



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
TEHNOLOŠKI FAKULTET NOVI SAD  
HEMIJSKO INŽENJERSTVO

**ISTOVREMENI UTICAJ  
PERMEABILNOSTI SLOJA,  
PREČNIKA VLAKNA I ULAZNE  
KONCENTRACIJE ULJNE FAZE NA  
SEPARACIJU MINERALNIH ULJA IZ  
OTPADNIH VODA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor:  
dr Aleksandar Jokić, vanredni profesor

Kandidat:  
Srđan Sokolović, dipl.ing.

Novi Sad, 2020 godine

UNIVERZITET U NOVOM SADU

## Zahvalnica

Poštovanom mentoru vanrednom profesoru dr Aleksandru Jokiću se zahvaljujem na pomoći prilikom izrade ovog rada kao i na ukazanom poverenju, pruženom znanju i stručnim savetima bez čijeg truda i zalaganja ovaj rad ne bi mogao biti realizovan.

Veliku zahvalnost na pomoći, korisnim savetima i sugestijama tokom izrade dela ove disertacije dugujem dopisnom članu SANU prof. dr Vladi Veljkoviću.

Takođe se zahvaljujem vanrednom profesoru dr Bojani Ikonić, vanrednom profesoru dr Oskaruu Beri i docentu dr Arpadu Kiralju na korisnim savetima i sugestijama u toku izrade disertacije.

Najveće hvala mojim roditeljima, sestri i prijateljima na podršci!

Srđan

**UNIVERZITET U NOVOM SADU**

**TEHNOLOŠKI FAKULTET**

**KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

Redni broj: RBR	
Identifikacioni broj: IBR	
Tip dokumentacije: TD	Monografska dokumentacija
Tip zapisa: TZ	Tekstualni štampani materijal
Vrsta rada (dipl., mag., dokt.): VR	Doktorska disertacija
Ime i prezime autora: AU	Srđan Sokolović
Mentor (titula, ime, prezime, zvanje): MN	Dr Aleksandar Jokić, vanredni profesor
Naslov rada: NR	Istovremeni uticaj permeabilnosti sloja, prečnika vlakna i ulazne koncentracije uljne faze na separaciju mineralnih ulja iz otpadnih voda
Jezik publikacije: JP	Srpski (latinica)
Jezik izvoda: JI	srp. / eng.

Zemlja publikovanja: ZP	Republika Srbija
Uže geografsko područje: UGP	AP Vojvodina
Godina: GO	2020
Izdavač: IZ	autorski reprint
Mesto i adresa: MA	21000 Novi Sad, Bulevar cara Lazara 1
Fizički opis rada: FO	6 poglavlja, 154 strane, 16 tabela, 115 slika, 191 literaturnih navoda
Naučna oblast: NO	Tehnološko inženjerstvo
Naučna disciplina: ND	Hemijsko inženjerstvo
Predmetna odrednica, ključne reči: PO	Koalescencija, vlaknasti sloj, zauljena voda, separacija
UDK	
Čuva se: ČU	Biblioteka Tehnološkog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu, 21000 Novi Sad, Bulevar cara Lazara 1
Važna napomena: VN	Nema
Izvod: IZ	Cilj ove doktorske disertacije je da dâ doprinos u proučavanju nedovoljno poznatih fenomena koalescentne filtracije, kako bi se smanjio obim potrebnih poluindustrijskih istraživanja prilikom projektovnja filtera za neku konkretnu primenu. Svi materijali korišćeni u ovoj doktorskoj disertaciji su otpadni materijali, čija primena kao filtarskog punjenja predstavlja poseban doprinos održivom razvoju. Jedan od ciljeva ove doktorske disertacije je proučavanje istovremenog uticaja promene permeabilnosti sloja i debljine vlakana na osobine

	<p>sloja, pad pritiska i efikasnost separacije dispergovanog ulja iz kontinualne vodene faze. Uticaj geometrije sloja proučavan je na slojevima homogene i heterogene geometrije po dubini. Realizovano je detaljno ispitivanje izgleda, morfologije vlakana, kao i strukture sloja, izgleda i rasporeda njegovih pora, primenom skening elektronske mikroskopije i optičke mikroskopije. U radu je dat pregled istraživanja primene vlakana različite prirode (slobodnih i međusobno povezanih, krutih i elastičnih, različite debljine te time i različite vijugavosti) i njihovih slojeva. Takođe, dat je doprinos proučavanju istovremenog uticaja promena ulazne koncentracije dispergovane faze i permeabilnosti sloja. U veći deo ostvarenih istraživanja uključeno je i proučavanje uticaja prirode uljne faze, pri čemu je neophodno istaći da su sva korišćena ulja mineralnog porekla. Cilj optimizacije rada koalescera bio je da se pronađu uslovi u kojima se postiže maksimalna vrednost kritične brzine uz minimalni pad pritiska.</p>
<p>Datum prihvatanja teme od strane Senata: DP</p>	<p>27. 12. 2018. Godine</p>
<p>Datum odbrane: DO</p>	
<p>Članovi komisije: (ime i prezime / titula / zvanje / naziv organizacije / status) KO</p>	<p>predsednik: dr Bojana Ikonić, vanredni profesor Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu  član/mentor: dr Aleksandar Jokić, vanredni profesor Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu  član: dr Vlada Veljković, redovni profesor, dopisni član SANU Tehnološki fakultet Leskova, Univerzitet u Nišu  član: dr Oskar Bera, vanredni profesor Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu  član: dr Arpad Kiralj, docent Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu</p>

# University of Novi Sad

Faculty of Technology

Key word documentation

Accession number: ANO	
Identification number: INO	
Document type: DT	Monograph documentation
Type of record: TR	Textual printed material
Contents code: CC	Ph.D. thesis
Author: AU	Srdan Sokolović
Mentor: MN	Dr Aleksandar Jokić, associate professor
Title: TI	Simultaneous effect of bed permeability, fiber diameter and oil phase inlet concentration on the separation of mineral oils from wastewater
Language of text: LT	Serbian (latin)
Language of abstract: LA	eng. / srp.
Country of publication:	Republic of Serbia

CP	
Locality of publication: LP	AP Vojvodina
Publication year: PY	2020
Publisher: PU	Author reprint
Publication place: PP	Faculty of Technology, 2100 Novi Sad, Bulevar cara Lazara 1
Physical description: PD	6 chapters, 154 pages, 16 tables, 115 figures, 191 references
Scientific field SF	Chemical Engineering
Scientific discipline SD	Process Design, Environmental Engineering, Separation
Subject, Key words SKW	Coalescence, fiber bed, mineral oil, oily wastewater
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 this doctoral dissertation is to contribute to the study of insufficiently known phenomena of coalescent filtration, in order to reduce the number of pilot plant experiments required for designing filters for some specific applications. All the used materials are waste materials the use of which as a filter media contributes to sustainable development. One of the goals of this doctoral dissertation is to study the simultaneous effect of changes in bed permeability and fiber thickness on bed properties, pressure drop and the efficiency of the dispersed oil separation from a continuous aqueous phase. The effect of bed geometry was studied by applying the beds of homogeneous and heterogeneous

	<p>geometry in depth. A detailed examination of the appearance and morphology of the fibers, as well as the structure of the bed and the appearance and arrangement of its pores, was performed by scanning electron microscopy and optical microscopy. The doctoral dissertation gives an overview of the testing of fibers of different nature (free and interconnected, rigid and elastic, of different thickness and thus of different meandering) and their beds. The simultaneous effect of the changes in the input dispersed phase concentration and the bed permeability was also investigated. Much of the conducted research includes the study of the impact of the nature of the oil phase, and it is necessary to point out that all used oils are mineral oils. The goal of optimizing the operation of a coalescer was to find the conditions providing the maximum critical velocity value with a minimum pressure drop.</p>
<p>Accepted on Senate on: AS</p>	<p>27. 12. 2018.</p>
<p>Defended: DE</p>	
<p>Thesis Defend Board: DB</p>	<p>president: dr Bojana Ikonić, associate professor, Faculty of Technology Novi Sa, University of Nov Sad</p> <p>member/methor: dr Aleksandar Jokić, associate professor, Faculty of Technology Novi Sad, University of Nov Sad</p> <p>member: dr Vlada Veljković, full professor, corresponding member of SASA Faculty of Technology Leskovac, University of Niš</p> <p>member: dr Oskar Bera, associate professor Faculty of Technology Novi Sad, University of Nov Sad</p> <p>member: dr Arpad Kiralj, assistant professor, Faculty of Technology Novi Sad, University of Nov Sad</p>



# SADRŽAJ

<b>1. UVOD I CILJ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. TEORIJSKI DEO.....</b>	<b>3</b>
2.1. Mehanizmi koalescencije u poroznom sloju.....	4
2.2. Osobine vlaknastog poroznog sloja.....	9
2.3. Geometrija sloja vlakana i njen uticaj na separaciju kapi.....	14
2.3.1. Uticaj debljine vlakana.....	15
2.3.2. Uticaj permeabilnosti sloja.....	38
2.4. Uticaj ulazne koncentracije dispergovane faze na koalescentnu filtraciju	51
<b>3. EKSPERIMENTALNI DEO.....</b>	<b>75</b>
3.1. Eksperimentalni program.....	76
3.2. Metode rada, eksperimentalne tehnike i obrada rezultata.....	78
3.2.1. Osobine sloja.....	78
3.2.2. Osobine filtarskog materijala.....	80
3.2.3. Osobine ulja.....	80
3.2.4. Osobine emulzije.....	81
3.2.5. Obrada rezultata.....	82
3.3. Eksperimentalni uređaji i uslovi rada.....	83
3.4. Prikaz rezultata.....	85
3.4.1. Osobine filtarskog materijala.....	85
3.4.2. Osobine dispergovane faze.....	85
<b>4. ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA.....</b>	<b>87</b>
4.1. Proučavanje morfologije i osobine vlakana i sloja.....	87
4.2. Uticaj geometrije sloja na koalescentnu filtraciju.....	99
4.2.1. Analiza istovremenog uticaja permeabilnosti sloja i debljine vlakana kod homogenog sloja.....	99
4.2.2. Analiza istovremenog uticaja permeabilnosti sloja i debljine vlakna kod heterogenog sloja.....	113
4.2.3. Izbor optimalne geometrije sloja za realizaciju maksimalne kritične brzine.....	115
4.3. Uticaj ulazne koncentracije na koalescentnu filtraciju.....	120
4.3.1. Uticaj ulazne koncentracije na izlaznu koncentraciju pri različitoj debljini sloja.....	120
4.3.2. Uticaj ulazne koncentracije na izlaznu koncentraciju pri različitoj permeabilnosti sloja.....	122

4.3.3. Uticaj ulazne koncentracije na efikasnost separacije pri promeni debljine sloja ili promeni permeabilnosti sloja.....	125
4.3.4. Uticaj ulazne koncentracije na kritične veličine pri promeni debljine ili permeabilnosti sloja.....	128
4.3.5. Uticaj ulazne koncentracije na kritičnu brzinu za dispergovano ulje različite prirode.....	131
*	
<b>5. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>134</b>
<b>6. LITERATURA.....</b>	<b>137</b>

## LISTA SLIKA

Slika 1.	Šematski prikaz hemijski i fizički homogene i heterogene čvrste površine.....	5
Slika 2.	Šematski prikaz situacija koje kap može da ima u odnosu na dva vlakna koja se ukrštaju.....	5
Slika 3.	Oblici dispergovane faze u porama sloja prema Spielmanu.....	6
Slika 4.	Promena pada pritiska sa vremenom za nestacionarni i stacionarni režim.....	8
Slika 5.	Šematski prikaz mreže pornog prostora u sloju granula.....	9
Slika 6.	Šematski prikaz sloja vlakana ostvarenog mrežnim modelovanjem da bazi slike.....	10
Slika 7.	Šematski prikaz sloja vlakana izotropne strukture i strujanja fluida pod uticajem napona smicanja.....	11
Slika 8.	Dijagram zavisnosti koeficijenta filtracije od debljine vlakana stakla za različite veličine kapi na ulazu i dve brzine fluida.....	18
Slika 9.	Zavisnost izlazne koncentracije od brzine fluida za sloj različite konfiguracije.....	21
Slika 10.	Zavisnost efikasnosti separacije od brzine fluida za sloj različite konfiguracije.....	22
Slika 11.	Uticaj prečnika vlakna stakla na efikasnost separacije kapi mineralnih ulja.....	23
Slika 12.	Zadržavanje neodvojenih kapi staklenim vlaknima različitog prečnika i različite veličine kapi.....	25
Slika 13.	Zadržavanje neodvojenih kapi za staklena vlakna različitog prečnika pri različitim brzinama fluida.....	25
Slika 14.	Kumulativna kriva za sloj od 20 cm za vlakna polipropilena za ulaznu koncentraciju od 5000 mg/l.....	26
Slika 15.	Kumulativna kriva za sloj od 20 cm za vlakna najlona za ulaznu koncentraciju od 5000 mg/l.....	27
Slika 16.	SEM snimak vlakana polipropilena.....	28
Slika 17.	Zavisnost izlazne koncentracije ulja od brzine fluida za vlakna PP1 i ulje ULSD.....	29
Slika 18.	Zavisnost izlazne koncentracije ulja od brzine fluida za vlakna PP3.....	29
Slika 19.	Promena pada pritiska i izlazne koncentracije vode u vremenu za sloj staklenih vlakana pri protoku od 50 l/h.....	31
Slika 20.	Promena pada pritiska i izlazne koncentracije vode u vremenu za sloj vlakana polipropilena pri protoku od 50 l/h.....	32
Slika 21.	Šematski prikaz structure slojeva A, B i C.....	33

Slika 22.	Zavisnost efikansosti separacije dispergovane faze od brzine fluida za slojeve različite strukture.....	34
Slika 23.	Morfologija nasumice nasutih vlakana.....	36
Slika 24.	Zarobljavanje i koalescencija kapi u sloju vlakana.....	37
Slika 25.	Poređenje efikansosti separacije, faktora kvaliteta i pada pritisk između slojeva različite strukture.....	38
Slika 26.	Zavisnost poroznosti od permeabilnosti sloja PU.....	39
Slika 27.	Snimak materijala PU.....	41
Slika 28.	Snimak materijala PU optičkim mikroskopom x40 pri nasipnoj gustini 50 kg/m <sup>3</sup> .....	41
Slika 29.	3D dijagrami zavisnosti izlazne koncentracije sloja PU.....	42
Slika 30.	Zavisnost $vk_{15}$ od permeabilnosti sloja.....	43
Slika 31.	Zavisnost $vk_{15}$ od debljine sloja.....	44
Slika 32.	Konturni dijagram međusobne zavisnosti izokritične brzine, emulzivnosti i permeabilnosti sloja.....	46
Slika 33.	Konturni dijagram međusobne zavisnosti izokritične brzine, neutralizacionog broja i permeabilnosti sloja za materijale.....	46
Slika 34.	Fotografije ulja iza sloja SS40.....	47
Slika 35.	Konture izlazne koncentracije od 15 mg/L u funkciji brzine fluida i permeabilnosti sloja za tri mineralna ulja i materijale SS40 i PP.....	48
Slika 36.	3D dijagram zavisnosti kritične brzine od neutralizacionog broja i LLR vrednosti.....	50
Slika 37.	Grafički prikaz promene sadržaja vode na izlazu u funkciji vremena.....	52
Slika 38.	Grafički prikaz uticaja sadržaja vode na ulazu na sadržaj vode na izlazu.....	53
Slika 39.	Zavisnost efikasnosti separacije od ulazne koncentracije ulja.....	55
Slika 40.	Zavisnost izlazne koncentracije u vremenu u funkciji promene ulazne koncentracije vode u kontinualnoj organskoj fazi.....	56
Slika 41.	Zavisnost izlazne koncentracije od brzine fluida za različite debljine sloja pri ulaznoj koncentraciji od 100 ppm.....	57
Slika 42.	Zavisnost izlazne koncentracije od brzine fluida za različite debljine sloja pri ulaznoj koncentraciji od 400 ppm.....	57
Slika 43.	Zavisnost izlazne koncentracije od brzine fluida za različite debljine sloja pri ulaznoj koncentraciji od 1000 ppm.....	58
Slika 44.	Zavisnost efikasnosti separacije od brzine fluida za različite debljine sloja pri ulaznoj koncentraciji od 100 ppm.....	59
Slika 45.	Zavisnost efikasnosti separacije od brzine fluida za različite debljine sloja pri ulaznoj koncentraciji od 1000 ppm.....	59
Slika 46.	Zavisnost izlazne koncentracije od ulazne koncentracije za model sistem nafte A i nafte E.....	61
Slika 47.	Zavisnost efikasnosti separacije od ulazne koncentracije za model sistem nafte A i nafte E.....	61

Slika 48	Uticaj ulazne koncentracije ulja na izlaznu koncentraciju za različite brzine.....	63
Slika 49	3D dijagram uticaja brzine i ulazne koncentracije na izlaznu koncentraciju.....	63
Slika 50	Dijagram uticaja ulazne koncentracije dispergovane faze i debljine sloja kritičnu brzinu.....	64
Slika 51	Zavisnost izlazne koncentracije od ulazne koncentracije za različite brzine.....	66
Slika 52	Zavisnost kritične ulazne koncentracije $c_{uk}$ od brzine i permeabilnosti.....	67
Slika 53	3D dijagram zavisnosti kritične ulazne koncentracije $c_{uk}$ od permeabilnosti i brzine.....	67
Slika 54	Zavisnost efikasnosti koalescencije od brzine u sloju granula za različite ulazne koncentracije ulja.....	68
Slika 55	Zavisnost efikasnosti koalescencije od ulazne koncentracije.....	70
Slika 56	Zavisnost izlazne koncentracije od debljine sloja za dve ulazne koncentracije.....	70
Slika 57	Zavisnost efikasnosti koalescencije od ulazne koncentracije ulja za različite debljine sloja.....	71
Slika 58	Zavisnost efikasnosti koalescencije od brzine i ulazne koncentracije ulja.....	72
Slika 59	Istovremeni uticaj ulazne koncentracije i brzine fluida na efikasnost separacije.....	73
Slika 60	Grafički prikaz određivanja kritične brzine.....	82
Slika 61	Šema eksperimentalne aparature.....	83
Slika 62	Prikaz eksperimentalne aparature za Drasy ogled.....	84
Slika 63	SEM snimak vlakana nerđajućeg čelika SS40.....	89
Slika 64	SEM snimak vlakana polipropilena PP.....	89
Slika 65	Snimak sloja vlakana nerđajućeg čelika SS40 permeabilnosti $K_{01}$ realizovan optičkim mikroskopom pri uvećanju 40x.....	90
Slika 66	Snimak sloja vlakana polipropilena PP permeabilnosti $K_{01}$ realizovan optičkim mikroskopom pri uvećanju 40x.....	90
Slika 67	SEM snimak vlakana polietilenteraftalata BA1 pri uvećanju 30x.....	91
Slika 68	Snimak sloja vlakana nerđajućeg čelika različite debljine snimljen optičkim mikroskopom pri uvećanju 40x za permeabilnost $K_{01}$ .....	92
Slika 69	SEM snimak vlakana polimera.....	92
Slika 70	SEM snimak vlakana PE pri uvećanju 30x.....	93
Slika 71	SEM snimak preseka vlakna SS40 pri uvećanju 5000x.....	94
Slika 72	Snimci sloja vlakana snimljeni optičkim mikroskopom.....	94
Slika 73	SEM snimak vlakana PU pri uvećanju 100x.....	95

Slika 74	Eksperimentalne prave zavisnosti pada pritiska po jedinici debljine sloja za materijal PU.....	96
Slika 75	Eksperimentalna kriva zavisnosti poroznosti od permeabilnosti.....	97
Slika 76	Eksperimentalne krive zavisnosti poroznosti od permeabilnosti za sve ispitivane materijale uključujući i PPDJ.....	98
Slika 77	Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja od brzine fluida i permeabilnosti sloja za materijal SS40.....	99
Slika 78	Grafička zavisnost izlazne koncentracije od brzine fluida za sve ispitivane permeabilnosti za materijal SS20 .....	100
Slika 79	3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije od brzine fluida i permeabilnosti sloja za materijal SS20.....	101
Slika 80	Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije i permeabilnosti za materijal SS20.....	101
Slika 81	Grafička zavisnost izlazne koncentracije od brzine fluida za sve ispitivane permeabilnosti za materijal SS12.....	103
Slika 82	Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije i permeabilnosti za materijal SS12.....	103
Slika 83	Grafička zavisnost izlazne koncentracije od brzine fluida za sve ispitivane permeabilnosti i sve materijale od nerđajućeg čelika.....	104
Slika 84	Zavisnost kritične brzine od permeabilnosti za sve materijale od nerđajućeg čelika različitog prečnika.....	105
Slika 85	Zavisnost kritične brzine od prečnika vlakna materijala SS za sve permeabilnosti.....	106
Slika 86	3D dijagram zavisnosti kritične brzine od permeabilnosti i prečnika vlakna materijala SS.....	106
Slika 87	Konturni dijagram zavisnosti kritične brzine od permeabilnosti i prečnika vlakna materijala SS.....	107
Slika 88	Konturni dijagram zavisnosti efikasnosti od brzine i permeabilnosti sloja za materijal SS40.....	108
Slika 89	Konturni dijagram zavisnosti efikasnosti od brzine i permeabilnosti sloja za materijal SS20.....	108
Slika 90	Fotografija materijala PP.....	109
Slika 91	Fotografija materijala PPDJ.....	110
Slika 92	Snimak materijala PPDJ optičkim mikroskopom pri uvećanju 5x.....	110
Slika 93	Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije od permeabilnosti i brzine za materijal PP i ulje P1.....	112
Slika 94	Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije od permeabilnosti i brzine za materijal PPDJ i ulje P1.....	112
Slika 95	Dijagram zavisnosti vk za materijal PP i PPDJ od permeabilnosti za ulje P1.....	113

Slika 96	Zavisnost izlazne koncentracije od brzine fluida za sloj heterogene strukture.....	114
Slika 97	Zavisnost izlazne koncentracije od brzine fluida za sloj BA1 i ulje A4 za sve ispitivane permeabilnosti.....	116
Slika 98	Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije od permeabilnosti i brzine za materijal BA1 i ulje A4.....	117
Slika 99	Zavisnost kritične brzine od permeabilnosti za neke ispitivane materijale.....	118
Slika100	Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije od permeabilnosti i brzine za materijal BA1 i ulje P1.....	119
Slika101	Zavisnost kritične brzine od permeabilnosti za materijale PPDJ, PP i BA1 i ulje P1.....	119
Slika102	Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije od ulazne koncentracije i debljine sloja pri brzini 10 m/h i 19 m/h.....	121
Slika103	Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije od ulazne koncentracije i debljine sloja pri brzini 30 m/h i 35 m/h.....	122
Slika104	Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije od brzine i permeabilnosti sloja za ulaznu koncentraciju od 500 mg/l i 800 mg/l.....	123
Slika105	Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije od brzine i permeabilnosti sloja za ulaznu koncentraciju od 1100 mg/l i 1400 mg/l.....	124
Slika106	Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije od brzine i permeabilnosti sloja za ulaznu koncentraciju od 5000 mg/l i 10000 mg/l.....	125
Slika107	Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije od brzine i permeabilnosti sloja za ulaznu koncentraciju od 15000 mg/l i 18000 mg/l.....	126
Slika108	Grafički prikaz zavisnosti efikasnosti separacije od ulazne koncentracije za sve ispitivane debljine sloja pri brzini od 13 m/h i 30 m/h.....	126
Slika109	Grafički prikaz zavisnosti efikasnosti separacije od ulazne koncentracije za sve ispitivane permeabilnosti pri brzini od 13 m/h i 30 m/h.....	127
Slika110	3D dijagrami zavisnosti efikasnosti separacije za brzinu od 30 m/h od ulazne koncentracije i debljine sloja i permeabilnosti sloja.....	128
Slika111	Konturni dijagram zavisnosti kritične brzine od ulazne koncentracije i debljine sloja.....	129
Slika112	Konturni dijagram zavisnosti kritične brzine od ulazne koncentracije i debljine sloja.....	130
Slika113	Konturni dijagram zavisnosti kritične ulazne koncentracije od brzine i Permeabilnosti.....	131
Slika114	Konturni dijagrami zavisnosti izlazne koncentracije od brzine i ulazne koncentracije za permeabilnost $K_{01}$ pri debljini sloja od 5 cm za ulje B1 i ulje B2.....	132

Slika115 Grafički prikaz zavisnosti kritične brzine od ulazne koncentracije za debljinu sloja od 5 cm i permeabilnost  $K_{01}$  za ulja B1 i B2..... 136



## LISTA TABELA

Tabela 1	Pregled osobina ispitivanih slojeva vlaknastih polimera.....	11
Tabela 2	Osnovne osobine korišćenih materijala.....	15
Tabela 3	Osobine staklenih vlakana.....	19
Tabela 4	Prečnici vlakana i poroznost slojeva.....	22
Tabela 5	Osnovne osobine vlakana polipropilena.....	26
Tabela 6	Neke osobine korišćenih vlakana i sloja.....	31
Tabela 7	Osobine ispitivanih vlakana i njihovih slojeva.....	33
Tabela 8	Karakteristike sloja PU različite nasipne gustine.....	37
Tabela 9	Vrednosti veličine LLR za sve ispitivane polimere i četiri mineralna ulja	46
Tabela 10	Fizičke karakteristike korišćenog vlaknastog sloja.....	47
Tabela 11	Prikaz nekih osobina korišćenih valakana i materijala.....	85
Tabela 12	Osobina korišćenih mineralnih ulja.....	86
Tabela 13	Eksperimentalne vrednsoti nagiba prave i poroznosti za određenu nasipnu gustinu za materijal PU.....	96
Tabela 14	Eksperimentalne vrednsoti nagiba prave i poroznosti za određenu nasipnu gustinu za material PPDJ.....	97
Tabela 15	Računske vrednosti specifične aktivne površine za neke od ispitivanih Materijala.....	98
Tabela 16	Vrednosti pada pritiska u funkciji permeabilnosti sloja i brzine strujanja tečnosti.....	115

# 1. UVOD I CILJ

Separacija zauljenih voda javlja se u procesnoj industriji, uslovljena primenjenim tehnološkim operacijama ili operacijama hlađenja, pranja i održavanja. Separacija sistema tečno-tečno koristi se za odvajanje rastvarača kod ekstrakcije, izdvajanje tečnih katalizatora iz reakcione smeše i sekundarnu proizvodnju nafte iz ležišnih voda. Iz tih razloga razvoj i unapređenje tehnika za separaciju sistema tečno-tečno je od izuzetnog značaja.

