kojima je mesna brzina fluida toliko velika da one-mogućava bilo koji oblik koalescencije u sloju, slika 39.

Tabela 7. Osobine poliuretanskog sloja za različite nasipne gustine

| Osobine sloja                                 | Nasipna gustina, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ |      |      |       |       |
|---|--|------|------|-------|-------|
|   | 50   | 70   | 90   | 150   | 180   |
| Dijagonala heksagona, $D$ , mm                | 0,50   | 0,40 | 0,30 | 0,25  | 0,20  |
| Udeo čvrste faze, $\phi$                      | 0,04   | 0,06 | 0,08 | 0,13  | 0,15  |
| Poroznost, $\varepsilon$                      | 0,96   | 0,94 | 0,93 | 0,88  | 0,85  |
| Površina čvrste faze, $S$ , $\text{mm}^{-1}$  | 3,36   | 4,64 | 6,00 | 10,00 | 12,00 |
| Permeabilnost, $K_0$ , $10^{-3} \text{ mm}^2$ | 5,39   | 2,43 | 1,13 | 0,38  | 0,18  |

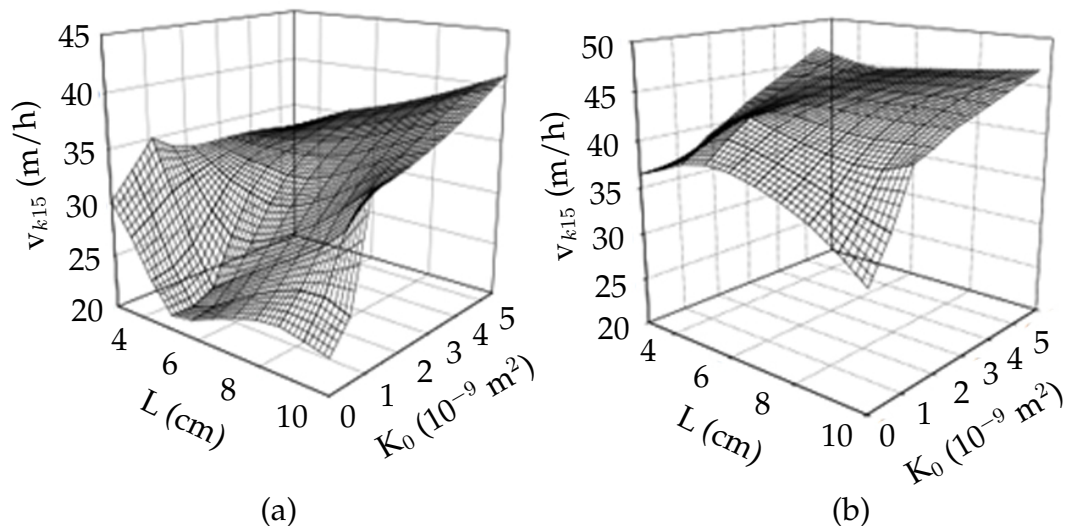


Slika 39. 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije od permeabilnosti sloja i brzine fluida

U analizu je uvedena i kritična brzina definisana kao brzina pri kojoj je sadržaj ulja na izlazu iz koalescera 15 mg/l. Predloženo je da se dalja analiza efikasnosti radi preko analize promene kritične brzine. Kao cilj istraživanja postavljaju pronalaženje uslova pri kojima se realizuje maksimalna kritična brzina. Šećerov-Sokolović i saradnici zaključuju da je prilikom projektovanja koalescera osnovni cilj odrediti maksimalnu vrednost kritične brzine čime se značajno smanjuju gabariti uređaja što je bitno ne samo zbog veličine prostora koja mu je potrebna, nego i zbog težine uređaja. Ove osobine nisu važne samo na brodovima i naftnim platformama, nego i u procesnoj industriji. Ako je uređaj lakši, troši manje konstrukcionog materijala, pored toga su i temelji koji ga nose manji te je i za njih potrebna manja količina materijala.

Na prikazanim 3D dijagramima, slika 40, uočljivo je da se u predelu niskih vrednosti permeabilnosti realizuju značajno niže kritične brzine kao posledica uticaja fenomena kritične permeabilnosti.





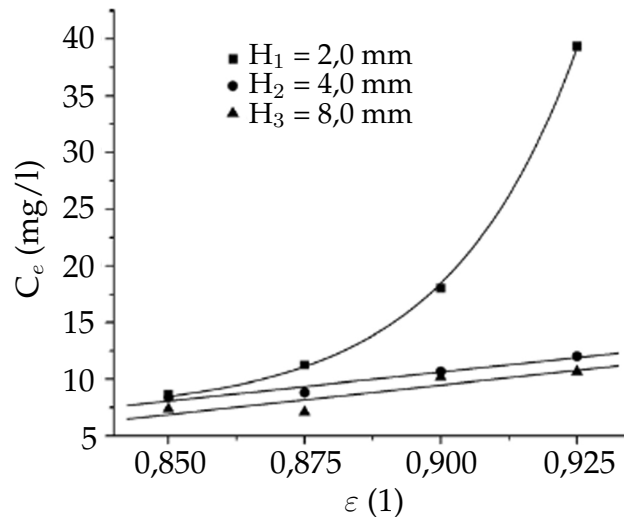
Slika 40. 3D dijagrami zavisnosti kritične brzine od debljine sloja i permeabilnosti za orijentacije toka (a) vertikalno nagore i (b) horizontalno

Autori smatraju da je neophodno održavati geometriju sloja ekvivalentnom kada se želi proučavati bilo koji drugi uticaj: debljine sloja, veličine kapi, osobine filtarskog materijala, osobine dispergovane faze i slično (2004, 2006, 2007, 2014). Istaknuto je da su uporedivi samo oni rezultati koji su realizovani pri jednakoj orijentaciji toka fluida pri permeabilnosti sloja višoj od kritične i bliskoj geometriji sloja.

Ma i saradnici (2014) su ispitivali uticaj geometrije sloja, kao i radnih uslova na separaciju kapi dizela srednjeg prečnika od  $6 \mu\text{m}$  do  $10 \mu\text{m}$ . Koristili su staklena vlakna prosečne debljine  $4 \mu\text{m}$ . Poroznost sloja su varirali formirajući sloj različite mase stakla u jednakoj zapremini. Opseg poroznosti sloja bio je od 85% do 92,5%. Istovremeno su menjali i debljinu sloja, a debljina je bila 2, 4 i 8 mm. Brzina fluida bila je u opsegu od 1 ml/s do 20 ml/s. Važno je istaći da je odabrani raspon brzine pokrivaio oblast do iznad kritične, što ukazuje eksponencijalna zavisnost na dijagramu zavisnosti izlazne koncentracije dispergovane faze od brzine. Orijehtacija toka fluida je bila vertikalno naviše.

Utvrđeno je da porastom poroznosti, u okolnostima njihovog testa, raste izlazna koncentracija ulja, slika 41, a intenzitet porasta uslovljen je debljinom sloja. Za najmanju debljinu sloja zavisnost je eksponencijalna, dok je za veće debljine linearna.

Nažalost, autori su u svojim istraživanjima napravili greške pri postavci eksperimenta, kao i pri izboru filtarskog materijala. Pre svega, orijentacija toka fluida vertikalno naviše onemogućava formiranje bilo koje količine kapilarno-provodne faze u zapremini sloja. Pored toga, testirali su vlakna stakla koja nisu kvašljiva kapima ulja pri čemu je još i prečnik tih vlakana blizak veličini kapi. To ukazuje na male dimenzije pora u sloju što može dodatno da usitnjava i one kapi koje ulaze u sloj. Uslovi eksperimenta nisu adekvatni za uspešnu realizaciju koalescencije i separacije kapi ulja.



Slika 41. Uticaj poroznosti sloja na izlaznu koncentraciju pri različitim debljinama

Bansal i saradnici (2011) su, kao što je već opisano, ispitivali uticaj energije površine, veličine pora u sloju i poroznosti na separaciju emulzije izooktan u vodi. Srednji prečnik kapi dispergovane faze je bio manji od  $6 \mu\text{m}$ , dok je 50% kapi dispergovane faze imalo prečnik manji od  $2 \mu\text{m}$ . Ispitivano je pet uzoraka slojeva vlakana pri čemu je varirana veličina pora od  $2 \mu\text{m}$  do  $51 \mu\text{m}$ , uz promenu poroznosti od 46% do 87%.

U tabeli 8 date su sve relevantne osobine ispitivanih slojeva. Može se uočiti da se veličine pora u sloju menjaju strukturom sloja (upletena-neupletena vlakna), kao i prirodom vlakana. To ukazuje da uticaj veličine pora nije ispitivan na adekvatan način pošto je istovremeno menjana struktura sloja i/ili priroda vlakana.

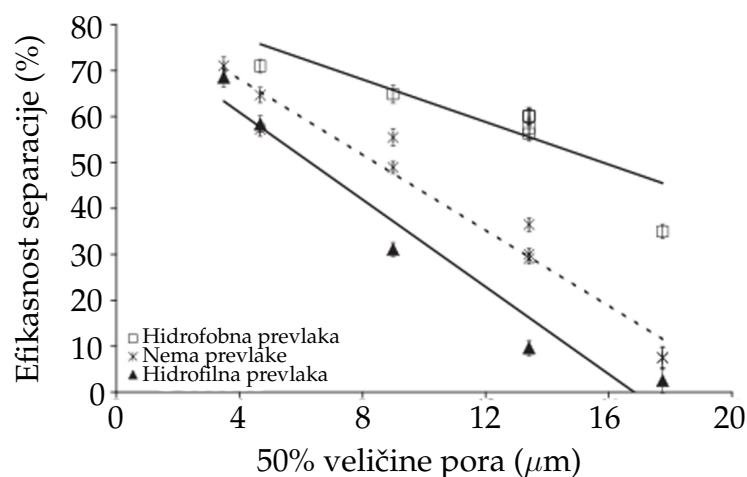
Zaključeno je da za vlakna slične energije površine sa povećanjem veličine pora u sloju opada efikasnost separacije, slika 42, bez obzira da li je reč o hidrofilnim ili hidrofobnim vlaknima. Opseg dobijenih vrednosti efikasnosti sa porastom veličine pora od  $4 \mu\text{m}$  do  $16 \mu\text{m}$  je od 70% do čak 10%. Kako bi efikasnost separacije bila zadovoljavajuća neophodno je da sloj bude kvašljiv disperznom fazom kako bi došlo do koalescencije kapi unutar sloja za razmatrani sistem. Ukoliko je odnos prečnika kapi dispergovane faze i pora u sloju približno jednak jedinici, tada kvašljivost površine ima mali uticaj na efikasnost separacije, a zapravo glavni uticaj ima ulazna brzina emulzije u sloj. Efikasnost koalescencije zavisi od vremena zadržavanja kapi dispergovane faze u sloju, brzine fluida, kvašljivosti površine vlakana, veličine pora, prečnika vlakana i poroznosti sloja.

Kod ovih istraživanja mogu se uočiti još neki nedostaci. Može se smatrati da je odnos veličine kapi i veličine pora izuzetno blizak za ceo ispitivani raspon, te bi se moglo prihvatiti da je on blizak jedinici u svim okolnostima. Pored toga, nije poznato da li je permeabilnost ispod kritične vrednosti, na šta uočeni trendovi ukazuju, a nepoznato je i da li je brzina fluida ispod ili iznad kritične. I pored želje

da se sistematično ispita uticaj promene kvašljivosti i promene veličine pora može se konstatovati da nije izvršeno sistematično ispitivanje fenomena koalescencije u sloju vlakana.

Tabela 8. Fizičke osobine ispitivanih materijala

| Uzorak | Materijal i tip polimera   | Veličina pora ( $\mu\text{m}$ ) (DIN 58355-2) |                | Permeabilnost ( $\text{l}/\text{m}^2/\text{s}$ ) (DIN EN ISO 9237) |
|--------|--|---|----------------|--|
|        |  | Opseg   | 50% Pora (P50) |  |
| F1     | PET-pletena  | 2-19  | $3,5 \pm 0,2$  | $14,5 \pm 2$   |
| F2     | Celuloza-nepletena   | 3-11  | $4,7 \pm 0,2$  | $17,8 \pm 4$   |
| F3     | PBT meltblou (eng. <i>meltblown</i> <sup>1</sup> ) + PET spunbond (eng. <i>spunbond</i> <sup>2</sup> ) | 6-19  | $9,0 \pm 0,7$  | $135,0 \pm 14$   |
| F4     | PET nidld-nonvovn (eng. <i>needled nonwoven</i> <sup>3</sup> )   | 9-51  | $13,4 \pm 0,7$ | $152,2 \pm 8$  |
| F5     | PET spunbond   | 11-43   | $17,7 \pm 1,1$ | $170,9 \pm 19$   |
| Uzorak | Materijal i tip polimera   | Debljina sloja (mm) (DIN EN ISO 9073-2)       |                | Poroznost sloja  |
| F1     | PET-pletena  | $0,86 \pm 0,04$                               |                | 0,46   |
| F2     | Celuloza-nepletena   | $0,60 \pm 0,06$                               |                | 0,73   |
| F3     | PBT meltblou + PET spunbond  | $1,64 \pm 0,06$                               |                | 0,87   |
| F4     | PET nidld-nonvovn  | $1,95 \pm 0,05$                               |                | 0,78   |
| F5     | PET spunbond   | $0,59 \pm 0,02$                               |                | 0,65   |



Slika 42. Uticaj veličine pora na efikasnost separacije

<sup>1</sup>Tehnologija prerade polimerne mase koja se izlaže struji vazduha

<sup>2</sup>Proizvodnja netkanih materijala termičkim povezivanjem ispređenih filamenata

<sup>3</sup>Proizvodnja netkanih materijala mehaničkim povezivanjem ispređenih filamenata

Shin i saradnici (2004a, 2005) prvi kod geometrije sloja razmatraju mešavinu vlakana različitog prečnika kao i prisustvo nanovlakana u sloju, slika 18. Pored toga uvode i mešavinu vlakana različite kvašljivosti. Ova istraživanja su, uvođenjem nanovlakana u sloj sa mikronskim vlaknima uvela novi oblik geometrije sloja koji do tada u literaturi nije ispitan. Ranije se ispitivao efekat vlakana različitog prečnika pri čemu je sloj bio konstantne debljine vlakana ili je formiran ređanjem slojeva od vlakana uniformne mikronske debljine različitim redosledom u odnosu na ulaz fluida. U ovom istraživanju autori prave mešavinu vlakana različitog prečnika od kojih su neka imaju nano dimenzije. Pored toga, prave i ispituju mešavinu vlakana stakla koja su kvašljiva kapima vode i nanovlakana različitih polimera koja nisu kvašljiva vodom. Istovremeno variraju i debljinu tih nanovlakana. Zapaženo je da nanovlakna značajno utiču na efikasnost separacije, ali, kao što je i očekivano, i na pad pritiska kroz sloj.

## 2.4 Uticaj osobina tečnosti na koalescenciju

U literaturi je analiziran uticaj više osobina kako dispergovane, tako i kontinualne faze na separaciju koalescentnom filtracijom. To su najčešće: viskoznost, gustina i međupovršinski napon. Neki autori su analizirali efekat promene osobina ispitivanih tečnosti koristeći grafičku analizu (Sareen i saradnici 1966, Šećerov-Sokolović i saradnici 1996), a drugi bezdimenzione grupe ili matematičke modele (Sharifi i Shaw 1996, Grilc i saradnici 1986). Najčešća greška u eksperimentima prilikom proučavanja uticaja promene osobina tečnosti na koalescenciju je činjenica da se posmatra uski opseg vrednosti posmatrane veličine što može da utiče na donošenje pogrešnih zaključaka (Šećerov-Sokolović i Sokolović 2000).

Sareen i saradnici (1966) su ispitivali uticaj promene viskoznosti dispergovane faze u intervalu od 1,38 mPa·s do 137 mPa·s na koalescenciju u vlaknastom sloju pri debljini sloja od 1,9 cm. Dispergovana faza su bili: bazna ulja, kerozin, benzen, butilbenzen, hloroform, cikloheksan, izobutan i nitrobenzen. Kritičnu brzinu su definisali kao brzinu pri kojoj dolazi do redisperzije dispergovane faze u sloju, te kapi koje napuštaju sloj imaju manju dimenziju od ulaznih i ne mogu se istaložiti. Zaključili su da pri brzinama većim od 45 m/h i manjim od 2,38 m/h, viskoznost nema uticaja na kritičnu brzinu. Pri navedenim uslovima kritična brzina se približava asimptotskoj vrednosti. Do takve konstatacije došli su i drugi autori (Šećerov-Sokolović i saradnici 1996).

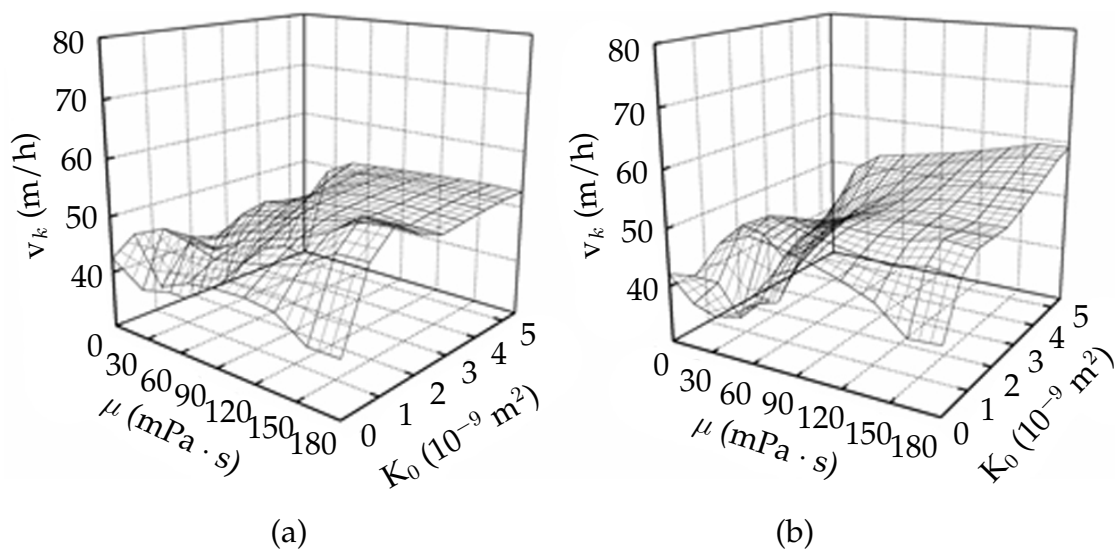
Jeffreys i Davies (1971) su zaključili da porast viskoznosti dispergovane faze smanjuje kritičnu brzinu. Kod njih je dispergovana faza bila: izooktan, kerozin i amil alkohol. Oblik zavisnosti kritične brzine od viskoznosti dispergovane faze je prividno različit u odnosu na rezultate drugih autora. Razlog tome može biti značajno uži ispitivani interval viskoznosti od 7 mPa·s do 42 mPa·s. Dobijeni rezultati odgovaraju delu krive date u radovima Grilc i Šećerov-Sokolović i saradnika u kom kritična brzina eksponencijalno opada (Grilc i saradnici 1986, Šećerov-Sokolović i saradnici 1996).

Na osnovu rezultata Grilca i saradnika (1986), može se konstatovati da postoji slična zavisnost kritične brzine od viskoznosti uljne faze, bez obzira da li je ona kontinualna ili dispergovana za ispitivani opseg viskoznosti pri ispitivanim uslovima rada i odabranoj prirodi vlakana. U oba slučaja korišćen je sloj vlakana od stakla.

Ryan i Elimelech (1996) su proučavali mehanizme otkidanja sfernih koloidnih čestica sa ravne površine. Dali su izraz za torzioni momenat koji deluje na te čestice. Na njega utiče adhezijska sila, vučna-hidrodinamička sila i sila potiska. U ovoj relaciji egzistira i viskoznost emulzije. Što je viskoznost emulzije veća to je manja kritična brzina.

Šećerov-Sokolović i saradnici (1996, 2010, 2012, 2013, 2014) detaljno su proučavali uticaj prirode dispergovane uljne faze u značajnom vremenskom periodu. Opsežna istraživanja koja su realizovali na temu uticaja viskoznosti dispergo-

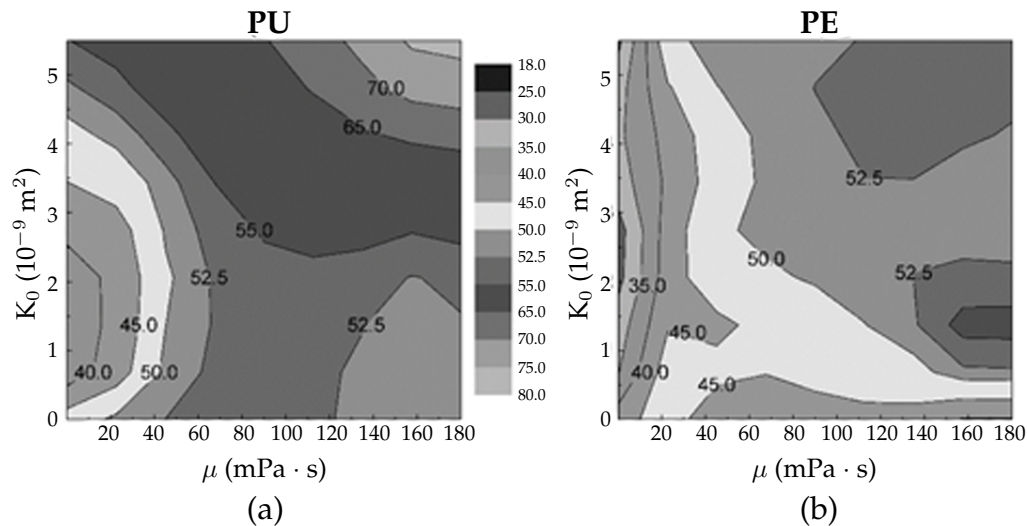
vane faze na koalescenciju delom su u skladu sa drugim autorima, a delom su specifična. Oni su utvrdili, takođe, da efikasnost koalescencije opada porastom viskoznosti za širok opseg viskoznosti od 7,00 mPa·s do 1132,00 mPa·s. Ispitivanja su realizovana na vlaknima poliuretana pri najvećoj permeabilnosti sloja i pri orijentaciji vertikalno nadole. Dalja istraživanja ovih autora ukazuju da orijentacija toka fluida ne utiče na oblik površine zavisnosti osobina dispergovanog ulja na 3D dijagramima, ali da geometrija sloja, brzina fluida i priroda vlakana filtarskog materijala značajno utiču na oblik površine za viskoznost kao odabranu osobinu dispergovanog ulja. Pri određenim oblastima brzina fluida i permeabilnosti sloja, efikasnost značajno raste porastom viskoznosti dispergovane faze kod nekih polimernih materijala. Na slici 43 dati su 3D dijagrami zavisnosti kritične brzine od permeabilnosti sloja i viskoznosti ulja za dva ispitivana polimerna materijala: polietilen teraftalat, PE, kao i polipropilena, PP, pri horizontalnoj orijentaciji. Oblik zavisnosti skoro kod svih materijala je sličan. U predelu niske viskoznosti i niske permeabilnosti vrednosti kritične brzine su male, dok pri visokoj permeabilnosti i visokoj viskoznosti brzine imaju visoke vrednosti čak i preko 70 m/h. Simultanom promenom geometrije sloja i viskoznosti ulja, porast permeabilnosti i viskoznosti povećava radnu brzinu. Iz dijagrama je uočljivo da na kritičnu brzinu značajno utiče priroda vlakana o čemu će biti reči kasnije.



Slika 43. 3D dijagrami zavisnosti kritične brzine,  $v_k$ , od viskoznosti ulja i permeabilnosti sloja za (a) sloj PE i (b) sloj PP

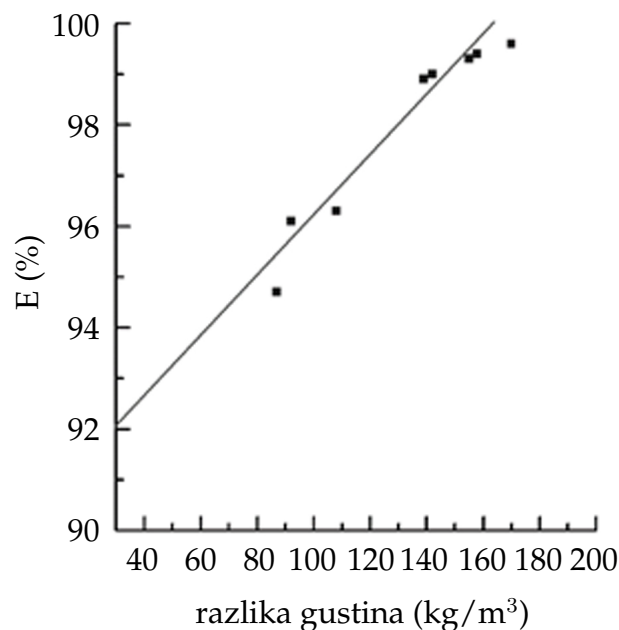
Govedarica i saradnici (2013) su izvršili analizu na osnovu konturnih dijagrama, na kojima se jasnije izvodi zaključak da porastom viskoznosti raste kritična brzina, ali različitim intenzitetom za različite materijale, slika 44.

Nekolicina autora (Vinson 1965, Šećerov-Sokolović i saradnici 1996, Sharifi i Shaw 1996) je ispitivala značaj gustine i još nekih osobina dispergovane faze. Veći broj autora tvrdi da je separacija kapi efikasnija u sistemima sa većom razlikom



Slika 44. Konturni dijagrami sa izokritičnim brzinama za sloj (a) PU i (b) PE

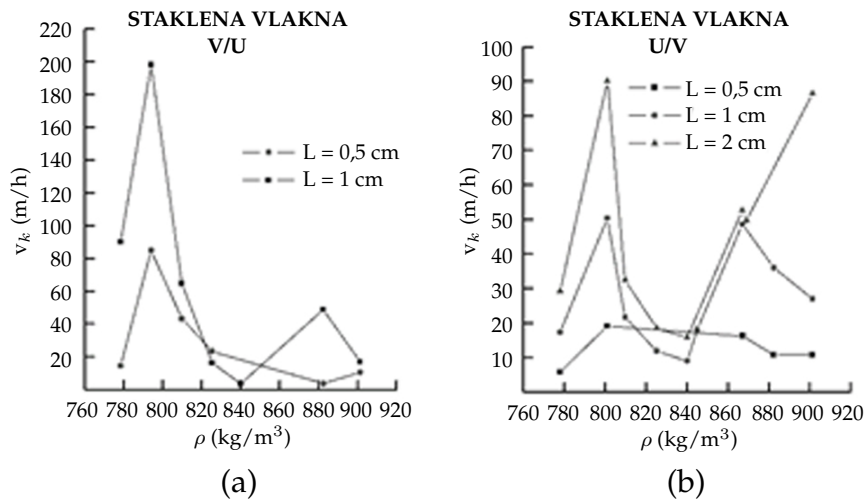
gustina faza (Šećerov-Sokolović i saradnici 1996, 2010). To i jeste logično za dominantan mehanizam taloženja kapi posle sloja, pošto je brzina taloženja upravo proporcijalna razlici gustina tečnosti koje grade emulziju, slika 45.



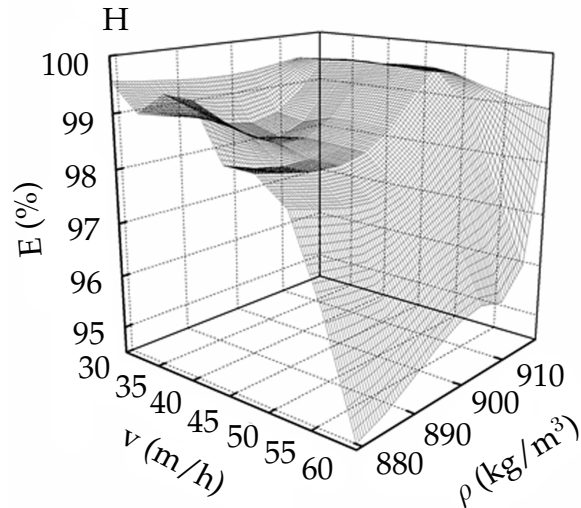
Slika 45. Zavisnost efikasnosti separacije od razlike gustina tečnosti koje grade emulziju

Jeffreys (1971) objašnjava da povećanje razlike gustina može da utiče na deformaciju kapi pri čemu se povećava površina drenažnog filma što ubrzava koalescenciju. Istovremeno se povećava hidrostatička sila potrebna za drenažu koja može da bude nedovoljna. Navedeni efekti su suprotstavljeni, te rezultanta uticaja razlike gustina može i da usporava i da ubrzava koalescenciju. Koji će od ova dva uticaja preovladati nije još uvek jasno. Grilc i saradnici (1986) su za oba

tipa emulzionih sistema, voda u ulju (V/U) i ulje u vodi (U/V), uočili da kritična brzina u određenim intervalima gustine postiže lokalni minimum i lokalni maksimum koji se ponavlja, slika 46 (Govedarica 2011). Data pojava je u skladu sa zaključcima Jeffreys-a. Dvojaki uticaj gustine dispergovane faze na koalescenciju utvrdili su i Šećerov-Sokolović i saradnici (2010) za horizontalnu orijentaciju, slika 47.



Slika 46. Zavisnost efikasnosti separacije od gustine za (a) V/U, (b) U/V



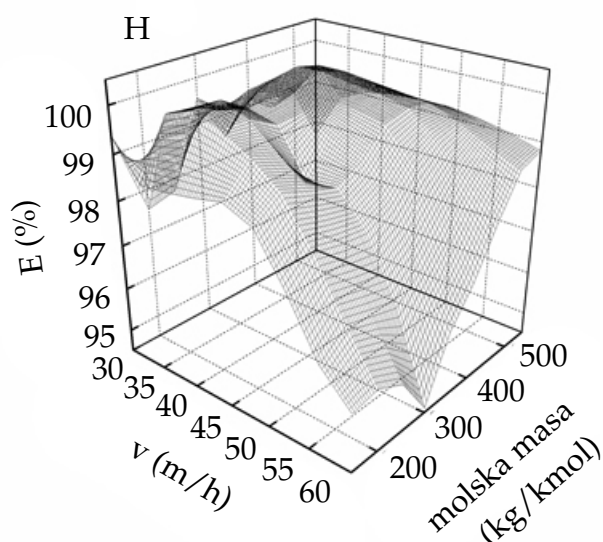
Slika 47. 3D dijagram zavisnosti efikasnosti separacije od brzine fluida i gustine dispergovane uljne faze pri horizontalnoj orijentaciji toka

Šećerov-Sokolović i saradnici (2010) ovu pojavu objašnjavaju na sledeći način: za datu horizontalnu orijentaciju kada su kapi značajno manje od veličine pora realizuju se svi poznati mehanizmi zarobljavanja kapi u porama sloja. Kada gustina kapi opada, taloženje u zapremini pora postaje dominantnije pošto brzina taloženja raste. U isto vreme dešava se i suprotan efekat. U stacionarnom režimu kapi ulja koalesciraju u kapilarno-provodnu uljnu fazu.