Koalescentna filtracija se koristi u industriji već više od pola veka. I pored višedecenijskog iskustva u primeni ovog tipa filtracije, kao i intenzivnog proučavanja fenomena, ova operacija je i dalje nedovoljno poznata i zahteva poluindustrijska istraživanja za svaku novu primenu. Koalescentna filtracija ima niz prednosti u odnosu na druge tehnike separacije. Neke od prednosti su: visoka efikasnost separacije, mali kapitalni i operativni troškovi, lak način automatizacije i kontinualni rad tokom dugog vremenskog perioda. Ovi uređaji našli su svoju dominantnu primenu na naftnim platformama i brodovima usled malih dimenzija i male težine.

Koalescentna filtracija je metoda koja obezbeđuje separaciju kapi mikronskih veličina primenom sloja vlakana u kome dolazi, uz pomoć različitih mehanizama, do ukupnjavanja kapi koje se posle izlaska iz sloja talože. Kako se radi o heterogenom sistemu i njegovom ponašaju u visoko poroznom sloju, fenomeni su izuzetno složeni. Ono što posebno otežava njihovo proučavanje je da se dešavaju mnogi istovremeni uticaji od kojih neki mogu biti potpuno prikriveni. Iz tih razloga u literaturi ima često oprečnih stavova o uticaju pojedinačnih promenljivih na koalescentnu filtraciju. Postoji odsustvo sistematičnog istraživanja uticaja geometrije sloja iz opravdanih razloga pošto još uvek nije utvrđeno šta određuje geometriju vlaknastog sloja. Pored toga, u literaturi nije nađeno sistematično proučavanje uticaja promene ulazne koncentracije dispergovane faze. Poseban je problem kada se radi o proučavanju istovremenog uticaja više od jedne promenljive.

Cilj ove doktorske disertacije je da dâ doprinos proučavanju nedovoljno poznatih fenomena koalescentne filtracije, kako bi se smanjio obim potrebnih poluindustrijskih

---

istraživanja prilikom projektovnja filtera za neku konkretnu primenu. Svi materijali korišćeni za izradu vlakana u ovoj doktorskoj disertaciji su otpadni materijali, čija primena kao filterskog punjenja predstavlja poseban doprinos održivom razvoju. Jedan od ciljeva ove doktorske disertacije je bio proučavanje istovremenog uticaja promene permeabilnosti sloja i debljine vlakana na osobine sloja, pad pritiska i efikasnost separacije dispergovanog ulja iz kontinualne vodene faze. Uticaj geometrije sloja je proučavan primenom sloja homogene ili heterogene geometrije po dubini. Zbog toga je, primenom skening elektronske mikroskopije i optičke mikroskopije, realizovano detaljno istraživanje izgleda i morfologije vlakana, kao i strukture sloja, izgleda i rasporeda njegovih pora. U radu je dat pregled istraživanja uticaja vlakana i njihovih slojeva različite prirode, slobodnih i međusobno povezanih, krutih i elastičnih, različite debljine, te time i različite vijugavosti, na efikasnost koalescentne filtracije. Takođe, naglašen je doprinos proučavanju istovremenog uticaja promena ulazne koncentracije dispergovane faze i permeabilnosti sloja. Veći deo izvedenih istraživanja je uključio proučavanje uticaja prirode uljne faze, pri čemu je posebno istaknuto da su sva ulja korišćena u ovoj disertaciji mineralnog porekla. Cilj optimizacije rada koalescera u ovoj disertaciji je bio da se utvrde operativni uslovi u kojima se postiže maksimalna vrednost kritične brzine strujanja fluida uz minimalni pad pritiska u sloju.

---

## **2. TEORIJSKI DEO**

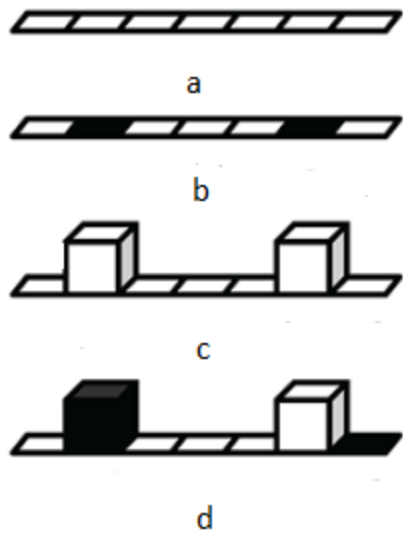
---

## 2.1. Mehanizmi koalescencije u poroznom sloju

U porama filterskog sloja istovremeno deluje veliki broj sila. Rezultanto delovanje vladajućih sila uslovljava da li će kap dispergovane faze biti zarobljena ili otkinuta. Znači, može se govoriti o mehanizmima zarobljavanja i otkidanja kapi (Hubbe 1984, 1985a, 1985b, Ives 1975, Ives i Fitzpatrick 1989, Maini i saranici 1996, Mead-Hunter i saranici 2011, 2012, Zhang K. i saradnici 2015). Usled kretanja fluida, u sloju deluju i hidrodinamičke sile. Te sile mogu biti dominantno viskozne ili inercione, što određuje vrednost masene brzine strujanja fluida. Kada su hidrodinamičke sile niskog intenziteta, dolazi do zadržavanja kapi u porama sloja. Kada je intenzitet hidrodinamičkih sila velik, dolazi do iznošenja diskontinualne faze iz pora sloja, pošto hidrodinamičke sile nadjačaju ostale sile koje vladaju u sistemu.

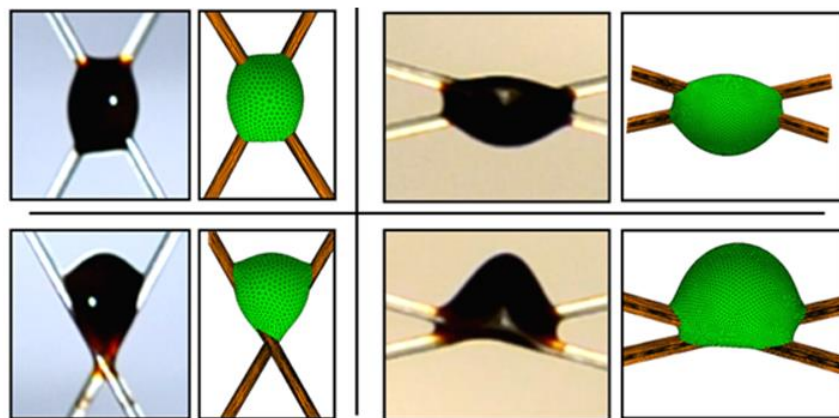
Značajan broj autora, u dužem vremenskom periodu, proučavao je fenomene privlačenja, otkidanja i transporta koloidnih čestica ili kapi u porama sloja (Cui i saradnici 2017, Davoudi i saradnici 2016, 2017, Du i saradnici 2013, Elimelech 1992, Elimelech i O Melia 1990a, 1990b, Elimelech i saradnici 1998, Fang i saradnici 2015, 2016, Johnson i Elimelech 1993, Lee C. i saradnici 2011, Lee M. i saradnici 2012, Ryan i Elimelech 1996, Seymour i saranici 2013, Sun i saradnici 2017, Thompson i saradnici 2012, Tufenkji i Elimelech 2004). Konstatovano je da na ove fenomene utiču, ne samo fizičke promene u sistemu, kao što je promena intenziteta hidrodinamičkih sila, nego i hemijske promene koje se odnose na jačinu jona vode koji okružuju koloidne čestice/kapi, na šta utiče sadržaj i asortiman kako jona natrijuma, tako i jona kalcijuma i magnezijuma. Pored toga, na koloidne čestice u sloju utiču i hemijska i fizička heterogenost te čvrste površine, slika 1 (Bradford i saradnici 2013a, 2013b, Dawar i Chase 2008, 2010, Elimelech i saradnici 2003, Li S. i saranici 2020, Li X. 2015, Shou i saradnici 2015, Zhu P. i saradnici 2018).

Na slici 1a prikazana je homogena čvrsta površina. To znači da su hrapavost kao i hemijska priroda jednaki po čitavoj površini. Na slici 1b prikazana je šematski površina koja je fizički homogena ali je hemijski heterogena pošto su u njenim različitim delovima zastupljene različite strukturne grupe kao što je slučaj kod nekih polimera. Na slici 1c dat je šematski prikaz hemijski homogene, ali fizički nehomogene površine. Takva površina ima različitu hrapavaost raspoređenu uniformno ili neuniformno po površini. Zatim je dat prikaz površine koja je i hemijski i fizički heterogena, slika 1d.



**Slika 1** Šematski prikaz hemijski i fizički homogene i heterogene čvrste površine  
 a. homogena površina b. hemijski heterogena površina c.  
 fizički heterogena površina i d. površina koja je i hemijski i fizički  
 heterogena (Bradford i Torkzaban 2013b)

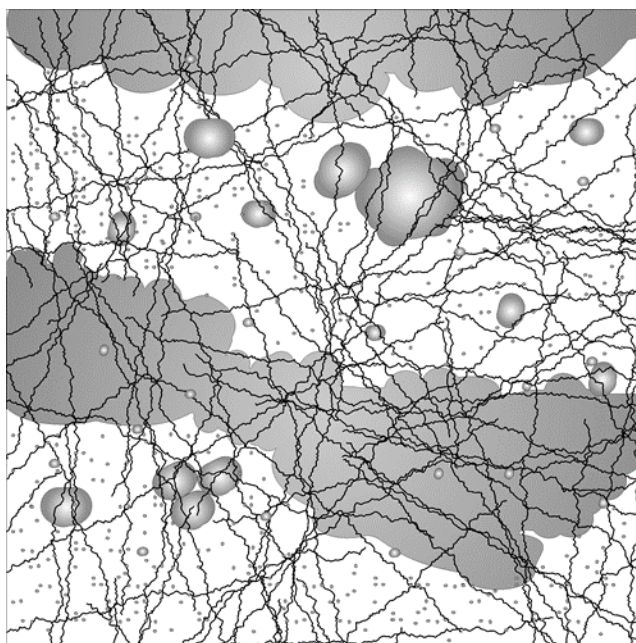
Amrei i saradnici (2016) su utvrdili da je za otkidanje sitnijih kapi sa površine vlakna potreban veći intenzitet sile nego za otkidanje krupnijih kapi. Autori su, takođe, utvrdili da na intenzitet sile otkidanja utiče položaj kapi u odnosu na vlakna, naročito na mestima njihovog ukrštanja. Pored toga, važan je i ugao pod kojim se vlakna ukrštaju, kao i ugao koji kap ostvaruje u odnosu na površinu vlakna, slika 2. To ukazuje da prostorni raspored vlakana bitno utiče na sudbinu kapi.



**Slika 2** Šematski prikaz situacija koje kap može da ima u odnosu na dva vlakna koja se ukrštaju (Amrei i saradnici 2016)

---

Prema dostupnoj literaturi, Spielman (Spielman 1968, Spielman i Goren 1968b, 1970, 1972a, 1972b, Spielman i Su 1977) je, među prvima, proučavao zbivanja u porama vlaknastog sloja prilikom proticanja sistema tečno-tečno. On je uočio tri oblika dispergovane faze u porama sloja pri proticanju relativno nestabilne emulzije kroz njih: kapilarno-provodnu fazu, globule dispergovane faze i sitne kapi, slika 3 (Govedarica i Sokolović 2014, Šećerov Sokolović i Sokolović 2000). Kapilarno-provodna faza se za kratko vreme formira u porama sloja, dovoljno je dvadesetak minuta u zavisnosti od brzine strujanja fluida. Kapilarno-provodna faza je faza koja je povezana od ulaza do izlaza iz sloja. Spielman smatra da su globule delovi dispergovane faze koji su se otkinuli od kapilarno-provodne faze, a da su sitne kapi one kapi koje ulaze u sloj i koje se nisu ukрупnile. No, strujanjem sistema tečno-tečno, pri određenim uslovima, može da dođe i do redisperzije već ukрупnjenih kapi/globula (Fahim i Agbar 1984, Speth i saradnici 2002, Šećerov Sokolović i saradnici 2006).



**Slika 3** Oblici dispergovane faze u porama sloja prema Spielmanu i Goren (1970)

Količina kapilarno-provodne faze, prema Spielmanu 1968, uslovljena je geometrijom sistema, zapreminom povezanih pora i intenzitetom hidrodinamičkih sila. On smatra da od sva tri oblika dispergovane faze u porama sloja jedino kapilarno-provodna faza utiče

---

na pad pritiska prilikom proticanja fluida. Spielman tvrdi, takođe, da koalescencija na površini kapilarno-provodne faze počinje kada je njena količina 10 % od zapremine pora, a da je maksimalna količina koja može da se formira oko 30 % od zapremine pora.

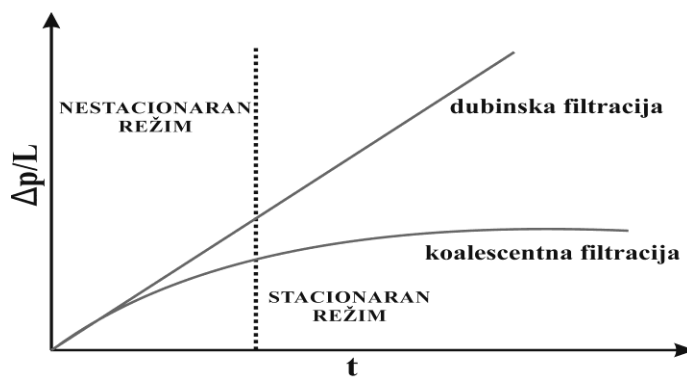
Može se prepoznati više mehanizama formiranja kapilarno-provodne faze s obzirom da se razlikuju tri mehanizma koalescencije kapi u zapremini sloja: koalescencija kapi na površini čvrstog materijala, koalescencija između dve kapi u porama i koalescencija kapi na površini kapilarno-provodne dispergovane faze (Govedarica i Sokolović 20014, Li B. i saranici 2018, 2019, Luo i saranici 2019, Spielman 1968, Spielman i Goren 1968b, 1970, 1972a, 1972b, Šećerovov-Sokolović i Sokolović 2000). Kapi dispergovane faze mogu delom da koalesciraju na površini čvrstog materijala koji čini sloj, a delom međusobno. Vremenom se na površini vlakana formira opna dispergovane faze, a daljom koalescencijom kapi dolazi do formiranja kapilarno-provodne faze u matrici čvrstog materijala. Koalescencija između kapi u porama sloja može biti pospešena time što se osobinama sloja može uticati na njihovo međusobno rastojanje i time favorizovati ovaj oblik koalescencije (Govedarica 2011, Kulkarni 2014, Kundu i Mishra 2013, Shen i saranici 2012, 2013, 2014).

Koalescentna filtracija može da se odvija u dva režima: nestacionarnom i stacionarnom. Kada u sloju nema dispergovane faze, tada proces počinje nestacionarnim režimom. Tada se formira i prikuplja kapilarno-provodna faza. Usled akumulacije dispergovane faze u porama filtra, dolazi do smanjenja poprečnog preseka protočnih kapilara, što ima za posledicu povećanje realne brzine fluida i otpora strujanju, to jest smanjenje permeabilnosti jedne faze u odnosu na drugu. Odvijanje nestacionarnog režima u porama sloja može se pouzdano znati preko promene pada pritiska koji raste u funkciji vremena, slika 4. Posle izvesnog vremena proces može da pređe u stacionaran ili da nastavi da radi u nestacionarnom režimu. Na to se može uticati intenzitetom hidrodinamičkih sila, tj. brzinom strujanja fluida. Vreme dostizanja stacionarnog režima može se skratiti kvašenjem filterskog materijala dispergovanom fazom. Kod stacionarnog režima, fluid iznosi deo dispergovane faze iz sloja, te se u sloju uspostavlja ravnotežna količina kapilarno-provodne faze. Kada su odabrani adekvatni uslovi, iz sloja izlaze kapi koje su krupnije od onih koje su ušle u sloj. Ako su te kapi dovoljno velike, one će se istaložiti posle sloja. U tim okolnostima, ne menja se pad pritiska sa vremenom pošto se ne menja ni količina



---

kapilarno-provodne faze u porama sloja, slika 4 (Šećerov Sokolović i Sokolović 2000, Chang i saradnici 2016).



**Slika 4** Promena pada pritiska sa vremenom za nestacionarni i stacionarni režim (Šećerov Sokolović 2000)

Soo i Radke (1984a, 1984b, 1985, 1986) su proučavali proticanje stabilne emulzije kroz sloj granula peska, simulirajući situaciju u podzemnim kolektorima nafte. Oni su zaključili da prilikom strujanja stabilne emulzije kroz sloj, svaka pojedinačna kap se hvata za površinu čvrstog i formira monosloj. Ne dolazi do koalescencije između kapi, te samim tim ni do formiranja kapilarno-provodne dispergovane faze. Oni definišu i kritičnu brzinu kao brzinu iznad koje hvatanje kapi pada na nulu. Kritična brzina, prema njima, je brzina pri kojoj više ne dolazi do hvatanja/zarobljavanja kapi već se otkidaju ranije uhvaćene/zarobljene kapi.

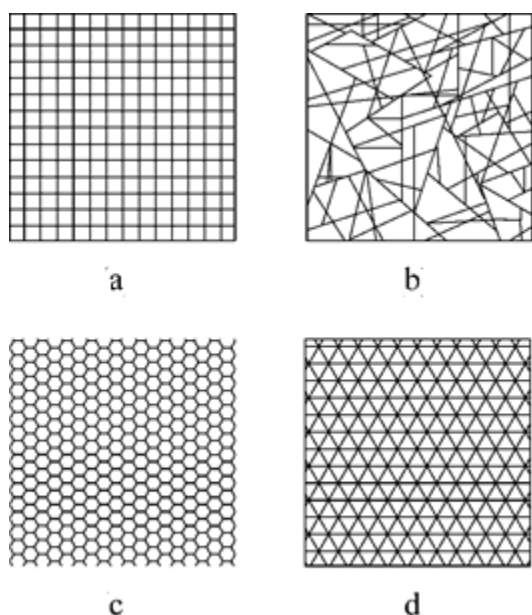
Novija istraživanja simulacijom na osnovu formiranih matematičkih modela proučavaju moguće mehanizme koalescencije kapi različitog oblika i veličine na čvrstoj površini (Borcia i Bestehon 2013, Khan i Aidun 2017). Borcia i Bestehorn (2013) su konstruisali fazne dijagrame koji ilustruju različite režime koalescencije dve kapi za različite uglove kvašenja u odnosu na čvrstu površinu uključujući uicaj promene lokalnog međupovršinskog napona.

---

## 2.2. Osobine vlaknastog poroznog sloja

Sloj mogu da grade nasute granule ili nasuta vlakna. Ova dva tipa sloja pokazuju značajno različite osobine. Najznačajnije razlike ova dva sloja ogledaju se u veličini i obliku pora. Sloj granula ima interval poroznosti do 50 %, dok su vlakna u stanju da grade sloj visoke poroznosti, čak i do 99 %. I pored toga što imaju različitu poroznost, permeabilnost slojeva ne mora da se razlikuje (Govedarica i Sokolović 2014, Stanimirović 2003, Šećerov Sokolović i Sokolović 2000, Šećerov Sokolović i saradnici 2003a, 2003b,).

Sloj granula može se zamisliti kao struktura u kojoj egzistira mreža kanala, pora, koje su najčešće malih dimenzija, te se zovu i kapilare. Rege i Fogler (1988a, 1988b) smatraju da se u sloju granula govori o mreži pora “network” koja se ponavlja u njegovoj zapremini. Taj raspored pora u zapremini sloja granula može biti različit: kvadratni, neuređeni, heksagonalan ili trougaoni, slika 5.



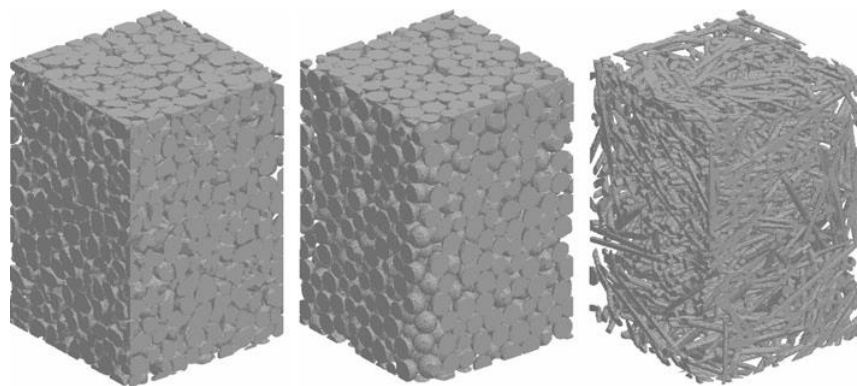
**Slika 5** Šematski prikaz mreže pora u sloju granula (Šećerov Sokolović i Sokolović 2000)

Ako poroznost u sloju vlakana dostiže čak i 99%, tada se u takvoj strukturi ne može govoriti o postojanju kanala ili pora. Takva struktura pre bi izgledala kao prazan prostor ispresecan različito orijentisanim vlaknima. Moglo bi se reći da bi slika 5 za sloj vlakana

---

mogla da prikazuje raspored i mrežu vlakana u praznom prostoru. Sloj vlakana izgleda kao nasuti sloj cilindara, slika 6. Generisanje mreže vlakana/cilindara ili njihovo opisivanje predstavlja osnovni cilj modelovanja, bilo da je u pitanju mrežno modelovanje na bazi slike ili neka druga metoda uz simultanu kompjuterom podržanu fluidodinamičku (CFD) simulaciju ili bez nje (Bhattad i saradnici 2011, Das i saradnici 2015, Fazeli i saradnici 2016, Hosseini i Tafreshi 2010, Jaganathan i saradnici 2008a, 2008b, James i Davis 2001, Koponen i saradnici 2017, Masoud Alexeev 2010, Nordlund i saranici 2013, Pak i saranici 2018, Pedersen i saranici 2007, Pradhan i saranici 2012, Salama i saranici 2020, Woudberg 2017). Park (2017) daje izuzetno lep prikaz, slika 7, simulacije proticanja fluida kroz sloj izotropne strukture različito orijentisanih vlakana i uticaja napona smicanja na proticanje.

Sloj može biti formiran korišćenjem krutih ili elastičnih vlakana. Kruta vlakna su vlakna metala kao nerđajući čelik i mesing, zatim vlakna stakla i keramička vlakna. Elastična vlakna su vlakna polimera. Vlakna najlona i teflona predstavljaju posebnu grupu, spadaju u polimere, ali su njihova vlakna relativno kruta. Vlakna se međusobno mogu razlikovati još i po obliku poprečnog preseka, debljini i dužini (Govedarica i Sokolović 2014, Stanimirović 2003, Šećerov Sokolović i Sokolović 2000, Šećerov Sokolović i saradnici 2003a, 2003b).

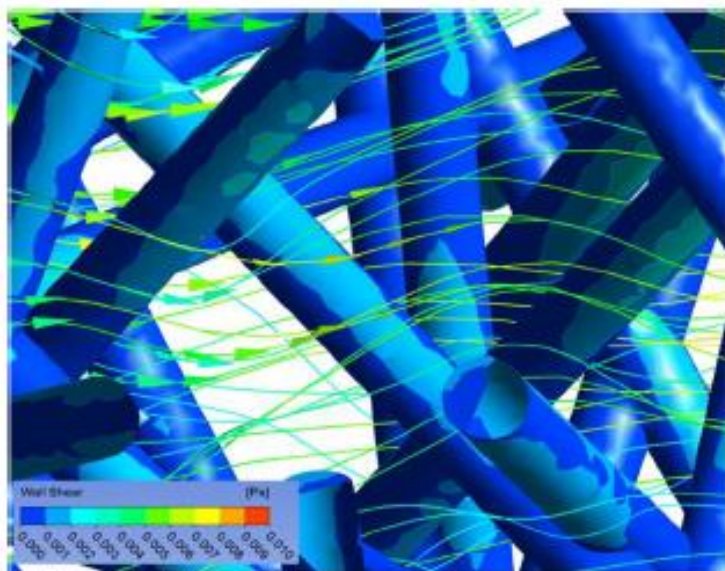


**Slika 6** Šematski prikaz sloja vlakana ostvarenog mrežnim modelovanjem na bazi slike (Bhattad i saradnici 2011)

---

Vlakna polimera, zbog svoje elastičnosti, omogućavaju pakovanje različite količine materijala u istu zapreminu. Vlakna su kompresibilna, te se mogu sabijati u zapremini. Na taj način, dobija se sloj različite geometrije, a jednake prirode vlakana, što je značajno za istraživanje različitih fenomena. Mogućnost kompresije vlakana polimera daje širok raspon osobina sloja posmatrano preko poroznosti, aktivne površine i permeabilnosti, tabela 1 (Govedarica i Sokolović 2014, Govedarica i saradnici 2015, Stanimirović 2003, Šećerov Sokolović i Sokolović 2000, Šećerov Sokolović i saradnici 2003a, 2003b). I vlakna metala određene debljine, iako su kruta, omogućavaju kompresiju obično manjeg raspona permeabilnosti od vlakana polimera.

Šećerov Sokolović i saradnici (2003a, 2006, 2007, 2014) su potvrdili da se permeabilnost sloja vlakana koja daje visoku efikasnost separacije kapi dispergovane faze prosečne veličine  $10\ \mu\text{m}$  nalazi u opsegu od  $5,3 \cdot 10^{-9}\ \text{m}^2$  do  $0,18 \cdot 10^{-9}\ \text{m}^2$  kada je reč o vlaknima debljine od 40 do 50  $\mu\text{m}$  bez obzira o kojoj orijentaciji toka fluida se radi, za debljine sloja od 5, 10 i 15 cm (Đoković 1997, Šećerov Sokolović i saradnici 2003b).



**Slika 7** Šematski prikaz sloja vlakana izotropne strukture i strujanja fluida pod uticajem napona smicanja (Park 2017)

**Tabela 1** Pregled osobina korišćenih slojeva vlaknastih polimera  
(Šećerov Sokolović i saradnici 2013b)

Oznake *	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$K_0$ 10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup>	$\epsilon$	$d_v$ μm
PP	900	7,4-0,70	0,978-0,889	45
PPDJ	900	11,8-0,8	0,944-0,833	357
PA	998	6,6-1,7	0,975-0,930	45
BA1	1400	5,3-0,3	0,970-0,870	45
PE	1400	17,1-0,7	0,980-0,900	60
PU	1200	5,4-0,2	0,958-0,850	50

Kompresijom sloja smanjuju se dimenzije njegovih pora, što drastično utiče na mehanizme zadržavanja. Ako su kapi značajno manje od veličine pora, asortiman mehanizama zarobljavanja je velik (Ives 1975, Ives i Fitzpatrick 1989). Ako su kapi veće od prečnika pora, tada se one teško zavlače u pore, a da bi ušle u njih moraju da se deformišu. Tada je jedini mehanizam zarobljavanja ceđenje. Ako su kapi bliske veličinama pora, tada isto postoji specifična situacija.

Najvažniji makroskopski parametri sloja formiranog od vlakana su: poroznost, permeabilnost, specifična aktivna površina i vijugavost, orijentacija, poprečni presek i dužina vlakana (Govedarica i Sokolović 2014, Šećerov Sokolović i Sokolović 2000).

Poroznost predstavlja udeo praznog prostora u jedinici zapremine sloja. Pri tome se ne zna da li su pore povezane ili slepe i koji je udeo jednih i drugih u sloju, što je od krucijalnog značaja za zbivanja u njemu i proticanje fluida kroz njega. Teorijski, poroznost se kreće u intervalu od nula do jedan, dok u praksi poroznost zavisi od načina formiranja sloja i nikada ne dostiže granične vrednosti.

Permeabilnost poroznog sloja jeste merilo otpora sloja proticanju fluida (Choong i saradnici 2014, Dullien 1975a, 1975b, 1989, 1992, Dullien i Azzam 1973, Dullien i Dhawan 1974, Dullien i saradnici 1989, Huang i saradnici 2017, Soltan i saradnici i 2014).

---

Permeabilnost ukazuje na prisustvo međusobno povezanih pora kroz koji fluid može da protiče (Das i saradnici 2015, Jackson i James 1986). Permeabilnost je površina poprečnog preseka pora raspoloživa za protok fluida.

Specifična površina predstavlja odnos površine i zapremine vlakna ili granula. Jedan sloj može da ima jednak udeo čvrste faze, jednaku permeabilnost, a da se drastično razlikuje u specifičnoj površini. Taj slučaj se javlja kada se primenjuju vlakna različitog prečnika o čemu će biti reči kasnije.

Kod sloja vlakana udeo čvrstog je često od 1 % do 15 %. Pri različitoj kompresiji sloja vlakana, ona su više ili manje vijugava. Vijugavost vlakana se može procenjivati poređenjem dužine ispravljenog vlakna sa njegovom dužinom u vijugavom obliku (Yazdchi 2011).

Prostorni raspored vlakana može se posmatrati po poprečnom preseku sloja i po njegovoj dubini. Ako se proučava orijentacija vlakana po poprečnom preseku, tada se posmatra geometrijski oblik, dimenzije i uniformnost pora. Prostorni raspored vlakana po dubini uključuje njihovu orijentaciju u sve tri dimenzije, kao i uniformnost njegove strukture (Hoang i saradnici 2013, Tamayol i Bahrami 2009, Yazdchi i saradnici 2011, Zampogna i Bottaro 2016, Zhu Z. i saradnici 2017).

Pored navedenog, za zbivanja u vlaknastom sloju od izuzetnog je značaja i morfologija čvrste površine. Glatka ili hrapava površina različito utiču na otpor pri proticanju ili zarobljavanju kapi u porama sloja (Agarwal i saradnici 2013a, 2013b, Amrei i saradnici 2017, Bansal i saradnici 2011, Cao i saradnici 2018, He i i saradnici 2019). Abolghasemibizaki i Mohammadi (2018) su, koristeći 3D printer ekstruderskog tipa, proizveli površine različite teksture, koje su hidrofobne. Oni su proučavali uticaj veličine kapi vode koja pada na tu površinu različite teksture. Na taj način su simulirali uticaj kinetičke energije proticanja tečnosti preko površine različite morfologije.

---

## 2.3. Geometrija sloja vlakana i njen uticaj na separaciju kapi

Geometrija sloja vlakana definisana je sa dve grupe osobina: osobinama sloja i osobinama vlakana (Govedarica 2011, Govedarica i Sokolović 2014, Šećerov Sokolović i Sokolović 2000, 2014). Osobine sloja čine: debljina sloja, njegova poroznost i permeabilnost, veličina, oblik i vijugavost pora, prostorni raspored vlakana, specifična aktivna površina čvrstog materijala i gustina pakovanja vlakana. Osobine vlakana bitne za koalescenciju su: debljina, dužina, poprečni presek, vijugavost i povezanost, hrapavost i kvašljivost (Gulizzoni 2011, Liu L. i saranici 2017, Liu Y. i Cameron 2001, Liu Y. i saranici 2018, Lu i saranici 2016a, 2016b Wei W. i saradnici 2017, Wei X. i saradnici 2018, 2019, Zhang J. i saradnici 2020).

Autori se suočavaju sa velikim problemom u pokušaju da definišu geometriju sloja pošto ne postoji reprezentativna veličina koja je jednoznačno određuje. Čak se pouzdano ne može ni tvrditi koje se to sve veličine moraju definisati da bi geometrija bila potpuno određena. Nasuprot ovom problemu, postoji i problem da istraživači nisu dovoljno svesni koliko je geometrija sloja dominantna na zbivanja u njemu te, vrlo često, ne daju skoro nikakve veličine koje govore koji su uslovi u sloju postojali tokom eksperimenata. Najčešće je definisana samo debljina sloja i eventualno debljina vlakana, vrlo retko poroznost, a još ređe permeabilnost sloja. U tim okolnostima, doneti zaključci ne mogu da se provere, niti da se porede rezultati istraživanja različitih autora pošto su realizovana pri različitoj i pri tome još i nepoznatoj geometriji sloja.

Istraživači su na različite načine proučavali uticaj geometrije sloja na koalescentnu filtraciju. Dostupna istraživanja bi se mogla grupisati na proučavanje uticaja hrapavosti vlakana, promene oblika filterskog materijala, debljine vlakana i promene permeabilnosti sloja.

Prema dostupnoj literature, uticaj hrapavosti vlakana na koalescentnu filtraciju nije masovno proučavan. Pri tome, različiti autori su istraživali značaj hrapavosti vlakana na vrlo različite načine (Agarwal i saradnici 2013a, 2013b, Bansal i saradnici 2011, Li J. 2003, Li J. i Gu 2005, Li X. i saranici 2015, Li Y. i saranici 2016, 2017a, 2017b, Zhang P. i saradnici 2015). Promena hrapavosti utiče višestruko na fenomene u sloju. Promenom

---

hrapavosti povećava se intenzitet adhezione sile i menja se kvašljivost površine vlakana, što mora imati efekat na efikasnost separacije. Na osnovu pregleda literature, ne može se doneti jednoznačni zaključak o efektu hrapavosti na koalescenciju u sloju i separaciju kapi pošto su istraživanja realizovana u drastično različitim uslovima. Li X. (2015) je proizvodio vlakna različite hrapavosti, ali je separisao sistem ulje u vodi, koristeći vlakna visoke energije površine ali različite hrapavosti, dok je Agarwal i saradnici (2013a, 2013b) nanosio čestice na površinu, ali su čestice bile od materijala različitog od materijala vlakna. Na taj način, istovremeno su menjane dve osobine: hrapavost i hemijska priroda površine. U tim okolnostima, nije moguće izvući neke zaključke opšteg karaktera. Očigledno je da su istraživači imali za cilj razvojna istraživanja usmerena na određeni zadatak separacije, a nisu bili fokusirani na fundamentalna istraživanja.

Proučavanjem uticaja oblika filterskog materijala bavili su se Chawaloeshonsiya i Painmanakul (2014) i Sharifi i Shaw (1996). Kiralj (2017), u svojoj doktorskoj disertaciji, je dao detaljan pregled dosadašnjih istraživanja uticaja promena geometrije sloja.

### **2.3.1. Uticaj debljine vlakana**

Čini se da je proučavanje uticaja promene debljine vlakana od kojih je formiran sloj najzastupljenije u literaturi i u najdužem period zaokuplja istraživače (Agarwal i saradnici 2013a, 2013b, Akagi i saradnici 1988, Clayfield i saradnici 1985a, 1985b, Fahim i Othman 1987, 1990, Grilc i saradnici 1984, Hazlett 1969a, 1969b, Krasinski i Wierzba 2015, Li J. 2005, Ma i saradnici 2014, Magiera i Blass 1997, Rebelein i Blass 1990, Sareen i saradnici 1966, Spielman 1968, Spielman i Goren 1972a, 1972b, Spielman i Su 1977, Shin i Chese 2004, Shin i saradnici 2005, Shin i Chese 2006a, 2006b,). Istraživanja uticaja debljine vlakana mogu se podeliti u tri grupe: a) debljina vlakana jednaka u celom sloju, homogena geometrija, b) sloj formiran od sendviča različite debljine vlakana, heterogena geometrija po dubini sloja i c) mešavina vlakana različite debljine.

Sareen i saradnici (1966) su u svojim istraživanjima kao filterske materijale koristili: medicinski pamuk (PAC), sintetičku vunu (Dynel/DY), staklo (GL), polietilen (POE), polipropilen (PP) i teflon (TE), kao i neke kombinacije ovih materijala: pamuk-staklo, pamuk-teflon i pamuk- sintetička vuna. Oni su, kao organsku dispergovanu fazu za pripremu emulzije, koristili niz čistih hemikalija i jednu multikomponentnu smešu-kerozin.



Prečnici vlakana dati su u tabeli 2. Oni su zaključili da za sistem ulje u vodi najbolje rezultate separacije pokazuje sloj vlakana pamuka, zatim staklenih vlakana, dok najlošije rezultate postižu sintetička vuna i polietilen. Sloj vlakana pamuka i stakla su najuspešniji i kod separacije kapi vode iz organske kontinualne faze, što autori ne ističu u svom objašnjenju. Neophodno je podvući da su u ovim ogledima vlakna pamuka i vlakna stakla najtanja. Pored toga, vlakna pamuka su izrazito hrapava dok su sva ostala vlakna glatka. Istraživači su istovremeno menjali debljinu vlakana, hrapavost i hemijsku prirodu vlakana, te se ne može sa sigurnošću utvrditi doprinos pojedinačnih osobina. Deluje da je, u postojećim okolnostima, dominantan doprinos debljine vlakana.

**Tabela 2** Osnovne osobine korišćenih materijala (Sareen i saranici 1966)

<b>Materijal</b>	<b>Prečnik vlakna μm</b>	<b>Gustina materijala g/cm<sup>3</sup></b>
<b>PAC</b>	14,05	1,58
<b>DY</b>	43,50	1,31
<b>GL</b>	8,85	2,50
<b>POE</b>	46,5	0,92
<b>PP</b>	45,00	0,90
<b>TE</b>	20,00	2,30

Spielman i Goren (1968b, 1972a, 1972b) su istraživali separaciju kapi ulja iz vode kroz sloj staklenih vlakana, kao i staklenih vlakana presvučenih organskim premazom koji ih čini kvašljivim uljem. Proučavali su uticaj prečnika vlakana, debljine sloja i brzine fluida. Rastvor silikonskog ulja u acetonu su koristili kao dispergovanu fazu. Postoje dva razloga što su odabrali ovu dispergovanu fazu: u pitanju je njutnovska tečnost koja ne menja viskoznost promenom brzine smicanja i minimizovan je uticaj gravitacione sile na separaciju pošto je razlika gustina faza u sistemu koji se separiše zanemarljiva. Prečnik kapi na ulazu u sloj se kretao od 1 μm do 7 μm. Prečnik staklenih vlakana je bio 3.5 μm, 6 μm i 12 μm. Prečnik vlakana je bio u domenu veličine kapi dok odnos veličine kapi i veličine pora nije poznat. Udeo čvrstog u sloju iznosio je 5 % vol. Spielman i Goren (1968b, 1972a, 1972b) su postavili izuzetno precizna istraživanja uticaja debljine vlakana na

---

koalescentnu filtraciju, te su imali sve okolnosti za donošenje relevantnih zaključaka. Vlakna uniformnog prečnika u sloju, tri prečnika vlakna, konstantan odnos veličine kapi u odnosu na debljinu vlakna, kao i uslove kada dispergovana faza ne kvasi i kada kvasi sloj. Iako je u opisu eksperimenata navedeno, ipak, u analizi rezultata nema dijagrama uticaja debljine vlakana za vlakna koja kvase uljnu fazu. Analiza rezultata rađena je preko koeficijenta filtracije. Ako je sadržaj dispergovane faze na ulazu i izlazu iz filtera blizak, tada koeficijent filtracije biva mali pošto sloj ne zadržava kapi i to je nepoželjna okolnost. Prema mišljenju autora, poželjno je da koeficijent filtracije raste. Uticaj veličine kapi, debljine vlakna i brzine fluida razlikuje se od prognoze klasične teorije presretanja, slika 8. Na osnovu prikazanog dijagrama može se konstatovati da koeficijent filtracije opada porastom debljine vlakana stakla koje ne kvasi dispergovana faza pri svim odabranim uslovima rada. Autori daju bezdimenzione jednačine u kojima su uključene sve, po njima, bitne veličine koje utiču na koalescenciju u sloju preko koeficijenta filtracije, relacije 1 i 2. Ove relacije nisu našle širu primenu.

Za materijal nekvašljiv uljnom fazom, jednačina 1:

$$\frac{\lambda d_F^3}{d_P^2} = 0.29 \left( \frac{Q d_F^2}{\mu_1 q_1 d_P^4} \right)^{0.25} \quad (1)$$

gde su:

$\Lambda$  - koeficijent filtracije,

$d_F$  - prečnik vlakna,

$d_P$  - prečnik kapi,

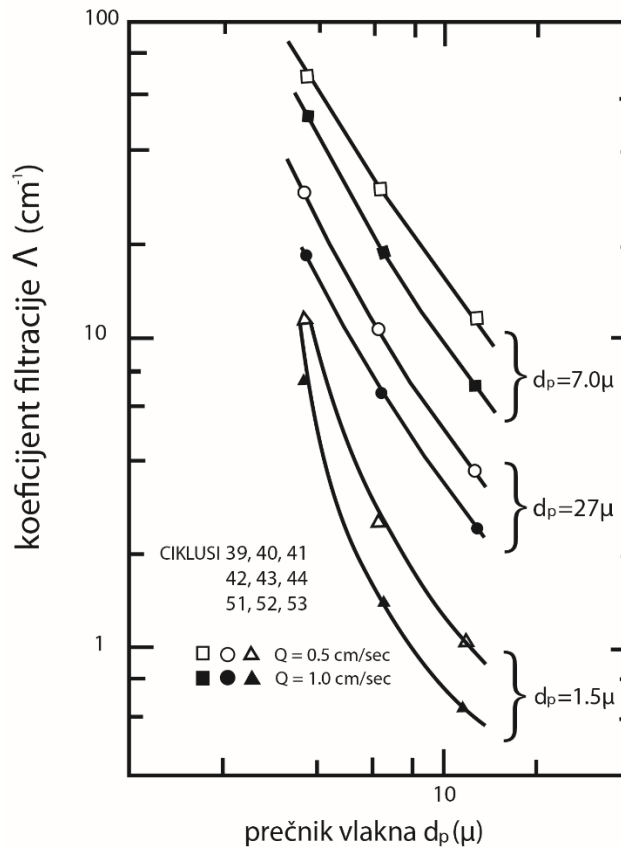
$Q$  - Hamaker konstanta,

$\mu_1$  - viskoznost kontinualne faze i

$q_1$  – brzina strujanja fluida.

Za materijal kvašljiv uljnom fazom, jednačina 2:

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



**Slika 8** Dijagram zavisnosti koeficijenta filtracije od debljine staklenih vlakana za različite veličine kapi na ulazu i dve brzine strujanja fluida (Spielman i Goren 1972b)

Grilc i saradnici (1984, 1986) su istraživali separaciju, kako vode iz ulja, tako i ulja iz vode, primenom sloja staklenih vlakana. Koristili su prečnik staklenih vlakana od 12  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$  i 35  $\mu\text{m}$ . U sloju je uvek bila zastupljena jednaka površina vlakana, ali su poroznost i permeabilnost bile različite. Zato se i postavlja pitanje u kojim okolnostima slojevi imaju sličnu geometriju. Oni su razumeli da je važno imati nepromenjenu geometriju sloja. Iako su koristili tri debljine staklenih vlakana, iz njihovih istraživanja nije moguće sagledati efekat debljine vlakana. Cilj njihovog istraživanja je bio pronalaženje matematičke relacije koja predstavlja modifikaciju Spielmanove bezdimenzionane grupe uvođenjem kritične brzine strujanja:

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

---

gde su:

$d_f$ - prečnik vlakana,

$d_{ps}$ - srednji prečnik kapi po Sauteru,

$L$  - debljina sloja,

$K$  – koeficijent,

$\gamma$  - međupovršinski napon,

$\mu_d$ - viskoznost dispergovane faze,

$U_{cr}$ - kritična brzina strujanja i

$a$  - koeficijent koji zavisi od koeficijenta filtracije.