Zarobljavanje kapi, a i koalescencija su direktno uslovljeni količinom zasićenog ulja u porama sloja, a ta količina je u korelaciji sa gustinom ulja. Za sve tri orijentacije toka fluida sa porastom gustine raste količina zasićenog ulja. Pri orijentaciji vertikalno nagore ulje niže gustine teži da napusti sloj. Kod horizontalne orijentacije, slika 47, distribucija zasićene uljne faze po poprečnom preseku sloja uslovljena je njegovom gustinom. Ulje veće gustine pokriva veći deo poprečnog preseka uređaja što daje veću količinu kapilarno-provodne uljne faze. Na taj način se efikasna koalescencija odigrava u većoj zapremini sloja. Rezultat ova dva suprotna efekta pri različitim brzinama fluida pokazuje minimum kao što je na slici 47 i vidljivo.

Uticaj molske mase, neutralizacionog broja i strukturnog sastava dispergovanog ulja mineralnog porekla na efikasnost koalescencije su prvi ispitivali Šećerov-Sokolović i saradnici (1996). Kod mineralnih ulja postoji korelacija između molske mase i gustine, te je uticaj molske mase na efikasnost separacije kapi ulja ekvivalentan uticaju gustine (slike 47 i 48).



Slika 48. 3D dijagram zavisnosti efikasnosti separacije od brzine fluida i molske mase dispergovane uljne faze pri horizontalnoj orijentaciji toka

Međupovršinski napon i njegov uticaj na koalescenciju kapi, kako ulja, tako i vode proučavao je značajan broj istraživača. Mogu se uočiti dva pristupa u tim istraživanjima. Jedna grupa autora ispituje koalescenciju kapi na realnim sistemima koji po svojoj prirodi pokazuju različite vrednosti međupovršinskog napona, dok druga grupa postiže određeni raspon međupovršinskog napona dodavanjem površinski aktivnih materija (PAM) organskom sistemu. Oba pristupa su opravdana sa aspekta prakse. Kod proizvodnje nafte dodaje se paket aditiva koji menjaju međupovršinska svojstva nafte i vode.

Većina autora prve grupe tvrde da sa porastom međupovršinskog napona efikasnost koalescencije organskih kapi raste približavajući se nekoj vrednosti posle

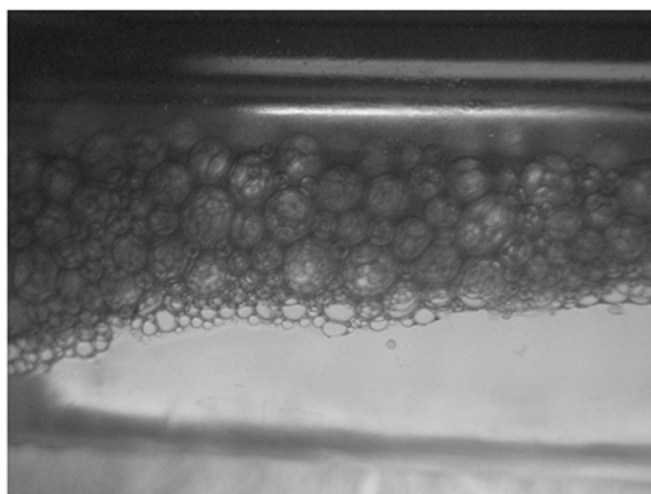
koje dalja promena međupovršinskog napona nema uticaja na efikasnost koalescencije (Vinson 1965, Clayfield i saradnici 1985a, Sharifi i Shaw 1996).

Jeffreys i Davies (1971) za međupovršinski napon tvrde da dvojako utiče na efikasnost koalescencije. Kapi, povećanjem međupovršinskog napona, postaju manje podložne deformaciji. Tako se smanjuje površina kontakta i ubrzava drenaža filma. Porastom međupovršinskog napona istovremeno može da dođe do usporavanja drenaže filma, što ima kontra efekat na koalescenciju.

Govedarica i saradnici (2012, 2013) utvrđuju kako eksperimentalnim putem, primenom konturnih dijagrama, tako i primenom PCA (eng. *Principal component analysis*) statističke metode da kritična brzina ili ne zavisi ili opada sa porastom međupovršinskog napona, što je uslovljeno oblašću permeabilnosti sloja i prirodom polimernih vlakana.

Kasnijim istraživanjima Šećerov-Sokolović i saradnici uvode u analizu i druge veličine kojim se utvrđuje polarnost ulja kao što su neutralizacioni broj, emulzivnost, dielektrična konstanta i sadržaj asfaltena (2010, 2013, 2014).

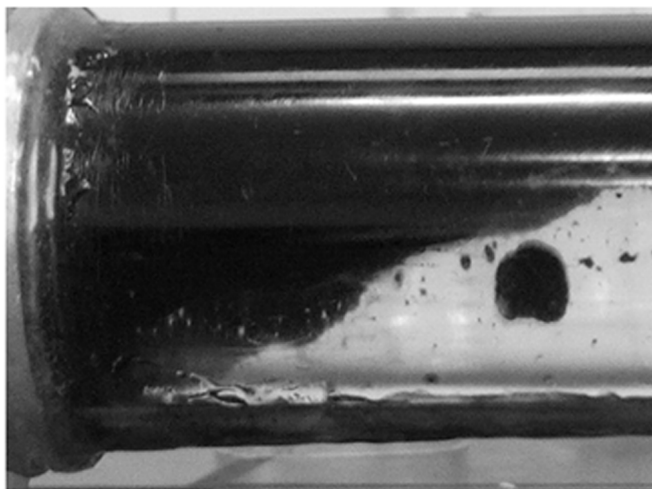
Govedarica i saradnici (2015) ispitivali su separaciju kapi tri mineralna ulja različite prirode uz pomoć sloja vlakana polipropilena. Ulje P1 imalo je najnižu polarnost (neutralizacioni broj 0,13 mgKOH/l, dielektrična konstanta 0,0645), dok su ulja A i A4 bliske međusobno polarnosti (neutralizacioni broj 1,42 i 1,71 mgKOH/l redom, dielektrična konstanta 0,1612 i 0,1905 redom). Separacija ulja P1 je najlošija u čitavom opsegu permeabilnosti sloja i realizuju se najmanje radne brzine. Analizom fotografija moglo se doći do nekih objašnjenja fenomena koji su uočeni. Boja, izgled, oblik i količina ulja posle sloja različita je za ova tri ulja. Nakon izlaska kapi ulja iz sloja, za ulje P1 uočeno je da dolazi do pojave inverzije faza, sloj napuštaju kapi vode obavijene opnom ulja, deluje kao da dolazi do formiranja dvojne emulzije, slika 49. Formiranje dvojne emulzije nije uočeno kod ostala dva ulja. Ovaj fenomen liči na onaj koji je nacrtao Spielman, dato slikom 6.



Slika 49. Mineralno ulje P1 nakon separacije prolaskom kroz sloj polipropilena

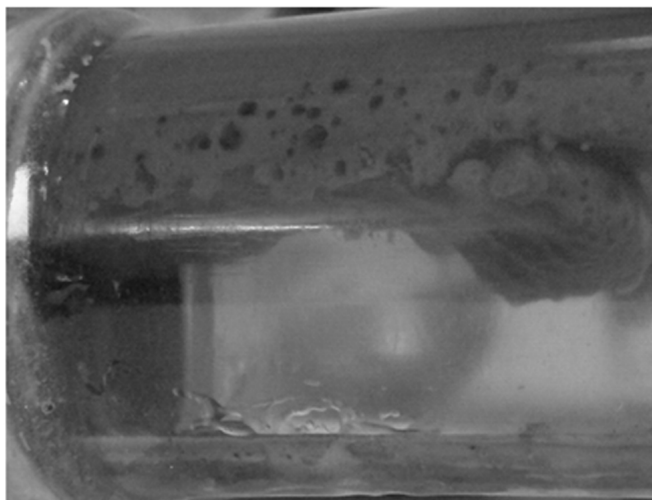
Deluje kao da je koalescencija kapi ulja posle sloja otežana i usporena. To može biti razlog loše separacije kapi ulja P1 vlaknima polipropilena.

Za ulje A se na izlazu iz sloja formirao sloj ulja debljine nekoliko milimetara koji je popunjavao poprečni presek uređaja, slika 50. Deluje kao da se deo kapilarno-provodne uljne faze izmestio iz sloja. Iz ove zapremine ulja su se otkidale krupne kapi koje su formirale kontinualnu uljnu fazu u zoni taloženja. Ovakav mehanizam koalescencije primetili su i drugi autori (Šećerov-Sokolović i saradnici 2010). Kako vlakna polipropilena najuspešnije separišu ulje A u najširem opsegu permeabilnosti sloja, može se pretpostaviti da je ovakav mehanizam koalescencije pogodan i da je to uzrok ovih dobrih rezultata.



Slika 50. Mineralno ulje A nakon separacije prolaskom kroz sloj polipropilena

Situacija kod ulja A4 ne liči ni na jednu do sada opisanu. Ulje A4 po izlasku iz sloja je promenilo svoju boju i deluje kao da je emulgovalo, kao da i dalje zadržava određenu količinu vode, što se može uočiti u rupama prisutnim u njegovoj zapremini, slika 51.



Slika 51. Mineralno ulje A4 nakon separacije prolaskom kroz sloj polipropilena

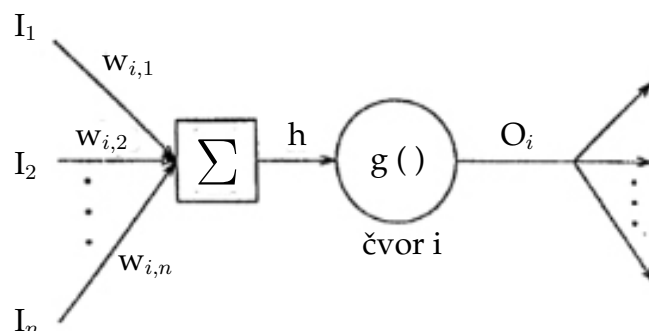
## 2.5 Primena veštačkih neuronskih mreža na koalescentnu filtraciju

U tradicionalnom pristupu rešavanju problema u hemijskom inženjerstvu često se kao problem javlja modelovanje kompleksnih i nelinearnih sistema, koji zbog prirode problema imaju svoja ograničenja (Abdel-Ghani i Davies 1985; Chen i saradnici 2001; Skouras i saradnici 2007; Chan i saradnici 2012; Hoang i saradnici 2013). U literaturi su prisutni neki modeli vlakana poroznog sloja (Dong i Dullien 1997; Burganos i saradnici 2001; Dong i saradnici 2005, 2006; Wang i saradnici 2008; Skouras i saradnici 2011; Tørå i saradnici 2012). Veštačke neuronske mreže mogu poslužiti za rešavanje kompleksnih zadataka formirajući modele u cilju praktične primene, potrebne u oblasti hemijskog inženjerstva. Potrebno je istaći da u literaturi koja se bavi temom koalescentne filtracije nisu nađeni radovi na temu primene veštačkih neuronskih mreža radi opisivanja ovog tipa separacije.

Prednosti primene veštačkih neuronskih mreža u odnosu na empirijske modele jeste što neuronska mreža može biti izrazito nelinearna, struktura joj može biti kompleksna, ne mora biti unapred određen problem da bi se našlo rešenje, kao i činjenica da predstavljaju fleksibilan model u smislu jednostavne modifikacije (Himmelblau 2000).

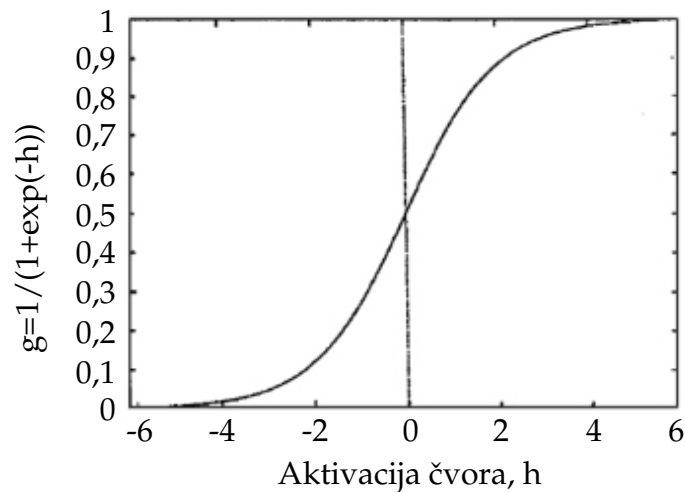
Termin veštačka neuronska mreža potiče iz ranih radova i dat je na osnovu ponašanja neurona koji se nalaze u ljudskom mozgu. Inženjerski sistemi razmatraju manje kompleksne probleme u odnosu na mozak. Veštačka neuronska mreža se može posmatrati kao nelinearni empirijski model posebno koristan u prikazivanju ulaznih-izlaznih podataka, predviđanju događaja u vremenu, klasifikaciji podataka, prepoznavanju obrazaca (Baughman i Liu 1995; Himmelblau 2000), kontroli procesa, projektovanju procesa, kao i projektovanju uređaja (Hoskins i Himmelblau 1988; Sato i saradnici 1999).

Na slici 52 prikazana je osnovna struktura jedne jedinice u veštačkoj neuronskoj mreži koja predstavlja neuron i ona je analogna neuronskoj ćeliji u ljudskom mozgu. Strukturna jedinica (neuron) može primiti jedan ili više ulaznih signala,  $I_j$ , koji mogu poteći od drugih neurona u mreži ili od nekih spoljnih izvora. Svaki



Slika 52. Struktura jedne jedinice (neurona) u veštačkoj neuronskoj mreži

ulaz i veza u veštačkoj neuronskoj mreži ima svoju jačinu,  $w_{ij}$ , koja opisuje vezu između neurona, kao što u ljudskom mozgu sinapsa predstavlja međuneuronsku vezu. Jačine signala ulaza se sumiraju pre nego što dospeju u neuron i to se zove aktivacija,  $h$ . Nakon toga se tako sumiran signal šalje u neuron koji zapravo predstavlja transfernu funkciju,  $g$ , koja se matematički može opisati bilo kojim oblikom funkcije. Najčešće se uzima jednostavna granična diferencijabilna funkcija poput sigmoidne, slika 53. Ako se funkcija  $g$  primeni na sve ulazne signale, naziva se globalnom transfernom funkcijom. Sa druge strane, ako se primenjuje kao radijalna bazna funkcija tada se radi o lokalnoj funkciji. Kao rezultat izlaza iz neurona,  $O_f$ , signali mogu da se šalju kao ulazni u druge neurone ili predstavljaju izlazne podatke iz formiranog modela veštačke neuronske mreže (Himmelblau 2000).



Slika 53. Grafik sigmoidne transferne funkcije

Neuroni koji se nalaze u ulaznom sloju primaju signale iz spoljašnjeg izvora. Druga grupa neurona, u izlaznom sloju, vraća signale u spoljašnje okruženje. Preostali neuroni u mreži se zovu skriveni neuroni, pošto ne primaju i/ili ne šalju signale u spoljašnji izvor. Skriveni neuroni mogu biti grupisani u jedan ili više slojeva. Ukoliko je svaki od neurona iz jednog sloja povezan sa svakim neuronom iz drugog sloja, tada se radi o potpuno povezanoj mreži.

Sledeći korak u formiranju veštačke neuronske mreže jeste identifikacija modela. Uopšteno, ne postoji direktan analitički metod za proračun vrednosti jačine signala da bi se opisalo ponašanje analiziranog procesa. Umesto toga, neophodno je trenirati mrežu određenim setom podataka prikupljenih iz procesa koji se želi modelovati. Treniranje mreže predstavlja proceduru procenjivanja vrednosti jačine veze, kao i određivanje strukture mreže. Algoritam koji se upotrebljava kako bi se to postiglo se naziva algoritam učenja (Badrnezhad i Mirza 2014). Algoritam učenja predstavlja tip algoritma optimizacije (Himmelblau 2000). Potrebno je obezbediti velik broj podataka za treniranje mreže, mada to zavisi i od tipa problema koji se posmatra. U procesu treniranja mreže dolazi do korigo-

vanja jačine veze između neurona u mreži i do pronalaženja jedinstvenog seta značajnosti veza neurona da bi se odredio izlaz iz mreže koji daje najbliže vrednosti stvarnim eksperimentalnim podacima. Ukoliko ne dolazi do promene vrednosti jačine veze, smatra se da je treniranje mreže za rešavanje problema završeno (Jokić 2010).

Treniranje mreže može da se izvrši na nekoliko načina: treniranje pod kontrolom, treniranje ocenjivanjem i samo-organizacija. U ovom radu će biti razmatrano samo treniranje pod kontrolom i to algoritam povratnog prostiranja. Ovaj tip treniranja se zasniva na slučajnom odabiru ulaznih i izlaznih podataka. Proces obuke se vrši tako što se na svaki ulazni neuron dovodi po jedan signal, koji se dalje prenosi kroz mrežu u skriveni sloj i na kraju se pojavljuje kao rezultat u izlaznim neuronima nakon nekog vremena. Kada se dobije podatak na izlazu vrši se upoređivanje dobijene vrednosti sa očekivanim vrednostima za zadatak test-primer i procenjuje se vrednost greške. Ukoliko je greška jednaka nuli, tada se proces prekida i obuka mreže je završena. Najčešće se dobijena vrednost tokom obuke i očekivana vrednost test-primera razlikuju tj. greška je različita od nule, tada se vrši modifikacija jačine veze i proces se ponavlja. Celokupan proces algoritma povratnog prostiranja je u cilju pronalaženja globalnog minimuma funkcije (Goh 1995; Jokić 2010).

U poglavlju 4.5 detaljnije se nastavlja teorijski deo tematike, radi lakšeg praćenja analize rezultata, koji opisuje upotrebljene algoritme u procesu treniranja mreže, način pripreme eksperimentalnih podataka za simulaciju, odabir promenljivih za testiranje, arhitekturu veštačke neuronske mreže i upotrebu modela za određivanje relativnog uticaja ulaznih promenljivih na izlaznu.

---

### 3. EKSPERIMENTALNI DEO

### 3.1 Eksperimentalni program

Eksperimentalni program je realizovan na emulziji tipa ulje u vodi. Ispitivanja su izvršena primenom dva filtarska materijala i tri različite dispergovane faze. Kao filtarski materijal korišćena su vlakna polipropilena prečnika  $45 \mu\text{m}$  i nerđajuća čelična vlakna prečnika  $40 \mu\text{m}$ , pri čemu je veličina pora značajno veća od prečnika kapi dispergovane faze. Orijentacija toka fluida u svim ogledima bila je horizontalna. Svaki pojedinačni ogled je ostvaren pri konstantnoj ulaznoj koncentraciji dispergovane faze od  $500 \text{ mg/l}$ , konstantnoj temperaturi od  $20^\circ\text{C}$  i konstantnoj debljini sloja (L) od  $5 \text{ cm}$ . Ogledi su realizovani pri konstantnoj brzini i ponavljani pri brzinama u intervalu od  $10$  do  $70 \text{ m/h}$ . Geometrija sloja je varirana, jer su ogledi rađeni pri permeabilnostima:  $K_{01} = 5,389 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ ,  $K_{02} = 2,426 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ ,  $K_{03} = 1,128 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ ,  $K_{04} = 0,380 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ ,  $K_{05} = 0,180 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  za sloj polipropilena. Za sloj sa nerđajućim čeličnim vlaknima, prve tri vrednosti permeabilnosti su jednake kao i za polipropilen  $K_{01}$ ,  $K_{02}$  i  $K_{03}$ , dok četvrta permeabilnost iznosi  $K_{n1} = 0,720 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ .

Kao kontinualna faza korišćena je sanitarna voda, a kao dispergovana faza tri ulja od čega je jedno vojvođanska sirova nafta, A, jedna njena frakcija koja se dobija vakuum destilacijom, A4, i jedan blendirani poluproizvod visokog sadržaja parafina bez aditiva, P1. Prosečna veličina kapi dispergovane uljne faze od  $10 \mu\text{m}$  dobijena je mešanjem propelerskom mešalicom u rezervoarima zapremine  $80 \text{ l}$ , brzinom od  $650 \text{ o/min}$ . Prethodnim kvašenjem sloja dispergovanom fazom smanjeno je vreme postizanja stacionarnog stanja sistema. Sloj je izlagan dvofaznom toku konstantne brzine, u trajanju od  $45$  minuta, pre nego što je uzet kompozitni uzorak na izlazu iz koalescera. Uzorkovanje je vršeno na izlazu iz uređaja kao petnaestominutni kompozit od po  $250 \text{ ml}$  na svakih  $5$  minuta. Brzina fluida povećana je posle  $1 \text{ h}$ . Koncentracija ulja u vodi na izlazu praćena je iz ugljente-trahloridnog ekstrakta na FTIR spektrofotometru ThermoNicolet 5700 u opsegu talasnih brojeva od  $3100$  do  $2700 \text{ cm}^{-1}$ .

Kinetika upijanja tečnosti određivana je praćenjem promene mase testirane tečnosti u vremenu koju upija sloj vlakana materijala. Vreme trajanja kontakta između sloja i testirane tečnosti je bio  $15$  minuta. Za određivanje kinetike upijanja tečnosti korišćena je mikrobilans vaga Ohaus Percision Balance Pioneer PA4102CM koja ima interval merenja  $0,1 \text{ s}$  i povezana je *on-line* sa računarnom.



## 3.2 Metode rada i eksperimentalne tehnike

Eksperimenti su realizovani pri uslovima definisanim u eksperimentalnom programu i obrađeni su preko različitih veličina. Određivane veličine se mogu podeliti na osobine sloja, osobine filtarskog materijala, osobine ulja, osobine emulzije i radne promenljive. Način izračunavanja pojedinih veličina, uslovi rada i aparatura prikazani su dalje u tekstu.

### 3.2.1 Osobine sloja

Osobine sloja koje su određivane su se odnosile na poroznost, udeo čvrste faze i permeabilnost.

*Poroznost*,  $\varepsilon$ , je računata za svaku pojedinačnu nasipnu gustinu sloja, a na osnovu vrednosti gustine materijala jednačinom:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_n}{\rho} \quad (8)$$

gde su:

$\rho_n$  - nasipna gustina sloja ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\rho$  - gustina materijala ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

*Udeo čvrste faze*,  $\phi$ , može se izračunati ako je poznata vrednost poroznosti:

$$\phi = 1 - \varepsilon \quad (9)$$

*Permeabilnost*,  $K_0$ , je eksperimentalno određivana Darcy ogledom tj. metodom koja je opisana u magistarskom radu T. Vulić (Vulić 2000).

### 3.2.2 Osobine filtarskog materijala

Osobine filtarskog materijala koje su određivane su: gustina, tačka topljenja i kritični površinski napon.

*Gustina* korišćenih filtarskih materijala je određena piknometrijskom metodom.

*Tačka topljenja* je određena DSC metodom (eng. *Differential Scanning Calorimetry*) na uređaju TA Instruments, Model Q20 za polipropilen, dok je za čelik dobijena od proizvođača vlakana Hebei Metal Fibre Science Co., Ltd.

*Kritični površinski napon* je usvojen na osnovu podataka dostupnih iz literature pomoću Zisman metode (Govedarica i Sokolović 2014).

### 3.2.3 Osobine ulja

Za analizu fizičko-hemijskih osobina dispergovane faze korišćene su brojne metode i tehnike rada kako bi se odredila gustina, viskoznost, molska masa,

međupovršinski napon, površinski napon, tačka tečenja, neutralizacioni broj i dielektrična konstanta.

*Gustina ulja* korišćenih u eksperimentima određivana je metodom kapilarne oscilometrije na Anton Paar-ovom digitalnom gustinomeru tipa DMA 46. Gustina je određivana na 15 i 20°C.

*Viskoznost* korišćenih ulja određena je standardnom Kanon-Fenske metodom, ASTM D445-64.

*Molska masa* ulja određivana je standardnom metodom ASTM D2502-67.

*Međupovršinski napon* određen je standardnom metodom ASTM D971:99 i ASTM D1331.

*Površinski napon* svih korišćenih tečnosti određen je stalagmometrijski, tj. metodom brojanja kapi.

*Tačka tečenja* je određivana pomoću standardne metode ASTM D97.

*Neutralizacioni broj* tj. sadržaj kiselina je određivan standardnom titracionom metodom ASTM D3242.

*Dielektrična konstanta* je eksperimentalno određena pomoću standardne metode JUS M. A5014 i uređaja Baur DPA 75.

*Emulzivnost* je eksperimentalno određena po metodi S. Šević (Šević 2000). U staklenu čašu od 500 ml sipano je 140 ml suve nafte ili naftnog derivata (bez vode) i 60 ml destilovane vode, zatim je mešano u toku 10 minuta na 500 o/min. Ovako pripremljena emulzija sipana je u kivete i centrifugirana pri 2000 o/min tokom 20 minuta. Zatim je očitavana zapremina izdvojene vode. Emulzivnost je računata na osnovu jednačine 10:

$$E_n = \frac{V_{IV} \cdot 100}{V_{UV}} \quad (10)$$

gde su:

$E_n$  - emulzivnost nafte (%)

$V_{IV}$  - razlika zapremina ukupne i izdvojene vode (ml)

$V_{UV}$  - zapremina ukupne vode (ml)

### 3.2.4 Osobine emulzije

Od osobina emulzije koje je moguće određivati, određivana je najznačajnija, srednji prečnik kapi dispergovane faze.

*Srednji prečnik kapi dispergovane faze*,  $d_{sr}$ , određen je korišćenjem jednačine Sauter:

$$d_{sr} = 0.053 \cdot D \cdot W_e^{-0.6} \quad (11)$$

gde su:

$D$  - prečnik impelera mešalice (m)

$W_e$  - Weber broj (-)

Weber broj se računa pomoću jednačine :

$$We = \frac{\rho_C \cdot n^2 \cdot D^3}{\sigma} \quad (12)$$

gde su:

$\rho_C$  - gustina kontinualne faze ( $\rho_C = 1000 \text{ kg/m}^3$ )

$n$  - brzina obrtaja mešalice ( $n = 650 \text{ o/min}$ )

$\sigma$  - međupovršinski napon (eksperimentalno određene vrednosti se nalaze u tabeli 11 sa karakteristikama ulja)

Primenom jednačina 11 i 12 dobijene su vrednosti srednjeg prečnika kapi dispergovane faze za sva tri ulja. Pored računskih vrednosti srednji prečnik kapi dispergovane faze je određen i pomoću dve eksperimentalne tehnike na uređajima: brojač čestica Elzone 280 PC i mikroskopu Olympus BH.2 RFCA.

### 3.2.5 Radne promenljive

Kada je reč o karakteristikama sistema, tu se mogu ubrojati: izlazna koncentracija dispergovane faze, kritična brzina i efikasnost separacije.

#### Izlazna koncentracija

Izlazna koncentracija dispergovane faze, koja je bila ulje,  $C_i$ , određivana je IR spektrofotometrijski na uređaju ThermoNicolet 5700. Za pripremu uzoraka korišćena je ekstrakcija uljne faze iz uzorka zauljene vode ugljentetrahloridom. Uzorci su čuvani u staklenim bocama i konzervisani hlorovodoničnom kiselinom do pH = 2.

#### Kritična brzina

Kritična brzina je određivana iz dijagrama zavisnosti izlazne koncentracije od brzine. Ova zavisnost je dobijena eksperimentalnim putem i predstavlja eksponencijalnu krivu. Ranijim radovima (Vulić 2000) usvojeno je da se za kritičnu brzinu smatra ona brzina pri kojoj je izlazna koncentracija postigla vrednost od 15 mg/l.

#### Efikasnost separacije

Efikasnost separacije,  $E$ , je određena, primenom jednačine 13.

$$E = \frac{C_u - C_i}{C_u} \cdot 100 \quad (13)$$

gde su:

$E$  - efikasnost separacije (%)

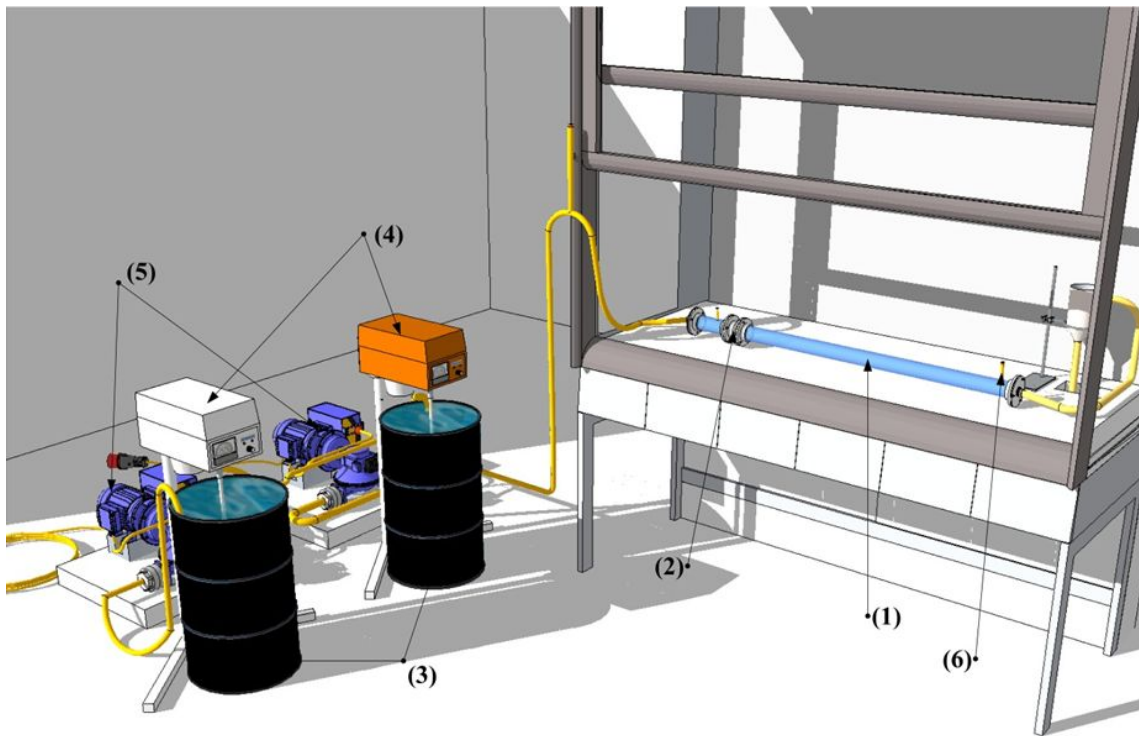
$C_u$  - ulazna koncentracija ulja (mg/l)

$C_i$  - izlazna koncentracija ulja (mg/l)

### 3.3 Eksperimentalni uređaj i uslovi rada

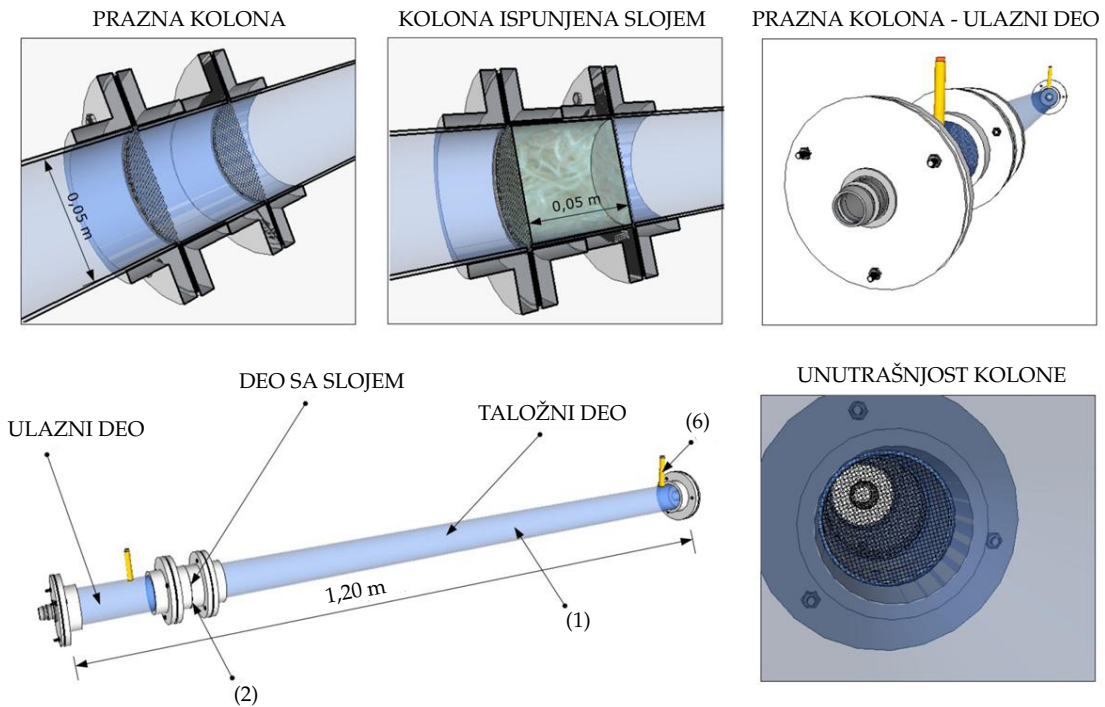
#### Koalescentna filtracija

Aparatura koja je korišćena za realizaciju eksperimenata koalescentne filtracije prikazana je na slikama 54 i 55. Eksperimentalni uređaj se sastoji od plek-siglas cevi prečnika 5 cm (1), ukupne dužine 1,2 m. Debljina sloja nerđajućeg čelika ili polipropilena (2), bila je 5 cm. Zauljena voda, temperature 20°C, pripremana je u dva rezervoara od 80 litara (3). Ulje je dispergovano u vodi kontinualnim mešanjem propellerskim mešalicama u rezervoaru brzinom od 650 o/min (4), u trajanju od 45 min pre početka oglada i kontinualno tokom oglada, tako da održavana prosečna veličina kapi bude 10  $\mu\text{m}$ . Transport fluida kroz uređaj obezbeđen je membranskom dozir pumpom (5). Posle prolaska kroz sloj, uvećane kapi ulja se talože, ulje se prikuplja u gornjem delu cevi i ispušta diskontinualno pomoću ventila (6).