U jednačini 3 egzistira prečnik vlakana. Kritična brzina strujanja je definisana kao brzina strujanja pri kojoj je postignuta zadata koncentracija dispergovane faze na izlazu iz sloja.

Autori zaključuju da data jednačina važi kod oba istraživana 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. Ni relacija data u ovim istraživanjima nije prihvaćena od strane istraživača.

Clayfield i saradnici (1985a, 1985b) su koristili staklena vlakna prečnika 1.5  $\mu\text{m}$  i 7.5  $\mu\text{m}$ , kao čista i presvučena nizom organskih premaza za separaciju kapi ulja iz vode. Osobine korišćenih vlakana stakla i njihovog sloja date su u tabeli 3. Neophodno je istaći da su autori dali detaljne podatke, kako za osobine vlakana, tako i za osobine sloja određene debljine, što su drugi autori često izostavljali. Upravo se iz podataka datih u tabeli 3 vidi da ako se formira sloj jednake površine filterskog materijala u jedinici zapremine, koja ovde iznosi 7483  $\text{m}^2/\text{m}^3$ , tada nije jednaka poroznost slojeva vlakana različite debljine. Kod debljih vlakana je poroznost 95,8 %, dok je kod tanjih 99,2 %. Vrednosti kritičnog površinskog napona postignutih tretiranjem površine staklenih vlakana su bile od 16  $\text{mN/m}$  do 39,2  $\text{mN/m}$ . Istraživana je separacija kapi kerozina, oksilena, dekanola, cikloheksanola i izobutanola iz vode. Efikasnost separacije je praćena preko distribucije veličine kapi i sadržaja ulja. Pokazano je da je efikasnost separacije vlakana manje debljine značajno veća od efikasnosti vlakana veće debljine, što je u skladu sa već objavljenim stavovima. Nažalost, nije data komparativna analiza rezultata koja bi ilustrovala datu konstataciju. Takođe, nije sasvim jasno da li se ovaj zaključak odnosi samo na vlakna čistog stakla ili i na vlakna presvučena određenim premazima. U fokusu

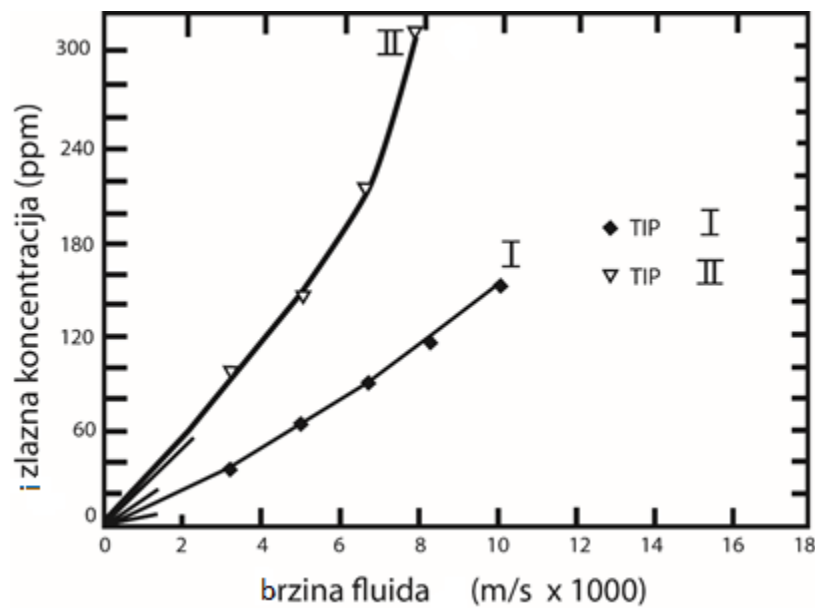
istraživača bio je uticaj kvašljivosti vlakana, te je analiza rezultata prikazana posebno za jednu debljinu, a posebno za drugu debljinu vlakana preko parametara koji se međusobno ne mogu porediti.

**Tabela 3** Osobine staklenih vlakana (Clayfield i saradnici 1985a)

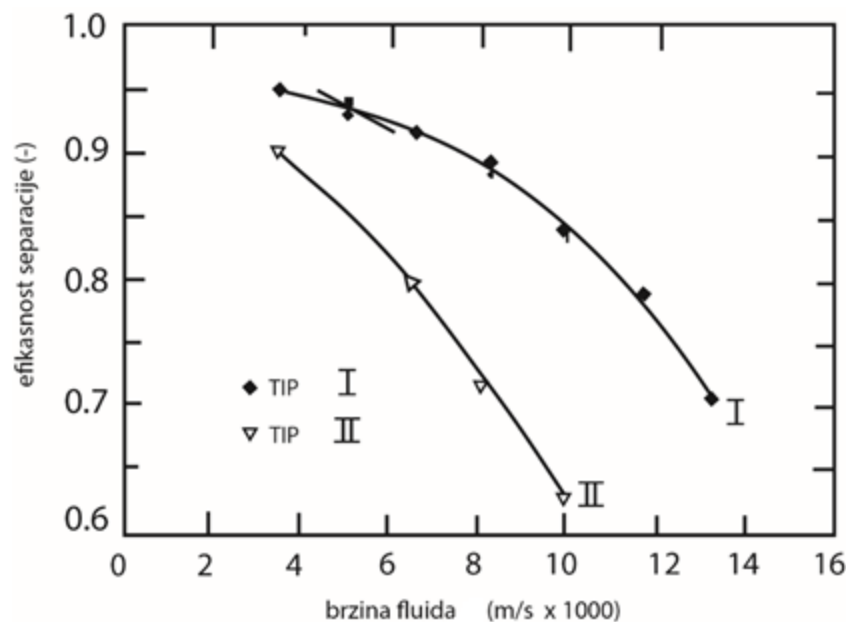
Veličina	Crown 300	PF 105
Nominalni prečnik vlakna ( $\mu\text{m}$ )	7,5	1,5
Debljina sloja (mm)	60	30
Specifična gustina vlakna ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	36,5	7,05
Izračunata površina vlakna $\text{m}^2/\text{kg}$ $\text{m}^2/\text{m}^3$	205 7483	1026 7233
Poroznost sloja %	98,6	99,7
Debljina sloja pre kompresije (mm)	30	30
Specifična gustina sloja posle kompresije ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	109,5	21,2
Poroznost sloja %	95,8	99,2

Fahim i Othman (1987, 1988) su istraživali efikasnost separacije koristeći sloj staklenih vlakana debljine 6  $\mu\text{m}$ , oznake I i 12  $\mu\text{m}$ , oznake II, kao i sendvič sistem slojeva ovih vlakana u kombinaciji sa segmentom sloja vlakana PP debljine 400  $\mu\text{m}$ . Oni su dali detaljne podatke o geometriji sloja kroz njegovu poroznost, aktivnu površinu i prečnik vlakana. Ovde je razmatran efekat promene prečnika staklenih vlakana na efikasnost separacije na slojevima homogene geometrije. Eksperimenti su realizovani sa model sistemom organske tečnosti u destilovanoj vodi pri orijentaciji toka fluida vertikalno nagore.

Zavisnost izlazne koncentracije od brzine strujanja fluida za slojeve različite konfiguracije data je na slici 9. Jasno je uočljivo da sloj oznake I, čija su staklena vlakna debljine  $6\ \mu\text{m}$ , ostvaruje znatno niže izlazne koncentracije ulja od sloja oznake II, čiji je prečnik  $12\ \mu\text{m}$ , za ceo opseg brzine strujanja. Na slici 10 data je zavisnost efikasnosti separacije od promene brzine strujanja fluida gde se, takođe, nedvosmisleno vidi da sloj oznake I sa manjim prečnikom ostvaruje značajno veće vrednosti efikasnosti za ceo opseg brzine strujanja. Opseg efikasnosti sloj oznake I kreće se od 0,95 do 0,7, dok je za sloj oznake II to od 0,9 do 0,62.

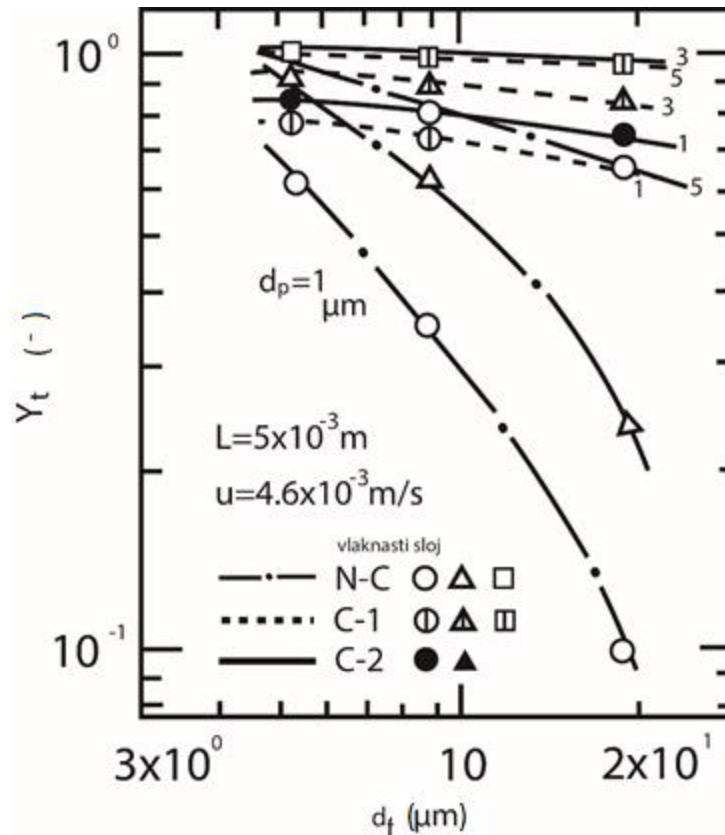


**Slika 9** Zavisnost izlazne koncentracije od brzine strujanja fluida za sloj različite konfiguracije (Fahim i Othman 1987)



**Slika 10** Zavisnost efikasnosti separacije od brzine strujanja fluida za sloj različite konfiguracije (Fahim 1987)

Akagi i saradnici (1988, 1990) su, takođe, istraživali uticaj debljine staklenih vlakana na efikasnost separacije ulja iz vode. Koristili su vlakna debljine 5,3  $\mu m$ , 9  $\mu m$  i 19  $\mu m$ . Poroznost sloja je iznosila 0,935, 0,920 i 0,920 za navedeni redosled prečnika vlakana. Vršili su separaciju tri mineralna ulja iz vode pri horizontalnoj orijentaciji toka fluida. Koncentracija dispergovane faze je bila 1000 mg/l. Istraživači su dali grafički prikaz efekta uticaja debljine staklenih vlakana na efikasnost separacije kapi ulja iz vode, slika 11. Sa porastom debljine staklenih vlakana efikasnost separacije kapi ulja drastično opada samo pri određenim uslovima. Data zavisnost je uslovljena time da li su vlakna kvašljiva uljem ili ne. Vlakna stakla, oznake N-C, nisu kvašljiva uljem i kod njih je drastična osetljivost na promenu debljine vlakna. Kada se radi o vlaknima koja su kvašljiva uljem (autori su staklena vlakna presvukli organskom presvlakom), zavisnost efikasnosti separacije od debljine vlakna je čak i zanemarljiva.



**Slika 11** Uticaj prečnika staklenih vlakana na efikasnost separacije kapi mineralnih ulja (Akagi i saradnici 1990)

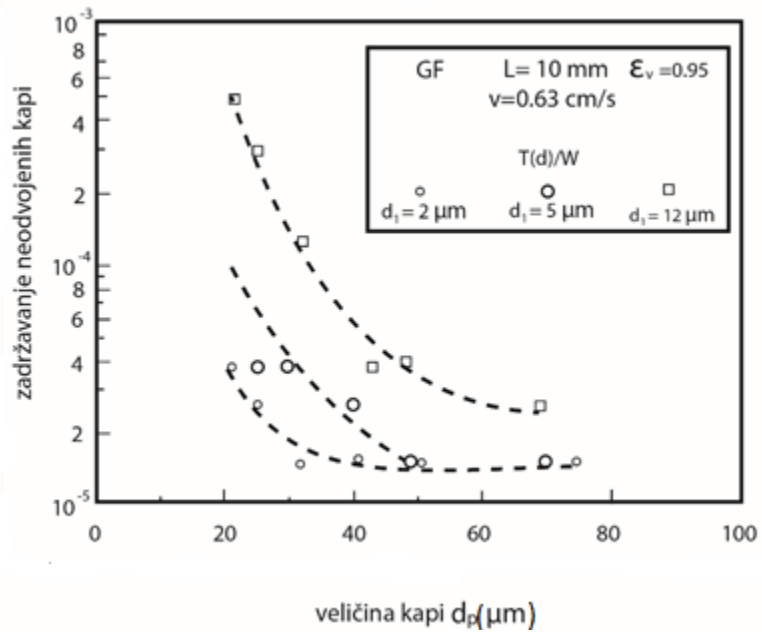
Rebelein i Blass (1990) su istraživali uticaj prečnika kapi, prirode dispergovane faze, prirode vlaknastog materijala, debljine sloja, kao i brzine strujanja fluida na separaciju, kako emulzije ulje u vodi, tako i emulzije voda u ulju, koristeći vlakna različitog prečnika. Koristili su vlakna GL, nerđajućeg čelika (SS) i politetrafluoroetilena (PTFE). Osnovne osobine vlakana i poroznost sloja date su u tabeli 4. Autori su zaključili da vlakna SS ostvaruju najveću efikasnost separacije kapi ulja iz vode. Veliki nedostatak ovih istraživanja jeste to što su korišćena vlakna različite prirode, ali istovremeno i različitog prečnika. Jedina korišćena vlakna od polimera imaju prečnik  $40 \mu\text{m}$ , dok su prečnici vlakana SS od  $5 \mu\text{m}$ ,  $12 \mu\text{m}$  i  $50 \mu\text{m}$ . Na osnovu prikazanih dijagrama ne može se zaključiti na koju debljinu vlakana SS se dati zaključak odnosi. Dati rezultati odnose se na različite debljine slojeva, te komentari i dijagrami nisu u saglasnosti jedni sa drugima.



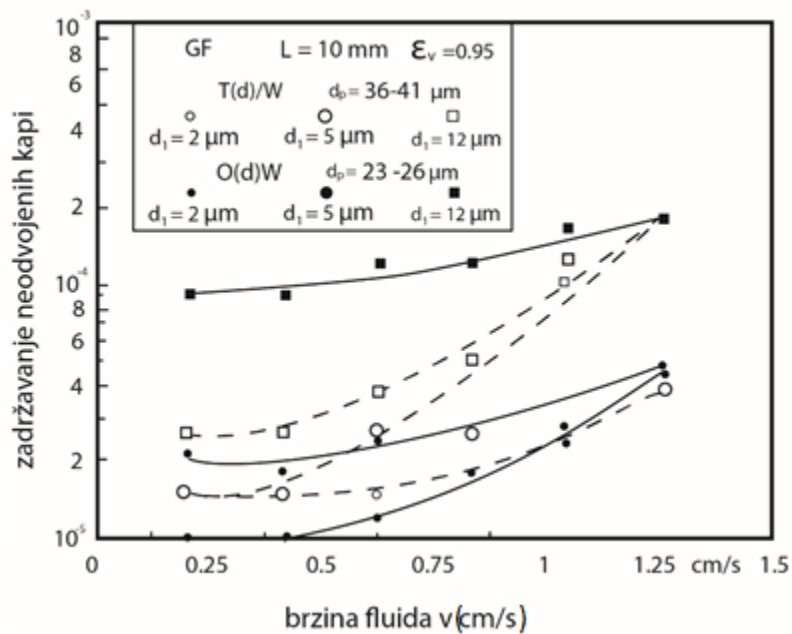
**Tabela 4** Prečnici vlakana i poroznost slojeva (Rebelein i Blass 1990)

<b>Materijal vlakna</b>	<b>Prečnik vlakna (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Specifična površina vlakna (<math>\text{m}^2/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Poroznost sloja</b>
<b>PTFE</b>	40	16222	0,818
<b>GL</b>	12	16340	0,951
<b>SS</b>	5	12589	0,984
	12	8550	0,974
	50	1462	0,982

Magiera i Blass (1997) su istraživali uticaj prečnika i prirode vlakana, debljine sloja, prečnika kapi i prirode dispergovane faze na separaciju sistema ulje u vodi i vode u ulju. Kao dispergovana faza, korišćena su organska jedinjenja. Korišćena su vlakna GL (prečnika 2,5  $\mu\text{m}$  i 12  $\mu\text{m}$ ), SS (prečnika 2,8  $\mu\text{m}$  i 12  $\mu\text{m}$ ) i TE (prečnika 60  $\mu\text{m}$ ). Debljina sloja je varirana od 5 mm do 30 mm. Eksperimenti su realizovani pri horizontalnoj orijentaciji toka fluida. Poroznost sloja se kretala između 0,9 i 0,975. Autori su analizirali uticaj debljine vlakana u slojevima jednake poroznosti, koji su formirani pakovanjem vlakana različite debljine. Na taj način, povećava se aktivna površina čvrstog materijala u sloju i smanjuju se veličine pora. Efikasnost separacije kapi različitog prečnika vlaknima od stakla opada porastom debljine vlakana, naročito za sitnije kapi pri konstantnoj debljini sloja i brzini strujanja fluida, slika 12. Ovo je redak slučaj da su dati rezultati istraživanja uticaja debljine vlakana koji se mogu smatrati relevantnim jer su realizovani u definisanim i kontrolisanim uslovima. Važno je istaći da se i ovde radi o situaciji u kojoj dispergovana faza ne kvasi vlakna filterskog materijala. Isto je važno podvući da su kapi bile čiste organske tečnosti koje se drugačije ponašaju od multikomponentnih smeša (Govedarica i Sokolović 2014, Šećerov Sokolović i saradnici 2016). Treba naglasiti da je raspon debljine korištenih vlakana izuzetno mali (5-12  $\mu\text{m}$ ). Autori su prikazali i uticaj debljine vlakana pri separaciji kapi toluena i oktana konstantne veličine pri različitoj brzini strujanja fluida, slika 13. U slučaju separacije oktana, uticaj debljine vlakana je značajan i izlazna koncentracija drastično opada smanjenjem debljine vlakana od stakla. I za separaciju kapi toluena zakonitost je jednaka, jedino se uočava manji uticaj debljine vlakana. Priroda ulja može umanjiti uticaj debljine vlakana.

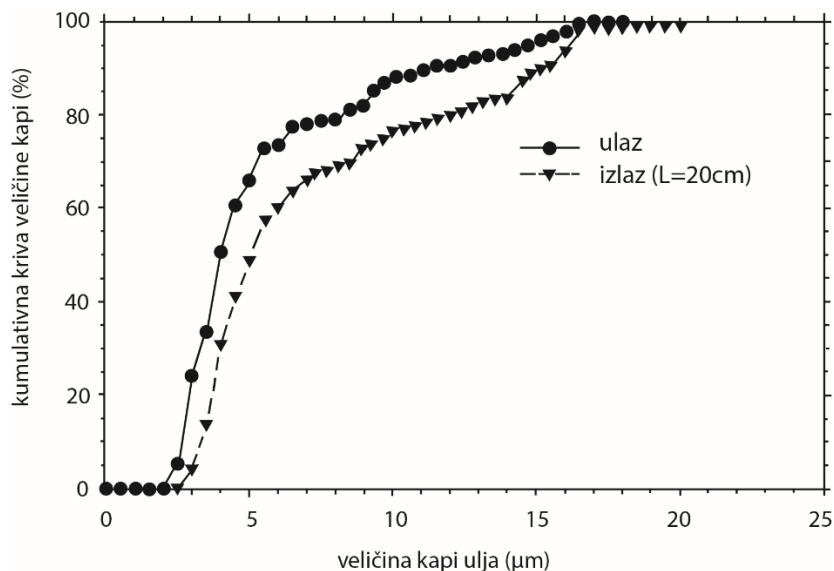


**Slika 12** Zadržavanje neodvojenih kapi različite veličine staklenim vlaknima različitog prečnika (Magiera i Blass 1997)

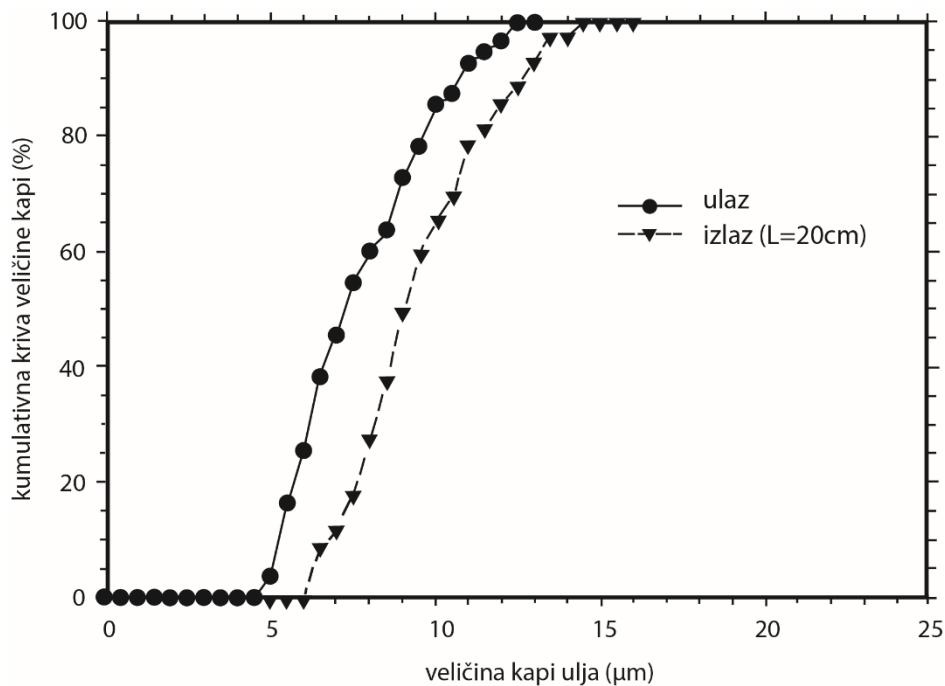


**Slika 13** Zadržavanje neodvojenih kapi za staklena vlakna različitog prečnika pri različitim brzinama strujanja fluida (Magiera i Blass 1997)

Li i Gu (2005) su istraživali koalescenciju u sloju vlakana PP i NA, kao i u sloju granula PP, pri horizontalnoj orijentaciji toka fluida varirajući brzinu strujanja, ulaznu koncentraciju, debljinu vlakana, prirodu ulja i veličinu ulaznih kapi. Ulazna koncentracija ulja u oglecima je bila 2000-10000 ppm. Separacija kapi ulja iz vode je vršena primenom vlakana PP, prečnika 170  $\mu\text{m}$ , i vlakana od najlona prečnika, 80  $\mu\text{m}$ . Kao uljna faza, korišćena je jedna nafta i mineralno ulje bliske gustine. Proučavana je promena pada pritiska pri strujanju jedne faze i pri strujanju stabilne emulzije. Takođe, određivana je promena broja i veličine kapi na ulazu i izlazu. Na osnovu ostvarenih rezultata, slike 14 i 15, autori su dali sledeće zaključke. Kumulativna kriva raspodele ima niže vrednosti za 15 % u odnosu na ulaz za vlakna PP pri ulaznoj koncentraciji od 5000 mg/l, slika 14. Zapravo, za toliko opada procenat zastupljenosti srednjeg prečnika kapi na ulazu, koji iznosi 5,53  $\mu\text{m}$ . Kod vlakana NA, ta vrednost pri jednakim uslovima rada, iznosi 37 %, tj. procenat srednjeg prečnika kapi od 7,66  $\mu\text{m}$  se za toliko smanji na izlazu. Ovo povećano ukрупnjavanje kapi za vlakna NA objašnjeno je smanjenom debljinom vlakana. Pri tome, potpuno je zanemarena činjenica da su korišćena vlakna različite hemijske prirode uz obrazloženje da je dovoljna odrednica da su obe vrste vlakna kvašljiva uljem, što istraživanja drugih autora nisu potvrdila.



**Slika 14** Kumulativna kriva za sloj od 20 cm za vlakna PP za ulaznu koncentraciju od 5000 mg/l (Li 2005)

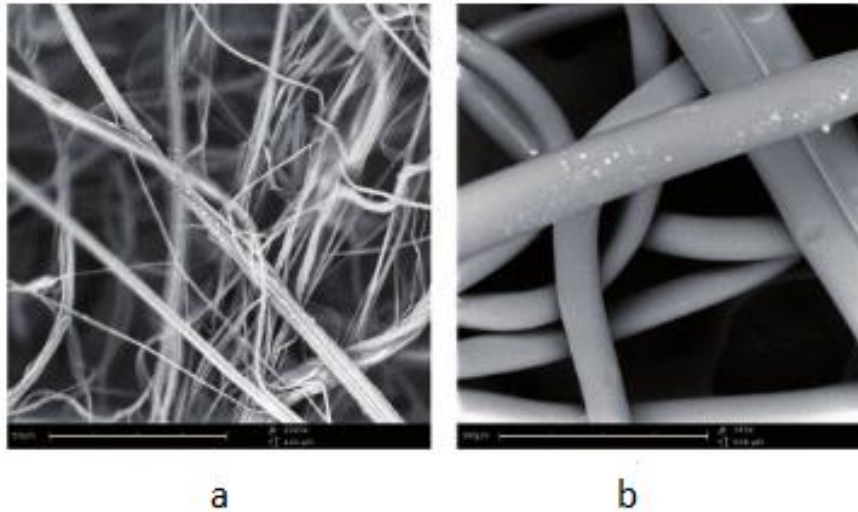


**Slika 15** Kumulativna kriva za sloj od 20 cm za vlakna od najlona za ulaznu koncentraciju od 5000 mg/l (Li 2005)

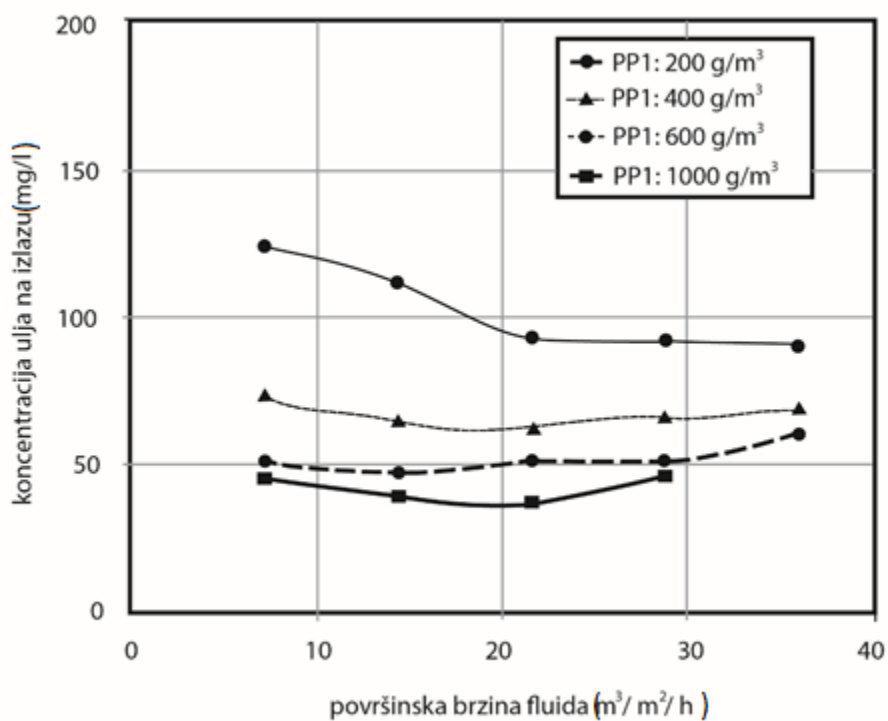
Krasinski (2014, 2016) i Krasinski i Wierzba (2015) su istraživali značaj prečnika vlakana, prirode dispergovane faze, debljine sloja i brzine strujanja fluida na efikasnost separacije kapi ulja iz vode. Kao diskontinualna faza, korišćeno je dizel gorivo sa niskim sadržajem sumpora, ULSD, i ulje Shel V-Oil 1404. Korišćena su vlakna PP pet debljina, čije su karakteristike prikazane u tabeli 5. Izgled vlakana je ispitivan korišćenjem SEM mikroskopije, slika 16. Orijentacija toka fluida bila je horizontalna. Varirana je brzina strujanja fluida, dok je koncentracija dispergovane faze na ulazu bila konstantna i iznosila 1,45 %. Debljina sloja se kretala od 1 mm do 6 mm i prikazana je količinom materijala pakovanom za njeno formiranje (200-1000 g/m<sup>3</sup>). Praćeni su promena pada pritiska i koncentracija ulja na izlazu iz sloja. Uticaj promene debljine vlakana i debljine sloja može se sagledati analizom rezultata na slikama 17 i 18.

**Tabela 5** Osnovne osobine vlakana PP (Krasinski 2014)

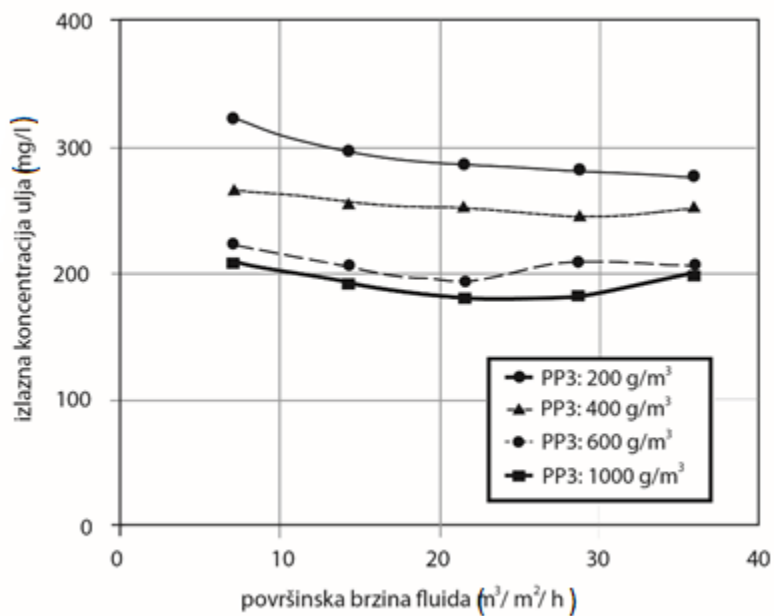
Naziv strukture	Komercijalni naziv	Srednji prečnik vlakna $\mu\text{m}$	Standardna devijacija $\mu\text{m}$	Raspon prečnika vlakna $\mu\text{m}$	Prosečna poroznost sloja %
PP1	Borealls Borflow HL504FB	1,31	1,42	0,32-9,72	$\sim 79,3 \pm 2,4$
PP3		3,53	2,71	0,85-13,7	$\sim 79,0 \pm 2,9$
PP4		11,8	5,59	4,20-22,5	$\sim 84,5 \pm 2,1$
PP5		16,7	6,25	7,83-36,5	$\sim 84,2 \pm 4,2$
PP6		59,5	14,2	31,4-87,0	$\sim 92,2 \pm 3,6$



**Slika 16** SEM snimak vlakana PP različitog kvaliteta: a. PP1 i b. PP6 (Krasinski 2014)



**Slika 17** Zavisnost izlazne koncentracije ulja od brzine strujanja fluida za vlakna PP1 i ulje ULSD (Krasinski 2014)

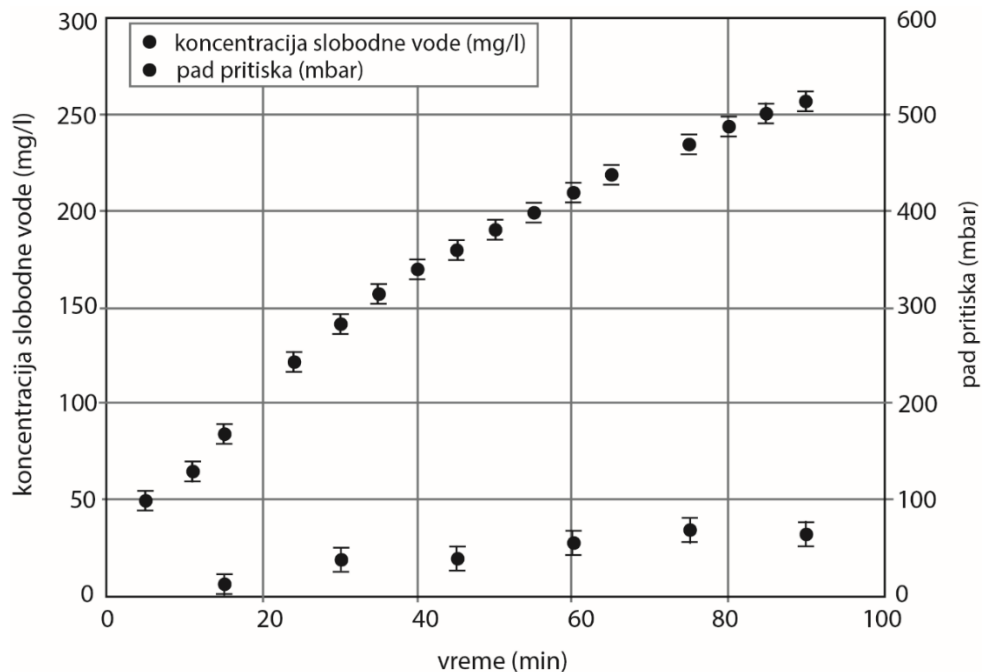


**Slika 18** Zavisnost izlazne koncentracije ulja od brzine strujanja fluida za vlakna PP3 (Krasinski 2014)

---

Porastom debljine sloja, za posmatrani opseg vrednosti, opada izlazna koncentracija ulja dok brzina strujanja ne utiče značajno na izlaznu koncentraciju ulja nezavisno od debljine vlakana. Potvrđeno je da prečnik vlakana značajno utiče na izlaznu koncentraciju ulja, tako što porastom debljine vlakana, za posmatrani opseg, raste izlazna koncentracija ulja pri svim korišćenim debljinama sloja. Neophodno je podvući da su istraživanja Krasinskog jedinstvena, pošto su korišćena vlakna koja su kvašljiva uljnom fazom po svojoj prirodi, a nisu veštački modifikovana nanošenjem presvlake (Himma i saradnici 2017a, 2017b). Sva dosadašnja istraživanja uticaja debljine vlakana za sistem ulje u vodi bila su na vlaknima GL ili SS koja ne kvase dati materijal. Time je sumnja nekih istraživača da je uticaj debljine zanemarljiv u tim okolnostima potpuno isključena. Znači, uticaj debljine vlakana je značajan i kada dispergovana faza kvasi i kada ne kvasi vlakna. Ono što je nedostatak ovih istraživanja je to što je sloj formiran uvek jednakom masom materijala za određenu debljinu sloja nevezano o kojoj debljini vlakana se radi. Na taj način, aktivna površina sloja nije jednaka, veći je broj vlakana u sloju smanjenjem debljine vlakana, a time su značajno manje pore, što utiče da se i druge osobine sloja menjaju sa promenom debljine vlakana, koje nisu praćene. Međutim, doneti zaključci se zbog ovoga ne dovode u pitanje.

Krasinski i Wierzba (2015) su u svom narednom radu istraživali efikasnost separacije vlakana PP na separaciju vode iz dizela, pri čemu dispergovana faza ne kvasi vlakna. Slična istraživanja su sprovedeli Kulkarni i saradnici (2014). Motiv za korišćenje hidrofobnih vlakana za dehidrataciju dizela bio je da se utvrdi da li bi se njihovom primenom obezbedila zadovoljavajuća efikasnost separacije pri manjem padu pritiska. U radu su date vrednosti izlazne koncentracije vode na pojedinačnim dijagramima na kojima je uočljivo da su uslovi eksperimenata kod slojeva vlakana od stakla nestacionarni, pošto pad pritiska raste u vremenu eksperimenta, dok kod slojeva vlakana PP to nije slučaj, slike 19 i 20. Prečnik vlakana GL je bio 1,89  $\mu\text{m}$  i imao je poroznost 87,2 %. Korišćenene su dve debljine vlakana PP 1,75  $\mu\text{m}$  i 15,2  $\mu\text{m}$ , a poroznost njihovih slojeva je iznosila 79.3 % i 91.5 %. Eksperimenti su realizovani pri orijentaciji toka fluida odozgo nadole. Opseg brzine strujanja fluida dat je preko protoka od 50 l/h do 159 l/h. Ulazna koncentracija dispergovane faze je bila 2500 mg/l. Srednji prečnik kapi vode iznosio je 6.2  $\mu\text{m}$ .



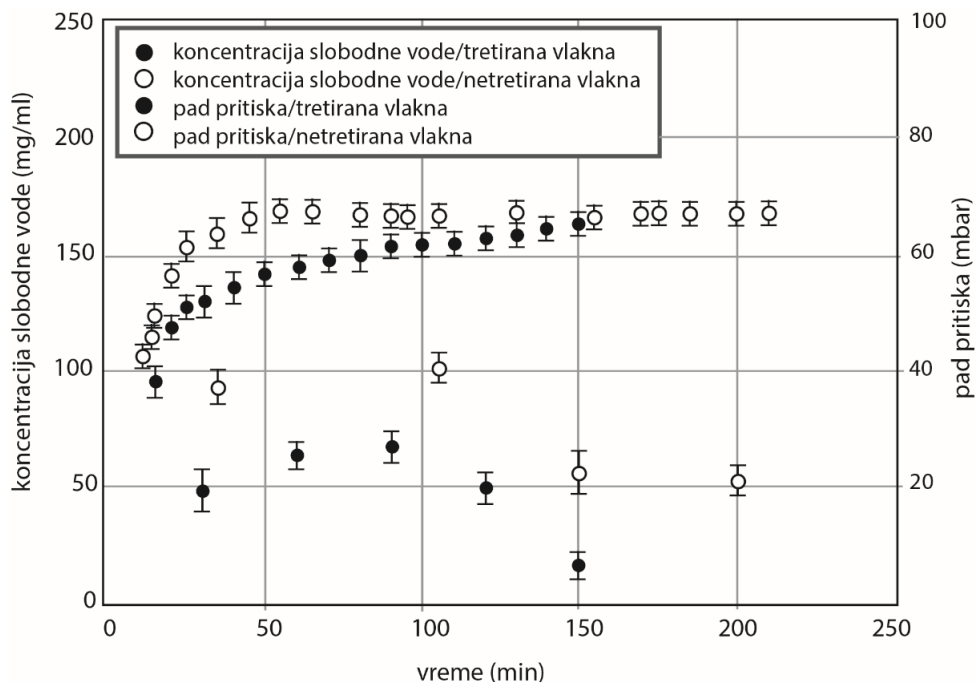
**Slika 19** Promena pada pritiska i izlazne koncentracije vode u vremenu za sloj staklenih vlakana pri protoku od 50 l/h (Krasinski i Wierzba 2015)

Druga grupa istraživanja uticaja debljine vlakana data je kroz promenu debljine po dubini formiranjem sloja sistemom sendviča (Agarwal i saradnici 2013a, 2013b, Fahim i Agbar 1987, Hazlett 1969a, 1969b). Tek su Agarwal i saradnici (2013a, 2013b) povezali sendvič strukuru sa veličinom pora. Fahim i Agbar (1987) su, takođe, smatrali da su pore kod vlakana manje debljine manje od pora kod vlakana veće debljine ali ih nisu merili. Ovo, naravno, ne mora da bude slučaj pošto je to uslovljeno i količinom materijala smeštenim u definisanu zapreminu.

Hazlett (1969a, 1969b) je uočio značaj promene debljine vlakana, i to po dubini sloja. Proučavao je sloj izgrađen od segmenata koji su imali vlakana od stakla različite debljine. Koristio je staklena vlakna prečnika 0,75  $\mu\text{m}$  i 1  $\mu\text{m}$ , kao i staklena vlakna većeg prečnika 2,8  $\mu\text{m}$  i 4,6  $\mu\text{m}$ , za separaciju kapi vode iz kerozina kao kontinualne faze. Orijehtacija toka fluida bila je vertikalno naniže. Autor je utvrdio da je bitan redosled slaganja segmenata vlakana različitog prečnika i da separaciji pogoduje situacija da su tanja vlakna na vrhu sloja, tj. na ulazu fluida u sloj, a deblja na dnu sloja. Deblja vlakna na izlasku kapi iz sloja smanjuju rizik od redisiperzije ukрупnjenih kapi. Hazlett je, verovatno



podrazumevao ali bez isticanja, da u tim okolnostima egzistiraju krupnije pore. Hazlett smatra, takođe, da struktura sloja utiče na dominantne mehanizme zarobljavanja kapi u porama sloja.



**Slika 20** Promena pada pritiska i izlazne koncentracije vode u vremenu za sloj vlakana PP pri protoku od 50 l/h (Krasinski i Wierzba 2015)

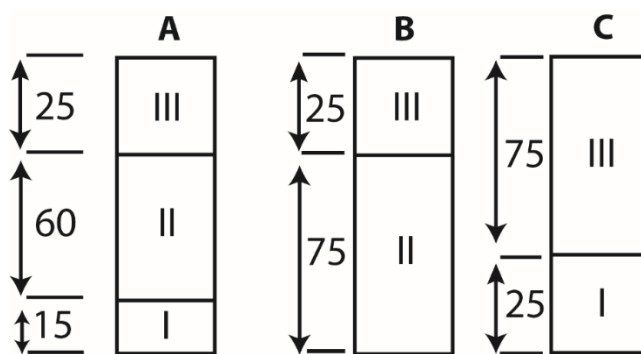
Fahim i Othman (1987, 1988) su, takođe, istraživali efekat promene prečnika vlakana po dubini sloja pri orijentaciji toka fluida vertikalno nagore. Nedostatak njihovih istraživanja ogleda se u tome što su kombinovali u isto vreme vlakna različitog prečnika, ali i različite prirode, a da tu činjenicu uopšte nisu istakli, niti su je smatrali bitnom. Koristili su vlakna GL dve debljine, kao i vlakna PP koja su višestruko deblja od vlakana GL. U tabeli 6, date su osnovne osobine vlakana i slojeva formulacije sa oznakom I, II i III. Na slici 21, dat je šematski prikaz strukture slojeva oznake A, B i C. Ovi slojevi su građeni kao sendvič od slojeva. Debljine segmenata date su u milimetrima.

Na slici 22 data je efikasnost separacije korišćenih slojeva različite strukture u funkciji brzine strujanja fluida. Vrlo je upečatljivo da je sloj oznake A ostvario izuzetno visoku efikasnost separacije, značajno veću od ostalih slojeva. Ako se posmatra struktura sloja A u odnosu na orijentaciju toka fluida, onda fluid ulazi u deo sloja sa najtanjim

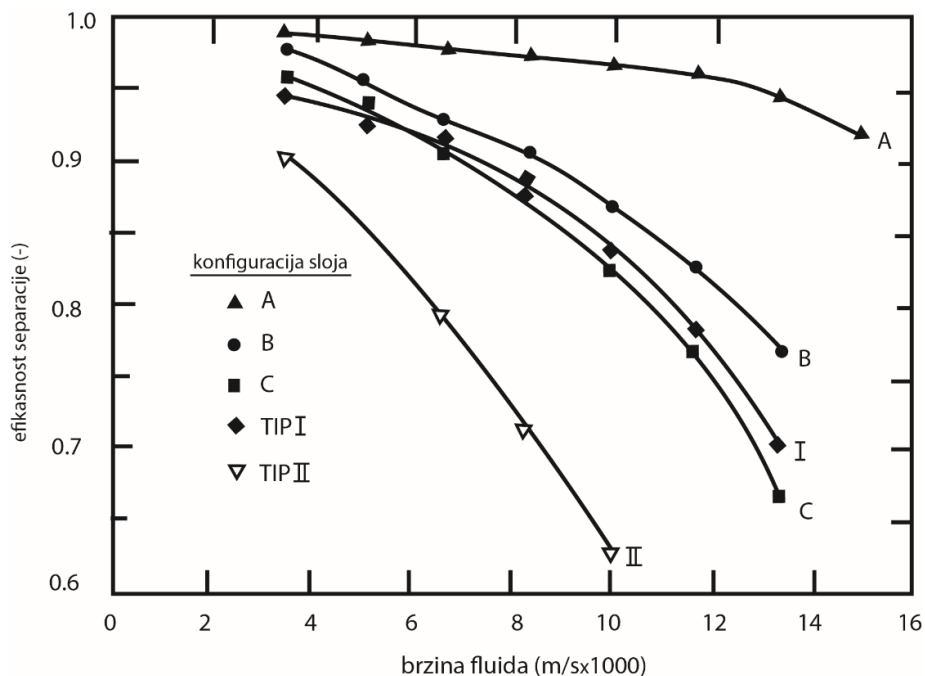
vlaknima oznake I, zatim se nadovezuju vlakna sloja oznake II, čiji je prečnik nešto veći, i završava se sa vlaknima oznake III, čija je debljina najveća i iznosi 400  $\mu\text{m}$ . Kao i kod drugih istraživača, i ovde je potvrđeno da separaciji pogoduje sloj koji ima najveće pore na izlazu fluida iz sloja, a najmanje na ulazu.