Slika 54. 3D prikaz eksperimentalne aparature za koalescentnu filtraciju

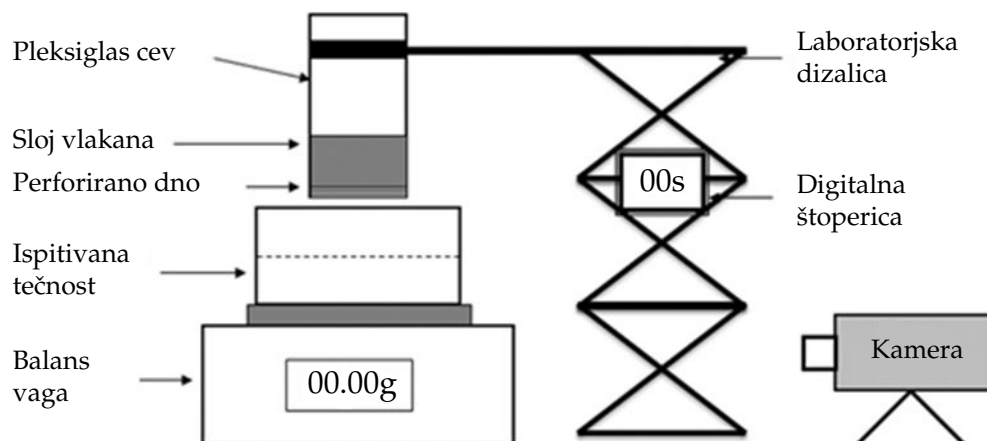
Ogled pri konstantnoj permeabilnosti kroz određeni filtarski materijal je realizovan pri više brzina, tako što je jedna brzina držana konstantnom tokom jednog časa.



Slika 55. 3D prikaz koalescera

### Određivanje kinetike upijanja tečnosti

U eksperimentima za određivanje kinetike upijanja tečnosti praćena je promena mase testirane tečnosti ( $w$ ) u vremenu koju upija sloj vlakana materijala. Kako bi se odredila kinetika upijanja ispitivanih tečnosti odabranim materijalima dobijeni podaci su prikazani kao zavisnost promene mase na kvadrat ( $w^2$ ) u funkciji vremena ( $t$ ). Merenja za svaku testiranu tečnost su ponovljena najmanje tri puta. U svim eksperimentima permeabilnost sloja je bila konstantna i iznosila  $1,128 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ , a poroznost 93%. Šematski prikaz eksperimentalne aparature je prikazan na slici 56. Cev od pleksiglasa u koju je prethodno postavljen sloj



Slika 56. Aparatura za ispitivanje kinetike upijanja tečnosti

materijala je fiksirana za laboratorijsku dizalicu. Pleksiglas cev sa materijalom je postavljena iznad testirane tečnosti, koja se nalazi u laboratorijskoj čaši i postavljena je na mikrobilans vagu (Ohaus Precision Balance Pioneer PA4102CM). Digitalna štoperica je fiksirana na laboratorijsku dizalicu, a video kamera je postavljena na takvo mesto kako bi se snimile brojčane vrednosti koje se pojavljuju na digitalnom displeju vage i na štoperici. Vreme trajanja eksperimenta držano je konstantnim i iznosilo je 15 minuta.

### 3.4 Prikaz rezultata

U datom poglavlju su tabelarno prikazane numeričke vrednosti osobina sloja, osobina filtarskog materijala, osobine dispergovane faze i osobine emulzije.

#### 3.4.1 Osobine sloja

Osobine testiranih slojeva poput permeabilnosti, poroznosti i debljine vlakana koje čine sloj date su u tabeli 9.

Tabela 9. Osobine sloja

| Osobina sloja  | Polipropilen | Nerđajući čelik |
|--|--------------|-----------------|
| Permeabilnost,<br>$K_0$ ( $10^{-9}$ m <sup>2</sup> ) | 5,389        | 5,389           |
|  | 2,426        | 2,426           |
|  | 1,128        | 1,128           |
|  | 0,380        | 0,720           |
|  | 0,180        |                 |
| Poroznost, $\varepsilon$                             | 0,85–0,98    | 0,91–0,98       |
| Debljina vlakna, $d_v$ ( $\mu\text{m}$ )             | 45           | 40              |

#### 3.4.2 Osobine filtarskog materijala

Gustina, tačka topljenja i kritični površinski napon kao osobine filtarskih materijala prikazane su u tabeli 10.

Tabela 10. Osobine filtarskog materijala

| Materijal            | Gustina<br>kg/m <sup>3</sup> | Tačka topljenja,<br>°C | Kritični površinski<br>napon, mN/m |
|----------------------|------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Nerđajući čelik (SS) | 7597                         | 1510                   | 108                                |
| Polipropilen (PP)    | 900                          | 168,6                  | 30,5                               |

### 3.4.3 Osobine dispergovane faze

Osobine dispergovane faze: gustina, viskoznost, neutralizacioni broj, tačka tečenja, međupovršinski i površinski napon, dielektrična konstanta i molska masa su date u tabeli 11.

Tabela 11. Osobine dispergovane faze

| Osobina/Uzorak                                | A      | A4      | P1     | interval  |
|---|--------|---------|--------|-----------|
| Gustina 15°C, $\rho_{15}$ , kg/m <sup>3</sup> | 916,7  | 923,3   | 883,3  | 880-925   |
| Gustina 20°C, $\rho_{20}$ , kg/m <sup>3</sup> | 915,5  | 918,9   | 879,0  | 880-920   |
| Viskoznost na 40°C, $\mu$ , mPa·s             | 43,350 | 168,904 | 10,316 | 10-170    |
| Neutralizacioni broj, $N_b$ , mg KOH/l        | 1,42   | 1,71    | 0,13   | 0,10-1,70 |
| Tačka tečenja, $T_t$ , 0°C                    | -42    | -3      | +3     | -42±3     |
| Međupovršinski napon, $\sigma$ , mN/m         | 18,8   | 30,5    | 32,4   | 18-34     |
| Površinski napon, $\gamma$ , mN/m             | 26,56  | 27,72   | 30,16  | 26-31     |
| Emulzivnost, $E_m$ , %vol                     | 99,92  | 70,00   | 54,17  | 54-100    |
| Dielektrična konstanta, $\epsilon_r$ , -      | 0,1612 | 0,1905  | 0,0645 | 0,06-0,2  |
| Molska masa, $M$ , kg/kmol                    | 410    | 520     | 300    | 300-520   |

### 3.4.4 Osobina emulzije

Osobina emulzije koja je prikazana u ovom radu je srednji prečnik kapi dispergovane faze i date su vrednosti u tabeli 12.

Tabela 12. Osobine emulzije

| analiza/uzorak   | A   | A4  | P1   |
|--|-----|-----|------|
| Srednji prečnik kapi dispergovane faze, $d_{sr}$ , $\mu\text{m}$ | 7,1 | 9,4 | 11,8 |

### 3.4.5 Eksperimentalni podaci dobijeni koalescentnom filtracijom

U ovom poglavlju su tabelarno prikazane numeričke vrednosti rezultata dobijenih eksperimentima. Prikaz rezultata je grupisan u tri celine. Prvi deo rezultata je prikazan u tabelama 13 – 15 i odnosi se na vrednosti koncentracije ulja u vodi nakon separacije kada se za sloj upotrebljavao nerđajući čelik (SS) kao materijal pri različitim brzinama i permeabilnostima. U tabelama 16 – 18 prikazani su podaci koncentracija ulja za sloj polipropilena (PP) pri različitim brzinama i permeabilnostima. Druga grupa tabela, 19 – 24, odnosi se na efikasnost separacije za oba ispitivana materijala pri svim radnim brzinama i permeabilnostima za sva tri ispitivana ulja. Treća grupa podataka, tabele 25 i 26, prikazuje vrednosti kritičnih brzina za sve permeabilnosti sloja i sva ispitivana ulja.



Tabela 13. Eksperimentalni rezultati izlazne koncentracije  $C_i$  (mg/l) za sloj SS i ulje A

| $C_i$ (mg/l)                        |          |          |          |          |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| SS, A, $C_u = 500$ mg/l, $L = 5$ cm |          |          |          |          |
| Brzina, $v$ (m/h)                   | $K_{01}$ | $K_{02}$ | $K_{03}$ | $K_{n1}$ |
| 10                                  | 11,00    | 8,35     | 2,76     | 2,54     |
| 19                                  | 41,62    | 11,84    | 10,14    | 8,54     |
| 30                                  | -        | 12,54    | 7,76     | 6,47     |
| 35                                  | -        | 22,51    | 11,02    | 7,17     |
| 40                                  | -        | -        | 17,95    | 15,49    |

Tabela 14. Eksperimentalni rezultati izlazne koncentracije  $C_i$  (mg/l) za sloj SS i ulje A4

| $C_i$ (mg/l)                         |          |          |          |          |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| SS, A4, $C_u = 500$ mg/l, $L = 5$ cm |          |          |          |          |
| Brzina, $v$ (m/h)                    | $K_{01}$ | $K_{02}$ | $K_{03}$ | $K_{n1}$ |
| 10                                   | 5,42     | 3,10     | 3,18     | 3,21     |
| 19                                   | 8,88     | 4,53     | 5,97     | 6,43     |
| 30                                   | 7,61     | 9,44     | 4,20     | 3,84     |
| 35                                   | 18,41    | 19,06    | 9,03     | 12,69    |
| 40                                   | -        | -        | 7,47     | 21,89    |
| 45                                   | -        | -        | 7,29     | -        |
| 50                                   | -        | -        | 17,04    | -        |

Tabela 15. Eksperimentalni rezultati izlazne koncentracije  $C_i$  (mg/l) za sloj SS i ulje P1

| $C_i$ (mg/l)                         |          |          |          |          |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| SS, P1, $C_u = 500$ mg/l, $L = 5$ cm |          |          |          |          |
| Brzina, $v$ (m/h)                    | $K_{01}$ | $K_{02}$ | $K_{03}$ | $K_{n1}$ |
| 10                                   | 6,56     | 7,68     | 9,10     | 2,58     |
| 19                                   | 32,55    | 15,10    | 19,81    | 8,31     |
| 30                                   | -        | -        | -        | 8,30     |
| 35                                   | -        | -        | -        | 20,31    |

Tabela 16. Eksperimentalni rezultati izlazne koncentracije  $C_i$  (mg/l) za sloj PP i ulje A

| $C_i$ (mg/l)                        |          |          |          |          |          |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| PP, A, $C_u = 500$ mg/l, $L = 5$ cm |          |          |          |          |          |
| Brzina, $v$ (m/h)                   | $K_{01}$ | $K_{02}$ | $K_{03}$ | $K_{04}$ | $K_{05}$ |
| 30                                  | 4,32     | 5,15     | 3,25     | 3,39     | 9,01     |
| 35                                  | 3,16     | 4,97     | 4,20     | 2,92     | 6,36     |
| 40                                  | 5,02     | 14,21    | 3,74     | 3,54     | 6,82     |
| 45                                  | 4,30     | 15,59    | 4,40     | 3,74     | 9,48     |
| 50                                  | 5,34     | -        | 5,49     | 8,77     | 9,56     |
| 60                                  | 34,10    | -        | 58,15    | 21,71    | 48,00    |

Tabela 17. Eksperimentalni rezultati izlazne koncentracije  $C_i$  (mg/l) za sloj PP i ulje A4

| $C_i$ (mg/l)                         |          |          |          |          |          |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| PP, A4, $C_u = 500$ mg/l, $L = 5$ cm |          |          |          |          |          |
| Brzina, $v$ (m/h)                    | $K_{01}$ | $K_{02}$ | $K_{03}$ | $K_{04}$ | $K_{05}$ |
| 30                                   | 4,57     | 3,44     | 4,20     | 6,92     | 4,63     |
| 35                                   | 5,78     | 10,04    | 8,66     | 3,79     | 11,65    |
| 40                                   | 6,07     | 4,72     | 4,45     | 4,80     | 30,42    |
| 45                                   | 8,20     | 4,93     | 4,52     | 7,47     | -        |
| 50                                   | 6,93     | 7,63     | 3,43     | 6,98     | -        |
| 60                                   | 14,53    | 58,17    | 37,18    | 43,15    | -        |
| 70                                   | 42,70    | -        | -        | -        | -        |

Tabela 18. Eksperimentalni rezultati izlazne koncentracije  $C_i$  (mg/l) za sloj PP i ulje P1

| $C_i$ (mg/l)                         |          |          |          |          |          |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| PP, P1, $C_u = 500$ mg/l, $L = 5$ cm |          |          |          |          |          |
| Brzina, $v$ (m/h)                    | $K_{01}$ | $K_{02}$ | $K_{03}$ | $K_{04}$ | $K_{05}$ |
| 19                                   | -        | 13,73    | 14,27    | -        | -        |
| 30                                   | 1,32     | 18,46    | 86,50    | 13,74    | 8,67     |
| 35                                   | 3,42     | 35,25    | -        | 6,81     | 20,53    |
| 40                                   | 1,92     | -        | -        | 6,85     | -        |
| 45                                   | 1,49     | -        | -        | 13,63    | -        |
| 50                                   | 1,90     | -        | -        | 67,04    | -        |
| 60                                   | 50,49    | -        | -        | -        | -        |

Tabela 19. Vrednosti efikasnosti separacije  $E_i$  (%) za sloj SS i ulje A

| $E_i$ (%)                           |          |          |          |          |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| SS, A, $C_u = 500$ mg/l, $L = 5$ cm |          |          |          |          |
| Brzina, $v$ (m/h)                   | $K_{01}$ | $K_{02}$ | $K_{03}$ | $K_{n1}$ |
| 10                                  | 97,80    | 98,33    | 99,45    | 99,49    |
| 19                                  | 91,68    | 97,63    | 97,97    | 98,29    |
| 30                                  | -        | 97,49    | 98,45    | 98,71    |
| 35                                  | -        | 95,50    | 97,80    | 98,57    |
| 40                                  | -        | -        | 96,41    | 96,90    |

Tabela 20. Vrednosti efikasnosti separacije  $E_i$  (%) za sloj SS i ulje A4

| $E_i$ (%)                            |          |          |          |          |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| SS, A4, $C_u = 500$ mg/l, $L = 5$ cm |          |          |          |          |
| Brzina, $v$ (m/h)                    | $K_{01}$ | $K_{02}$ | $K_{03}$ | $K_{n1}$ |
| 10                                   | 98,92    | 99,38    | 99,36    | 99,36    |
| 19                                   | 98,22    | 99,09    | 98,81    | 98,71    |
| 30                                   | 98,48    | 98,11    | 99,16    | 99,23    |
| 35                                   | 96,32    | 96,19    | 98,19    | 97,46    |
| 40                                   | -        | -        | 98,51    | 95,62    |
| 45                                   | -        | -        | 98,54    | -        |
| 50                                   | -        | -        | 96,59    | -        |

Tabela 21. Vrednosti efikasnosti separacije  $E_i$  (%) za sloj SS i ulje P1

| $E_i$ (%)                            |          |          |          |          |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| SS, P1, $C_u = 500$ mg/l, $L = 5$ cm |          |          |          |          |
| Brzina, $v$ (m/h)                    | $K_{01}$ | $K_{02}$ | $K_{03}$ | $K_{n1}$ |
| 10                                   | 98,69    | 98,46    | 98,18    | 99,48    |
| 19                                   | 93,49    | 96,98    | 96,04    | 98,34    |
| 30                                   | -        | -        | -        | 98,34    |
| 35                                   | -        | -        | -        | 95,94    |

Tabela 22. Vrednosti efikasnosti separacije  $E_i$  (%) za sloj PP i ulje A

| $E_i$ (%)                           |          |          |          |          |          |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| PP, A, $C_u = 500$ mg/l, $L = 5$ cm |          |          |          |          |          |
| Brzina, $v$ (m/h)                   | $K_{01}$ | $K_{02}$ | $K_{03}$ | $K_{04}$ | $K_{05}$ |
| 30                                  | 99,14    | 98,97    | 99,35    | 99,32    | 98,20    |
| 35                                  | 99,37    | 99,01    | 99,16    | 99,42    | 98,73    |
| 40                                  | 99,00    | 97,16    | 99,25    | 99,29    | 98,64    |
| 45                                  | 99,14    | 96,88    | 99,12    | 99,25    | 98,10    |
| 50                                  | 98,93    | -        | 98,90    | 98,25    | 98,09    |
| 60                                  | 93,18    | -        | 88,37    | 95,66    | 90,40    |

Tabela 23. Vrednosti efikasnosti separacije  $E_i$  (%) za sloj PP i ulje A4

| $E_i$ (%)                            |          |          |          |          |          |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| PP, A4, $C_u = 500$ mg/l, $L = 5$ cm |          |          |          |          |          |
| Brzina, $v$ (m/h)                    | $K_{01}$ | $K_{02}$ | $K_{03}$ | $K_{04}$ | $K_{05}$ |
| 30                                   | 99,09    | 99,31    | 99,16    | 98,62    | 99,07    |
| 35                                   | 98,84    | 97,99    | 98,27    | 99,24    | 97,67    |
| 40                                   | 98,79    | 99,06    | 99,11    | 99,04    | 93,92    |
| 45                                   | 98,36    | 99,01    | 99,10    | 98,51    | -        |
| 50                                   | 98,61    | 98,47    | 99,31    | 98,60    | -        |
| 60                                   | 97,09    | 88,37    | 92,56    | 91,37    | -        |
| 70                                   | 91,46    | -        | -        | -        | -        |

Tabela 24. Vrednosti efikasnosti separacije  $E_i$  (%) za sloj PP i ulje P1

| $E_i$ (%)                            |          |          |          |          |          |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| PP, P1, $C_u = 500$ mg/l, $L = 5$ cm |          |          |          |          |          |
| Brzina, $v$ (m/h)                    | $K_{01}$ | $K_{02}$ | $K_{03}$ | $K_{04}$ | $K_{05}$ |
| 19                                   | -        | 97,25    | 97,15    | -        | -        |
| 30                                   | 99,74    | 96,31    | 82,70    | 97,25    | 98,27    |
| 35                                   | 99,32    | 92,95    | -        | 98,64    | 95,89    |
| 40                                   | 99,62    | -        | -        | 98,63    | -        |
| 45                                   | 99,70    | -        | -        | 97,27    | -        |
| 50                                   | 99,62    | -        | -        | 86,59    | -        |
| 60                                   | 89,90    | -        | -        | -        | -        |

Tabela 25. Vrednosti kritičnih brzina za sloj SS, sva ulja i sve permeabilnosti

| $v_k$ (m/h) |                        |          |          |          |
|-------------|------------------------|----------|----------|----------|
| Ulje        | Permeabilnost sloja SS |          |          |          |
|             | $K_{01}$               | $K_{02}$ | $K_{03}$ | $K_{n1}$ |
| A           | 11,20                  | 31,25    | 37,90    | 39,69    |
| A4          | 33,44                  | 32,94    | 48,97    | 36,27    |
| P1          | 12,94                  | 18,9     | 14,98    | 32,84    |

Tabela 26. Vrednosti kritičnih brzina za sloj PP, sva ulja i sve permeabilnosti

| $v_k$ (m/h) |                        |          |          |          |          |
|-------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Ulje        | Permeabilnost sloja SS |          |          |          |          |
|             | $K_{01}$               | $K_{02}$ | $K_{03}$ | $K_{04}$ | $K_{05}$ |
| A           | 53,29                  | 42,77    | 51,80    | 54,68    | 51,43    |
| A4          | 59,94                  | 51,45    | 53,34    | 52,15    | 35,9     |
| P1          | 52,59                  | 21,85    | 19,18    | 45,17    | 32,87    |

---

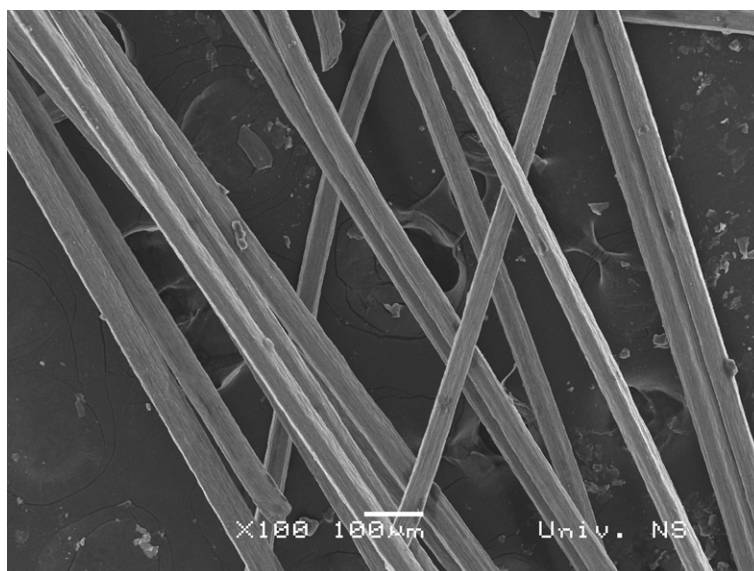
## 4. ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA

## 4.1 Morfologija površine vlakana ispitivanih materijala

U ovom radu analizirani su rezultati separacije mineralnih ulja sloja vlakana od nerđajućeg čelika, SS, prečnika vlakana 40  $\mu\text{m}$  kao i sloja vlakana od polipropilena, PP, ekvivalentnih osobina.

Morfologija površine korišćenih materijala ispitivana je skening elektronskom mikroskopijom, SEM. Na osnovu tih ispitivanja može se konstatovati da se u oba slučaja radi o vlaknima kružnog poprečnog preseka, veoma ujednačenog prečnika. Što se tiče njihove površine potrebno je istaći da se radi o izrazito glatkim površinama.

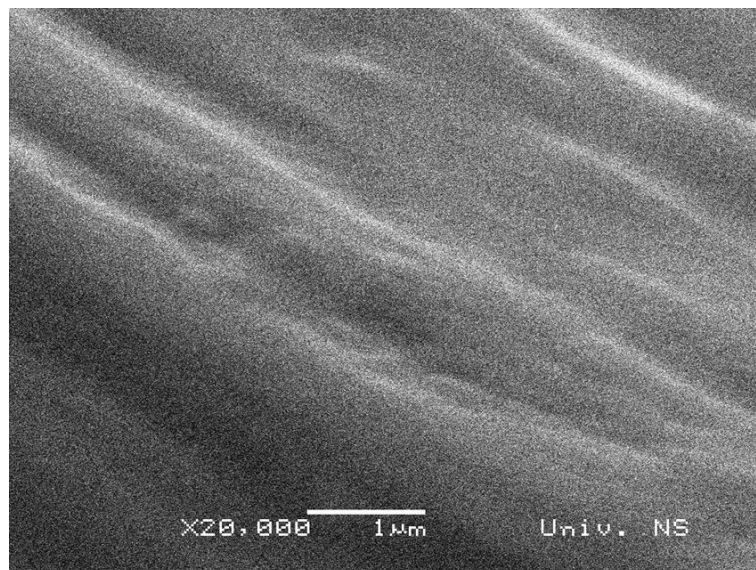
Na slici 57 dat je SEM snimak vlakana čelika pri uvećanju od 100 na kome se vidi izgled vlakana.



Slika 57. Snimak vlakana materijala SS (SEM $\times$ 100)

Kvalitet površine vlakana SS može se videti na slici 58. Pri visokom uvećanju od 20000 $\times$  jasno se može zaključiti da se radi o izrazito glatkim vlaknima.

Na slici 59 dat je SEM snimak vlakana polipropilena, PP, gde se vidi da su i ona izrazito glatka.



Slika 58. Snimak vlakana materijala SS (SEM×20000)

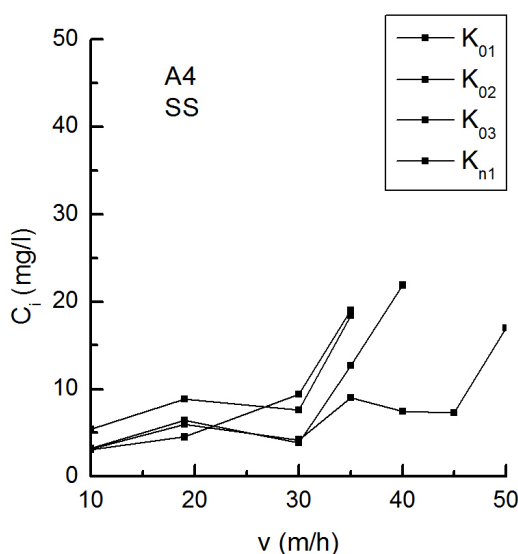


Slika 59. Snimak vlakana materijala PP (SEM×100)



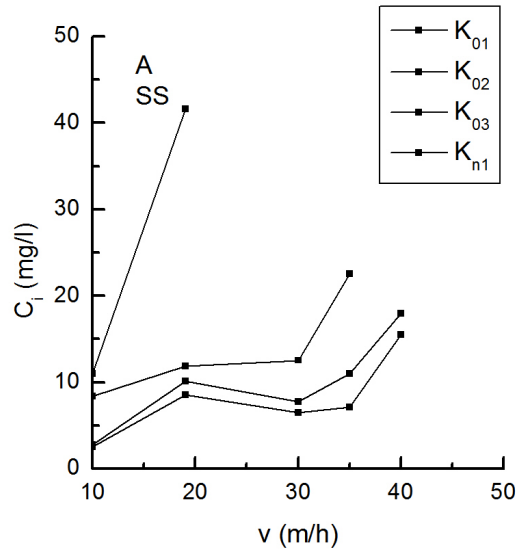
## 4.2 Separacija kapi ulja primenom vlakana od nerđajućeg čelika

Analiza rezultata separacije kapi ulja vlaknima od nerđajućeg čelika rađena je na osnovu tri zavisno promenljive veličine: izlazne koncentracije ulja, efikasnosti separacije i kritične brzine. Kako je već ukazano, eksperimenti su realizovani u širokom rasponu brzina fluida, tako da zavisnosti izlazne koncentracije ulja od brzina fluida ima eksponencijalan oblik, slike 60, 61 i 62. Na osnovu ovih dijagrama određivane su vrednosti kritičnih brzina za koje je izlazna koncentracija ulja jednaka 15 mg/l.

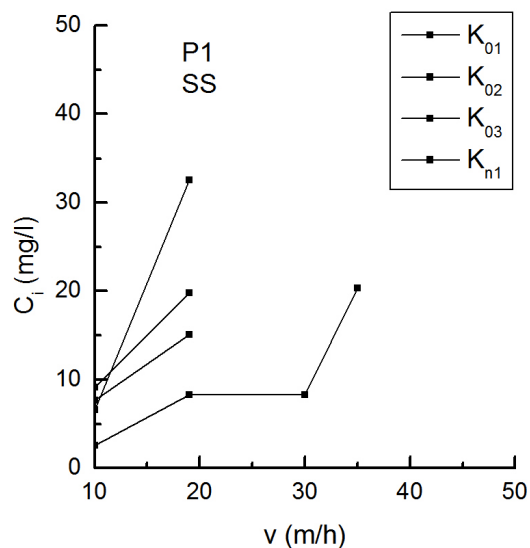


Slika 60. Prikaz zavisnosti izlazne koncentracije ulja A4 od brzine za sve permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika

Slika 60 prikazuje zavisnost izlazne koncentracije ulja od brzine fluida, za sve ispitivane permeabilnosti sloja, za ulje A4, dok se slika 61 odnosi na ulje A, a slika 62 na ulje P1. Jasno je uočljivo da je oblik zavisnosti kod sva tri ulja ekvivalentan, ali se drastično razlikuje predeo u kome dolazi do eksponencijalnog rasta izlazne koncentracije dispergovane faze kod ispitivanih ulja. Najveće brzine se realizuju za ulje A4.