**Tabela 6** Neke osobine korišćenih vlakana i sloja (Fahim i Othman 1987)

	Tip I	Tip II	Tip III
<b>Materijal</b>	<b>GL</b>	<b>GL</b>	<b>PP</b>
<b>Srednji prečnik vlakana <math>\mu\text{m}</math></b>	6	25	400
<b>Specifična površina <math>\text{ft}^2/\text{ft}^3</math></b>	1500	800	450
<b>Poroznost sloja %</b>	84-88	88	95



**Slika 21** Šematski prikaz strukture slojeva A, B i C (Fahim i Othman 1987)



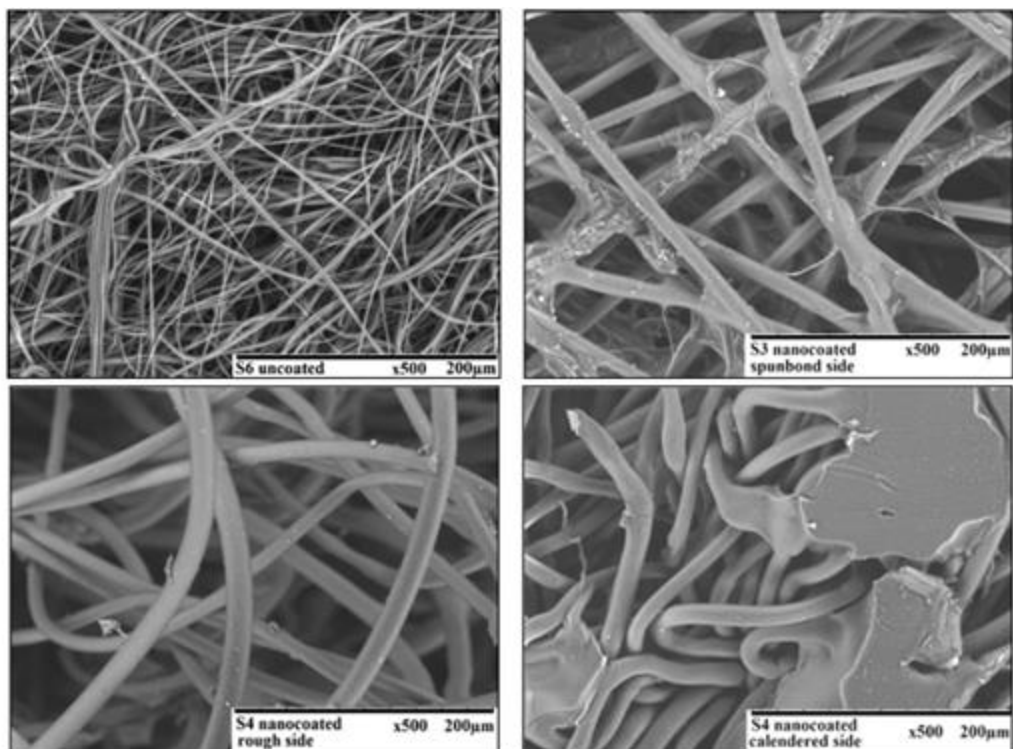
**Slika 22** Zavisnost efikasnosti separacije dispergovane faze od brzine strujanja fluida za slojeve različite strukture (Fahim i Othman 1987)

Agrawal i saradnici (2013a, 2013b) su istraživali uticaj prečnika vlakana, njihovog rasporeda po dubini sloja i uticaj površinske energije materijala na koalescentnu filtraciju. Kao dispergovanu fazu imali su izooktan u vodi koncentracije 1 %. Koristili su vlakna od polibutilen tereftalata (PBT) i poliester (PET) različite debljine, kao i njihove mešavine. Osnovne osobine korišćenih devet kombinacija slojeva prikazane su u tabeli 7. Prečnici vlakana PBT su 2  $\mu\text{m}$  do 3  $\mu\text{m}$ , a od vlakna PET 10  $\mu\text{m}$  do 12  $\mu\text{m}$  i 12  $\mu\text{m}$  do 14  $\mu\text{m}$ . Debljina sloja varirana je od 0,32 mm do 5,87 mm, dok je poroznost bila od 78 % do 88%. Energija površine vlakana, a time i njihova kvašljivost, menjana je nanošenjem nano čestica silikona i siloksana bez fluora. Autori su analizirali rezultate preko faktora kvaliteta i efikasnosti separacije.

**Tabela 7** Osobine vlakana i njihovih slojeva (Agarwal i saradnici 2013b)

<b>Materijal</b>	<b>Polimer i struktura</b>	<b>Prečnik vlakna (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Debljina (mm)</b>	<b>Poroznost</b>	<b>Veličina pora [<math>d_{p50}</math>] (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
<b>S3</b>	PBT+ PET	2-3 + 10-12	1,64	0,87	6-20 [9,3]
<b>S4</b>	PET	12-14	1,95	0,78	9-51 [13,5]
<b>S6</b>	PBT	2-3	0,32	0,88	8-23 [11,1]
<b>SF7</b>	S3 + S4		3,60	0,83	6-24 [10,0]
<b>SF8</b>	S6 + S3		1,95	0,88	5-19 [8,7]
<b>SF9</b>	S6 + S6 + S6 + S3		2,60	0,88	3-16 [7,8]
<b>SF10</b>	S6 + S4 + S4		4,20	0,81	5-33 [8,6]
<b>SF11</b>	S6 + S3 + S4		3,93	0,84	5-24 [7,7]
<b>SF12</b>	S6 + S3 + S4 + S4		5,87	0,83	4-22 [6,8]

Autori su pripremili, kako slobodna, tako i povezana vlakna, kako bi veličina pora bila nepromenjena i pratili efekat veličine pora po dubini sloja, slika 23. Autori su potvrdili nalaze ranijih istraživanja da je neophodno da se na ulazu u sloj nalaze vlakna najmanjeg prečnika, kao i da prečnici vlakana treba da se povećavaju od ulaza prema izlazu iz sloja, ako se time povećava veličina pora, slike 24 i 25. Agarwal i saradnici su konačno povezali uočeni fenomen sa veličinom pora.



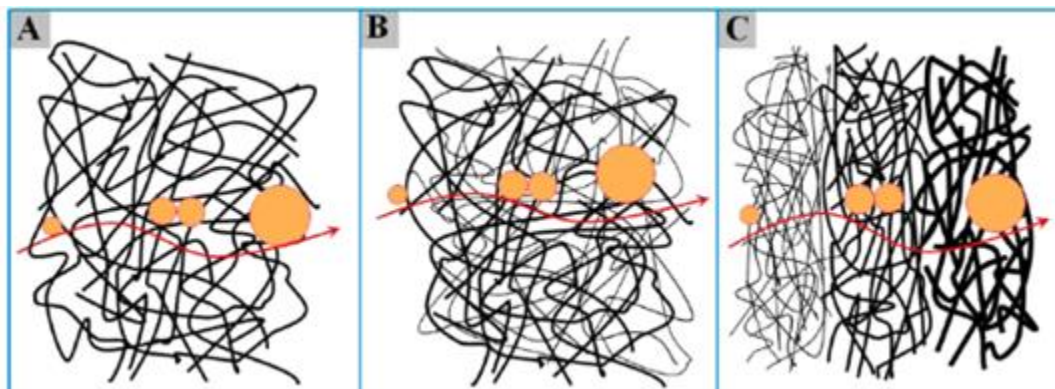
**Slika 23** Morfologija nasumice nasutih vlakana (Agarwal i saradnici 2013b)

Promenom geometrije sloja, prema ovim istraživanjima, menjaju se dominantni mehanizmi zarobljavanja i koalescencije kapi, slika 25 što je napominjao još Hazlett.

Na slici 24, prikazan je sloj vlakana jednake debljine. Slika 24b prikazuje sloj nasumice pomešanih vlakana dve debljine. Na slici 24c, prikazana je sendvič struktura u kojoj raste debljina vlakana od ulaza prema izlazu, ali raste i veličina pora po dubini. Kada su vlakna jednakog prečnika, do koalescencije kapi dolazi odmah, te u tim okolnostima postoji rizik da dođe do redisperzije ukрупnjenih kapi daljim prolaskom kroz sloj. Kada se koristi sloj pomešanih vlakana, tada dolazi do još efikasnije koalescencije, ali je rizik od redisperzije kapi još veći. Kada veličina pora u sloju raste smerom kretanja tečnosti, tada se postiže optimalna struktura u kojoj se kap ukрупnjava na ulazu i, prolazeći kroz veće pore, izbegava opasnost od redisperzije. Ovde opisani efekti mogu se videti na slici 25. Ako se posmatra efikasnost separacije, šrafirani pravougaonici, tada se može konstatovati da se vrednost efikasnosti kreće od 32 % do 66 %. Najniža efikasnost je postignuta za sloj S4, a najviša za sloj SF12. Struktura ova dva sloja je potpuno različita. Sloj S4 ima PET vlakna koja su slobodna i nasumično poređana, dok sloj SF12 ima takvu strukturu gde po

---

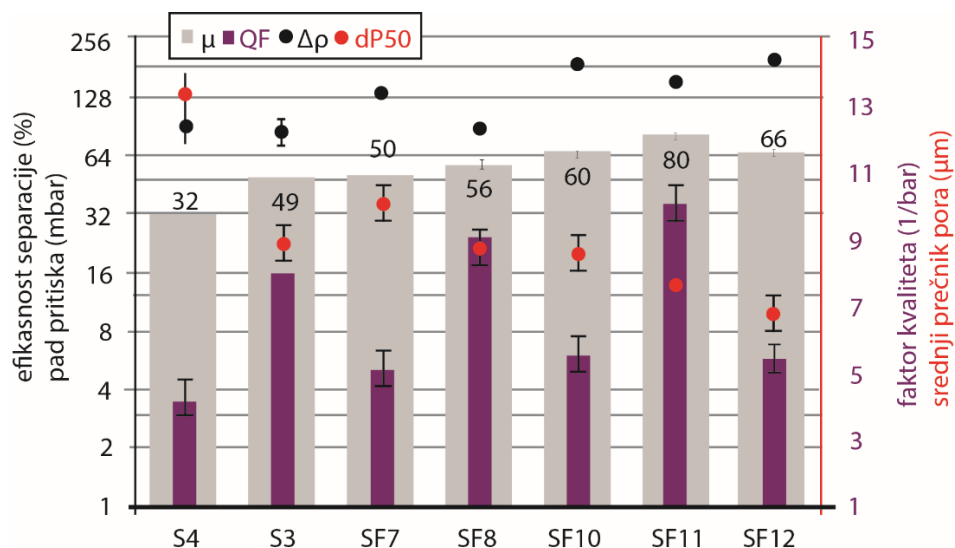
dubini raste veličina pora. Efekat je vrlo upečatljiv, a efikasnost separacije je duplirana. Pad pritiska je za ova dva slučaja među nižima u prikazanim eksperimentima.



**Slika 24** Zarobljavanje i koalescencija kapi u sloju vlakana

- a. kap u sloju jednake debljine vlakana b. kap u nasumično pomešanim vlaknima dve debljine i c. kap u sendvič sistemu, gde debljina vlakna raste od ulazaprema izlazu (Agarwal i saradnici 2013b)

Neophodno je istaći da su ova istraživanja obavljena primenom kapi dispergovane faze koje su reda veličine pora. Kada se radi u okolnostima da su veličine pora značajno veće od veličine kapi, tada situacija može biti drugačija pošto je asortiman mehanizama zarobljavanja kapi u porama sloja značajno veći (Elimelech 1992, , Elimelech i O Melia 1990a, 1990b , Elimelech i saradnici 1998, Ryan 1996).



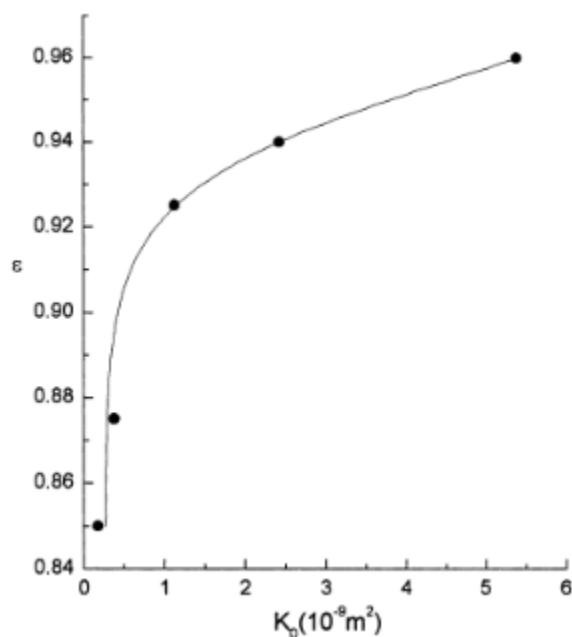
**Slika 25** Poređenje efikasnosti separacije, faktora kvaliteta i pada pritiska između slojeva različite strukture (Agarwal i saradnici 2013b)

### 2.3.2. Uticaj permeabilnosti sloja

Jedini autori koji su proučavali uticaj promene permeabilnosti sloja vlakana na separaciju kapi su istraživačka grupa Šećerov Sokolović i saradnici. Dominanto su istraživali efikasnost separacije kapi mineralnih ulja različite polarnosti primenom sloja vlakana od polimera različite prirode, ali bliskog prečnika reda veličine oko 40 μm (Šećerov Sokolović i saradnici 1997, 2003a, 2003b, 2006, 2007, 2010, 2014, 2016, Vulić 2000). U svojim radovima su koristili otpadne polimerne materijale koji su balast u industriji. Poliuretan je otpad u proizvodnji nameštaja (PU). Polietilenteraftalat koristi se kao termo punjenje u proizvodnji zimskih jakni (BA1) ili kao filter za kuhinjske aspiratore (PE), dok su vlakna polipropilena otpad u proizvodnji tepiha (PP). I drugi su istraživači uočili da je sloj formiran od polimernih vlakana kompresibilan (Woudberg i saradnici 2014, 2018, Woudberg 2017, Zhu Z. i saradnici 2017). Oni nisu našli pravi put kako da obezbede sloj poznate i kontrolisane geometrije njegovim sabijanjem i kompresijom. Problem je što polimerni materijali imaju širok raspon gustine, te nije masa materijala ta koju treba držati konstantom kada su različiti materijali u pitanju. Šećerov Sokolović i saradnici su uveli zavisnost poroznosti od permeabilnosti za sloj vlakana PU, slika 26 (Šećerov Sokolović i saradnici 2003a, 2003b, Vulić 2000).

Magistarski rad Vulić (2000) je postavio za cilj istraživanje uticaja orijentacije toka fluida i promene nasipne gustine PU, uz simultanu promenu debljine sloja, na koalescenciju emulzije u poroznom sloju. Rezultati ovog magistarskog rada su vrlo dragoceni i daju značajan doprinos razumevanju uticaja promene orijentacije toka fluida i geometrije sloja kroz promenu nasipne gustine o čemu, u dostupnoj literaturi, skoro uopšte nije bilo reči. U ovom radu, urađena je detaljna analiza različitih metoda određivanja kritične brzine strujanja fluida. Na osnovu opsežnih istraživanja usvojeno je da se ubuduće kritična brzina strujanja određuje kao brzina strujanja pri kojoj je postignuta koncentracija dispergovane faze na izlazu od 15 mg/l. Ta količina ulja je često zahtevana norma za sadržaj mineralnih ulja u otpadnim vodama definisana propisima (Zakon o vodama 30/10, Uredba 67/11, 48/12). Ovako određena kritična brzina često označena je kao  $vk_{15}$ .

Na osnovu date zavisnosti, slika 26, moguće je odabrati željenu permeabilnost sloja PU, očitati posledičnu poroznost i tada, iz relacije za poroznost, izračunati masu materijala koja je potrebna za njegovo formiranje. Šećerov Sokolović i saradnici (2003a) smatraju da je permeabilnost u odnosu na poroznost sloja mnogo važnija osobina pošto daje informaciju o slobodnom poprečnom preseku za protok fluida, tj. prikazuje zastupljenost samo protočnih pora koje i jesu bitne za protok fluida. Poroznost sloja uključuje i slepe pore kroz koje fluid uopšte ne prolazi.



**Slika 26** Zavisnost poroznosti od permeabilnosti sloja PU  
(Šećerov Sokolović i saradnici 2003a)

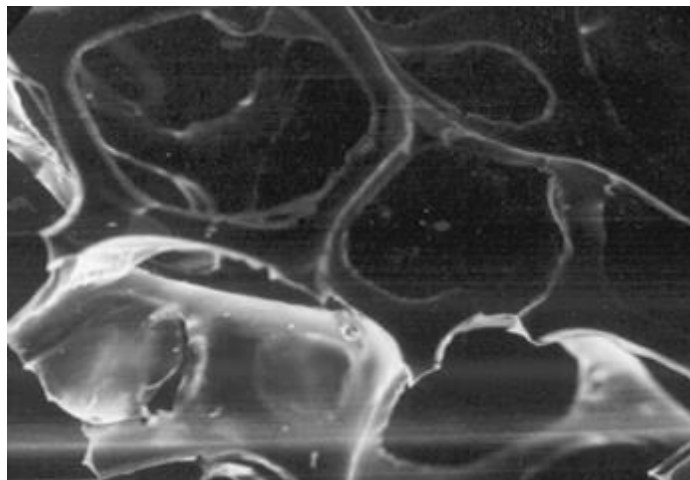


Za sloj formiran od vlakana PU, Šećerov Sokolović i saradnici (2003a) su dali osnovne informacije u funkciji nasipne gustine korišćene za njegovo formiranje. Prečnik pora se smanjuje sabijanjem materijala u definisanu zapreminu. U isto vreme, raste aktivna površina, a smanjuje se i permeabilnost i poroznost, tabela 8. Navedene vrednosti permeabilnosti sloja su zadržane u svim narednim istraživanjima ove istraživačke grupe bez obzira o kom materijalu je reč.

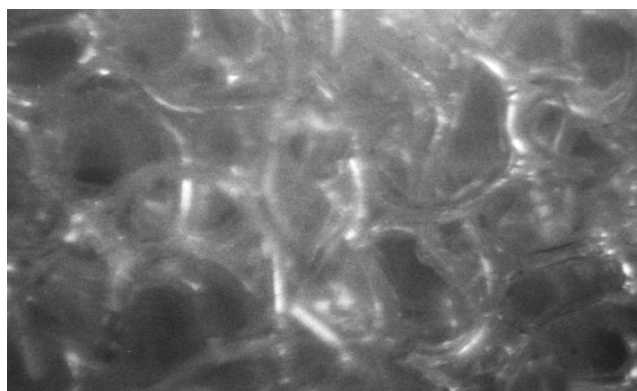
**Tabela 8** Karakteristike sloja PU različite nasipne gustine  
(Šećerov Sokolović i saradnici 2003a)

	Nasipna gustina kg m <sup>-3</sup>				
	50	70	90	150	180
<b>Dijagonala šestougla D mm</b>	0,50	0,40	0,30	0,25	0,20
<b>Udeo čvrstog <math>\phi</math></b>	0,04	0,06	0,08	0,13	0,15
<b>Poroznost sloja <math>\epsilon</math></b>	0,96	0,94	0,93	0,88	0,85
<b>Specifična površina S mm<sup>-1</sup></b>	3,36	4,64	6,00	10,0	12,0
<b>Permeabilnost sloja <math>K_0 \cdot 10^9 \text{ m}^2</math></b>	5,39	2,43	1,13	0,38	0,18

Sloj vlakana PU ima pore heksagonalnog oblika, što je jasno uočljivo na snimcima urađenim SEM i optičkim mikroskopom. Vlakna su povezana, te time, u odnosu na slobodna vlakna drugih polimera, taj sloj sigurno ima različit raspored vlakana u svojoj zapemini, slike 27 i 28, (Šećerov Sokolović i Sokolović 2000). Sloj vlakana PU je i dalje u fokusu istraživača za separaciju ulja iz vode (Guo i saradnici 2017, Hu i saradnici 2015a, 2015b, 2017).



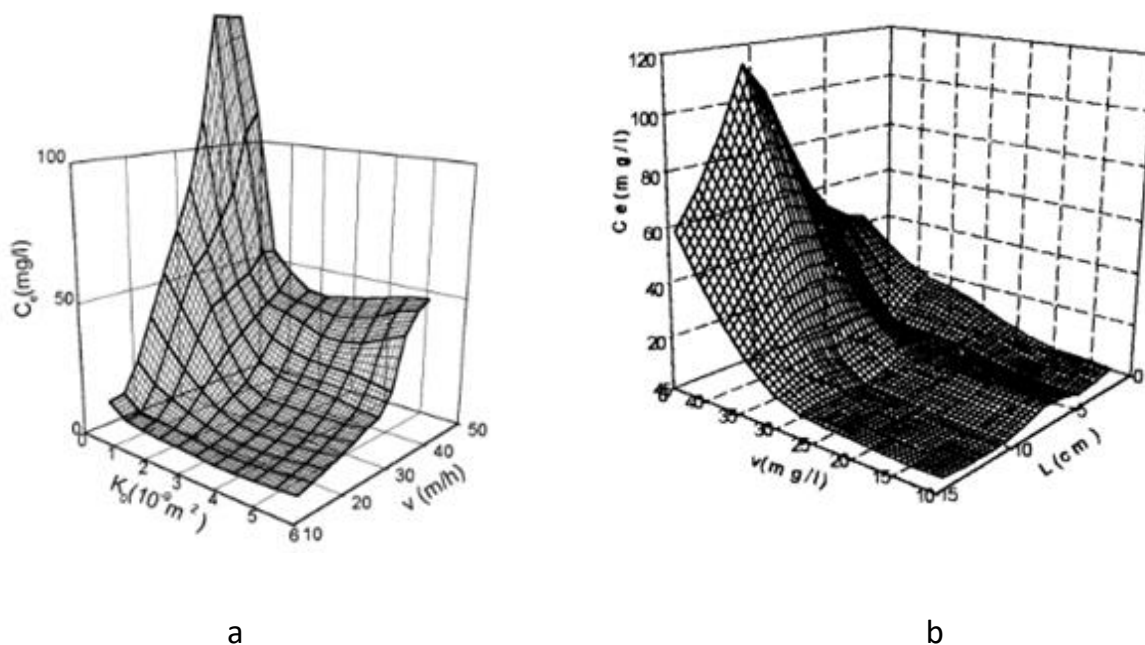
**Slika 27** Snimak materijala PU: SEM 60x nesabijeno (Šećerov Sokolović i Sokolović 2000)



**Slika 28** Snimak materijala PU snimak optičkim mikroskopom 40x pri nasipnoj gustini  $50 \text{ kg/m}^3$  (Šećerov Sokolović i Sokolović 2000)

Zbog velikog broja promjenljivih koje su proučavali, Šećerov Sokolović i saradnici su analizirali rezultate preko kritične brzine strujanja (Šećerov Sokolović i saradnici 2003a, 2006, 2007, 2010, 2014, Vulić 2000). Tako, brzina strujanja prelazi iz nezavisno u zavisno promjenljive veličine, sa ciljem da se pronađu uslovi u kojima ona dostiže maksimalnu vrednsot. Na taj način, postiže se minimiziranje dimenzija uređaja, što je važno u svim okolnostima zbog smanjenog utroška konstrukcionog materijala, ali je naročito važno na brodovima i naftnim platformama zbog racionalizacije prostora i tereta. Pri tome, neophodno je voditi računa o utrošku električne energije za rad pumpe. Variranje permeabil-

nosti direktno utiče na pad pritiska kroz sloj. Otkrivši ključ za analizu rezultata, uz permeabilnost sloja kao obaveznu nezavisno promenljivu, ovi istraživači su uspeli da objasne neke fenomene za koje su postojali, naizgled, kontradiktorni stavovi u literature: kao, na primer, uticaj debljine sloja, uticaj orijentacije toka fluida, uticaj osobina dispergovane faze, uticaj prirode vlaknastog sloja, uticaj geometrije uređaja. Oni smatraju da su brzina strujanja fluida i permeabilnost sloja krucijalne veličine, koje uslovljavaju zbivanja pri separaciji kapi ulja primenom vlaknastog sloja, slika 29.