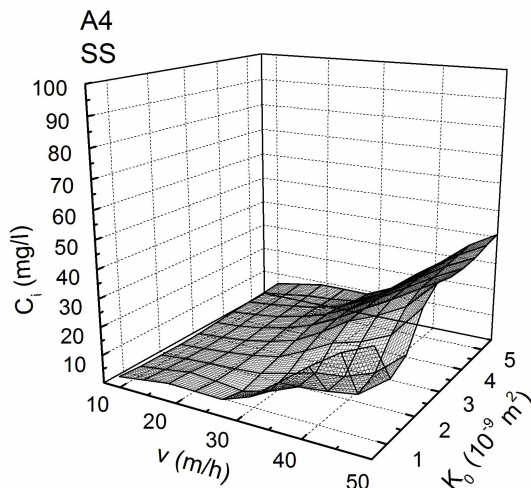
Slika 61. Prikaz zavisnosti izlazne koncentracije ulja A od brzine za sve permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika



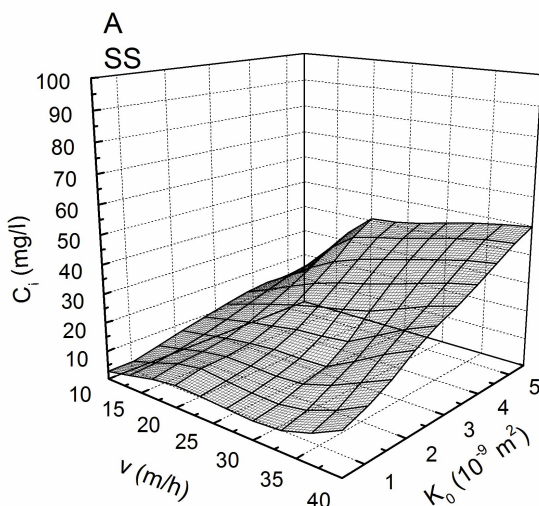
Slika 62. Prikaz zavisnosti izlazne koncentracije ulja P1 od brzine za sve permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika

Uočeni trend i zavisnost izlazne koncentracije ulja od brzine fluida i permeabilnosti sloja su upečatljiviji i jasniji na 3D dijagramima. Zavisnost izlazne koncentracije ulja od brzine fluida i permeabilnosti sloja u obliku 3D dijagrama za svako ispitivano ulje prikazano je na slikama 63, 64 i 65.

Na slici 63 vidi se da postoji širok raspon radne površine koju ograničava brzina fluida pri čemu je izlazna koncentracija značajno niža od 15 mg/l, dok je ta površina na slikama 64 i 65 mnogo manja. Kod ulja A4 permeabilnost sloja ne



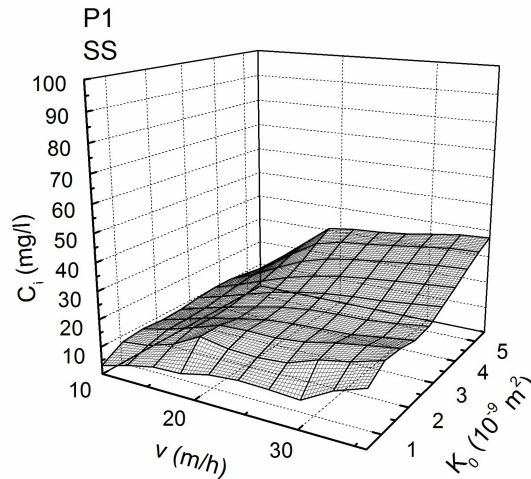
Slika 63. 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A4 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika



Slika 64. 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika

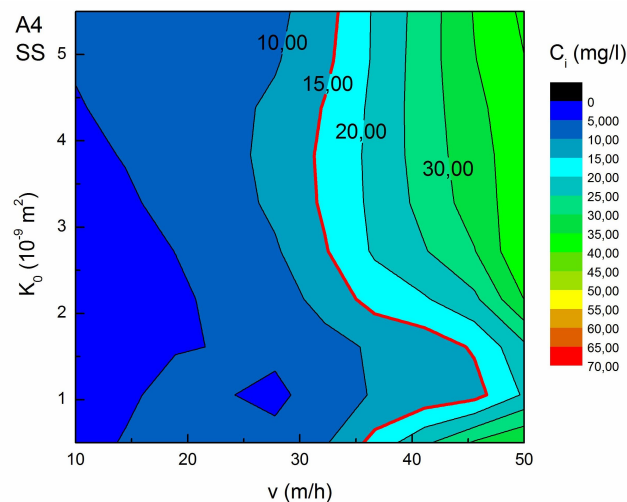
utiče na izlaznu koncentraciju pri nižim brzinama, što nije slučaj kod ulja A i P1. Kod ulja A i P1 porastom permeabilnosti i pri najvišim brzinama raste izlazna koncentracija.

Pozicija zacrtane granice izlazne koncentracije ulja od 15 mg/l jasno se može videti na konturnim dijagramima, slike 66, 67 i 68. Konturni dijagrami kao konture sadrže krive jednakih vrednosti nezavisno promenljive veličine. U ovim okolnostima to je izlazna koncentracija ulja, te se te konture mogu zvati izlazne koncentracije.



Slika 65. 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja P1 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika

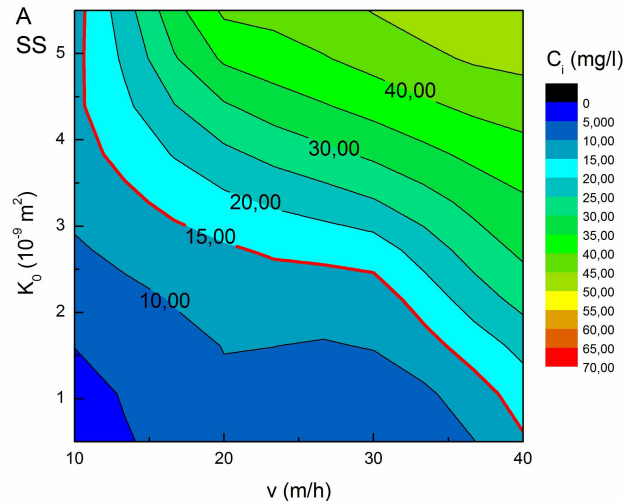
Kod ulja A4, slika 66, pri čitavom ispitivanom opsegu permeabilnosti sloja mogu se realizovati brzine i od 30 m/h, dok se pri nižim vrednostima permeabilnosti realizuju i veće brzine, čak i do 45 m/h. Veći deo površine dijagrama nalazi se ispod vrednosti od 15 mg/l čija je kontura izvučena crvenom bojom.



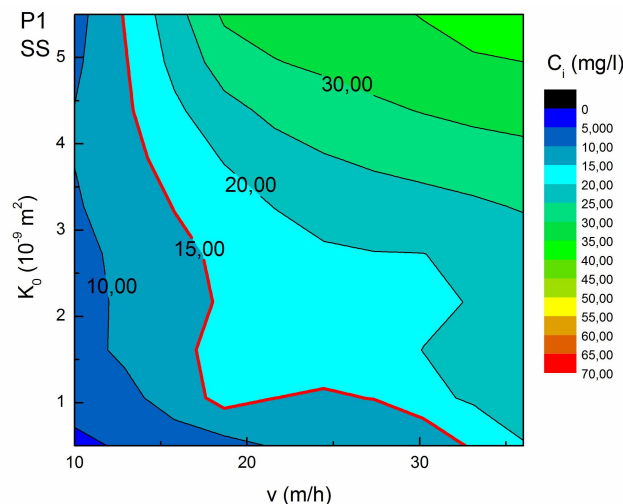
Slika 66. Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A4 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika

Kod ulja A, slika 67, pri nižim vrednostima permeabilnosti sloja realizuju se, takođe, veće radne brzine fluida i do 40 m/h, dok su veće permeabilnosti nepovoljne za rad. Kontura koncentracije od 15 mg/l deli površinu dijagrama na dve otprilike podjednake površine. Kod ulja P1, slika 68, za čitav opseg permeabilnosti sloja realizuju se brzine od 15 m/h do 20 m/h dok za najmanju permeabilnost

brzina može biti i 30 m/h. Kod ovog ulja je, takođe, povoljnija niža permeabilnost sloja. Kontura koncentracije od 15 mg/l deli površinu dijagrama otprilike na jednu trećinu za manje koncentracije i dve trećine za veće koncentracije. Radni prostor za ulje P1 je najmanji od tri ispitivana ulja.



Slika 67. Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika

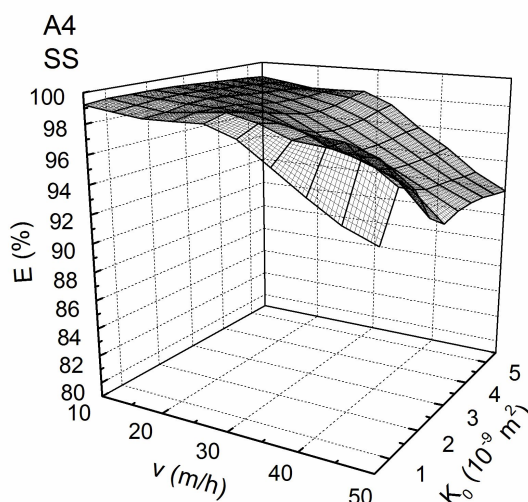


Slika 68. Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja P1 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika

Prikazani rezultati ukazuju da se ispitivana ulja mogu uspešno separisati slojem vlakana od nerđajućeg čelika posmatrajući zadati sadržaj ulja na izlazu samo pri određenim brzinama fluida i permeabilnosti sloja, što je slučaj sa svakim vlaknastim materijalom. Da su istraživanja izvršena samo na jednom ulju i da je izbor pao na ulje A4, što istraživači često rade, moglo bi se pogrešno zaključiti da je sloj vlakana od nerđajućeg čelika izrazito uspešan u separaciji kapi ulja iz vode.

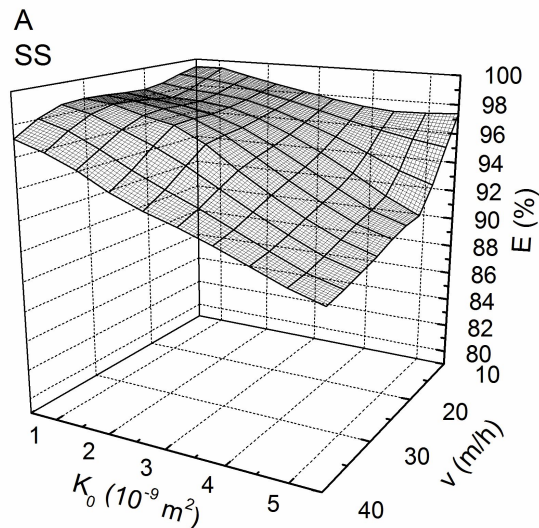
Kako bi se realizovani rezultati mogli uporediti sa rezultatima drugih autora, urađena je analiza preko efikasnosti separacije. Nedostatak analize rezultata preko efikasnosti ogleđa se u tome što odsustvuje informacija koliki je sadržaj ulja u izlaznom toku i da li on zadovoljava određeni propis ili je sadržaj veći od dozvoljenog. U teorijskom delu jasno se vidi da je većina istraživanja analizirana preko efikasnosti separacije. Analiza rezultata preko efikasnosti je najzastupljeniji oblik analize u literaturi, što se može smatrati velikim nedostatkom. Takođe, korisno je istaći da većina autora nije varirala geometriju sloja pri svim ispitivanim brzinama fluida da bi na taj način našli optimalne oblasti u kojima se realizuje minimalna izlazna koncentracija uljne faze, a time i visoka efikasnost separacije.

Slike 69, 70 i 71 prikazuju 3D dijagrame zavisnosti efikasnosti separacije od brzine fluida i permeabilnosti sloja za sva tri ispitivana ulja za sloj nerđajućeg čelika.

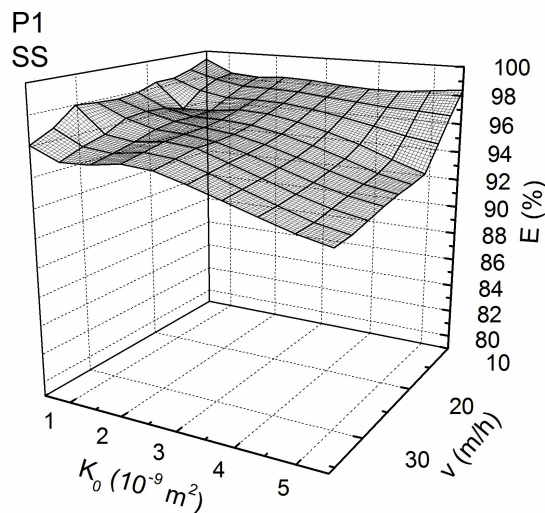


Slika 69. 3D dijagram zavisnosti efikasnosti separacije ulja A4 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika

Važno je napomenuti da se efikasnost separacije kapi ispitivanih ulja vlaknima od nerđajućeg čelika kreće u opsegu od 91% do 99% za opseg brzina fluida od 10 m/h do 50 m/h. Ove ostvarene vrednosti efikasnosti su neuporedivo više od vrednosti koje su publikovali drugi autori i realizovane su čak pri znatno većim brzinama fluida. Rezultati ukazuju da su odabrani uslovi rada, pre svega prečnik vlakana materijala u odnosu na ulaznu veličinu kapi, kao i način njihovog pakovanja uz obezbeđivanje poznate i definisane permeabilnosti, bili adekvatni i povoljni za željenu separaciju.



Slika 70. 3D dijagram zavisnosti efikasnosti separacije ulja A od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika

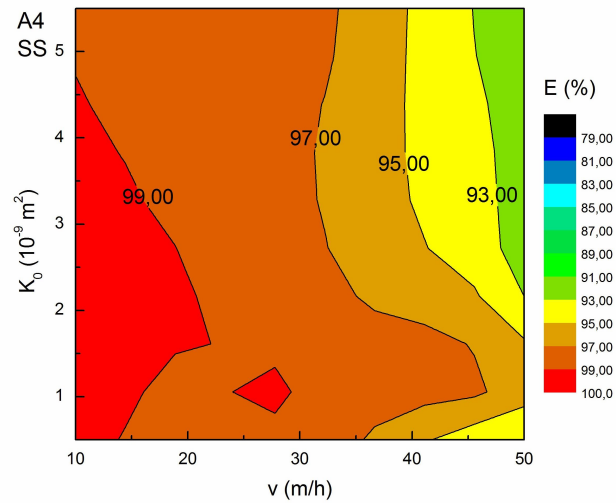


Slika 71. 3D dijagram zavisnosti efikasnosti separacije ulja P1 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika

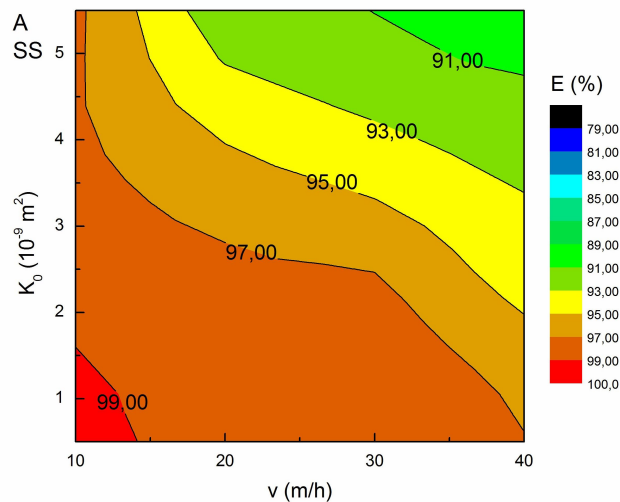
Ako se analiza vrednosti efikasnosti pri različitim brzinama fluida i permeabilnosti sloja prikaže konturnim dijagramima, tada je slika međuzavisnosti još jasnija, slike 72, 73 i 74.

Ako se pažnja usmeri na maksimalno ostvarenu vrednost efikasnosti od 99% tada se može konstatovati sledeće: kod ulja A4 površina koja pripada ovoj vrednosti je značajne veličine, realizovana je pri niskim vrednostima brzine i širokom rasponu permeabilnosti sloja, dok te oblasti kod druga dva ulja skoro da i nema. Ako se posmatra kontura od 97% tada su proporcije veličine ovih površina ade-

kvatne površinama koncentracije ispod 15 mg/l, najveća je kod A4 ulja, nešto manja kod ulja A i najmanja kod ulja P1.

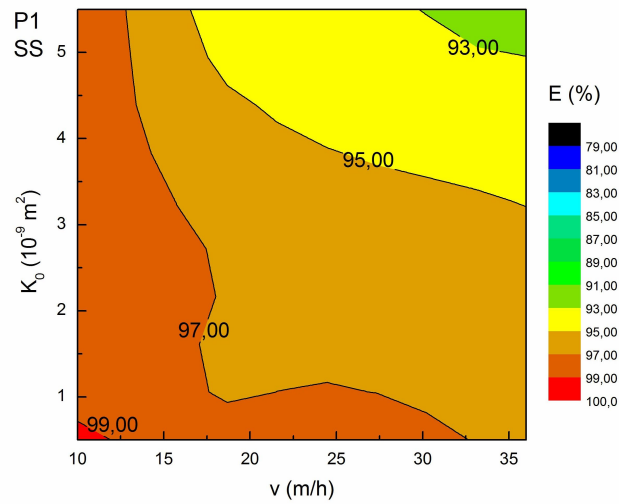


Slika 72. Konturni dijagram zavisnosti efikasnosti separacije ulja A4 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika



Slika 73. Konturni dijagram zavisnosti efikasnosti separacije ulja A od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika





Slika 74. Konturni dijagram zavisnosti efikasnosti separacije ulja A od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika

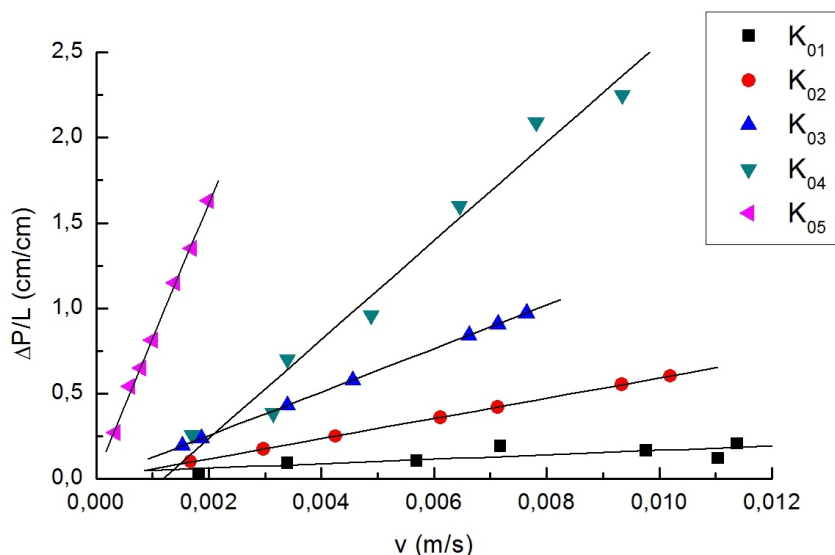
### 4.3 Simultani uticaj geometrije sloja i prirode ulja za sloj od nerđajućeg čelika

U ovom poglavlju će biti ponovo istaknuto, da su Šećerov-Sokolović i saradnici kao suštinske osobine koje određuju geometriju sloja vlakana definisali zavisnost poroznosti od permeabilnosti i prečnika vlakana. Porastom permeabilnosti sloja raste njegova poroznost, slika 38, teorijski deo. Razlika značenja poroznosti od permeabilnosti ogleda se u tome što poroznost daje udeo praznog prostora u zapremini sloja ne vodeći računa o tome da li su uključene pore protočne ili slepe. Kod poroznosti se uzima u obzir ukupna zapremina pora. Permeabilnost ima dimenziju površine i ona zapravo prikazuje zbir poprečnih preseka onih pora koje su protočne. Kod permeabilnosti figurišu one pore kroz koje tečnost može da prođe od ulaza ka izlazu iz sloja. Kako je sloj vlakana kompresibilan, njegovim sabijanjem smanjuje se i udeo praznog prostora, ali i broj protočnih kapilara što utiče značajno na zbivanja u tom sloju. Smanjenjem poroznosti smanjuje se prostor za smeštaj kapilarno-provodne faze. Još veći uticaj na smanjenje količine kapilarno-provodne faze ima smanjenje permeabilnosti, pošto to smanjuje broj protočnih kapilara i prouzrokuje porast mesne brzine fluida. Ako jednaka količina tečnosti treba da prođe za isto vreme kroz manji broj pora, jasno je da ona mora proticati većom brzinom. Još je Spielman istakao da intenzitet hidrodinamičkih sila dominantno određuje količinu kapilarno-provodne faze. Dakle, ako se realizuje veća mesna brzina, tada će količina kapilarno-provodne faze biti manja. Zbog toga što kapi dispergovane faze koje ulaze u sloj mogu da koalesciraju u zapreminu ove faze, njena količina direktno utiče na efikasnost koalescencije.

Sloj vlakana od nerđajućeg čelika, ispitivan u ovom radu, imao je raspon navedenih osobina, tabela 9, u sledećim intervalima: permeabilnost od  $0,720 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  do  $5,389 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  i poroznost od 91% do 98%. Uticaj ovih vrednosti permeabilnosti i poroznosti na efikasnost koalescencije i separacije kapi ulja analiziran je na strani 88.

Vrlo je korisno objasniti smisao uvođenja kritične brzine kao zavisno promenljive veličine. Šećerov-Sokolović i saradnici (2003b, 2007) su usvojili da je kritična brzina ona brzina fluida pri kojoj je izlazna koncentracija jednaka 15 mg/l. U tim okolnostima konstantne su obe koncentracije dispergovane faze, i ulazna i izlazna, koje određuju efikasnost separacije. Za slučaj kada je ulazna koncentracija 500 mg/l, a izlazna 15 mg/l efikasnost separacije je konstantna i iznosi 97%. U okolnostima eksperimenata realizovanih od strane Šećerov-Sokolović i saradnika kada se analiza rezultata daje preko kritične brzine, zapravo su konstantne i izlazna koncentracija 15 mg/l i efikasnost 97%. Cilj njihovih istraživanja je traganje za uslovima pri kojima kritična brzina ostvaruje maksimalnu vrednost. Kritična brzina je osnovna projektna veličina koalescentnog filtera, to je zapravo njegova maksimalna moguća radna brzina. Porastom radne brzine uređaja smanjuju se

njegovi gabariti ne samo u dimenzijama, kako bi zauzeli manji prostor, nego i u težini kako bi potrošili manje konstrukcionog materijala i zahtevali nikakve ili male temelje. Povećanjem brzine fluida raste pad pritiska kroz sloj čime raste i potrošnja energije. Međutim, uvođenjem male debljine sloja i obezbeđivanjem visoke permeabilnosti pad pritiska je u domenu od nekoliko santimetara vodnog stuba. Na slici 75 prikazana je zavisnost pada pritiska od brzine za čist sloj vlakana od nerđajućeg čelika različite permeabilnosti.

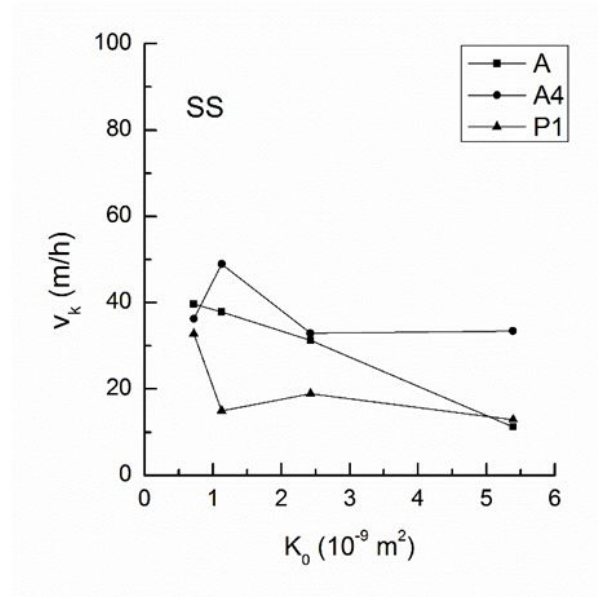


Slika 75. Pad pritiska po jedinici debljine sloja pri proticanju vode kroz sloj od nerđajućeg čelika pri različitim brzinama

Na slici 76 prikazana je zavisnost kritične brzine  $v_k$  od permeabilnosti sloja vlakana od nerđajućeg čelika za sva tri ispitivana ulja. Na osnovu zavisnosti prikazanih na dijagramu, mogu se izvući sledeće konstatacije:

- Kritična brzina drastično zavisi od promene permeabilnosti sloja za sva tri ispitivana ulja;
- Trend zavisnosti je takav da se povećanjem permeabilnosti smanjuje vrednost  $v_k$ ;
- Materijal SS ostvaruje opseg vrednosti kritične brzine od 10 m/h do 50 m/h;
- Raspon vrednosti  $v_k$  za ulje A4 kreće se od 35 m/h do 50 m/h;
- Najniža vrednost  $v_k$  iznosi 10 m/h i realizuje se za ulja A i P1 pri najvišoj permeabilnosti sloja.

Kada se isključi brzina iz seta nezavisno promenljivih dobija se prostor da se uvede neka druga veličina, što može da bude priroda uljne faze, tako da se na istom dijagramu, bilo da je u pitanju 2D, 3D ili konturni dijagram, mogu simultano pratiti uticaj geometrije sloja i prirode uljne faze na uspešnost separacije prikazano preko kritične brzine,  $v_k$ , slike 77, 78 i 79.



Slika 76. Zavisnost kritične brzine od permeabilnosti sloja za sva ispitivana ulja

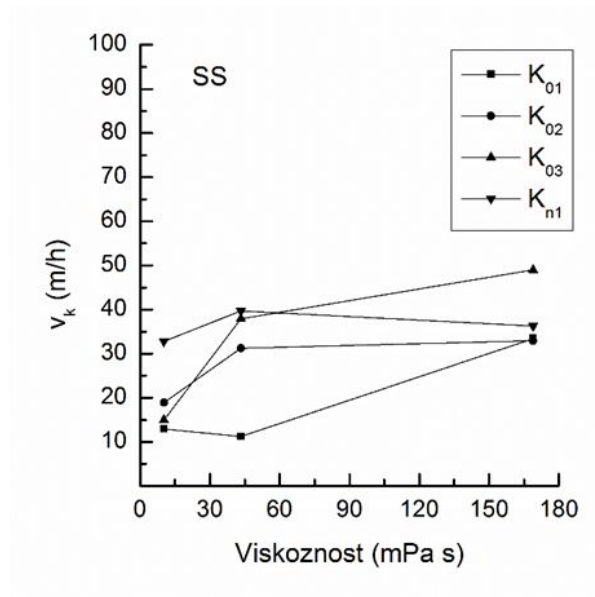
Ogledi koalescentne filtracije u ovom radu realizovani su korišćenjem tri ulja mineralnog porekla. Pored geometrije sloja bitan faktor koji utiče na koalescenciju jeste i priroda ulja koja formira kapilarno-provodnu fazu. Kao što je već istaknuto, istraživanja su pokazala da su viskoznost i polarnost ovih ulja najbitnije osobine koje uslovljavaju fenomene u porama sloja (Šećerov-Sokolović i saradnici 2014). Ulje P1 ima najmanju viskoznost, 10,316 mP·s, dok ulje A ima srednju vrednost, 43,350 mP·s, a ulje A4 ima najveću viskoznost, 168,904 mP·s. Polarnost ulja prikazuje više osobina, ali su Šećerov-Sokolović i saradnici (2014) utvrdili da je najbolje raditi analizu preko neutralizacionog broja i emulzivnosti. Neutralizacioni broj ulja P1 je 0,13 mg KOH/l, ulje A ima neutralizacioni broj 1,42 mg KOH/l, dok ulje A4 ima neutralizacioni broj 1,71 mg KOH/l.

Efekat promena prirode ulja na koalescenciju u sloju različite permeabilnosti i poroznosti biće ilustrovan daljom analizom rezultata.

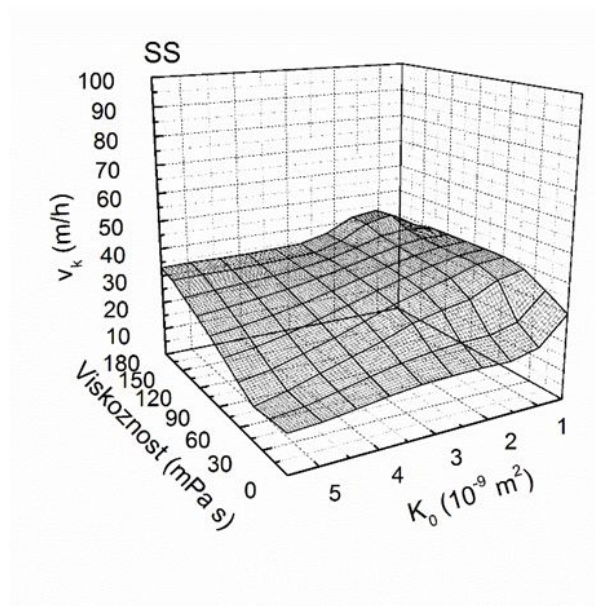
Ako se u analizu uključi viskoznost ulja kao značajna osobina, može se konstatovati sledeće (slike 77, 78 i 79): na slici 77 već se može uočiti da sa porastom viskoznosti raste  $v_k$  pri svim permeabilnostima sloja.

Pošto na 2D dijagramu nije dovoljno slikovit simultani uticaj permeabilnosti i prirode dispergovane faze, uveden je 3D dijagram, slika 78 i konturni dijagram, slika 79.

Analiza rezultata prikazanih na slici 78 ukazuje da je predeo niske permeabilnosti povoljniji za rad kod sloja vlakana od nerđajućeg čelika. Pri najnižim vrednostima permeabilnosti i najvišim vrednostima viskoznosti ulja realizuju se najveće vrednosti  $v_k$ .



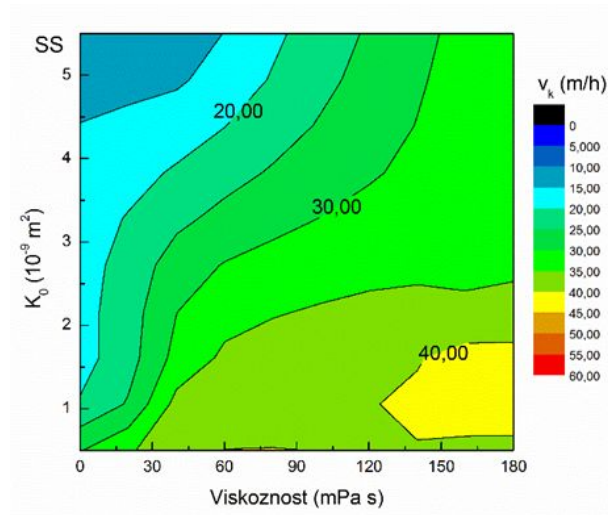
Slika 77. Zavisnost kritične brzine od viskoznosti ulja za sve permeabilnosti sloja od nerđajućeg čelika



Slika 78. 3D dijagram zavisnosti kritične brzine od viskoznosti ulja i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika

Ove tvrdnje dodatno potvrđuje konturni dijagram na slici 79. U predelu visoke viskoznosti i niske permeabilnosti sloja realizuju se vrednosti  $v_k$  od 40 m/h, površina obojena žuto.

Pri najnižoj permeabilnosti mesna brzina je najveća, količina kapilarno provodne faze trebalo bi da je najmanja pošto je i poroznost najmanja. Međutim, treba imati na umu da su vlakna nerđajućeg čelika prema literaturi nekvašljiva uljnom fazom, te deluje da se realizuju kao dominantni mehanizmi neki drugi

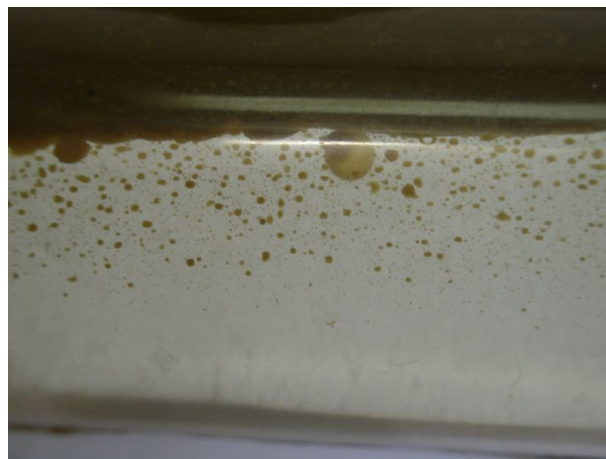


Slika 79. Konturni dijagram zavisnosti kritične brzine od viskoznosti ulja i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika

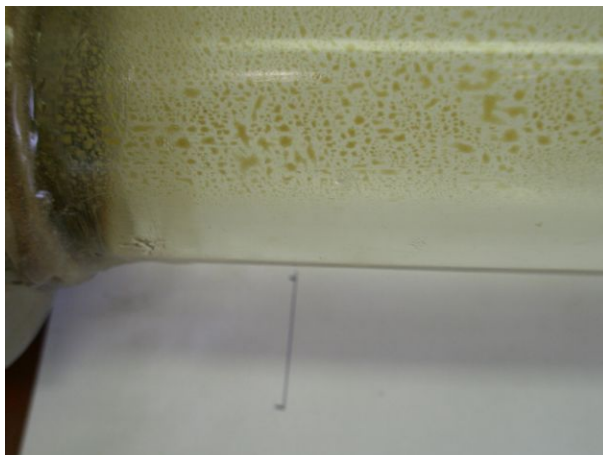
mehanizmi koalescencije u porama sloja. Može se pretpostaviti da kada je permeabilnost najniža dolazi do koalescencije kapi međusobno pošto su u tim okolnostima kapi najbliže jedna drugoj i da je to način formiranja kapilarno-provodne faze u zapremini sloja. Kada je sloj razvučen, tada su kapi udaljenije jedna od druge, te je otežano ili čak onemogućeno formiranje kapilarno-provodne uljne faze, za slučaj kada ulje ne kvasi filtarski materijal, u koju posle koalesciraju dolazeće kapi ulja. Kada je u pitanju viskoznije ulje, hidrodinamičke sile ga teže istiskuju iz sloja. Analizom fotografija koje su snimane tokom eksperimenta mogu se potvrditi gore navede pretpostavke.

Na slici 80 je fotografija ulja koje ima najvišu viskoznost, A4, nakon izlaska iz sloja za eksperiment pri najnižoj permeabilnosti. Može se uočiti da na izlazu iz sloja postoji formirana uljna faza.

Na fotografiji sa istim uljem A4, a pri najvišoj permeabilnosti, uočljivo je odsustvo takve uljne faze posle sloja, slika 81.

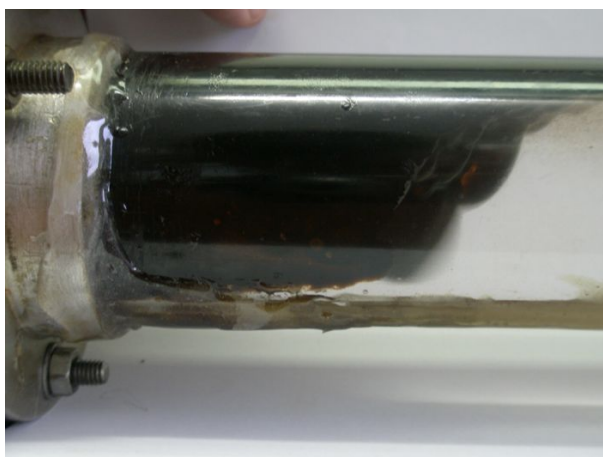


Slika 80. Uljna faza posle sloja za ulje A4 pri najmanjoj permeabilnosti

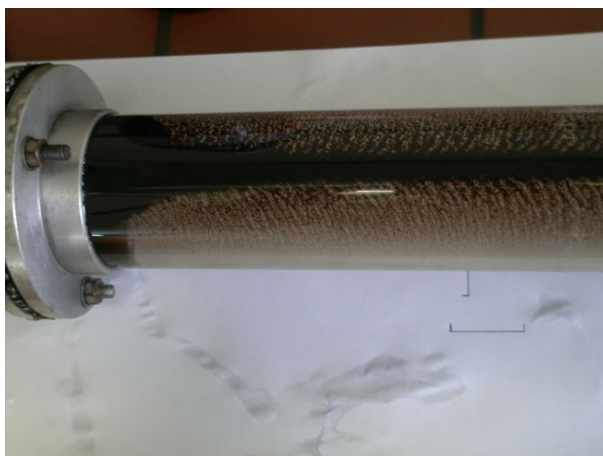


Slika 81. Uljna faza posle sloja za ulje A4 pri najvećoj permeabilnosti

Ako se uporede fotografije za ulje A pri najnižoj i najvišoj permeabilnosti može se uočiti isti fenomen, to jest videti različita količina uljne faze posle sloja, slike 82 i 83.



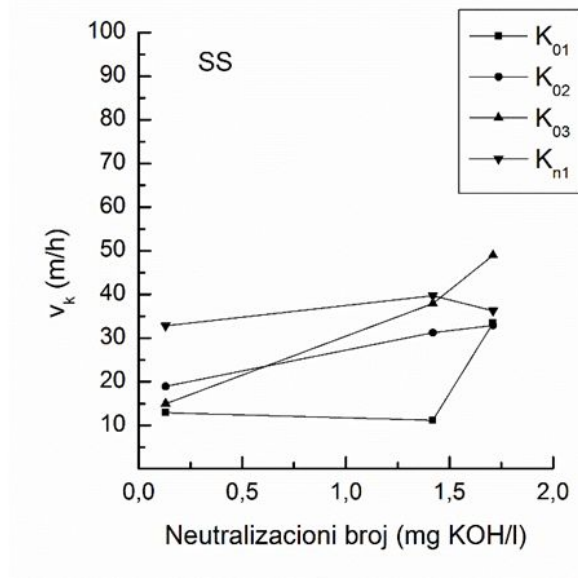
Slika 82. Uljna faza posle sloja za ulje A pri najmanjoj permeabilnosti



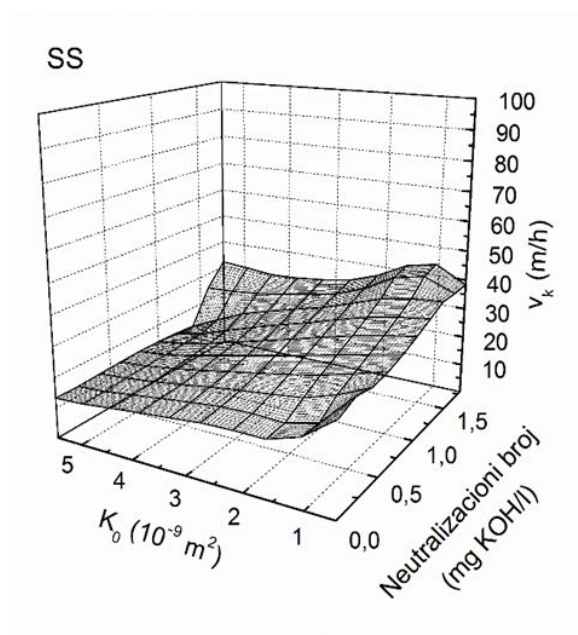
Slika 83. Uljna faza posle sloja za ulje A pri najvećoj permeabilnosti

Na slici 83 se jasno uočava da nije došlo do formiranja kontinualne faze ulja pošto se vide pojedinačne kapi koje deluju kao prašina.

Analiziran je uticaj polarnosti preko usvojene veličine neutralizacionog broja. Na slici 84 data je zavisnost  $v_k$  od neutralizacionog broja za sve ispitivane permeabilnosti sloja. Polarnija ulja realizuju nešto veće vrednosti  $v_k$  pri svim permeabilnostima sloja. To isto potvrđuje 3D dijagram dat na slici 85. Na ovom dijagramu se jasno uočava da maksimalna vrednost  $v_k$  raste sa smanjenjem permeabilnosti sloja i porastom polarnosti ulja. Najveća vrednost  $v_k$  se realizuje za najmanju permeabilnost i najveći neutralizacioni broj.



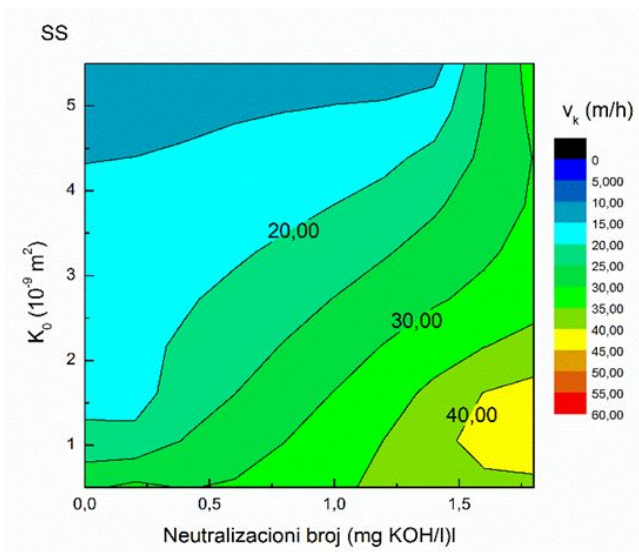
Slika 84. Dijagrami zavisnosti  $v_k$  od neutralizacionog broja za sve permeabilnosti za materijal SS



Slika 85. 3D dijagrami zavisnosti  $v_k$  od permeabilnosti i neutralizacionog broja za materijal SS



Konturni dijagram, slika 86, odlično ilustruje da se oblast maksimalne vrednosti  $v_k$  od 40 m/h nalazi pri najmanjoj permeabilnosti sloja i najvećoj vrednosti neutralizacionog broja. Površina maksimalne vrednosti  $v_k$  je relativno mala.



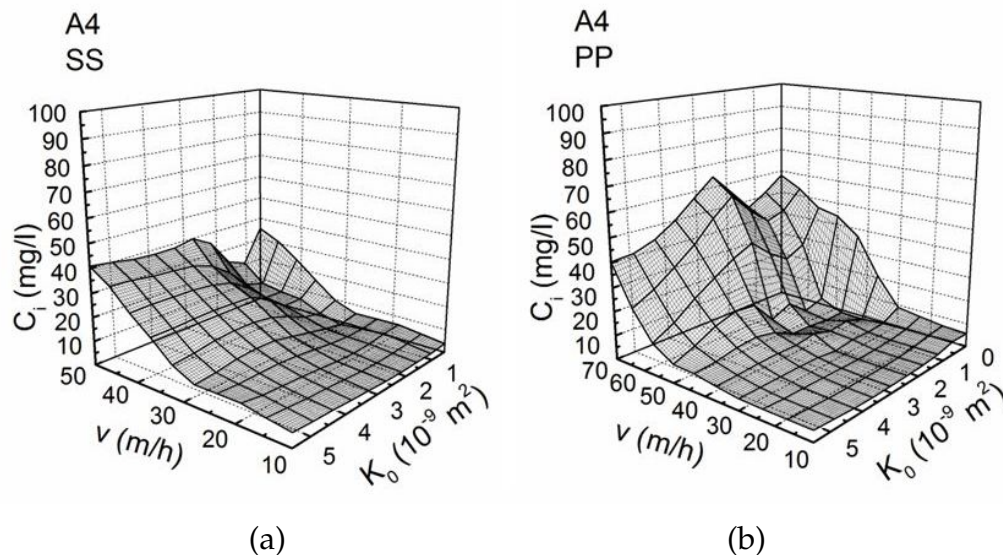
Slika 86. Konturni dijagrami zavisnosti  $v_k$  od permeabilnosti i neutralizacionog broja za materijal SS

Ako se ova analiza primeni na ispitivana ulja može se istaći da sloj vlakana od nerđajućeg čelika najuspešnije separiše ulje A4 koje ima najveću viskoznost, kao i najveći neutralizacioni broj, zatim ulje A koje ima srednju viskoznost, a najlošije ulje P1 koje ima najniže vrednosti obe odabrane veličine. Ovaj redosled nije specifičan za vlakna od nerđajućeg čelika. Istraživanja izvedena od strane Šećerov-Sokolović i sardanika (2014) pokazuju isti redosled i kod vlakana polimera. Vrednost  $v_k$  kod ulja A4 kreće se od 32,94 m/h do 48,97 m/h, dok je kod ulja A od 11,2 m/h do 39,69 m/h. Za ulje P1 taj raspon je od 12,94 m/h do 32,84 m/h.

## 4.4 Uticaj energije površine na koalescenciju u vlaknastom sloju

Kao što je komentarisano u teorijskom delu, u literaturi zapravo nisu nađena istraživanja koja validno i pod prihvatljivim uslovima upoređuju efikasnost separacije sloja vlakana niske i visoke energije površine. Iz pomenutih razloga je i proizašao motiv za takvu vrstu istraživanja. Za poređenje sa nerđajućim čelikom odabran je sloj vlakana polipropilena, PP, koji se, od svih ispitivanih polimera pokazao kao najmanje uspešan, ali zadovoljavajući. Vlakna oba odabrana materijala, SS i PP, su jednake debljine, glatke površine, a sloj im je jednakog opsega permeabilnosti. U takvim okolnostima razlika je samo hemijska priroda i elastičnost vlakana.

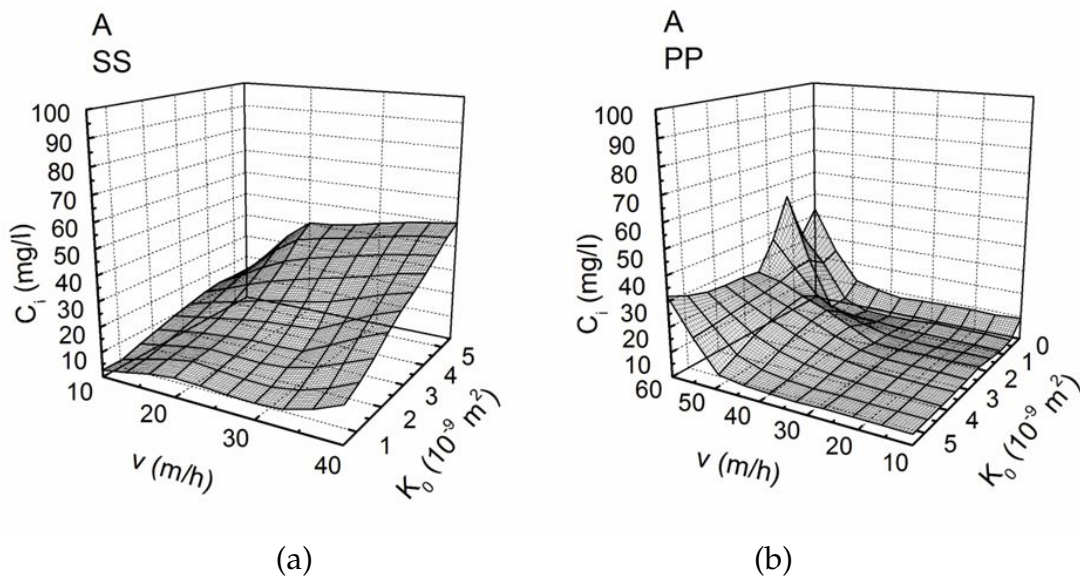
U narednom nizu slika dati su 3D dijagrami zavisnosti izlazne koncentracije od brzine i permeabilnosti sloja za materijale SS i PP i za sva ispitivana ulja. Slika 87 odnosi se na ulje A4, slika 88 na ulje A, a slika 89 na ulje P1.



Slika 87. 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A4 od brzine i permeabilnosti: (a) materijal SS i (b) materijal PP

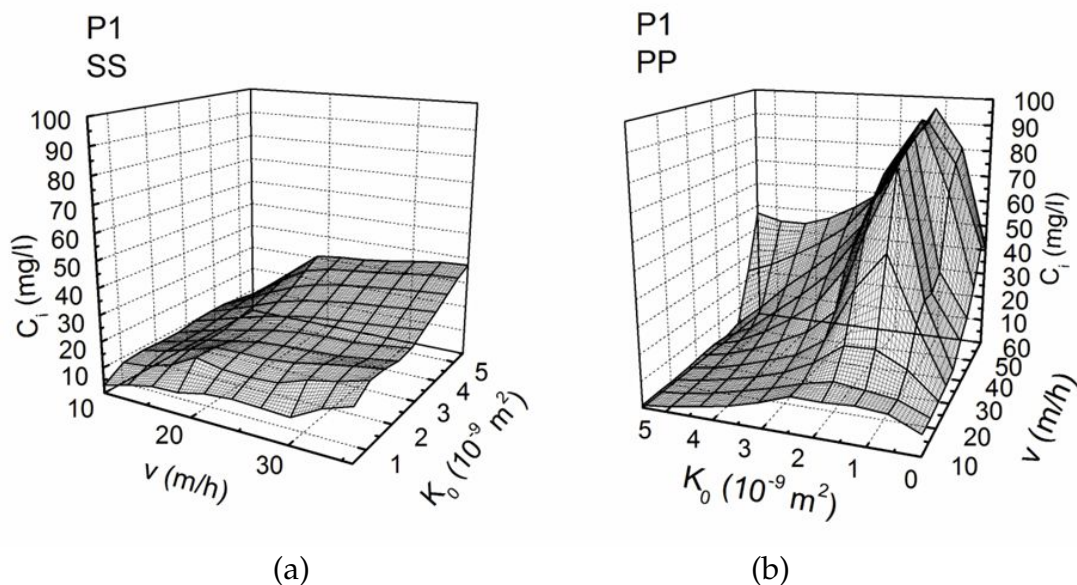
Analizirajući sliku 87 može se ustanoviti da je oblik zavisnosti kod oba materijala sličan. Veličina radne površine niske vrednosti izlazne koncentracije uslovljene brzinom i permeabilnošću kod SS je velika i zanemarljivo manja u odnosu na površinu kod PP. Kada je reč o uljima A i P1 situacija je potpuno drugačija. Materijal PP ima neuporedivo veću radnu površinu sa niskim vrednostima izlazne koncentracije, što se za SS ne može tvrditi. Zadovoljavajući kvalitet izlaza SS se postiže u uskom segmentu niskih vrednosti permeabilnosti i malih brzina.

Ulje P1 je ulje najniže viskoznosti. Oba odabrana materijala imaju problema da separišu ovo ulje. To je bio jedan od dodatnih razloga da se za poređenje sa SS odabere materijal PP. Materijal SS postiže zadovoljavajući kvalitet izlaza i dalje u istom opsegu uslova, niske permeabilnosti i niske brzine. Za razliku od SS,



Slika 88. 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A od brzine i permeabilnosti: (a) materijal SS i (b) materijal PP

materijal PP zadovoljava kvalitet izlaza pri najvišoj permeabilnosti i širokom opsegu brzina, dok za niske permeabilnosti ima drastično visoke vrednosti izlaznih koncentracija ulja.

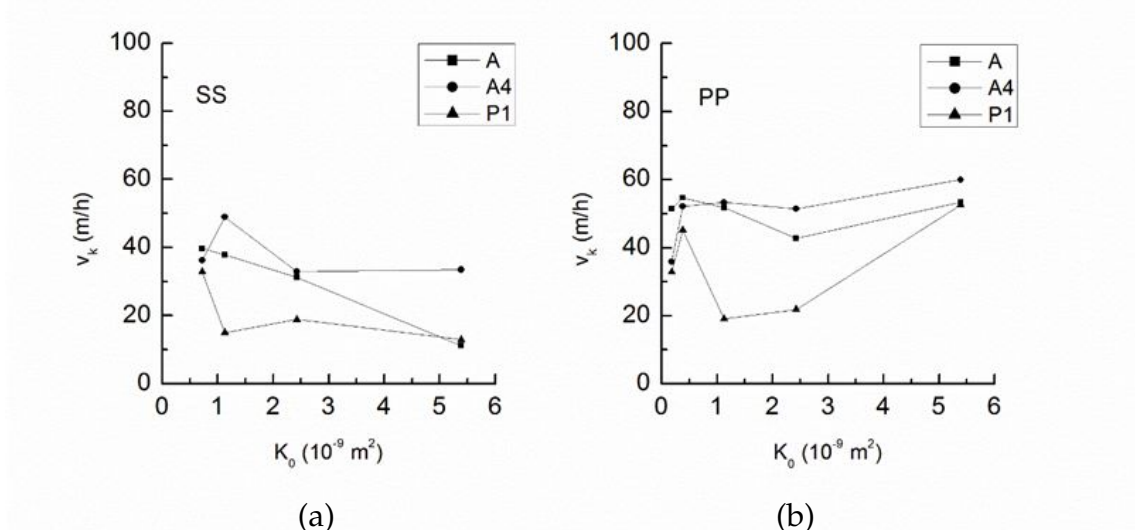


Slika 89. 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja P1 od brzine i permeabilnosti: (a) materijal SS i (b) materijal PP

Ako se poređenje dva odabrana materijala vrši preko vrednosti ostvarenih kritičnih brzina, slika 90, tada je slika njihove uspešnosti mnogo jasnija. Materijal SS ostvaruje opseg vrednosti kritične brzine od 10 m/h do 50 m/h. Raspon vrednosti  $v_k$  za ulje A4 kreće se od 35 m/h do 50 m/h. Najniža vrednost  $v_k$  iznosi 10 m/h i realizuje se za ulja A i P1 pri najvišoj permeabilnosti.

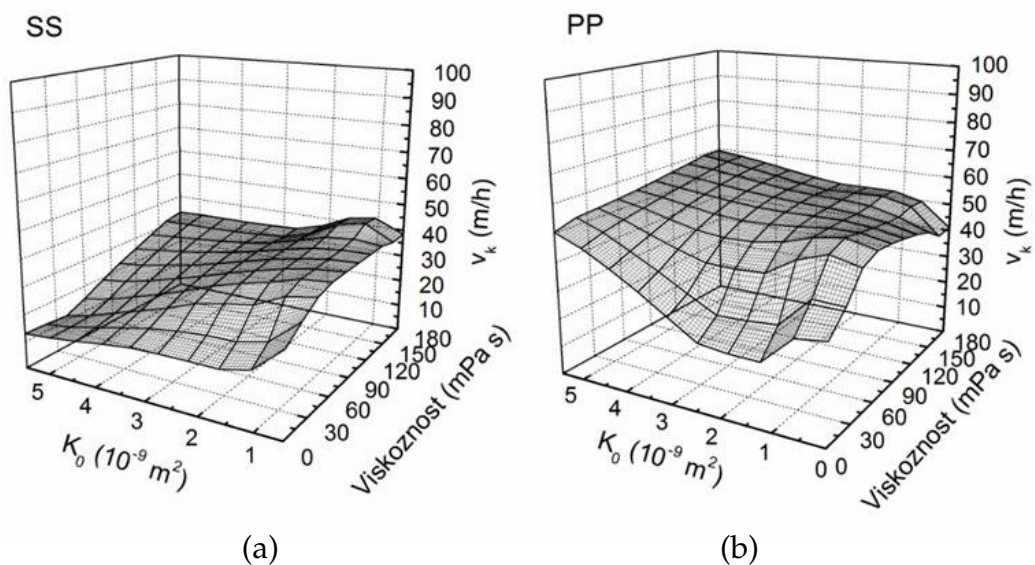
Materijal PP ostvaruje vrednost  $v_k$  u opsegu od 20 m/h do 60 m/h. Ulje A4 realizuje vrednosti  $v_k$  od 55 m/h do 60 m/h. Ulje A ostvaruje značajno veće  $v_k$  pri separaciji sa PP. Najniže vrednosti  $v_k$  ostvaruje ulje P1 i iznosi 20 m/h.

U daljem tekstu u analizu je uvedeno i poređenje: efikasnosti odabranih materijala i prirode ulja preko odabranih veličina, viskoznosti i neutralizacionog broja.



Slika 90. Dijagrami zavisnosti  $v_k$  od permeabilnosti za sva ispitivana ulja: (a) materijal SS i (b) materijal PP

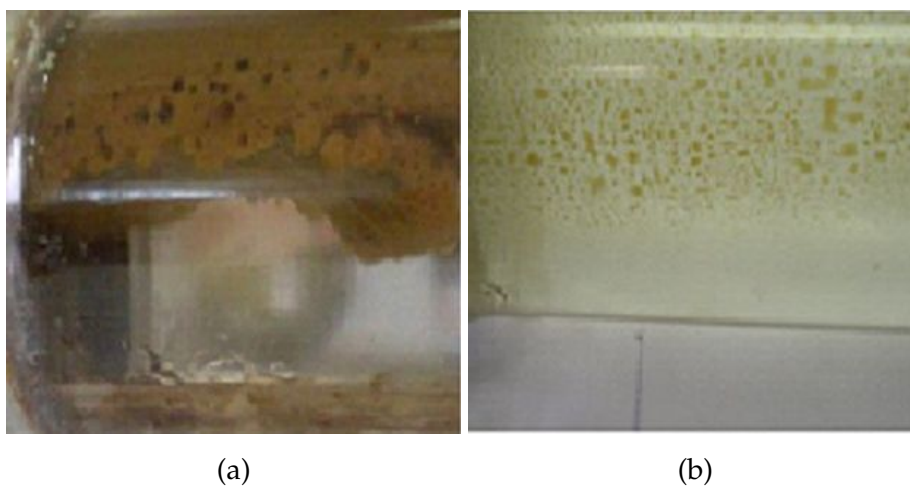
Na slici 91 dat je 3D dijagram zavisnosti kritične brzine od permeabilnosti i viskoznosti ispitivanih ulja za materijale: (a) SS i (b) PP. Jasno se vidi da se postižu najmanje vrednosti  $v_k$  u opsegu najmanjih vrednosti viskoznosti kod oba materijala. Ono što je drastična razlika jeste uticaj permeabilnosti. Kod SS najniža



Slika 91. 3D dijagrami zavisnosti  $v_k$  od permeabilnosti i viskoznosti ispitivanih ulja: (a) materijal SS i (b) materijal PP

permeabilnost ostvaruje najveće  $v_k$  za ceo opseg viskoznosti, dok je kod PP upravo obrnuto. Najveće vrednosti  $v_k$  realizuju se pri najvišim permeabilnosti sloja PP, takođe, za ceo opseg viskoznosti.

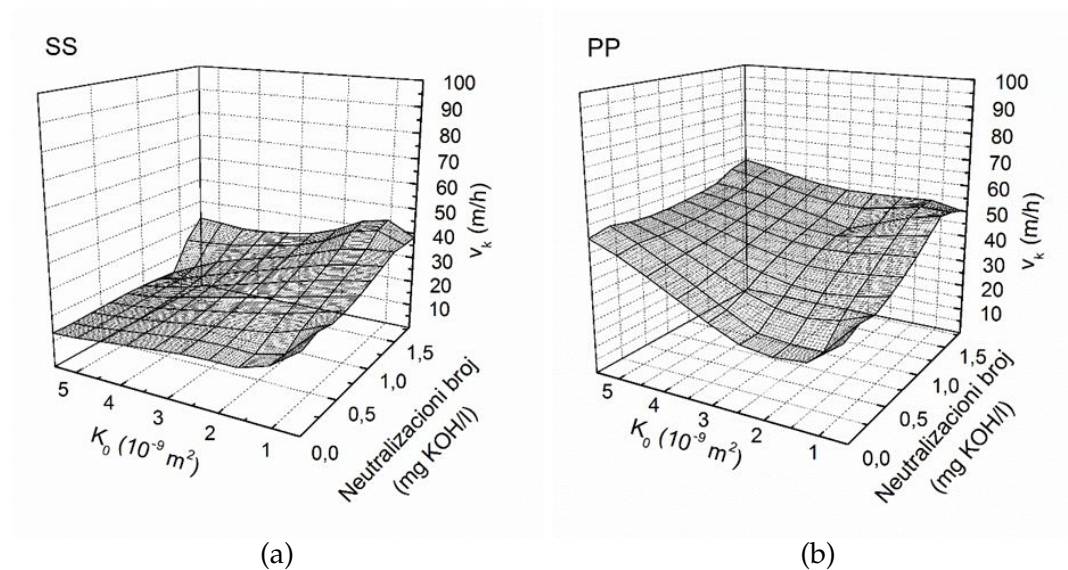
Može se postaviti pitanje zašto materijalu SS pogoduje niska permeabilnost, a materijalu PP visoka. Najrealnije objašnjenje ovog fenomena može biti to da se u postojećim okolnostima kod posmatranih materijala realizuju različiti dominantni mehanizmi koalescencije. Šećerov-Sokolović i saradnici (2014) su ovaj fenomen kod polimera objasnili na sledeći način: pošto su polimeri kvašljivi uljem, u okolnostima kada je permeabilnost najveća, sloj ima najveće pore i najnižu mesnu brzinu. Kako je poroznost u tim okolnostima maksimalna, u sloju egzistira i maksimalna količina kapilarno-provodne faze. Dolazeće male kapi koalesciraju u zapreminu te uljne faze i taj mehanizam koalescencije je dominantan. Na slici 92a data je fotografija na kojoj se vidi bogata uljna faza koja se nalazi posle sloja PP za ulje A4 i najveću permeabilnost. Kod materijala SS koji nije kvašljiv uljem količina kapilarno-provodne faze pri najvećoj permeabilnosti sloja nije dovoljna da obezbedi masovnu koalescenciju kapi u svoju zapreminu što dokazuje i slika 92b. Razlog tome može biti što materijal SS nije kvašljiv uljem. Pri najmanjoj permeabilnosti pore u sloju su najmanje te su kapi u porama najbliže jedna drugoj. Pored toga vlakna SS odbijaju kapi ulja te pospešuju njihovo sakupljanje u centralni deo pornog prostora. U tim okolnostima postoje svi uslovi da se realizuje mehanizam koalescencije između kapi kao dominantan. Iako je tada mesna brzina najveća ona, ipak ne ometa ovu koalescenciju.