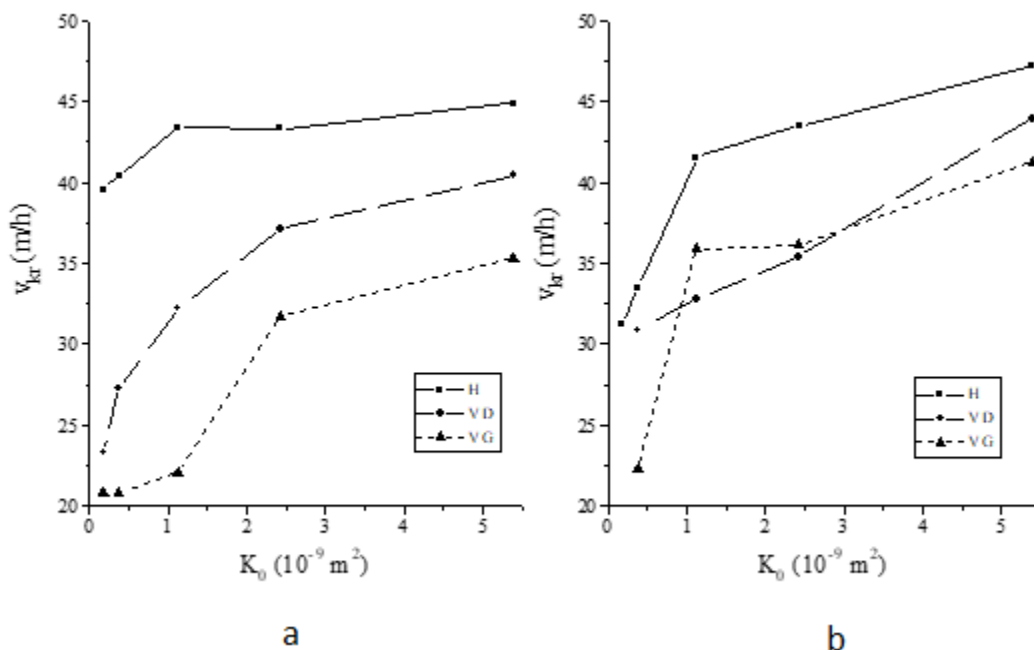


**Slika 29** 3D dijagrami zavisnosti izlazne koncentracije sloja PU od

a. permeabilnosti i brzine za sloj debljine 5 cm pri ulaznoj koncentraciji od 500 mg/l i orijentaciji VG b. brzine i debljine sloja pri ulaznoj koncentraciji 800 mg/l i orijentaciji H (Vulić 2000)

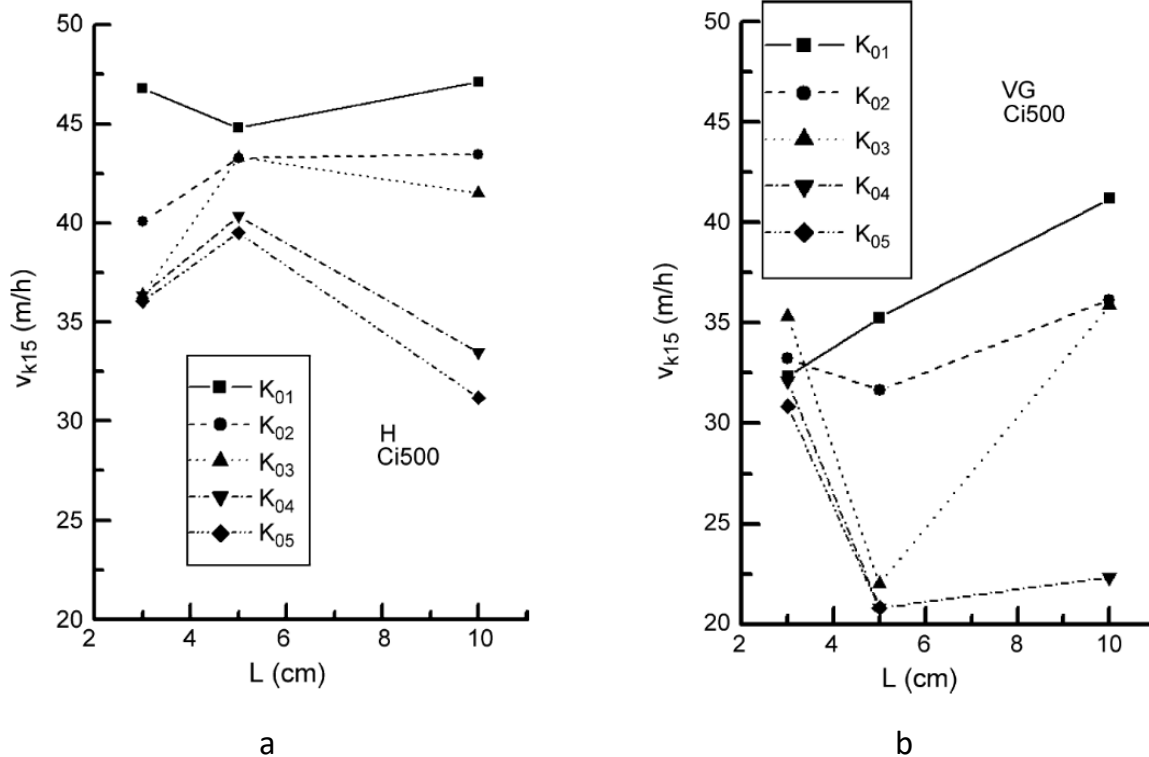
Na prikazanom dijagramu, slika 29a, vrlo je upečatljiv uticaj, kako brzine strujanja, tako i permeabilnosti sloja, na izlaznu koncentraciju dispergovane faze. Pošto je u pitanju polimerni materijal PU, smanjenjem permeabilnosti i porastom brzine strujanja drastično raste izlazna koncentracija dispergovane faze. Kada je reč o uticaju debljine za isti filterski materijal, može se uočiti da je on uslovljen vrednošću brzine strujanja, slika 29b. Što je veća brzina, to je veći značaj debljine sloja za posmatrani opseg pri ulaznoj koncentraciji od 500 mg/l i horizontalnoj orijentaciji toka fluida.

Šećerov Sokolović i saradnici (2003a) su uveli da bi se sva istraživanja fenomena koalescencije u vlaknastom sloju morala proučavati uz obavezan istovremeni uticaj promene permeabilnosti sloja i promene brzine strujanja fluida. Kao ilustracija značaja ovakvog prilaza, daju se neki rezultati analize istovremenog uticaja permeabilnosti sloja, brzine strujanja fluida, orijentacije toka fluida i debljine sloja za filterski materijal PU, slike 30 i 31.



**Slika 30** Zavisnost  $v_{k15}$  od permeabilnosti sloja za debljine sloja: a. L5 i b. L10 pri sve tri orijentacije toka fluida (Vulić 2000)  
 orijentacija toka fluida H-horizontalna VD-vertikalno na dole VG-vertikalno na gore

Jasno je uočljivo da kritična brzina drastično zavisi od permeabilnosti sloja pri sve tri orijentacije toka fluida i da bi svi zaključci mogli biti pogrešni da su ogledi rađeni samo pri jednoj permeabilnosti, što je čest slučaj u publikovanim istraživanjima, slika 30 (Šećerov Sokolović i saradnici 2006). Takođe, vrlo je uočljivo da su vrednosti kritične brzine značajno uslovljene orijentacijom toka fluida i da su one najveće, pri svim primenjenim uslovima, za horizontalnu orijentaciju. Iz tih razloga, Šećerov Sokolović i saradnici nastavljaju svoja istraživanja samo pri toj optimalnoj orijentaciji.



**Slika 31** Zavisnost  $v_{k15}$  od debljine sloja za: a. orijentaciju H  
b. za orijentaciju VG pri svim permeabilnostima (Vulić 2000)

Kada se u analizu uticaja debljine sloja uključe obe veličine permeabilnosti i orijentacija toka fluida, tada se pojave objašnjenja za naizgled kontradiktorne stavove o uticaju debljine sloja na separaciju kapi koalescentnom filtracijom, koji su dati u literaturi (Šećerov Sokolović i saradnici 2007).

Ista istraživačka grupa uvodi jednu novu veličinu, izokritičnu brzinu koristeći konturne dijagrame za analizu rezultata (Govedarica i saradnici 2013). Kontura u konturnim dijagramima je linija koja povezuje tačke koje imaju jednaku vrednost kritične brzine. Na taj način, jasno se vide oblasti povoljne za rad.

Šećerov Sokolović i saradnici (2006) su objavili rezultate koji ilustruju uticaj orijentacije toka fluida na koalescentnu filtraciju u stacionarnom stanju. Na osnovu prikazanih rezultata, slika 31, jasno se vidi da se pri horizontalnoj orijentaciji, pri jednakim svim ostalim uslovima, realizuju najviše vrednosti kritične brzine strujanja  $v_{k15}$  za sve

---

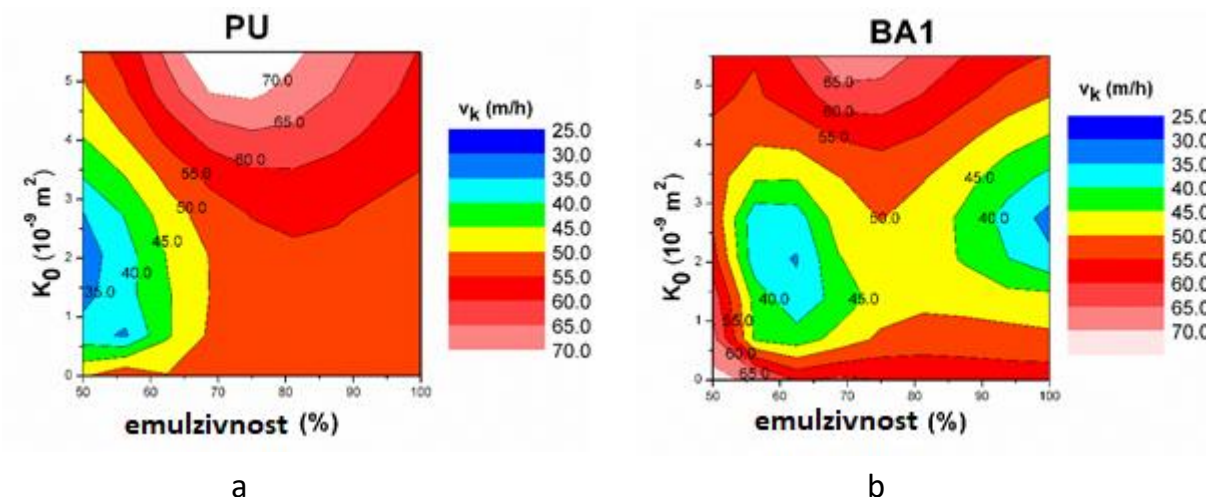
korišćene debljine sloja. Ovako drastične razlike vrednosti kritične brzine strujanja pri različitoj orijentaciji dovodi u pitanje poređenje rezultata datih u literaturi koji nisu realizovani pri jednakoj orijentaciji, kao i pri jednakoj vrednosti permeabilnosti sloja, pošto pri svim ulsovima, porastom permeabilnosti značajno raste vrednost kritične brzine strujanja  $v_{k15}$ .

Šećerov Sokolović i saradnici (2007) su uspeli da povežu i objasne sve do tada publikovane kontradiktorne stavove o uticaju debljine sloja vlakana pri simultanom uticaju orijentacije toka fluida i permeabilnosti sloja. Oni su potvrdili stav prethodnika da postoji minimalna debljina sloja ispod koje je efikasnost separacije drastično mala. U datim okolnostima, to je debljina od 3 cm, slika 31a. Upravo je razlog postojanja kontradiktornih stavova bio taj što su istraživanja realizovana pri različitim orijentacijama toka fluida, a poređena su međusobno zanemarujući tu činjenicu. Takođe, može se konstatovati da promena permeabilnosti sloja najčešće ne utiče na oblik zavisnosti kritične brzine strujanja od debljine sloja, ali značajno utiče na numeričku vrednost kritične brzine strujanja  $v_{k15}$ . Smanjenjem permeabilnosti značajno opada vrednost  $v_{k15}$  pri svim orijentacijama i debljinama sloja vlakana od korišćenog polimera.

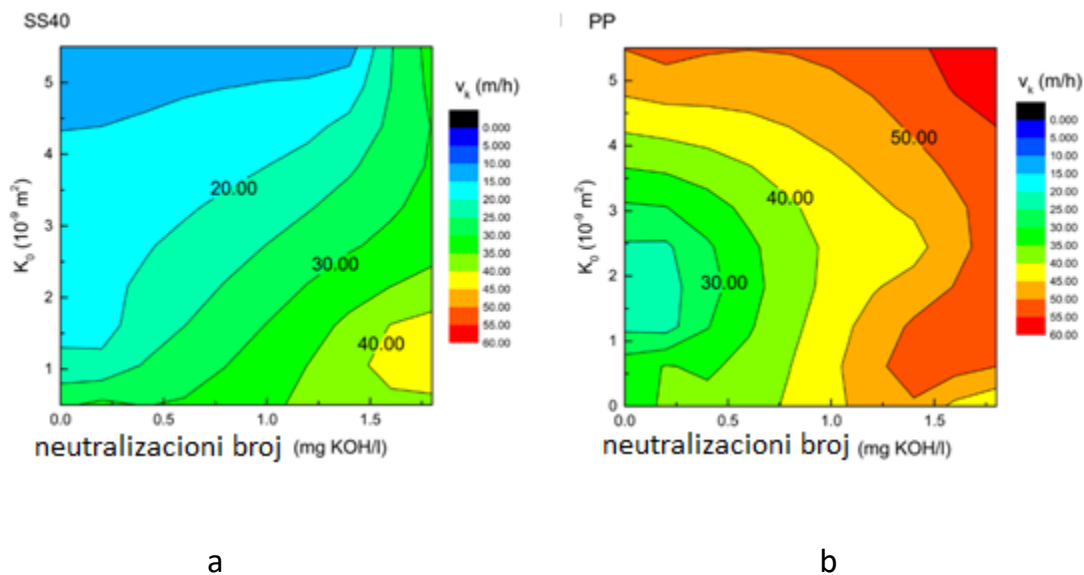
Šećerov Sokolović i saradnici, pored vlakana PU, koristili su i druge otpadne polimerne materijale za izradu vlakana za separaciju kapi mineralnih ulja različitog kvaliteta (Govedarica 2011, Šećerov Sokolović i saradnici 2014). Oni su razvili metodologiju za selekciju polimernog materijala korišćenjem konturnih dijagrama sa izokritičnom brzinom strujanja, pri čemu su u analizu uključeni i permeabilnost sloja i priroda dispergovanog ulja kroz neku odabranu osobinu ulja. Zaključili su da je oblast visoke vrednosti permeabilnosti optimalna za sve polimere jer se u tom predelu realizuju najveće kritične brzine strujanja, za sva korišćena ulja i sve korišćene polimerne materijale, slika 32. Slika 32b odnosi se na materijal polietilenteraftalat oznake BA1.

Kiralj i saradnici su istraživali separaciju kapi mineralnih ulja pomoću vlakana SS prečnika oko 40  $\mu\text{m}$  (Kiralj 2017, Kiralj i saradnici 2017b), čija je debljina bliska debljini polimernih vlakana korišćenih u ranijim istraživanjima. Oni su zaključili da je kod vlakana SS opseg vrednosti niskih permeabilnosti povoljnija za separaciju korišćenih mineralnih ulja. Poredeći vlakna SS sa vlaknima PP dobijena je jasna slika ove bitne razlike između efekata ove dve vrste vlakana, slika 33. Kod polimernih vlakana, Šećerov Sokolović i

saradnici su ovaj fenomen objasnili na sledeći način (Govedarica i Sokolović 2014, Šećerov Sokolović i saradnici 2016, Sokolović D. i saradnici 2018b).



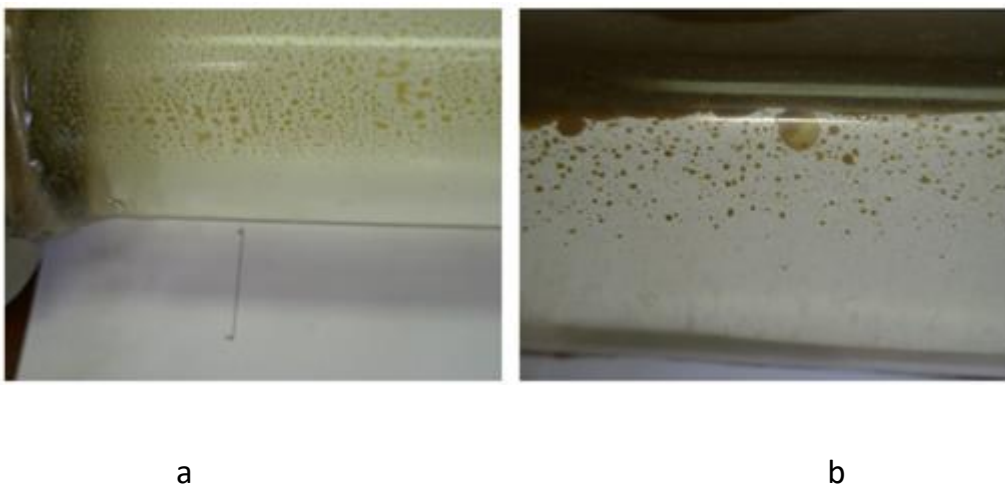
**Slika 32** Konturni dijagram međusobne zavisnosti izokritične brzine, emulzivnosti i permeabilnosti sloja: a. PU i b. BA1 (Šećerov Sokolović i saradnici 2014)



**Slika 33** Konturni dijagram međusobne zavisnosti izokritične brzine strujanja, neutralizacionog broja i permeabilnosti sloja za materijale: a. SS40 i b. PP (Kiralj 2017)

---

Kada je permeabilnost najveća, sloj ima najveće pore i najnižu lokalnu brzinu strujanja. Kako je i poroznost u tim okolnostima maksimalna, u sloju se formira najveća količina kapilarno-provodne faze. Formiranje kapilarno-provodne faze u tim uslovima započinje na površini vlakana uslovljeno niskom energijom površine i njegovom oleofilnom prirodom. Kada se kapilarno-provodna faza formira, dolazeće male kapi koalesciraju na površinu uljne faze i taj mehanizam koalescencije je dominantan. Kada je permeabilnost sloja mala, tada je lokalna brzina strujanja maksimalna, te kod polimera ne omogućava dobre uslove za formiranje kapilarno-provodne faze. Kod vlakana SS40, koji ima visoku energiju površine, situacija je obrnuta. Istraživanja su pokazala (Kiralj 2017) da je količina kapilarno-provodne faze pri najvećoj permeabilnosti mala ili se čak i ne formira, slika 4a. U tim okolnostima, nema uslova za formiranje početne količine ulja na površini vlakana, te uljna faza u sloju ne može da zaživi u ozbiljnoj količini. Nasuprot tome, pri najmanjoj permeabilnosti, pore u sloju su najmanje, te su kapi u porama najbliže jedna drugoj. Tada postoje uslovi da se realizuje mehanizam koalescencije između dve kapi kao dominantan mehanizam i da se tako obezbede početni uslovi za formiranje bogatije kapilano-provodne faze. Iako je tada lokalna brzina strujanja najveća, rezultati pokazuju da se formira stabilna kapilarno-provodna faza, slika 34b.

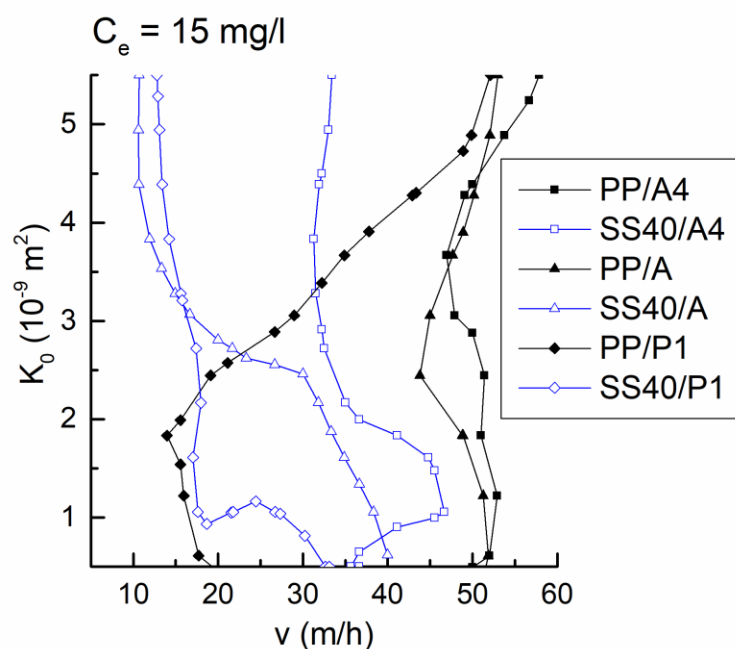


**Slika 34** Fotografije ulja iza sloja SS40: a. velika permeabilnost i b. mala permeabilnost (Kiralj 2017)

Ako se poredi efikasnost vlakana PP, sa malom energijom površine, koja je, uz to, kvašljiva uljem, i vlakana SS40, sa velikom energijom površine, koja nije kvašljiva uljem,



onda se variranjem brzine fluida, permeabilnosti sloja i prirode uljne faze može doći do vrlo važnih zaključaka, koji, takođe, rasvetljavaju oprečne stavove o uticaju kvašljivosti materijala na efikasnost separacije, slika 35 (Kiralj 2017). Na slici 35, prikazane su konture izokritične izlazne koncentracije od 15 mg/l za tri korišćena mineralna ulja A, A4 i P1 pri širokom rasponu brzine strujanja fluida i permeabilnosti sloja za materijale PP i SS40. Pri niskom opsegu permeabilnosti sloja i srednjim vrednostima brzine strujanja fluida, material SS40 pokazuje veću efikasnost od materijala PP, što je u koliziji sa stavom da je bolji onaj material koji je kvašljiv uljnom fazom. Ovo se objašnjava uticajem i drugih veličina, tako da rezultanta svih uticaja može biti različita.



**Slika 35** Konture izlazne koncentracije od 15 mg/l u funkciji brzine fluida i permeabilnosti sloja za tri mineralna ulja i materijale SS40 i PP (Kiralj 2017)

Istraživačka grupa Šećerov Sokolović u dužem vremenskom periodu radi na razvoju nove veličine koja treba da opiše sklonost filterskog materijala ka nekom ulju (Sokolović D. i saradnici 2018a). Veličina je razvijena na osnovu modifikovane metode kinetike upijanja tečnosti i nazvana je lipofilno-lipofobni odnos, LLR. U tabeli 9, date su vrednosti LLR za sve korišćene polimere i sva korišćena mineralna ulja. Jasno se vidi da svi materijali najuspešnije separišu ulje A4, koje ima najveću viskoznost i pokazuje pseudoplastična

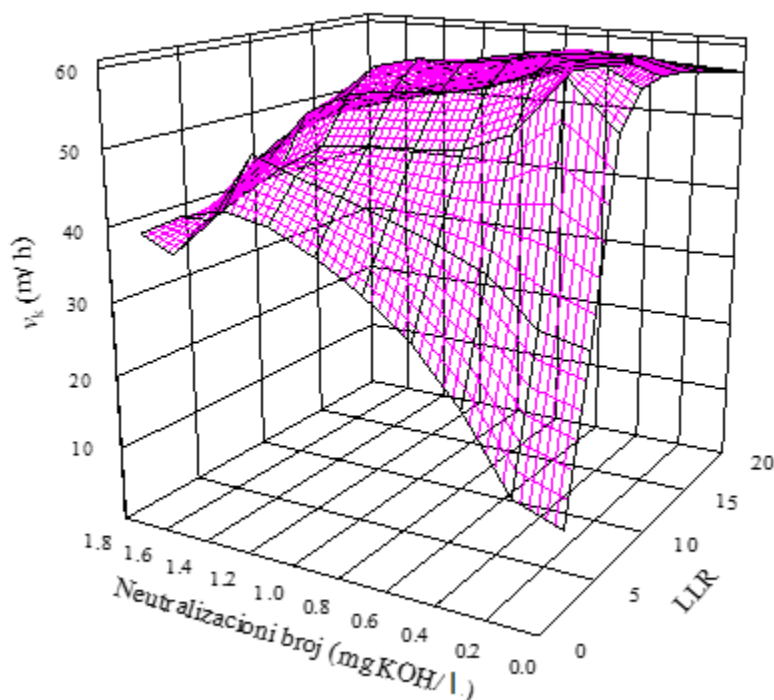
svojstva, a najlošije separišu ulja A i P1, koja imaju malu viskoznost (Sokolović D. i saradnici 2013, 2018a). Ove vrednosti su u skladu sa realizovanim eksperimentima separacije navedenih mineralnih ulja vlaknima od odabranih polimernih materijala.