Slika 92. Fotografije uljne faze posle sloja: (a) materijal PP i (b) materijal SS

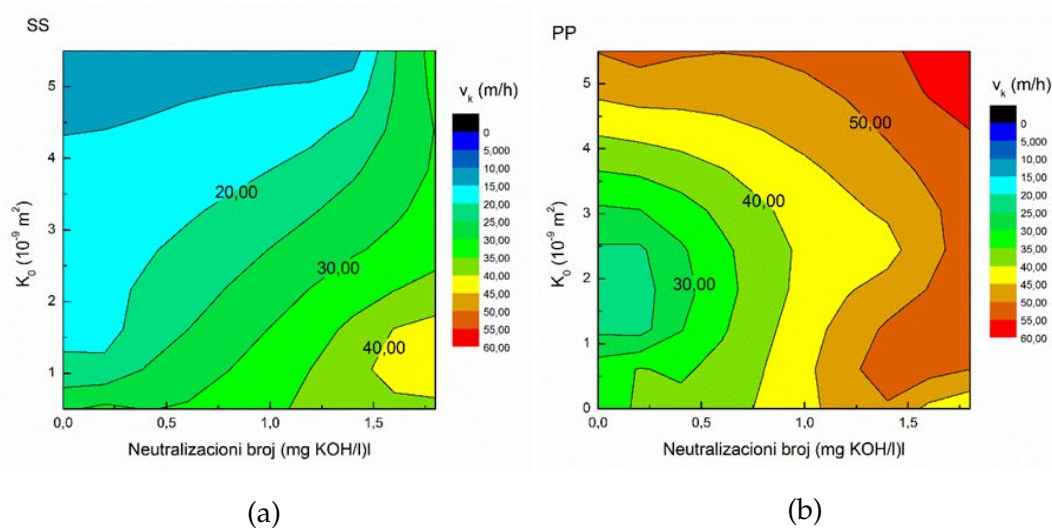
U daljoj analizi se u razmatranje uključuje osobina polarnost koju reprezentuje neutralizacioni broj, slika 93. Vrednosti kritičnih brzina kod materijala SS u oblasti velike permeabilnosti praktično ne zavise od neutralizacionog broja ili od polarnosti ulja sem za najveću vrednost koja pripada ulju A4. U oblasti niskih vrednosti permeabilnosti  $v_k$  raste sa porastom polarnosti ulja. Slična je zavisnost i kod materijala PP, s tim što se kod PP realizuju najveće vrednosti  $v_k$  za najveću

permeabilnost skoro za ceo opseg polarnosti. Sloj PP pokazuje izuzetno nepovoljnu oblast za rad koja pripada niskoj permeabilnosti i maloj polarnosti ulja. Ova regija kod SS ne postoji.



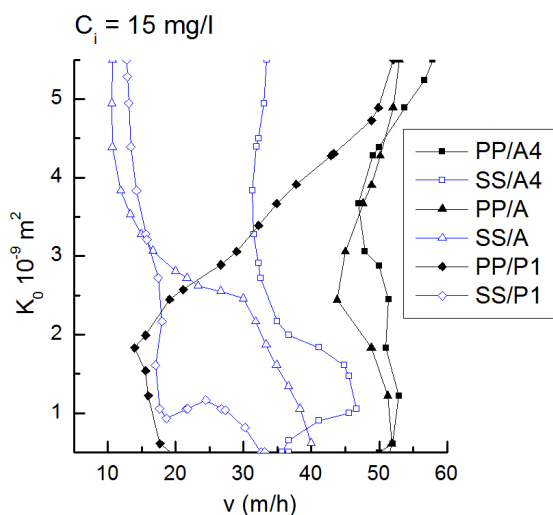
Slika 93. 3D dijagrami zavisnosti  $v_k$  od permeabilnosti i neutralizacionog broja ispitivanih ulja: (a) materijal PP i (b) materijal SS

Uticaj polarnosti ulja na vrednost  $v_k$  još je slikovitija na konturnim dijagramima datim na slici 94. Kao što je već ukazano kod materijala SS, slika 94b, javlja se oblast maksimuma  $v_k$  od 40 m/h koja je relativno mala i locirana za niske permeabilnosti i visoku polarnost ulja. Kod materijala PP, slika 94a, se jasno vidi da sa porastom neutralizacionog broja raste  $v_k$  i da je maksimalna vrednost od 60 m/h locirana za najveću permeabilnost.



Slika 94. Konturni dijagrami zavisnosti  $v_k$  od permeabilnosti i neutralizacionog broja ispitivanih ulja: (a) materijal PP i (b) materijal SS

Možda najslikovitiji dijagram za poređenje odabrana dva materijala može biti dijagram kontura realizacije izlazne koncentracije od 15 mg/l gde se vidi za koje uslove je SS bolji od PP u separaciji ispitivanih ulja, slika 95. Materijal SS uspešnije separiše ulje P1 od materijala PP i to u oblasti niskih permeabilnosti, ali pri izuzetno maloj brzini od oko 10 m/h.



Slika 95. Konturni dijagram izlazne koncentracije,  $C_i=15 \text{ mg/l}$ , od permeabilnosti i brzine za oba ispitivana materijala

## 4.5 Simultani uticaj energije površine geometrije sloja i prirode uljne faze na koalescenciju u sloju vlakana primenom veštačkih neuronskih mreža

U ovom poglavlju je prikazano ispitivanje mogućnosti primene veštačkih neuronskih mreža u cilju fitovanja eksperimentalnih podataka dobijenih koalescentnom filtracijom.

Veštačke neuronske mreže primenjene za obradu dobijenih eksperimentalnih podataka koalescentnom filtracijom su formirane u programskom paketu MATLAB, pomoću alata Neural Network Toolbox (NNT). U datoj problematici razmatrana je arhitektura neuronske mreže sa jednim skrivenim slojem. Tako formirana mreža sadrži  $I$  ulaznih elemenata,  $J$  elemenata u skrivenom sloju, kao i  $K$  elemenata u izlaznom sloju.

U procesu treniranja mreže programski paket nasumično bira početne vrednosti jačine veze između neurona. Tokom iterativnog procesa primenom odgovarajućeg algoritma treniranja neuronske mreže, pronalazi se kombinacija jačina veza među neuronima. Testirani su algoritmi Levenberg-Marquardt, konjugovani gradijenti i kvazi Njutnov. Ovi algoritmi su upotrebljeni za treniranje mreže i od strane drugih autora za modelovanje realnih sistema (Brasquet i Le Cloirec 2000; Marques i saradnici 2005; Lucignano i saradnici 2010; Jokić i saradnici 2012; Mukherjee i Routroy 2012). Za aktivacionu funkciju neurona u prvom sloju izabran je hiperbolični tangens, dok je za neurone u skrivenom sloju izabrana linearna zavisnost.

Eksperimentalni podaci su normalizovani pre početka treniranja veštačkih neuronskih mreža da bi se smanjile velike razlike u jačinama veza. Velika razlika u jačini veze se može javiti prilikom upotrebe eksperimentalnih podataka koji imaju različite dimenzije, a koriste se za definisanje nezavisno promenljivih. Ukoliko se normalizacija podataka ne izvrši, moguće je da će pojedine nezavisno promenljive imati veći uticaj na zavisno promenljivu nego što bi imale u realnom sistemu (Sarkar i saradnici 2009; Jokić i saradnici 2012; Tan i saradnici 2014). Za potrebe normalizacije podataka upotrebljena je jednačina 14:

$$y_{norm} = (1 - \Delta^U - \Delta^L) \cdot \frac{y - y^{min}}{y^{max} - y^{min}} + \Delta^L \quad (14)$$

gde su:

$y_{norm}$  - normalizovane vrednosti zavisno promenljive

$y_{min}$  - minimalne vrednosti zavisno promenljive

$y_{max}$  - maksimalne vrednosti zavisno promenljive

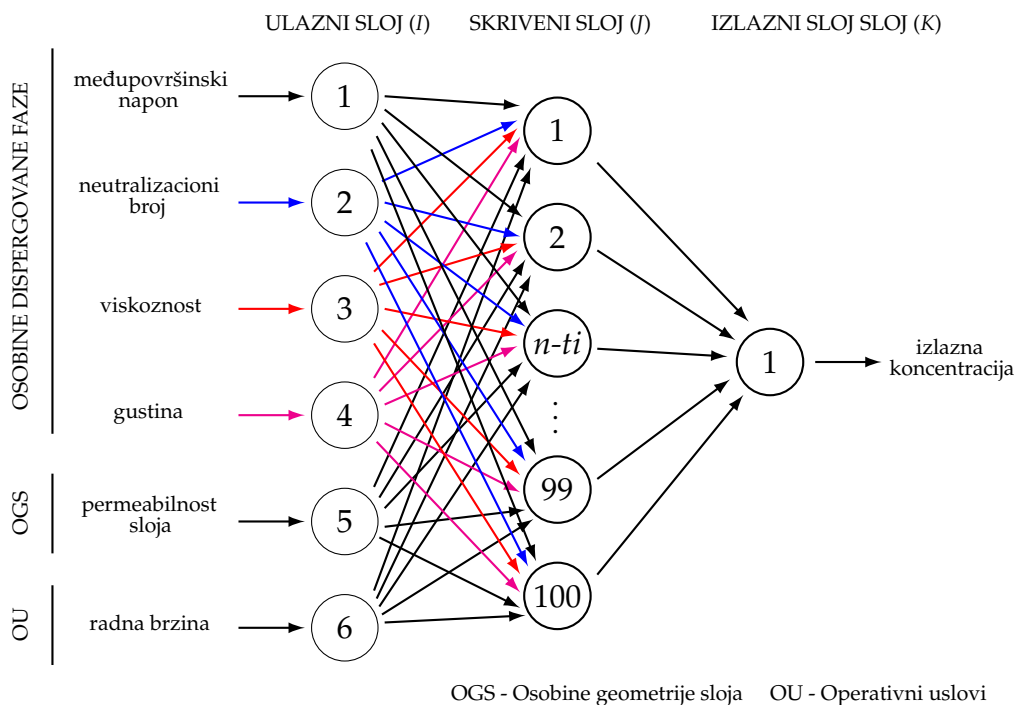
$\Delta^U$  - vrednost leve granice normalizovanih podataka - 0,1

$\Delta^L$  - vrednost desne granice normalizovanih podataka - 0,9.



Eksperimentalni podaci su podeljeni u tri grupe podataka: prva grupa kojima se vrši treniranje neuronske mreže (70%), druga grupa za validaciju modela (15%) i treća grupa za testiranje modela (15%). Optimalan broj neurona u skrivenom sloju određivan je variranjem njihovog broja od 1 do 100 neurona.

Ulazni sloj predstavljaju promenljive koje opisuju parametre eksperimenta. Parametri su podeljeni u tri grupe, pri čemu prva grupa opisuje osobine dispergovane faze: međupovršinski napon, neutralizacioni broj, viskoznost i gustina dispergovane faze. Druga i treća grupa predstavljaju osobine geometrije sloja i operativne uslove, a opisani su parametrima permeabilnosti sloja i radne brzine. U ulaznom sloju svaki od neurona je povezan sa svakim od neurona u skrivenom sloju, koji su opet povezani sa svakim neuronom koji se nalazi u izlaznom sloju. Ovako formirana mreža predstavlja potpuno povezanu mrežu. U izlaznom sloju se nalazi jedan neuron, koji odgovara zavisno promenljivoj veličini koja se fituje, slika 96. Maksimalan broj neurona u skrivenom sloju je bio 5, 10, 30, 50 i 100. Adekvatnost reprodukovanja eksperimentalnih podataka je praćena na osnovu koeficijenta korelacije ( $R$ ), koeficijenta determinacije ( $R^2$ ) i srednje kvadratne greške ( $MSE$ ). Na osnovu dobijenih rezultata odabran je jedan od algoritama povratnog prostiranja za optimalan broj neurona i na osnovu njega reprodukovana je vrednost zavisno promenljive u izlaznom sloju neuronske mreže.



Slika 96. Arhitektura veštačke neuronske mreže testirane za eksperimentalne podatke koalescentne filtracije

Glavni nedostatak upotrebe veštačkih neuronskih mreža jeste taj što se nezavisno promenljive unose kao polazni parametri, a zavisno promenljive kao izlazni parametri bez prethodnog poznavanja relacija i međusobnog uticaja između

njih. Modelovanje sistema sa ovakvim pristupom ne daje informacije o sistemu koji se modeluje. Međutim, tokom godina razvijeni su algoritmi koji kvantifikuju uticaj pojedinih polaznih parametara. To se vrši tako što se odrede relativni uticaji jačine veza formiranih između neurona treniranjem neuronske mreže između polaznih i izlaznih parametara (Olden i Jackson 2002).

U ovom radu su upotrebljeni Garson-ov (1991) i Yoon-ov (1993, 1994) model za određivanje relativnog uticaja ulaznih na izlaznu promenljivu. Oni se upotrebljavaju u arhitekturi mreže gde postoji jedan skriveni sloj (Mak i Blanning 1998). Ovi modeli su primenjeni i u istraživanjima drugih autora (Huang i saradnici 2004). Yoon-ov model, jednačina (15), meri relativni uticaj parametara u ulaznom sloju na parametre koji se nalaze u izlaznom sloju. Garson-ov model, jednačina (16), naglašava jačinu veze između parametara u skrivenom i izlaznom sloju i ne meri direktni uticaj (pozitivan ili negativan).

Glavni nedostatak Garson-ovog modela je što daje apsolutne vrednosti jačine veze između neurona. Na taj način se zanemaruju pozitivni, odnosno negativni uticaji pojedinih veza. To može dovesti do pogrešnog zaključivanja o tome koja veza je bitnija između pojedinih zavisnih i nezavisnih promenljivih u veštačkoj neuronskoj mreži (Olden i saradnici 2004).

$$con_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^J w_{ji}v_{jk}}{\sum_{i=1}^I \left| \sum_{j=1}^J w_{ji}v_{jk} \right|} \quad (15)$$

$$con_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^J \frac{|w_{ji}||v_{jk}|}{\sum_{i=1}^I |w_{ji}|}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{|w_{ji}||v_{jk}|}{\sum_{i=1}^I |w_{ji}|}} \quad (16)$$

Na osnovu dobijenih rezultata simulacijom, vrednosti koeficijenta korelacije, determinacije i srednje kvadratne greške između eksperimentalnih i računskih vrednosti dobijenih za nerđajući čelik, tabela 27, najbolje se pokazao Levemberg-Marquardt algoritam povratnog prostiranja. Za materijal polipropilen, tabela 28, dobijeni rezultati pokazuju da se najbolje slaganje postiže upotrebom Levemberg-Marquardt algoritama za broj neurona do 60, dok se daljim testiranjem najbolje slaganje postiže sa 86 neurona pomoću kvazi Njutnovog algoritma. U daljem razmatranju odabran je Levemberg-Marquardt algoritam povratnog prostiranja za nerđajući čelik, a kvazi Njutnov algoritam povratnog prostiranja za polipropilen, jer imaju najviše vrednosti koeficijenta korelacije i najniže vrednosti srednje kvadratne greške. Biranjem ovih algoritama nasumične vrednosti jačina veza iz-

Tabela 27. Vrednosti koeficijenta korelacije, determinacije i srednje kvadratne greške za različit maksimalan broj testiranih veštačkih neuronskih ćelija u skrivenom sloju za SS

| Algoritam             | ZAVISNO PROMENLJIVA |   |     | IZLAZNA KONCENTRACIJA                                       |     |   | MATERIJAL |   |     | NERĐAJUĆI ČELIK, SS   |     |   |     |   |  |
|-----------------------|---------------------|---|-----|---|-----|---|-----------|---|-----|---|-----|---|-----|---|--|
|                       | 5                   |   |     | 10  |     |   | 30        |   |     | 50  |     |   | 100 |   |  |
|                       | OBN <sup>5</sup>    | Statistika  | OBN | Statistika  | OBN | Statistika  | OBN       | Statistika  | OBN | Statistika  | OBN | Statistika  | OBN | Statistika  |  |
| trainlm <sup>6</sup>  | 5                   | R<br>0,88333<br>R <sup>2</sup><br>0,78027<br>MSE<br>0,00583 | 5   | R<br>0,88333<br>R <sup>2</sup><br>0,78027<br>MSE<br>0,00583 | 27  | R<br>0,90855<br>R <sup>2</sup><br>0,82547<br>MSE<br>0,00468 | 27        | R<br>0,90855<br>R <sup>2</sup><br>0,82547<br>MSE<br>0,00468 | 27  | R<br>0,90855<br>R <sup>2</sup><br>0,82547<br>MSE<br>0,00468 | 70  | R<br>0,91042<br>R <sup>2</sup><br>0,82887<br>MSE<br>0,00467 | 70  | R<br>0,91042<br>R <sup>2</sup><br>0,82887<br>MSE<br>0,00467 |  |
| trainscg <sup>7</sup> | 5                   | R<br>0,48588<br>R <sup>2</sup><br>0,23608<br>MSE<br>0,01978 | 7   | R<br>0,72842<br>R <sup>2</sup><br>0,53059<br>MSE<br>0,01221 | 19  | R<br>0,76927<br>R <sup>2</sup><br>0,76927<br>MSE<br>0,01069 | 19        | R<br>0,76927<br>R <sup>2</sup><br>0,76927<br>MSE<br>0,01069 | 50  | R<br>0,81555<br>R <sup>2</sup><br>0,66512<br>MSE<br>0,00876 | 97  | R<br>0,85978<br>R <sup>2</sup><br>0,73922<br>MSE<br>0,00720 | 97  | R<br>0,85978<br>R <sup>2</sup><br>0,73922<br>MSE<br>0,00720 |  |
| trainbfg <sup>8</sup> | 4                   | R<br>0,45803<br>R <sup>2</sup><br>0,20979<br>MSE<br>0,0223  | 10  | R<br>0,73586<br>R <sup>2</sup><br>0,5415<br>MSE<br>0,01203  | 19  | R<br>0,75807<br>R <sup>2</sup><br>0,57467<br>MSE<br>0,01117 | 19        | R<br>0,75807<br>R <sup>2</sup><br>0,57467<br>MSE<br>0,01117 | 40  | R<br>0,8562<br>R <sup>2</sup><br>0,73307<br>MSE<br>0,00883  | 81  | R<br>0,86119<br>R <sup>2</sup><br>0,74164<br>MSE<br>0,00702 | 81  | R<br>0,86119<br>R <sup>2</sup><br>0,74164<br>MSE<br>0,00702 |  |

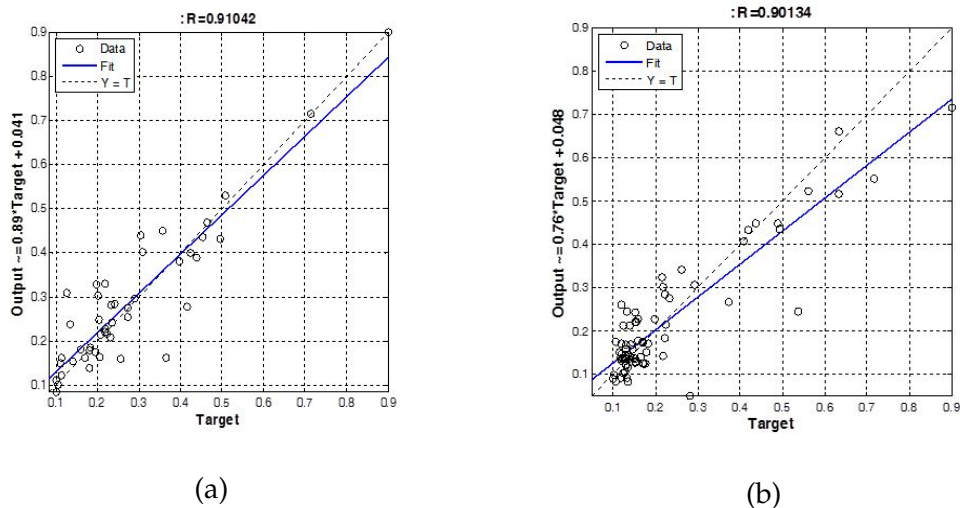
<sup>4</sup>Testiran broj neurona  
<sup>5</sup>Optimalan broj neurona  
<sup>6</sup>Levenberg-Marquardt  
<sup>7</sup>Konjugovanih gradijenata  
<sup>8</sup>Kvazi Njutnov

Tabela 28. Vrednosti koeficijenta korelacije, determinacije i srednje kvadratne greške za različit maksimalan broj testiranih veštačkih neuronskih ćelija u skrivenom sloju za PP

| TBN      | ZAVISNO PROMENLJIVA |                       |                               | IZLAZNA KONCENTRACIJA |                       |                               | MATERIJAL |                       |                               | POLIPROPILEN, PP |                       |                               |     |                       |                               |
|----------|---------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------|-----------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------------|-----|-----------------------|-------------------------------|
|          | OBN                 | Statistika            | 5                             | OBN                   | Statistika            | 10                            | OBN       | Statistika            | 30                            | OBN              | Statistika            | 50                            | OBN | Statistika            | 100                           |
| trainlm  | 3                   | $R$<br>$R^2$<br>$MSE$ | 0,75271<br>0,56657<br>0,01140 | 7                     | $R$<br>$R^2$<br>$MSE$ | 0,75922<br>0,57641<br>0,01127 | 17        | $R$<br>$R^2$<br>$MSE$ | 0,87116<br>0,75893<br>0,00635 | 37               | $R$<br>$R^2$<br>$MSE$ | 0,88522<br>0,78361<br>0,00581 | 60  | $R$<br>$R^2$<br>$MSE$ | 0,89921<br>0,80858<br>0,00502 |
| trainscg | 2                   | $R$<br>$R^2$<br>$MSE$ | 0,61926<br>0,38348<br>0,0164  | 6                     | $R$<br>$R^2$<br>$MSE$ | 0,6757<br>0,45657<br>0,01431  | 28        | $R$<br>$R^2$<br>$MSE$ | 0,69647<br>0,48507<br>0,01355 | 48               | $R$<br>$R^2$<br>$MSE$ | 0,80244<br>0,64392<br>0,00943 | 86  | $R$<br>$R^2$<br>$MSE$ | 0,81612<br>0,66605<br>0,00906 |
| trainbfg | 2                   | $R$<br>$R^2$<br>$MSE$ | 0,61284<br>0,37557<br>0,01644 | 6                     | $R$<br>$R^2$<br>$MSE$ | 0,69495<br>0,48295<br>0,01376 | 18        | $R$<br>$R^2$<br>$MSE$ | 0,78770<br>0,62048<br>0,01002 | 48               | $R$<br>$R^2$<br>$MSE$ | 0,80513<br>0,64823<br>0,00932 | 86  | $R$<br>$R^2$<br>$MSE$ | 0,90134<br>0,81242<br>0,00501 |

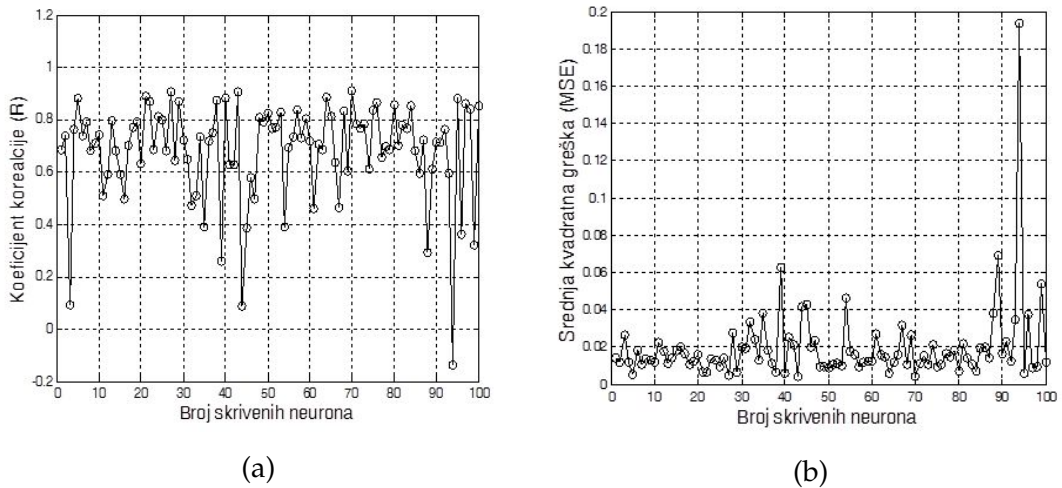
među neurona dodeljenih na početku simulacije imaju najmanji uticaj na treniranje neuronske mreže. Očekivano je da porastom broja neurona u skrivenom sloju dolazi do poboljšanja osobina predviđanja putem veštačke neuronske mreže, što je na osnovu primenjene analize i potvrđeno.

Porastom optimalnog broja neurona dolazi do opadanja srednje kvadratne greške, kao i porasta koeficijenta korelacije i determinacije. Dalje povećanje broja neurona u skrivenom sloju ne doprinosi značajnom poboljšanju rezultata predviđanja. Na osnovu urađenih simulacija za nerđajući čelik, najbolje poklapanje predikcije veštačke neuronske mreže je postignuto sa 70 neurona u skrivenom sloju, pomoću Levenberg-Marquardt funkcije treniranja. Linearna veza između eksperimentalno i računski dobijenih podataka ima visoke vrednosti, jer koeficijent korelacije iznosi 0,91042, slika 97a. Koeficijent korelacije za polipropilen ima nešto niže vrednosti i iznosi 0,89921, slika 97b, za optimalan broj neurona od 86 i kvazi Njutnove funkcije treniranja neuronske mreže. Na slikama 98 i 99 su prikazani rezultati za najbolje poklapanje eksperimentalnih i računski dobijenih podataka kada je variran opseg neurona između 1 i 100.

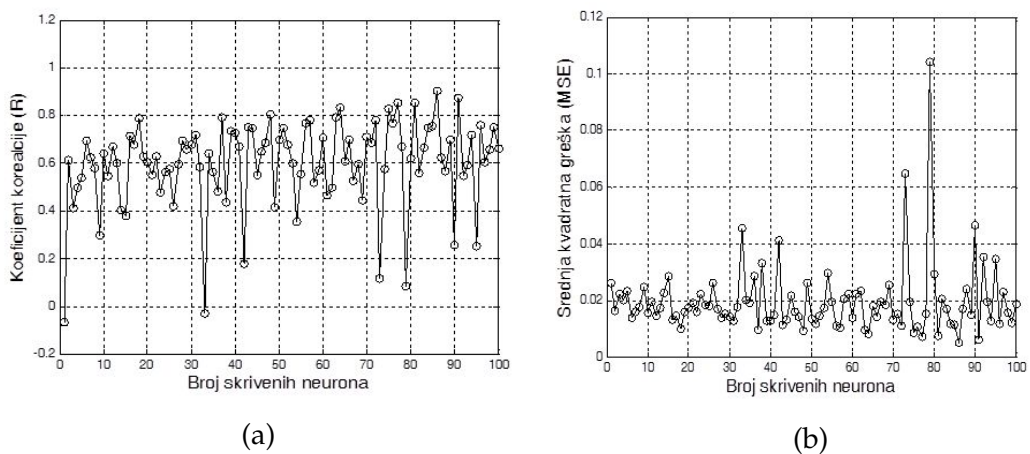


Slika 97. Dijagram regresije za (a) nerđajući čelik i (b) polipropilen

Srednja kvadratna greška, koja poredi računске i eksperimentalne podatke, kod nerđajućeg čelika ima vrednosti uglavnom ispod 0,2 duž celog opsega promene broja neurona, slika 98b. Kod polipropilena uočava se da pri malom broju neurona u skrivenom sloju (do 30) srednja kvadratna greška osciluje oko vrednosti 0,2, a zatim se ne uočava takva pravilnost sa daljim porastom broja neurona, slika 99b.



Slika 98. Dijagram zavisnosti (a) koeficijenta korelacije i (b) srednje kvadratne greške od broja neurona u skrivenom sloju za materijal od nerđajućeg čelika

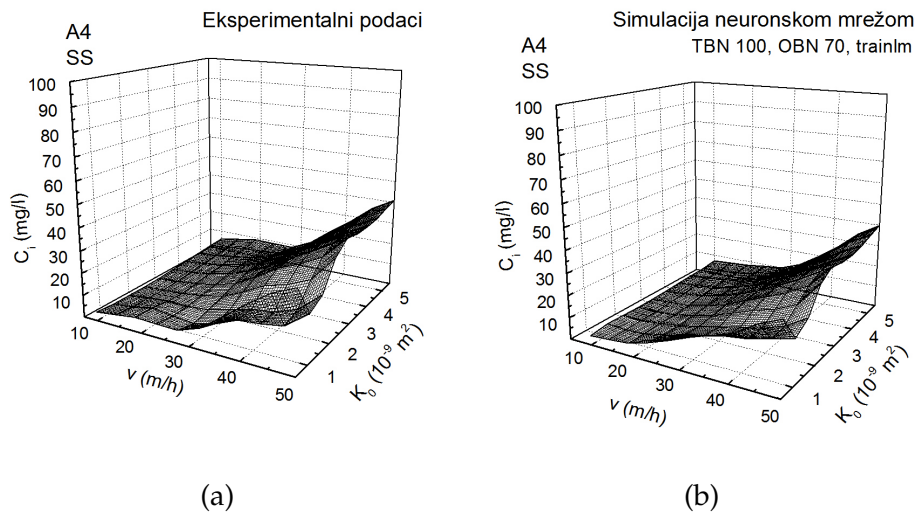


Slika 99. Dijagram zavisnosti (a) koeficijenta korelacije i (b) srednje kvadratne greške od broja neurona u skrivenom sloju za materijal od polipropilena

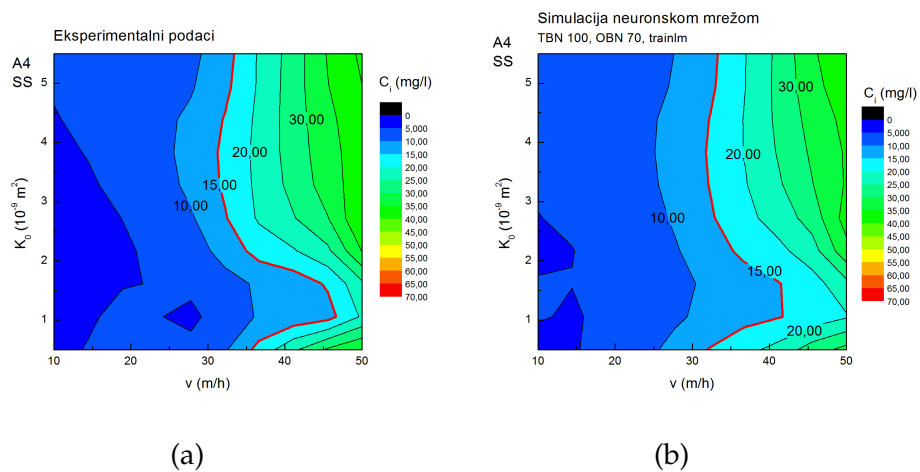
Rezultat simulacije eksperimentalnih podataka koalescentne filtracije veštačkom neuronskom mrežom u vidu zavisnosti izlazne koncentracije ulja od brzine fluida i permeabilnosti sloja za nerđajući čelik su prikazane u obliku 3D i konturnih dijagrama za svako ispitivano ulje na slikama 100, 101, 102, 103, 104 i 105.

Na osnovu prikazanih dijagrama za ulje A4 i nerđajući čelik na slici 100 uočava se da u oblasti viših vrednosti permeabilnosti sloja (od  $3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  do  $5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ ) izgled površine na 3D dijagramu za simulirane podatke je sličan površini koja je prikazana na osnovu eksperimentalnih podataka. Posmatrajući konturne dijagrame, slika 101, uočava se da je oblik konture izo-izlazne koncentracije zadržan, ali sa odstupanjem pri višim vrednostima radnih brzina i najnižim vrednostima

permeabilnosti. Takođe, uočava se da dolazi do odstupanja i u oblasti visoke permeabilnosti i niskih radnih brzina.

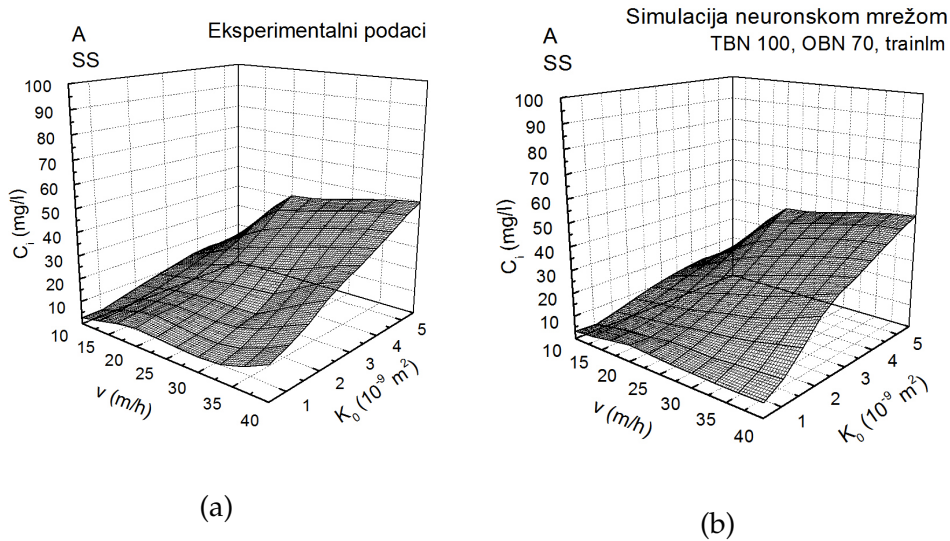


Slika 100. 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A4 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom

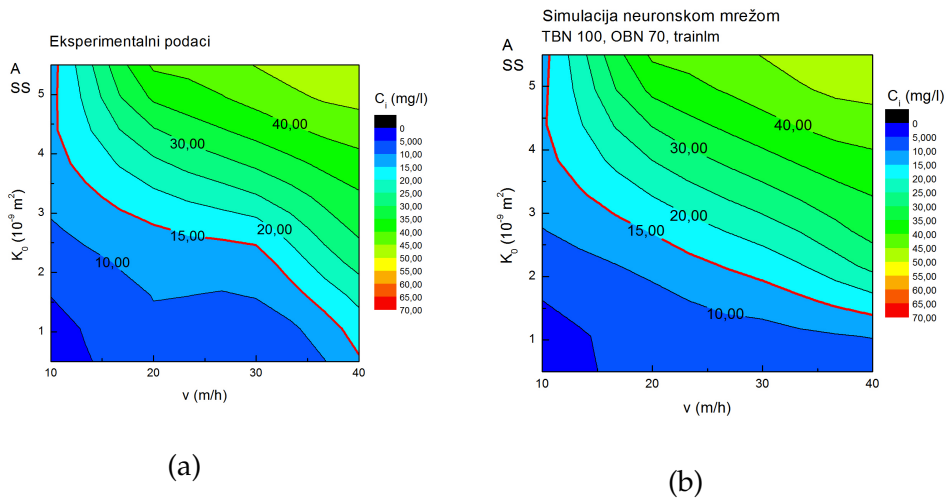


Slika 101. Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A4 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom

Ukoliko se posmatra ulje A uočava se da su slične površine eksperimentalnih i računskih podataka, osim u oblasti visokih vrednosti permeabilnosti i radnih brzina, slika 102 i 103.



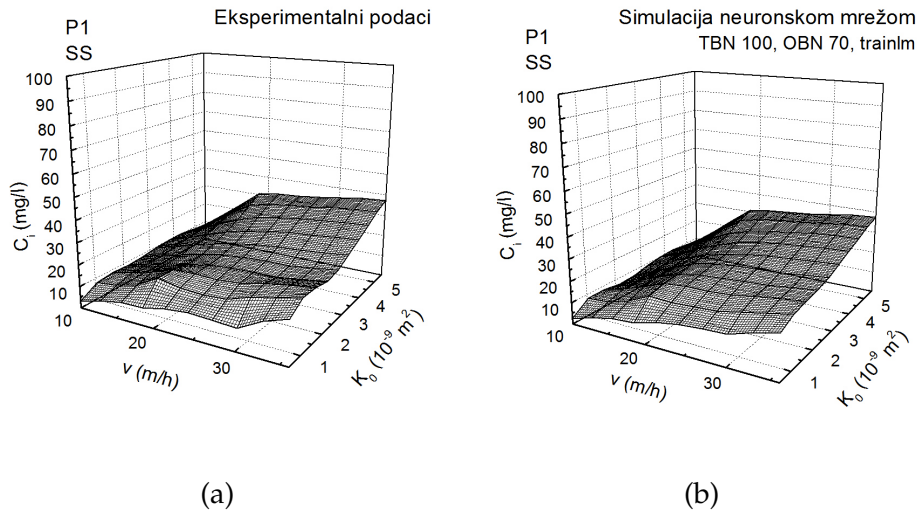
Slika 102. 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom



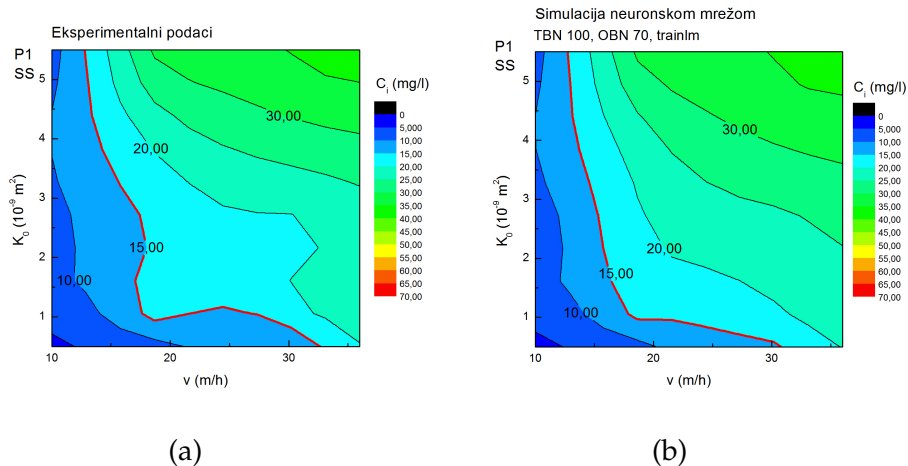
Slika 103. Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom

Ukoliko se posmatra grafički prikaz eksperimentalnih i računskih podataka za ulje P1, slika 104 i 105, uočava se da kontura izo-izlazne koncentracije računskih podataka ima trend kao kod eksperimentalnih, ali ipak postoje odstupanja.





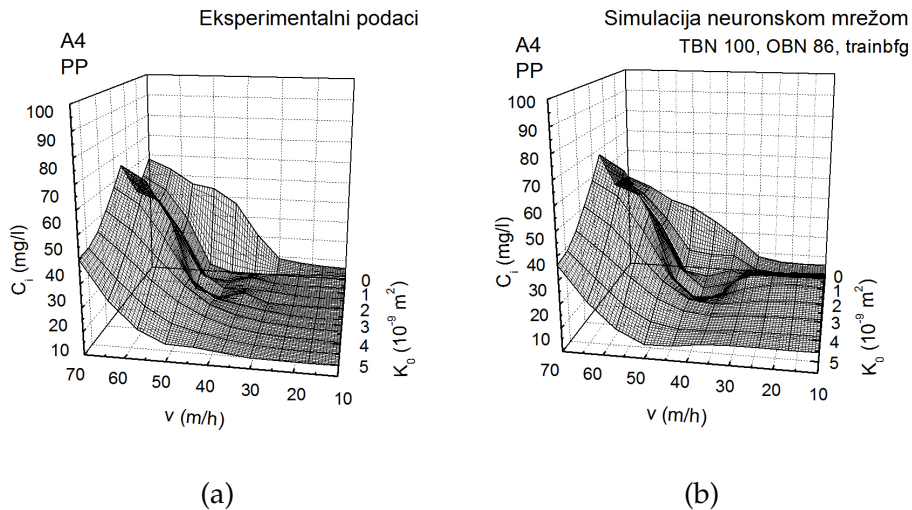
Slika 104. 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja P1 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom



Slika 105. Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja P1 od brzine i permeabilnosti sloja nerđajućeg čelika za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom

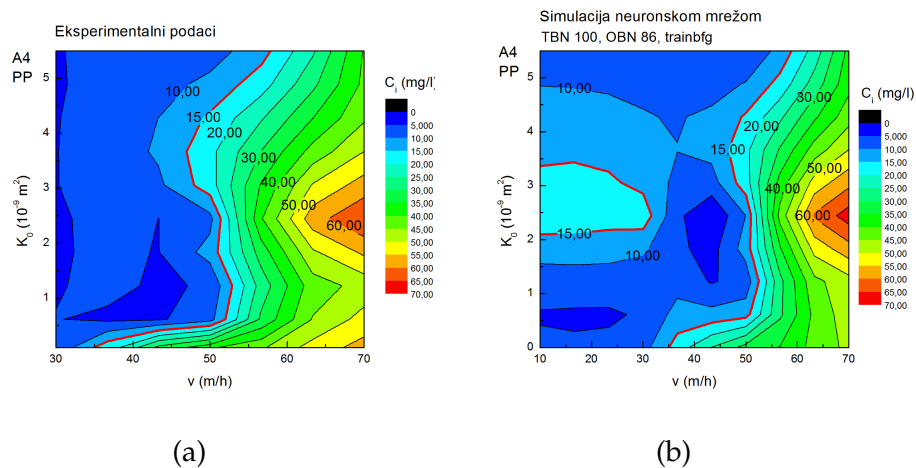
Kod polipropilena se uočava da postoji više odstupanja u rezultatima simulacije nego kod nerđajućeg čelika. Rezultati eksperimentalnih i računskih vrednosti za polipropilen i sva ulja se mogu videti na slikama 106, 107, 108, 109, 110 i 111.

Za zavisnost izlazne koncentracije od brzine i permeabilnosti sloja polipropilena za ulje A4 na 3D dijagramu, slika 106, se uočava znatno odstupanje računskih u odnosu na eksperimentalne podatke. Neslaganje se zapaža, kako u oblasti visokih vrednosti brzina i najniže vrednosti permeabilnosti, tako i u širokom opsegu permeabilnosti za brzine do 30 m/h. To potvrđuju i konturni dijagrami, jer u oblasti niskih vrednosti brzina na konturnom dijagramu, kod računskih



Slika 106. 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A4 od brzine i permeabilnosti sloja polipropilena za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom

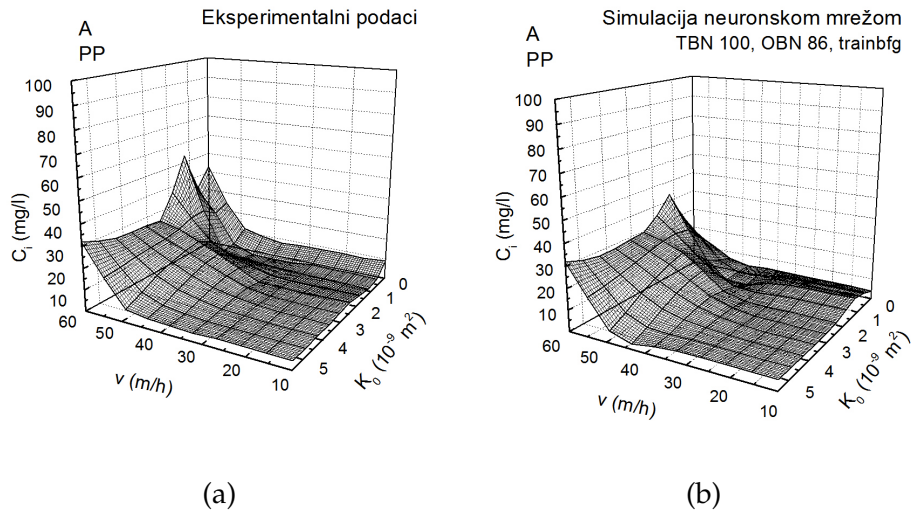
podataka, uočava se oblast izlazne koncentracije koja prelazi 15 mg/l, slika 107. Kod eksperimentalnih podataka, ta oblast ne postoji, što znači da nije dobro fitovanje podataka u toj oblasti. Za ove podatke simulacija veštačkim neuronskim mrežama pokazuje najlošije poklapanje eksperimentalnih i računskih podataka.



Slika 107. Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A4 od brzine i permeabilnosti sloja polipropilena za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom

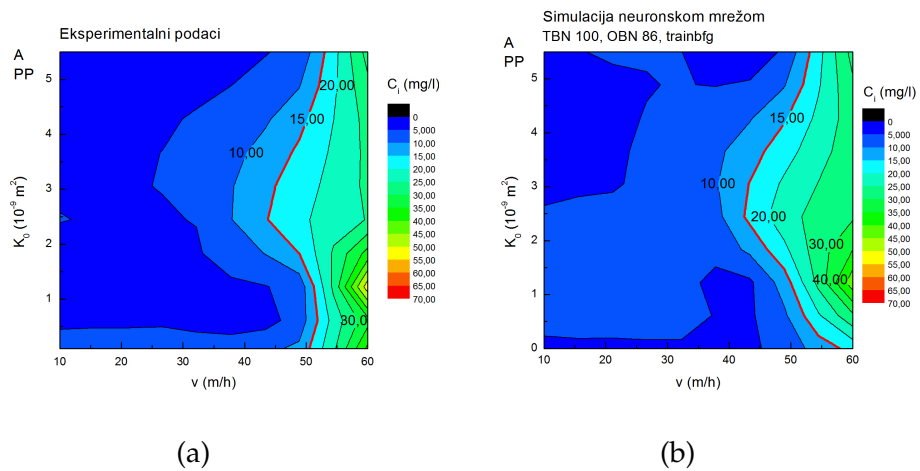
Na osnovu rezultata dobijenih za ulje A i materijal polipropilen na 3D dijagramu se uočava neslaganje u oblasti visokih vrednosti brzina i najnižih vrednosti permeabilnosti, slika 108.

Na konturnim dijagramima se uočava dobro slaganje eksperimentalnih i računskih podataka konture izo-izlaznih koncentracija izuzev krajnjih granica vi-



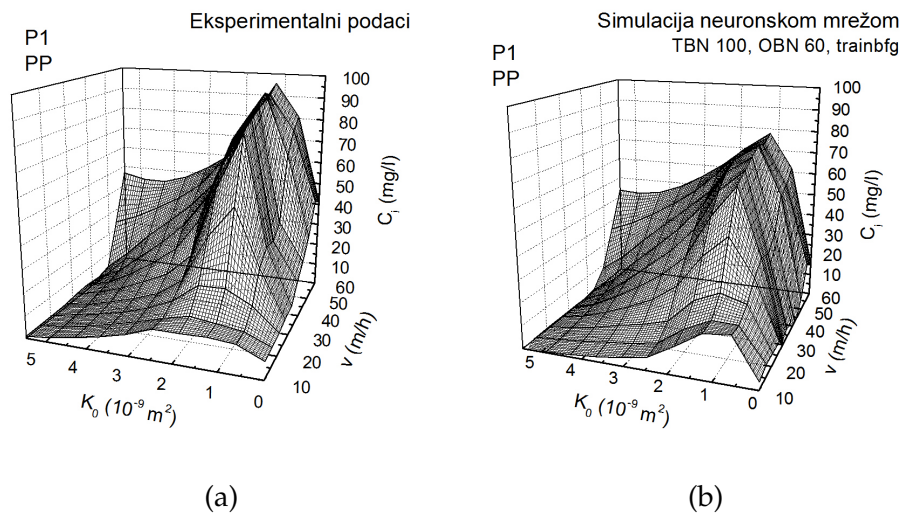
Slika 108. 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A od brzine i permeabilnosti sloja polipropilena za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom

sokih vrednosti permeabilnosti i radnih brzina, slika 109. Ono što se uočava kod konturinih dijagrama jeste da u oblasti radnih brzina od 10 m/h do 30 m/h kod računskih podataka vrednost izlazne koncentracije je u oblasti između 5 mg/l i 10 mg/l, dok je za eksperimentalne vrednosti nešto viša i u opsegu je između 10 mg/l i 15 mg/l.

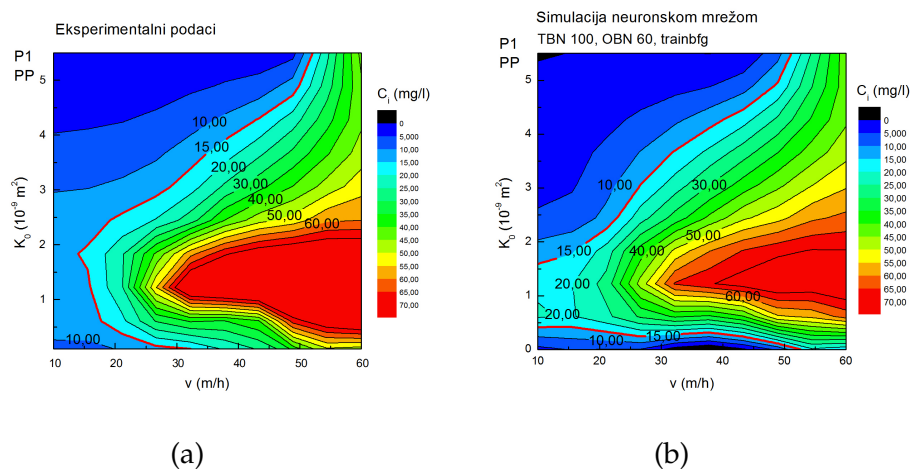


Slika 109. Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja A od brzine i permeabilnosti sloja polipropilena za (a) eksperimentalne podatke (b) podatke dobijene modelom

Eksperimentalni i računski podaci u obliku površine na 3D dijagramima za ulje P1, dati na slikama 110 i 111, imaju sličan trend.



Slika 110. 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja P1 od brzine i permeabilnosti sloja polipropilena za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom



Slika 111. Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja P1 od brzine i permeabilnosti sloja polipropilena za (a) eksperimentalne podatke i (b) podatke dobijene modelom

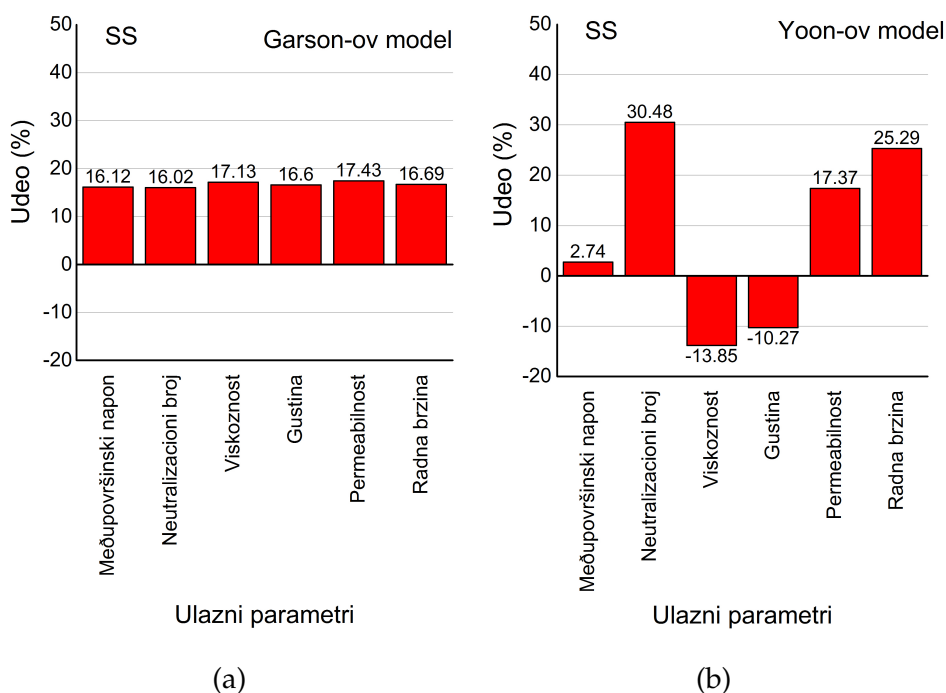
Na osnovu dobijenih računskih rezultata upotrebom veštačkih neuronskih mreža može se doći do zaključka da su veze između veličina međusobno u jačoj korelaciji. Uočeno je da su poređeni eksperimentalni i računski rezultati za materijal nerđajući čelik u boljem slaganju u odnosu na rezultate dobijene za polipropilen. Za odabrane ulazne parametre i variran veliki broj neurona u skrivenom sloju, poklapanje računskih i eksperimentalnih podataka je zadovoljavajuće

i ukazuje da postoji jaka veza između ulaznih i izlaznog parametra tj. izlazne koncentracije, što potvrđuju eksperimentalni podaci.

Uočeno je da su eksperimentalni i računski rezultati za materijal nerđajući čelik u boljem slaganju u odnosu na rezultate dobijene za polipropilen. Za odabrane ulazne parametre i variran veliki broj neurona u skrivenom sloju, poklapanje računskih i eksperimentalnih podataka je zadovoljavajuće i ukazuje da postoji jaka veza između ulaznih i izlaznog parametra tj. izlazne koncentracije, što potvrđuju eksperimentalni podaci.

Pored koeficijenta korelacije, determinacije i srednje kvadratne greške kao rezultat su dobijeni podaci o relativnom uticaju ulaznih na izlazne parametre prema Garson-ovom i Yoon-ovom modelu za nerđajući čelik, slika 112, i polipropilen, slika 113.

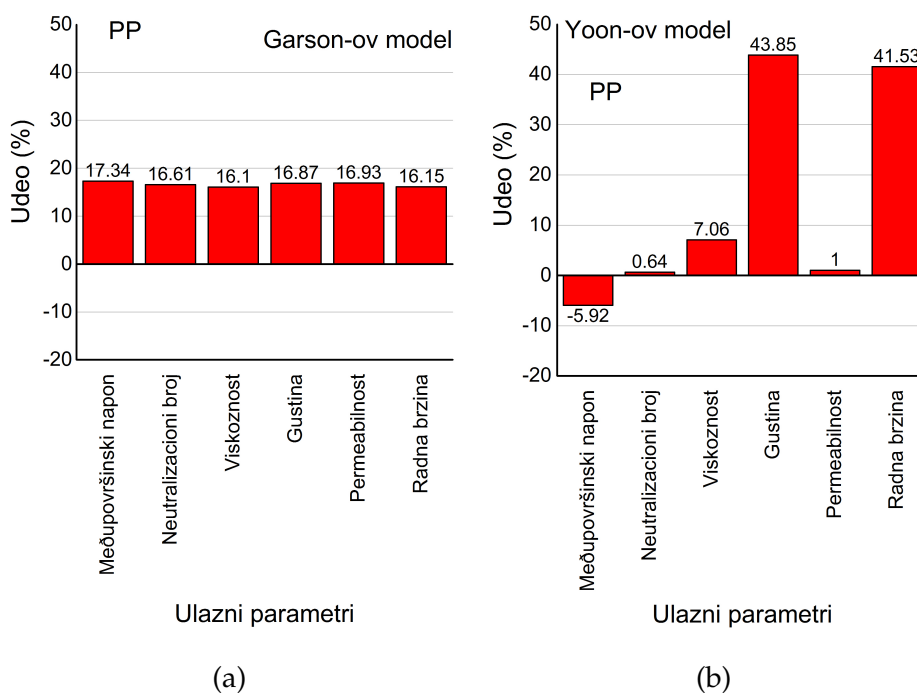
Za nerđajući čelik, Gason-ov model, za optimalan broj neurona sa najvećim koeficijentom korelacije, je pokazao da svi polazni parametri podjednako daju doprinos za odgovarajuće vrednosti izlazne koncentracije, slika 112a. To nije u skladu sa dobijenim eksperimentalnim podacima. Yoon-ov model, slika 112b, ukazuje da se povećanje izlazne koncentracije javlja ukoliko se povećaju neutralizacioni broj (30,48%), radna brzina (25,29%) i permeabilnost (17,37%) što potvrđuju 3D dijagrami na slikama 63, 64, 65 i 85. Negativan uticaj na izlaznu koncentraciju prema Yoon-ovom modelu imaju viskoznost i gustina tj. sa njihovim pove-



Slika 112. Uticaj ulaznih parametara na izlazni parametar (izlaznu koncentraciju dispergovane faze) za nerđajući čelik po (a) Garson-ovom modelu i (b) Yoon-ovom modelu

ćanjem dolazi do snižavanja izlazne koncentracije dispergovane faze. Međupovršinski napon prema rezultatima simulacije nema veći značajan doprinos.

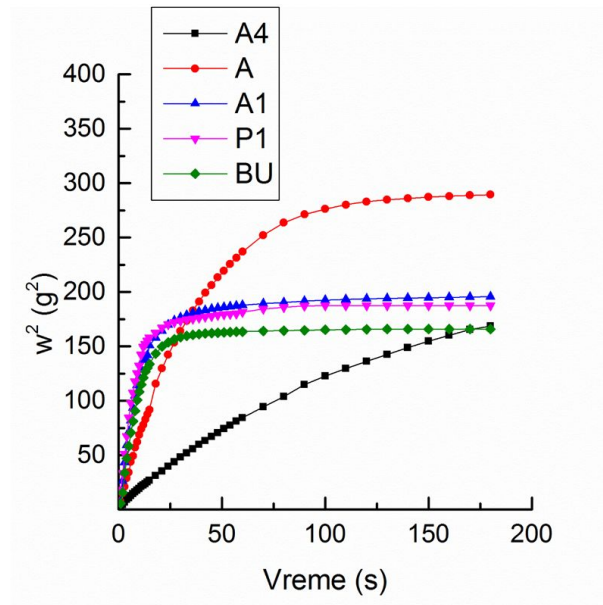
Za materijal polipropilen, Garson-ov model daje kao rezultat podjednake značajnosti ulaznim parametrima koji su odabrani, 113a. To, takođe, nije u skladu sa eksperimentalnim podacima. Kod Yoon-ovog modela povećanje svih ulaznih nezavisno promenljivih, osim međupovršinskog napona, utiču na povećanje izlazne koncentracije dispergovane faze, slika 113b. Najbitnije nezavisno promenljive su gustina, zastupljena sa 43,85% i radna brzina, zastupljena sa 41,53%. Na slikama 87b, 88b i 89b se može uočiti pozitivan uticaj povećanja brzine na izlaznu koncentraciju, što potvrđuje i ispitivani model.



Slika 113. Uticaj ulaznih parametara na izlaznu koncentraciju dispergovane faze za polipropilen po (a) Garson-ovom modelu i (b) Yoon-ovom modelu

## 4.6 Modifikovana metoda kinetike upijanja tečnosti i njena primena na ispitivane filtarske materijale

U literaturi nije nađeno da je neko određivao kinetiku upijanja vlakana čelika. Rezultati kinetike upijanja tečnosti realizovani opisanom aparaturom za sloj vlakana od nerđajućeg čelika pri permeabilnosti  $K_{03}$  za sva ispitivana ulja dati su na slici 114.



Slika 114. Dijagram kinetike upijanja ispitivanih ulja vlaknima SS

Na osnovu oblika krivih može se dati sledeći komentar. Vlakna SS najbrže upijaju ulje A, a najsporije ulje A4. Ostala tri ulja A1, P1 I BU su bliske kinetike upijanja.

Prema usvojenoj metodologiji tačke ostvarene u periodu od 0 s do 15 s čine pravu liniju. Nagibi tog pravolinijskog dela služe za izračunavanje odnosa liofilne i hidrofилne ( $L/H$ ) kvašljivosti materijala prema formuli 17.

$$\frac{L}{H} = \frac{S_0 \eta_0 C_w \rho_w^2 \gamma_w}{S_w \eta_w C_0 \rho_0^2 \gamma_0} \quad (17)$$

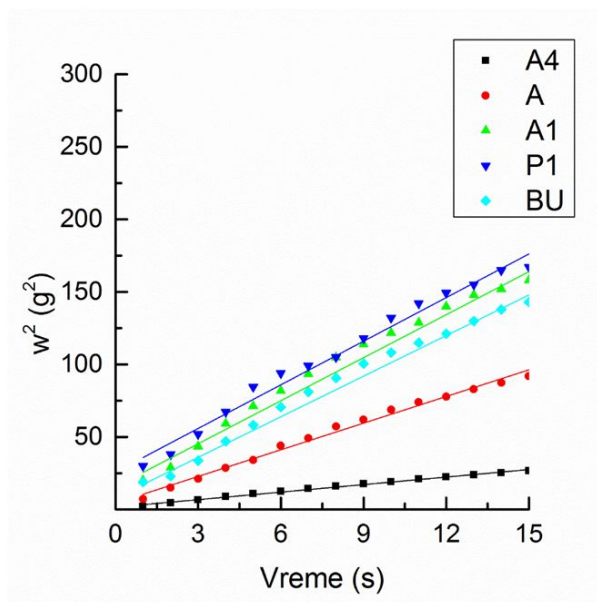
gde su:

- $S_0, S_w$  - nagibi za ulja i vodu, redom,
- $\mu_0, \mu_w$  - viskoznost ulja i vode, redom,
- $C_0, C_w$  - karakteristična konstanta uređaja, redom
- $\rho_0, \rho_w$  - gustine ulja i vode, redom,
- $\gamma_0, \gamma_w$  - površinski napon ulja i vode, redom.

Vrednost odnosa  $L/H$  koji se određuje eksperimentalno iz nagiba zavisi od viskoznosti, gustine i površinskog napona ispitivanih tečnosti. Raspon tih vrednosti

na temperaturi od 20°C nalazi se u sledećem opsegu: viskoznost vode 1,02 mP·s, opseg viskoznosti ulja od 28 mP·s do 1207 mP·s, gustina vode 1000 kg/m<sup>3</sup>, opseg gustine ulja od 879,0 kg/m<sup>3</sup> do 918,9 kg/m<sup>3</sup>, površinski napon vode 72,0 mN/N, opseg površinskih napona ulja od 26,56 mN/N do 30,16 mN/N.

Na slici 115 dat je grafički prikaz pravih za sva ispitivana ulja.



Slika 115. Dijagram linearnog dela kinetike upijanja tečnosti za vlakna SS

Kada je reč o brzini upijanja u prvih 15 s tada se vidi da je nagib za ulje A4 ostao najmanji, ali je prvi sledeći za ulje A. Ostala tri ulja imaju bliske i nešto veće nagibe čije su numeričke vrednosti date dalje u tekstu.

Numeričke vrednosti nagiba krivih za sve ispitivane tečnosti date su u tabeli 29. Neophodno je ukazati da je vrednost nagiba za vodu izuzetno mala, takođe je mala i viskoznost vode. Pošto se dati razlomak u jednačini deli sa ove dve male numeričke vrednosti, za očekivati je da se dobiju veliki brojevi.

Tabela 29. Vrednosti ostvarenih nagiba za sva ulja i vodu sa standardnom devijacijom

| Ulja | SS             |       |
|------|----------------|-------|
|      | $S_0$          | $R^2$ |
| A4   | 1,728 ± 0,083  | 0,994 |
| A    | 6,122 ± 0,456  | 0,993 |
| A1   | 11,521 ± 0,867 | 0,982 |
| P1   | 11,866 ± 0,592 | 0,972 |
| BU   | 9,116 ± 0,424  | 0,978 |
| Voda | 0,006 ± 0,0002 | 0,971 |

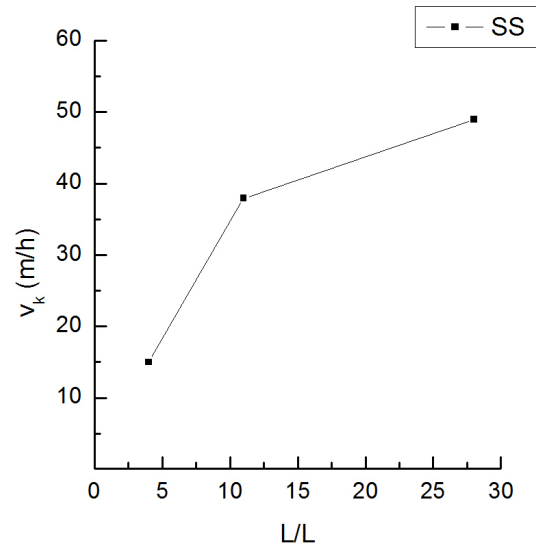


U tabeli 30 date su numeričke vrednosti  $L/H$  odnosa. Vrednosti se kreću od 37802 za ulje BU do 1048340 za ulje A4. Ovakvi brojevi su neuporedivi i neupotrebljivi u opisivanju sklonosti vlakana ka kvašenju nekim tečnostima. Kako su istraživači za određivanje  $L/H$  odnosa koristili dve standardne tečnosti od kojih ni jedna ne egzistira u realnom sistemu došlo se do zaključka da je to pogrešno. Kao polarna tečnost korišćena je dejonizujuća voda, a umesto dizela korišćeno je standardno ulje oznake Viscor oil 1487 koje simulira osobine dizela. Ovako odabrane tečnosti mogu biti relevantne možda za sistem voda u ulju, a nikako ne za sistem ulje u vodi. Kako priroda dispergovanog ulja značajno utiče na efikasnost koalescencije, normalno je da se ta i takva ulja uvedu u test. Pošto su ispitivana ulja polarna, onda nije potrebno imati vodu kao polazni fluid. Zato je odlučeno da se kao druga standardna tečnost uvede nepolarno belo ulje, oznake BU. Na taj način došlo se do nove veličine koja predstavlja odnos liofilno-liofobne kvašljivosti materijala koja je obeležena kao  $L/L$  odnos. Kada je umesto vode izvršeno izračunavanje sa uljem BU došlo se do brojeva koji su odgovarajući za upotrebu, tabela 30. Vrednost  $L/L$  odnosa kreće se od 4 za ulja P1 i A1 do 28 za ulje A4. Logičnost dobijenih vrednosti biće potvrđena korelacijom sa rezultatima koalescencije u sloju SS.

Tabela 30. Vrednosti  $L/H$  odnosa i  $L/L$  za sva ulja

| Ulja | SS      |       |
|------|---------|-------|
|      | $L/H$   | $L/L$ |
| A4   | 1048340 | 28    |
| A    | 397956  | 11    |
| A1   | 154250  | 4     |
| P1   | 167739  | 4     |
| BU   | 37802   | 1     |

Ako se analizira da li postoji zavisnost vrednosti  $v_k$  od  $L/L$  odnosa može se doći do sledećih konstatacija: vrednosti  $v_k$  za tri ispitivana ulja pri permeabilnosti  $K_{03}$  uslovljena su odnosom  $L/L$ , slika 116; što je veća vrednost veličine  $L/L$ , to je veća vrednost i realizovanog  $v_k$ . Ova zapažanja dovode do zaključka da se pomenuta metoda može koristiti za testiranje sklonosti nekog filtarskog materijala ka separaciji nekog ulja i da se na osnovu toga možda može vršiti selekcija materijala.



Slika 116. Zavisnost kritične brzine od promene L/L odnosa

---

## 5. ZAKLJUČAK

Prikazani rezultati ukazuju da se ispitivana ulja mogu uspešno separisati slojem vlakana od nerđajućeg čelika posmatrajući zadati sadržaj ulja na izlazu samo pri određenim brzinama fluida i permeabilnosti sloja, što je slučaj sa svakim vlaknastim materijalom.

Efikasnost separacije kapi ispitivanih ulja vlaknima od nerđajućeg čelika kreće se u opsegu od 91% do 99% za opseg brzina fluida od 10 m/h do 50 m/h. To ukazuje da su odabrani uslovi rada, pre svega prečnik vlakana materijala u odnosu na ulaznu veličinu kapi, kao i način njihovog pakovanja, uz obezbeđivanje poznate i definisane permeabilnosti, bili adekvatni i povoljni za željenu separaciju.

Sloj vlakana od nerđajućeg čelika najuspešnije separiše ulje koje ima najveću viskoznost, kao i najveći neutralizacioni broj, zatim ulje koje ima srednju viskoznost, a najlošije ulje koje ima najniže vrednosti obe odabrane veličine. Ovaj redosled nije specifičan za vlakna od nerđajućeg čelika, jer se isti redosled javlja i kod vlakana polimera. No, vlakna nerđajućeg čelika ostvaruju znatno niže vrednosti efikasnosti separacije ulja niže viskoznosti, te se može reći da su osetljiva na promenu prirode ulja, što je veliki nedostatak za primenu u industriji.

Prilikom upotrebe nerđajućeg čelika efikasnija separacija se odvija pri niskim vrednostima permeabilnosti, dok je kod polimernog materijala obrnut slučaj. To se može objasniti time da se, u postojećim okolnostima, kod posmatranih materijala realizuju različiti dominantni mehanizmi koalescencije u sloju.

U okviru ove doktorske disertacije definisana je nova veličina, *izo-izlazna koncentracija*, koja u grafičkom prikazu obeležava granice prilikom analize simultanog uticaja osobina dispergovane faze, geometrije sloja i radnih uslova.

Oblik zavisnosti izlazne koncentracije od brzine i permeabilnosti za oba ispitivana materijala, nerđajući čelik i polipropilen, je sličan. Polipropilen ostvaruje veći radni opseg brzina u odnosu na nerđajući čelik. Međutim, nerđajući čelik uspešnije separiše ulje najniže viskoznosti u oblasti niskih vrednosti permeabilnosti i pri niskim radnim brzinama u odnosu na polipropilen. Zadovoljavajući kvalitet separacije se kod polipropilena ostvaruje pri najvišoj permeabilnosti i

---

širokom opsegu brzina. Kod nerđajućeg čelika najniža permeabilnost ostvaruje najveće vrednosti kritične brzine za ceo opseg viskoznosti, dok je kod polipropilena upravo obrnuto.

Uspešno je izvršena modifikacija metode kinetike upijanja tečnosti za primenu na ispitivane filtarske materijale. Utvrđeno je da su vrednosti kritične brzine,  $v_k$ , za tri ispitivana ulja pri permeabilnosti  $K_{03}$  uslovljena odnosom liofilno-liofobne kvašljivosti materijala. Što je veća vrednost odnosa liofilno-liofobne kvašljivosti materijala to je veća vrednost i realizovane kritične brzine. To bi značilo da se ovim testom određivanja kinetike upijanja tečnosti može testirati sklonost nekog filtarskog materijala ka separaciji nekog ulja i da se na osnovu toga može vršiti selekcija materijala.

Primenom veštačkih neuronskih mreža na obradu eksperimentalnih podataka koalescentne filtracije za nerđajući čelik i polipropilen došlo se do zaključka da je moguće formirati model koji dobro fituje eksperimentalne podatke. Nakon testiranja značajnosti doprinosa ulaznih parametara formirane veštačke neuronske mreže, ustanovljeno je da su osobine dispergovane faze (međupovršinski napon, viskoznost, neutralizacioni broj i gustina), osobine sloja (permeabilnost) i operativni uslovi (radna brzina) u dobrom slaganju sa eksperimentalnim podacima. Za nerđajući čelik najveći doprinos imaju neutralizacioni broj, permeabilnost i brzina, dok su za polipropilen to gustina i brzina.

---

## 6. LITERATURA

- Abdel-Ghani, M.; Davies, G. Simulation of Non-Woven Fibre Mats and the Application to Coalescers. *Chem. Eng. Sci.*, 1985, *40(1)*, 117–129.
- Agarwal, S.; von Arnim, V.; Stegmaier, T.; Planck, H.; Agarwal, A. Role of Surface Wettability and Roughness in Emulsion Separation. *Sep. Purif. Technol.*, 2013a, *107*, 19–25.
- Agarwal, S.; von Arnim, V.; Stegmaier, T.; Planck, H.; Agarwal, A. Effect of Fibrous Coalescer Geometry and Operating Conditions on Emulsion Separation. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2013b, *52(36)*, 13164–13170.
- Akagi, Y.; Okada, K.; Dote, T.; Yoshioka, N. Separation of Oil from Oil-In-Water Mixture by Glass Fiber Beds. *J. Chem. Eng. Jpn.*, 1988, *21(5)*, 457–462.
- Akagi, Y.; Okada, K.; Dote, T.; Yoshioka, N. Effect of Wettability of Glass Fiber Beds on Separation of Oil Droplets Dispersed in Water. *J. Chem. Eng. Jpn.*, 1990, *23(1)*, 105–108.
- Austin, D.; Jeffreys, G. Coalescence Phenomena in Liquid-Liquid Systems. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 1981, *31(1)*, 475–488.
- Badrnezhad, R.; Mirza, B. Modeling and Optimization of Cross-Flow Ultrafiltration Using Hybrid Neural Network-Genetic Algorithm Approach. *J. Ind. Eng. Chem.*, 2014, *20(2)*, 528–543.
- Bansal, S.; von Arnim, V.; Stegmaier, T.; Planck, H. Effect of Fibrous Filter Properties on the Oil-In-Water-Emulsion Separation and Filtration Performance. *J. Hazard. Mater.*, 2011, *190(1)*, 45–50.
- Basu, S. A Study on Effect of Wetting on Mechanism of Coalescence in a Model Coalescer. *J. Colloid Interface Sci.*, 1993, *159(1)*, 68–76.

- 
- Baughman, D.; Liu, Y. *Neural Networks in Bioprocessing and Chemical Engineering*. Number v. 1 in *Neural Networks in Bioprocessing and Chemical Engineering*. Academic Press, 1995.
- Brasquet, C.; Le Cloirec, P. Pressure Drop Through Textile Fabrics—Experimental Data Modelling Using Classical Models and Neural Networks. *Chem. Eng. Sci.*, 2000, 55(15), 2767–2778.
- Burganos, V.; Skouras, E.; Paraskeva, C.; Payatakes, A. Simulation of the Dynamics of Depth Filtration of Non-Brownian Particles. *AIChE J.*, 2001, 47(4), 880–894.
- Chan, S.; Chen, Z.; Dong, M. Experimental and Numerical Study of Initial Water Mobility in Bitumen Reservoirs and Its Effect on SAGD. *J. Petrol. Sci. Eng.*, 2012, 92, 30–39.
- Chawaloeshonsiya, N.; Painmanakul, P. Study of Cutting-Oil Emulsion Separation by Coalescer Process in Terms of Medium Characteristics and Bed Packing. *Sep. Sci. Technol.*, 2014, 49(18), 2960–2967.
- Chen, B.; Cheng, A.-D.; Chou, T.-W. A Nonlinear Compaction Model for Fibrous Preforms. *Composites Part A*, 2001, 32(5), 701–707.
- Chu, Z.; Feng, Y.; Seeger, S. Oil/Water Separation with Selective Superantwetting/Superwetting Surface Materials. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2015, 54(8), 2328–2338.
- Clayfield, E. J.; Dixon, A. G.; Foulds, A. W.; Miller, R. L. The Coalescence of Secondary Dispersions: I. The Effect of Wettability and Surface Energy. *J. Colloid Interface Sci.*, 1985a, 104(2), 500–511.
- Clayfield, E. J.; Dixon, A. G.; Foulds, A. W.; Miller, R. L. The Coalescence of Secondary Dispersions: II. The Role of Electrokinetic Properties in Determining Coalescence Performance. *J. Colloid Interface Sci.*, 1985b, 104(2), 512–519.
- Davies, G.; Jeffreys, G. Coalescence of Droplets in Fiber Beds. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 1970, 9(3), 519–520.
- Dimov, N.; Ahmed, E.; Alargova, R.; Kralchevsky, P.; Durbut, P.; Broze, G.; Mehreteab, A. Deposition of Oil Drops on a Glass Substrate in Relation to the Process of Washing. *J. Colloid Interface Sci.*, 2000, 224(1), 116–125.
- Dong, M.; Dullien, F. A New Model for Immiscible Displacement in Porous Media. *Transp. Porous Media*, 1997, 27(2), 185–204.
- Dong, M.; Dullien, F. A.; Dai, L.; Li, D. Immiscible Displacement in the Interacting Capillary Bundle Model Part I. Development of Interacting Capillary Bundle Model. *Transp. Porous Media*, 2005, 59(1), 1–18.
-

- 
- Dong, M.; Dullien, F. A.; Dai, L.; Li, D. Immiscible Displacement in the Interacting Capillary Bundle Model Part II. Applications of Model and Comparison of Interacting and Non-Interacting Capillary Bundle Models. *Transp. Porous Media*, 2006, 63(2), 289–304.
- Fahim, M.; Akbar, A. Removal of Fine Oily Hazes from Wastewater Using Deep Fibrous Bed Coalescer. *J. Environ. Sci. Health., Part A Environ. Sci.*, 1984, 19(3), 299–319.
- Fahim, M.; Othman, F. Coalescence of Secondary Dispersions in Composite Packed Beds. *J. Dispersion Sci. Technol.*, 1987, 8(5-6), 507–523.
- Garson, G. D. Interpreting Neural-Network Connection Weights. *AI Expert*, 1991, 6(4), 46–51.
- Goh, A. Back-Propagation Neural Networks for Modeling Complex Systems. *Artif. Intell. Eng.*, 1995, 9(3), 143–151.
- Govedarica, D. *Koalescencija mineralnih ulja u vlaknastom sloju*. Doktorska disertacija, Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija, 2011.
- Govedarica, D.; Sokolović, D. *Separacija emulzija koalescencijom u sloju vlakana*. Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2014.
- Govedarica, D. D.; Šećerov-Sokolović, R. M.; Sokolović, D. S.; Sokolović, S. M. Evaluation of the Separation of Liquid–Liquid Dispersions by Flow through Fiber Beds. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2012, 51(49), 16085–16091.
- Govedarica, D. D.; Šećerov-Sokolović, R. M.; Sokolović, D. S.; Sokolović, S. M. A Novel Approach for the Estimation of the Efficiency of Steady-State Fiber Bed Coalescence. *Sep. Purif. Technol.*, 2013, 104, 268–275.
- Govedarica, D. D.; Šećerov-Sokolović, R. M.; Kiralj, A. I.; Govedarica, O. M.; Sokolović, D. S.; Hadnadev-Kostić, M. S. Separation of Mineral Oil Droplets Using Polypropylene Fibre Bed Coalescence. *Hem. ind.*, 2015, 69(4), 339–345.
- Grilc, V.; Golob, J.; Modic, R. Drop coalescence in liquid/liquid dispersions by flow through glass fibre beds. *Chem. Eng. Res. Des.*, 1984, 62(1), 48–52.
- Grilc, V.; Golob, J.; Modic, R. Drop Coalescence in Liquid/Liquid Dispersions by Flow Through Glass Fibre Beds. II. *Chem. Eng. Res. Des.*, 1986, 64(1), 67–70.
- Hazlett, R. N. Fibrous Bed Coalescence of Water – Steps in the Coalescence Process. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 1969a, 8(4), 625–632.
- Hazlett, R. N. Fibrous Bed Coalescence of Water – Role of a Sulfonate Surfactant in the Coalescence Process. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 1969b, 8(4), 633–640.
-

- 
- Himmelblau, D. M. Applications of Artificial Neural Networks in Chemical Engineering. *Korean journal of chemical engineering*, 2000, 17(4), 373–392.
- Hoang, H.; Hoxha, D.; Belayachi, N.; Do, D.-P. Modelling of Two-Phase Flow in Capillary Porous Medium by a Microscopic Discrete Approach. *Eur. J. Environ. Civ. En.*, 2013, 17(6), 444–452.
- Hoskins, J. C.; Himmelblau, D. Artificial Neural Network Models of Knowledge Representation in Chemical Engineering. *Computers & Chemical Engineering*, 1988, 12(9), 881–890.
- Huang, Z.; Chen, H.; Hsu, C.-J.; Chen, W.-H.; Wu, S. Credit Rating Analysis with Support Vector Machines and Neural Networks: A Market Comparative Study. *Decis. Support. Syst.*, 2004, 37(4), 543–558.
- Jackson, G. W.; James, D. F. The Permeability of Fibrous Porous Media. *Can. J. Chem. Eng.*, 1986, 64(3), 364–374.
- Jeffreys, G.; Davies, G. *Coalescence of Liquid Droplets and Liquid Dispersion*. Pergamon Press, New York, USA, 1971.
- Jokić, A. *Modelovanje "cross-flow" mikrofiltracije suspenzija kvasca primenom koncepta neuronskih mreža i postupka odzivne površine*. Doktorska disertacija, Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija, 2010.
- Jokić, A. I.; Grahovac, J. A.; Dodić, J. M.; Dodić, S. N.; Popov, S. D.; Zavargo, Z. Z.; Vučurović, D. G. Modelovanje alkoholne fermentacije gustog soka šećerne repe primenom veštačkih neuronskih mreža. *Hem. ind.*, 2012, 66(2), 211–221.
- Kabza, K. G.; Gestwicki, J. E.; McGrath, J. L. Contact Angle Goniometry as a Tool for Surface Tension Measurements of Solids, Using Zisman Plot Method. A Physical Chemistry Experiment. *J. Chem. Educ.*, 2000, 77(1), 63.
- Krasinski, A. Filter Media: Multilayer PP Filters for the Separation of O/W Emulsions. *Filtr. Sep.*, 2014, 51(6), 22–28.
- Krasinski, A.; Wierzba, P. Removal of Emulsified Water from Diesel Fuel Using Polypropylene Fibrous Media Modified by Ionization during Meltblow Process. *Sep. Sci. Technol.*, 2015, 50(10), 1541–1547.
- Kulkarni, P. S.; Patel, S. U.; Chase, G. G. Layered Hydrophilic/Hydrophobic Fiber Media for Water-In-Oil Coalescence. *Sep. Purif. Technol.*, 2012, 85, 157–164.
- Kulkarni, P. *Mixed Hydrophilic/Hydrophobic Fiber Media for Liquid-Liquid Coalescence*. Doctoral thesis, University of Akron, Ohio, United States, 2011.



- 
- Lee, C. H.; Johnson, N.; Drelich, J.; Yap, Y. K. The Performance of Superhydrophobic and Superoleophilic Carbon Nanotube Meshes in Water–Oil Filtration. *Carbon*, 2011, 49(2), 669–676.
- Li, J. *Coalescence of the Oil-In-Water Emulsions in Fibrous and Granular Beds*. Master thesis, University of Regina, Saskatchewan, Canada, 2003.
- Li, J.; Gu, Y. Coalescence of Oil-In-Water Emulsions in Fibrous and Granular Beds. *Sep. Purif. Technol.*, 2005, 42(1), 1–13.
- Lu, H.; Yang, Q.; Xu, X.; Wang, H.-L. Effect of the Mixed Oleophilic Fibrous Coalescer Geometry and the Operating Conditions on Oily Wastewater Separation. *Chem. Eng. Technol.*, 2016, 39(2), 255–262.
- Lucignano, C.; Montanari, R.; Tagliaferri, V.; Ucciardello, N. Artificial Neural Networks to Optimize the Extrusion of an Aluminium Alloy. *J. Intell. Manuf.*, 2010, 21(4), 569–574.
- Ma, S.; Kang, Y.; Cui, S. Oil and Water Separation Using a Glass Microfiber Coalescing Bed. *J. Dispersion Sci. Technol.*, 2014, 35(1), 103–110.
- Magiera, R.; Blass, E. Separation of Liquid-Liquid Dispersions by Flow Through Fibre Beds. *Filtr. Sep.*, 1997, 34(4), 369–376.
- Mak, B.; Blanning, R. W. An Empirical Measure of Element Contribution in Neural Networks. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. - Part C*, 1998, 28(4), 561–564.
- Marques, F.; Souza, L. d. F.; Rebolho, D.; Caporali, A.; Belo, E.; Ortolan, R. Application of Time-Delay Neural and Recurrent Neural Networks for the Identification of a Hingeless Helicopter Blade Flapping and Torsion Motions. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.*, 2005, 27(2), 97–103.
- Mead-Hunter, R.; Bergen, T.; Becker, T.; O’Leary, R. A.; Kasper, G.; Mullins, B. J. Sliding/Rolling Phobic Droplets Along a Fiber: Measurement of Interfacial Forces. *Langmuir*, 2012, 28(7), 3483–3488.
- Moorthy, K. *Effect of Surface Energy of Fibers on Coalescence Filtration*. Master thesis, University of Akron, Ohio, United States, 2007.
- Mukherjee, I.; Routroy, S. Comparing the Performance of Neural Networks Developed by Using Levenberg–Marquardt and Quasi-Newton with the Gradient Descent Algorithm for Modelling a Multiple Response Grinding Process. *Expert Syst. Appl.*, 2012, 39(3), 2397–2407.
- Mullins, B. J.; Braddock, R. D. Capillary Rise in Porous, Fibrous Media During Liquid Immersion. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2012, 55(21), 6222–6230.
-

- 
- Mullins, B. J.; Braddock, R. D.; Kasper, G. Capillarity in Fibrous Filter Media: Relationship to Filter Properties. *Chem. Eng. Sci.*, 2007, 62(22), 6191–6198.
- Olden, J. D.; Jackson, D. A. Illuminating The "Black Box": A Randomization Approach for Understanding Variable Contributions in Artificial Neural Networks. *Ecological modelling*, 2002, 154(1), 135–150.
- Olden, J. D.; Joy, M. K.; Death, R. G. An Accurate Comparison of Methods for Quantifying Variable Importance in Artificial Neural Networks Using Simulated Data. *Ecological Modelling*, 2004, 178(3), 389–397.
- Painmanakul, P.; Kongkangwarn, K.; Chawaloessphonsiya, N. Treatment of Oily Wastewater by Fibrous Coalescer Process: Stage Coalescer and Model Prediction. *World Acad. Sci. Eng.*, 2009, 58, 317.
- Patel, S. U.; Chase, G. G. Separation of Water Droplets from Water-In-Diesel Dispersion Using Superhydrophobic Polypropylene Fibrous Membranes. *Sep. Purif. Technol.*, 2014, 126, 62–68.
- Patel, S. U.; Kulkarni, P. S.; Patel, S. U.; Chase, G. G. The Effect of Surface Energy of Woven Drainage Channels in Coalescing Filters. *Sep. Purif. Technol.*, 2012, 87, 54–61.
- Rebelein, F.; Blass, E. Separation of Micro-Dispersions in Fibre-Beds. *Filtr. Sep.*, 1990, 27(5), 360–363.
- Ryan, J. N.; Elimelech, M. Colloid Mobilization and Transport in Groundwater. *Colloids Surf., A*, 1996, 107, 1–56.
- Sareen, S. S.; Rose, P.; Gudesen, R. C.; Kintner, R. C. Coalescence in Fibrous Beds. *AIChE J.*, 1966, 12(6), 1045–1050.
- Sarkar, B.; Sengupta, A.; De, S.; DasGupta, S. Prediction of Permeate Flux During Electric Field Enhanced Cross-Flow Ultrafiltration—a Neural Network Approach. *Sep. Purif. Technol.*, 2009, 65(3), 260–268.
- Sato, A.; Sha, Z.; Palosaari, S. Neural Networks for Chemical Engineering Unit Operations. *Chem. Eng. Technol.*, 1999, 22(9), 732–739.
- Sharifi, H.; Shaw, J. Secondary Drop Production in Packed-Bed Coalescers. *Chem. Eng. Sci.*, 1996, 51(21), 4817–4826.
- Shin, C.; Chase, G. The Effect of Wettability on Drop Attachment to Glass Rods. *J. Colloid Interface Sci.*, 2004a, 272(1), 186–190.
- Shin, C.; Chase, G. Water-In-Oil Coalescence in Micro-Nanofiber Composite Filters. *AIChE J.*, 2004b, 50(2), 343–350.

- 
- Shin, C.; Chase, G. G.; Reneker, D. H. The Effect of Nanofibers on Liquid–Liquid Coalescence Filter Performance. *AIChE J.*, 2005, 51(12), 3109–3113.
- Skouras, E.; Burganos, V.; Paraskeva, C.; Payatakes, A. Simulation of the Dynamic Behavior of Horizontal Granular Filters. *Sep. Purif. Technol.*, 2007, 56(3), 325–339.
- Skouras, E.; Burganos, V.; Paraskeva, C.; Payatakes, A. Phenomenological Description and Network Simulation of Horizontal Filtration Dynamics. *Sep. Purif. Technol.*, 2011, 80(1), 105–118.
- Sokolović, D. S.; Šećerov-Sokolović, R. M.; Sokolović, S. M. Rheology of Unstable Mineral Emulsions. *Hem. ind.*, 2013, 67(2), 293–301.
- Speth, H.; Pfennig, A.; Chatterjee, M.; Franken, H. Coalescence of Secondary Dispersions in Fiber Beds. *Sep. Purif. Technol.*, 2002, 29(2), 113–119.
- Spielman, L. A. *Separation of Finely Dispersed Liquid-Liquid Suspensions by Flow through Fibrous Media*. Doctoral thesis, University of California, Berkeley, United States, 1968.
- Spielman, L. A.; Goren, S. L. Experiments in Coalescence by Flow through Fibrous Mats. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 1972, 11(1), 73–83.
- Spielman, L. A.; Su, Y. Coalescence of Oil-in-Water Suspensions by Flow through Porous Media. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 1977, 16(2), 272–282.
- Spielman, L. A.; Goren, S. L. Progress in Induced Coalescence and a New Theoretical Framework for Coalescence by Porous Media. *Ind. Eng. Chem.*, 1970, 62(10), 10–24.
- Tan, M.; He, G.; Nie, F.; Zhang, L.; Hu, L. Optimization of Ultrafiltration Membrane Fabrication Using Backpropagation Neural Network and Genetic Algorithm. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, 2014, 45(1), 68–75.
- Tørå, G.; Øren, P.-E.; Hansen, A. A dynamic network model for two-phase flow in porous media. *Transp. Porous Media*, 2012, 92(1), 145–164.
- Vinson, C. G. *The Coalescence of Micron-Size Drops in Liquid-Liquid Dispersions in Flow past Fine-Mesh Screen*. Doctoral thesis, University of Michigan, Michigan, United States, 1965.
- Vinson, C. G.; Churchill, S. W. Removal of Drops from Liquid–Liquid Dispersions upon Flow Through Screens. *Chem. Eng. J.*, 1970, 1(2), 110–119.
- Viswanadam, G.; Chase, G. G. Contact Angles of Drops on Curved Superhydrophobic Surfaces. *J. Colloid Interface Sci.*, 2012, 367(1), 472–477.

- 
- Voyutskii, S.; Akh'yanova, K.; Panich, R.; Fodiman, N. Mechanism of Separation of the Disperse Phase of Emulsions During Filtration. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 91, 1155–1158, 1953.
- Vulić, T. *Uticao permeabilnosti sloja i orijentacije toka fluida na koalescenciju emulzije u poroznom sloju*. Magistarski rad, Tehnološki fakultet, Novi Sad, 2000.
- Wang, J.; Dullien, F. A.; Dong, M. Fluid Transfer Between Tubes in Interacting Capillary Bundle Models. *Transp. Porous Media*, 2008, 71(1), 115–131.
- Yang, B.; Chang, Q. Wettability Studies of Filter Media Using Capillary Rise Test. *Sep. Purif. Technol.*, 2008, 60(3), 335–340.
- Yao, X.; Song, Y.; Jiang, L. Applications of Bio-Inspired Special Wettable Surfaces. *Adv. Mater.*, 2011, 23(6), 719–734.
- Yoon, Y.; Swales Jr, G.; Margavio, T. M. A Comparison of Discriminant Analysis Versus Artificial Neural Networks. *J. Oper. Res. Soc.*, 1993, 44(1), 51–60.
- Yoon, Y.; Guimaraes, T.; Swales, G. Integrating Artificial Neural Networks with Rule-Based Expert Systems. *Decis. Support. Syst.*, 1994, 11(5), 497–507.
- Šecerov Sokolović, R. M.; Sokolović, S. M.; Đoković, B. D. Effect of Working Conditions on Bed Coalescence of an Oil-In-Water Emulsion Using a Polyurethane Foam Bed. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1997, 36(11), 4949–4953.
- Šević, S. *Uticao ležišne vode na proizvodnju i transport nafte i gasa*. Doktorska disertacija, DIT NIS-Naftagas, Novi Sad, 2000.
- Šecerov-Sokolović, R. M.; Sokolović, S. M.; Šević, S. N.; Mihajlović, D. Influence of Oil Properties on Bed Coalescence Efficiency. *Sep. Sci. Technol.*, 1996, 31(15), 2089–2104.
- Šecerov Sokolović, R.; Sokolović, S.; Šević, S. Oily Water Treatment Using a New Steady-State Fiber-Bed Coalescer. *J. Hazard. Mater.*, 2009, 162(1), 410–415.
- Šecerov Sokolović, R.; Govedarica, D.; Sokolović, D.; Sokolović, S. Separacija dispergovanog ulja primenom koalescera sa vlaknastim slojem. *Zaštita materijala*, 2014, 55(3), 259–263.
- Šecerov-Sokolović, R. M.; Sokolović, S. M. Effect of the Nature of Different Polymeric Fibers on Steady-State Bed Coalescence of an Oil-In-Water Emulsion. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2004, 43(20), 6490–6495.
- Šecerov-Sokolović, R. M.; Stanimirović, O. P.; Sokolović, S. M. The Influence of Fibrous Bed Bulk Density on the Bed Properties. *Hem. ind.*, 2003a, 57(7-8), 335–340.
-

- 
- Šećerov-Sokolović, R. M.; Vulić, T. J.; Sokolović, S. M.; Marinković Nedučin, R. P. Effect of fibrous bed permeability on steady-state coalescence. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2003b, 42(13), 3098–3102.
- Šećerov-Sokolović, R. M.; Vulić, T. J.; Sokolović, S. M. Effect of Fluid Flow Orientation on the Coalescence of Oil Droplets in Steady-State Bed Coalescers. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2006, 45(11), 3891–3895.
- Šećerov-Sokolović, R. M.; Vulić, T. J.; Sokolović, S. M. Effect of Bed Length on Steady-State Coalescence of Oil-In-Water Emulsion. *Sep. Purif. Technol.*, 2007, 56(1), 79–84.
- Šećerov-Sokolović, R. M.; Govedarica, D. D.; Sokolović, D. S. Separation of Oil-In-Water Emulsion Using Two Coalescers of Different Geometry. *J. Hazard. Mater.*, 2010, 175(1), 1001–1006.
- Šećerov-Sokolović, R. M.; Govedarica, D. D.; Sokolović, D. S. Selection of Filter Media for Steady-State Bed Coalescers. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2014, 53(6), 2484–2490.
- Šećerov Sokolović, R. M.; Sokolović, D. S.; Govedarica, D. D. Liquid-Liquid Separation Using Steady-State Bed Coalescer. *Hem. Ind.*, 2016, 70(4), 367–381.
- Šećerov-Sokolović, R.; Sokolović, S. *Koalescencija u poroznom sloju*. Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2000.