**Tabela 9** Vrednosti veličine LLR za sve korišćene polimere i četiri mineralna ulja (Sokolović D. i saradnici 2018a)

LLR				
Vlaknasti material	A	A1	A4	P1
PU	8,56	7,60	18,81	4,67
BA1	4,76	3,06	7,53	4,82
PE	5,33	3,28	8,68	4,10
PP	6,99	3,66	14,23	4,09

Na slici 36, dat je 3D dijagram zavisnosti kritične brzine strujanja od neutralizacionog broja ulja, koje je merilo njegove polarnosti, i LLR broja. Porastom LLR raste kritična brzina strujanja za sve vrednosti neutralizacionog broja.

Lu i saradnici (2106b) su proučavali uticaj geometrije sloja smeše vlakana SS i PTFE u različitom odnosu. Za formiranje sloja su koristili bliske gustine pakovanja, te slojevi imaju značajno različitu poroznost 0,80-0,93, tabela 10. Prečnici vlakana politetrafluor etilen PTFE i SS su bili 52  $\mu\text{m}$  i 120  $\mu\text{m}$ , redom. Oni su istraživali i uticaj radnih parametara na separaciju kapi dizela iz sanitarne vode različite koncentracije. Merenja ugla kvašenja korišćenih materijala pokazuju da je materijal PTFE oleofilan i hidrofoban dok je SS i oleofilan i hidrofilan. Takođe, realizovali su, pored laboratorijskih, i industrijske testove na naftnom polju. Oni su utvrdili da je formulacija sloja S8 realizovala najmanju izlaznu koncentraciju od oko 5 mg/l i najveću efikasnost separacije oko 99 %.



**Slika 36** 3D dijagram zavisnosti kritične brzine strujanja od neutralizacionog broja i LLR vrednosti (Sokolović D. i saradnici 2018a)

**Tabela 10** Fizičke karakteristike korišćenog vlaknastog sloja (Lu 2016b)

Uzorci	Broj vlakna: PFTE + SS	Specifična površina ( $m^{-1}$ )	Poroznost $\epsilon$	Gustina pakovanja ( $g/cm^3$ )
S2	12+3	4316	0,9313	0,2784
S3	20+2	6460	0,9074	0,2884
S4	14+3	4913	0,9235	0,2956
S5	16+3	5510	0,9157	0,3127
S6	24+2	7654	0,8918	0,3227
S7	40+2	12430	0,8296	0,4598
S8	48+2	14819	0,7984	0,5283

Novija istraživanja kreću se u pravcu razvijanja novih vlaknastih materijala koja se mogu koristiti za separaciju i ulja iz vode i vode iz organske faze, najčešće goriva. Vlakna su najčešće kompozitni polimeri mikro/nano debljine (Cheng i saradnici 2018, Wang i

---

saradnici 2017, 2018, Zhang Q. 2018, Zhao i saradnici 2019) koja su superhidrofilna, a istovremeno superoleofobna. Autori najčešće od tih vlakana formiraju membrane (Otitoju i saradnici 2016). Druga grupa autora proizvodi vlakna koja oblažu drugim materijalom, utičući tako na kvašljivost površine, što je već poznata tehnika iz prošlosti (Zang D. i saradnici 2015, Wang i saradnici 2016). Yang i saradnici (2015, 2016) su stimulisali separaciju dispergovane vode iz dizela vibracijom, koristeći staklena vlakna kao filterski medium. Istraživali su uticaj vibracije frekvencije od 50 do 250 Hz i konstavali da neke od ovih vibracija značajno povećavaju efikasnost separacije.

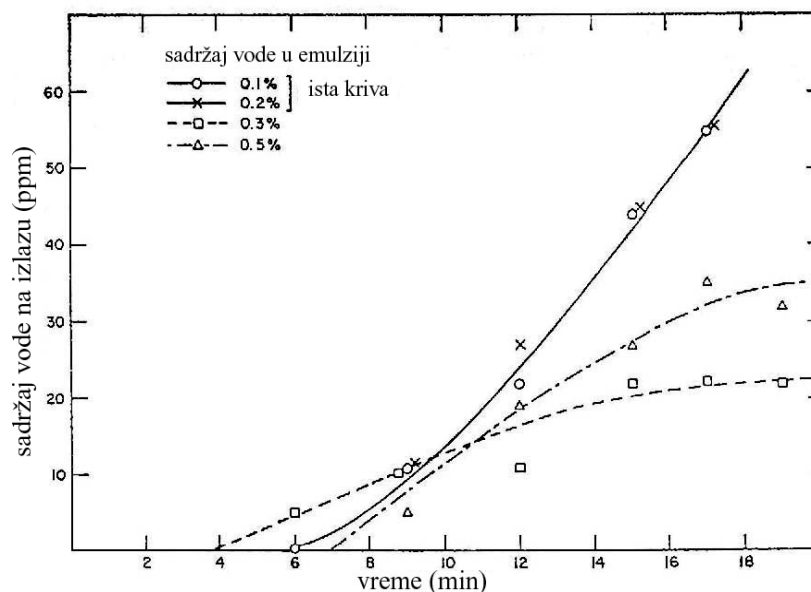
## **2.4. Uticaj ulazne koncentracije dispergovane faze na koalescentnu filtraciju**

Han i saradnici (2017) su ukazali da u literaturi postoje različiti stavovi o značaju ulazne koncentracije faza i njihovom uticaju na efikasnost separacije. Dok jedni autori tvrde da porastom ulazne koncentracije dispergovane faze raste efikasnost njene separacije, drugi tvrde suprotno.

Sareen i saradnici su (1966), prema dostupnoj literaturi, prvi su menjali ulaznu koncentraciju dispergovane faze u svojim eksperimentima. Istraživan je sistem voda u ulju pri horizontalnoj orijentaciji toka fluida i debljini sloja vlakana različite prirode od 0,635 do 3,2 cm. Proučavan je uticaj debljine sloja, osobina vlakana, viskoznosti dispergovane faze i dodatka površinski aktivnih materija (PAM) na efikasnost koalescencije. Koncentracija dispergovane faze u emulziji se kretala u rasponu 2-5 % vol. U radu nije data analiza uticaja ulazne koncentracije na koalescenciju, čak na datim dijagramima nije naznačena ulazna koncentracija dispergovane faze.

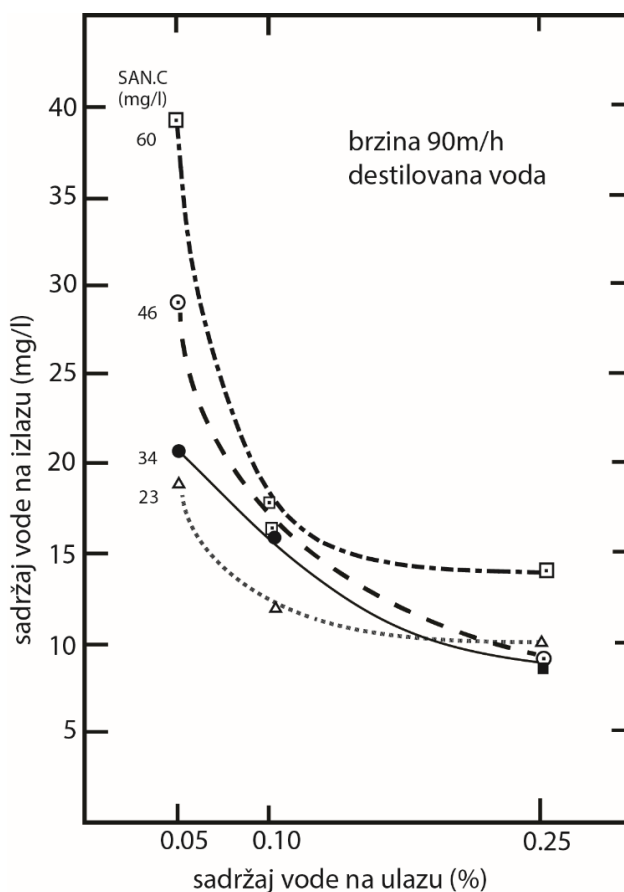
Bitten (1970) i Bitten i Fochtman 1971) su proučavali koalescenciju kapi na jednom vlaknu od GL, TE, najlona (NA) i dakrona (DA), posmatranjem ponašanja kapi vode u avio gorivu kao kontinualnom medijumu u koje je postavljeno vlakno. Koncentracija vode iznosila je 500 ppm i 1000 ppm. Primećeno je da je brzina koalescencije kapi pri ulaznoj koncentraciji vode od 500 ppm mala, pa je, iz tih razloga, većina eksperimenata realizovana pri ulaznoj koncentraciji od 1000 ppm.

Hazlett (1969a, 1969b) je proučavao koalescenciju kapi vode u kontinualnoj fazi goriva. Istraživan je uticaj PAM na koalescenciju kapi u četiri različita goriva bliskih vrednosti gustine i viskoznosti. Odabrane PAM bolje su se rastvarale u vodi nego u gorivu. Istraživana je efikasnost sloja vlakana GL prečnika 1 i 4,6  $\mu\text{m}$ , postavljenih jedan iza drugog, kao i uticaj ulazne koncentracije vode u opsegu 0,1-0,5 %. Na slici 37, prikazane su zavisnosti izlazne koncentracije vode od ulazne koncentracije u funkciji vremena. Porastom ulazne koncentracije u kasnijim fazama procesa koalescencije, posle 15 min, jasno je uočljivo da su izlazne koncentracije veće za manje ulazne koncentracije. Pošto je ogled pokrenut sa čistim vlaknima, potrebno je neko vreme da dođe do zasićenja sloja dispergovanom fazom. Iz tih razloga, uticajni fenomen se manifestovao tek posle nekog vremena. U takvim uslovima, veća koncentracija dispergovane faze na ulazu utiče na brže formiranje zasićene kapilarno-provodne faze. Pri određenim uslovima, postiže se stacionarno stanje, koje na dijagramu predstavlja oblast konstantne izlazne koncentracije koja se nazire pri kraju krivih visoke koncentracije. Potrebno je ukazati da je eksperiment praćen kratko vreme. Nastavljanjem eksperimenta, sloj bi se našao u zasićenom stanju i veća koncentracija na ulazu je mogla da izazove porast koncentracije na izlazu, naročito za tako velike brzine strujanja fluida većih od kritičnih brzina.



**Slika 37** Grafički prikaz uticaja sadržaja vode na izlazu u funkciji vremena (Hazlett 1969b)

Hazlett i Carhart (1972) su nastavili istraživanja koalescencije kapi vode u gorivu, koristeći i dalje sloj vlakana GL i obloženih vlakana GL, njihovom mešavinom, kao i slojem vlakana SS. Oblaganjem staklenih vlakana, on je vešto uspeo da obezbedi jednaku geometriju sloja, a da pri tome promeni prirodu kvašljivosti vlakana. I dalje je u pažnji istraživanje uticaja PAM, jer gorivo ima aditive koji stabilišu vodu u njegovoj zapremini. Deo vode u gorivu je poreklom iz proizvodnje, a deo nastaje oksidacijom organskih komponenti tokom eksploatacije. Uzorkovanje je i dalje vršeno posle 16 min od početka eksperimenta. I dalje se tokom ogleda formirala kapilarno-provodna faza vode, što je ubrzano i pospešeno većom koncentracijom vode u ulaznom gorivu. Neophodno je istaći da su zapravo ovi ogledi realizovani u nestacionarnom stanju, te je efekat ulazne koncentracije potpuno drugačiji nego kada je reč o stacionarnom stanju. Na slici 38, prikazano je da sa povećanjem ulazne koncentracije vode, njena izlazna koncentracija drastično opada zato što se dispergovana faza zadržava u sloju.



**Slika 38** Grafički prikaz uticaja sadržaja vode na ulazu na sadržaj vode na izlazu

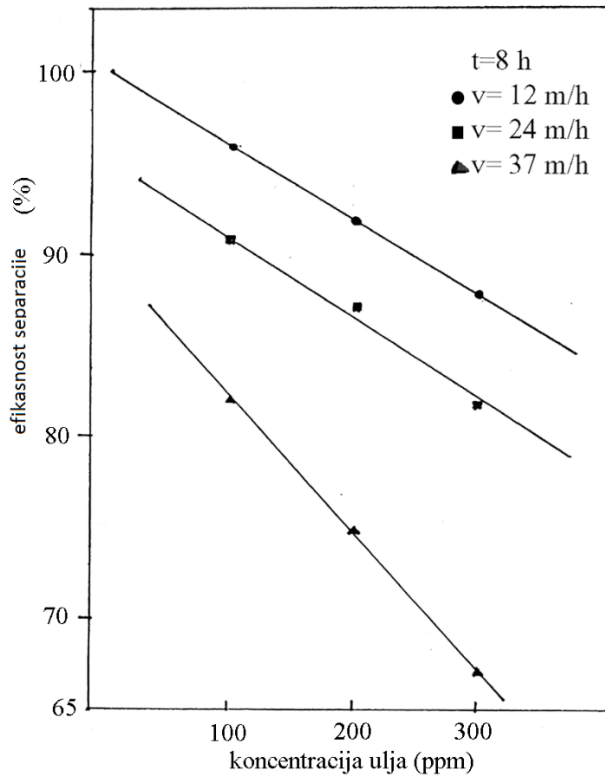
(Hazlett i Carhart 1972)

---

Sherony i Kintner (1971a, 1971b) su dali matematički model u koji su uključili, po njima, najvažnije mehanizme koalescencije. I oni su smatrali da je uspešnost koalescencije u sloju dominantno određena količinom zasićene dispergovane faze u njegovim porama. U svojim eksperimentalnim istraživanjima, oni su koristili sloj vlakana NA prečnika 20  $\mu\text{m}$ , kao i vlakana GL i SS prečnika 8  $\mu\text{m}$ . Orijehtacija toka fluida bila je horizontalna. Koncentracija dispergovane faze *n*-butil benzoata u vodi je bila 100-350 ppm. Ovi istraživači su tvrdili da ulazna koncentracija dispergovane faze nema uticaja na koalescenciju. Još je Bitten (1970) konstatovao da je za male koncentracije dispergovane faze brzina koalescencije mala, mada je on istraživao koalescenciju na jednom vlaknu i za sistem voda u ulju. Ovakav zaključak mora biti da je uslovljen, ne samo malim vrednostima ulazne koncentracije, nego i izuzetno malim rasponom ulazne koncentracije koji je primenjen.

Patel (1975) je, takođe, istraživao separaciju razblažene emulzije ulja u vodi. Uljna faza je bila jestivo ulje. U svojim eksperimentima koristio je tri koncentracije dispergovane faze: 100, 200 i 300 ppm. Eksperimenti su realizovani pri brzinama od 12, 24 i 37 m/h, pri debljinama sloja od 0,6 cm i 1,27 cm, pri orijentaciji toka fluida vertikalno nadole. Koristio je slojeve vlakana PP, POE i GL. Utvrdio je da povećanje ulazne koncentracije ulja, za posmatrani opseg, dovodi do opadanja efikasnosti separacije uljne faze usled povećanja njene koncentracije na izlazu, slika 39.

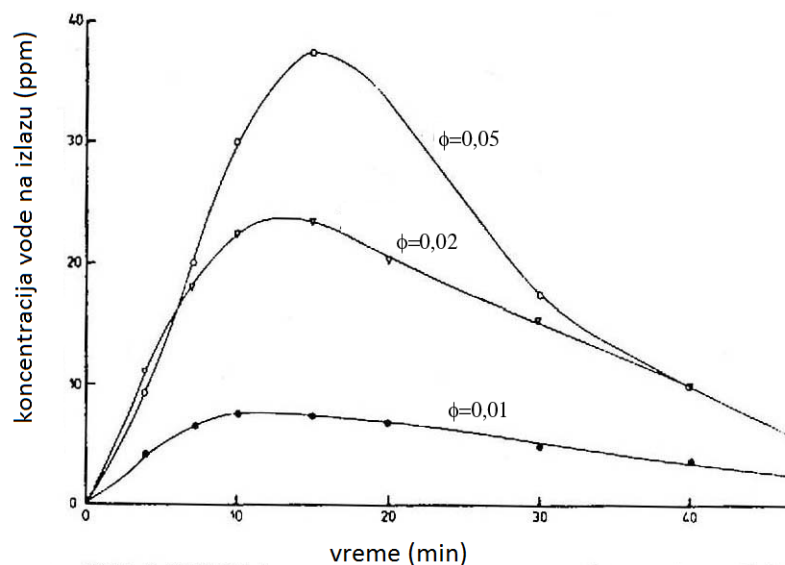
Istraživanja Patela su, na prvi pogled, u koliziji sa prethodno diskutovanim istraživanjima. Tek se istraživanjima Vulić (2000) i Šećerov Sokolović i saradnika (2006) došlo do eksperimentalnih dokaza za bitan uticaj orijentacije toka fluida na koalescentnu filtraciju. Kako su ovi istraživači dokazali, horizontalna orijentacija toka fluida daje najveće vrednosti efikasnosti separacije pošto je u tim uslovima količina zasićene uljne faze u porama sloja veća u odnosu na druge dve orijentacije, što je prikazano na slici 31. U prethodnim istraživanjima, ova orijentacija pokrila je negativan uticaj ulazne koncentracije dispergovane faze.



**Slika 39** Zavisnost efikasnosti separacije od ulazne koncentracije ulja (Patel 1975)

Jeater i saradnici (1980) su istraživali uticaj ulazne koncentracije vode u kontinualnoj organskoj fazi na koalescenciju koristeći slojeve vlakana GL, NA i PP. Orijentacija toka fluida je vertikalno nagore. Opseg ulazne koncentracije bio je 1-5 % vol. Na slici 40, prikazana je zavisnost izlazne koncentracije vode od vremena i promene ulazne koncentracije vode dispergovane u kontinualnoj organskoj fazi. Ogled je praćen tokom 50 min. U prvom periodu, izlazna koncentracije vode je najpre drastično porasla do maksimuma, a zatim se naglo smanjila. Ovakav oblik zavisnosti realizovan je za sve tri korišćene ulazne koncentracije vode. Porastom vrednosti ulazne koncentracije vode, povećava se vrednost maksimalne izlazne koncentracije, i to sa 10 ppm na skoro 40 ppm.

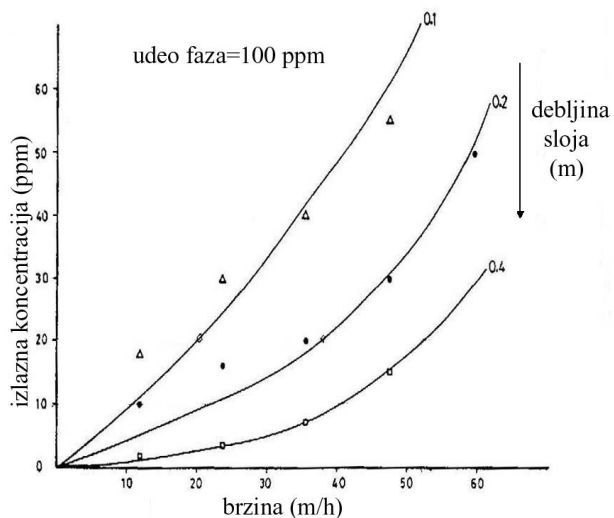




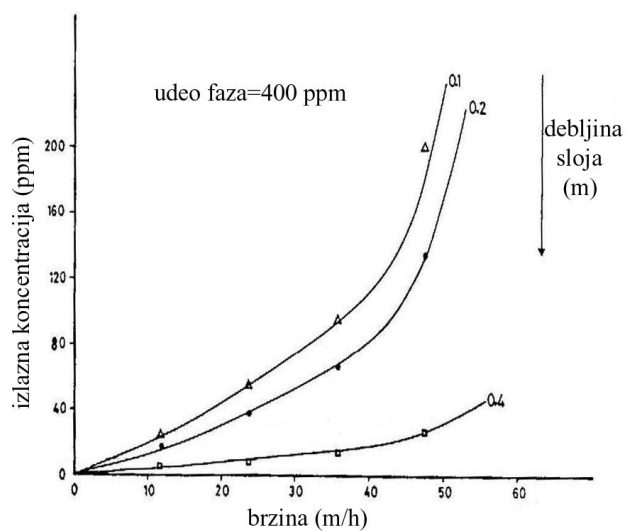
**Slika 40** Zavisnost izlazne koncentracije vode sa vremenom pri različitim promenama ulazne koncentracije vode u kontinualnoj organskoj fazi (Jeater i saradnici 1980)

Pored toga, porastom ulazne koncentracije vode, maksimum izlazne koncentracije se pojavljuje nešto kasnije. Ovakav oblik krive može se objasniti činjenicom da ogled pokriva opseg promene stanja u sloju od nestacionarnog do stacionarnog. Važno je istaći da su Jeater i saradnici (1980) odabrali najnepovoljniju orijentaciju toka fluida vertikalno nagore. U tim okolnostima količina zasićene dispergovane faze je minimalna, pošto ona biva istiskivana iz sloja hidrodinamičkim silama protoka fluida.

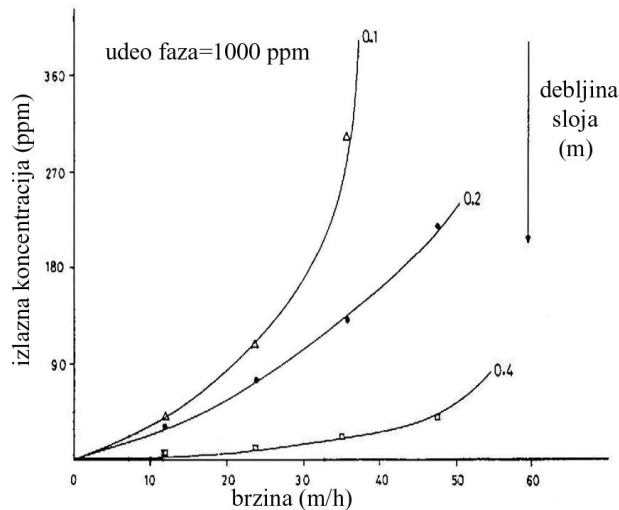
Fahim (1985), Fahim i Akbar (1984), Fahim i Othman (1987) i Othman i Fahim (1988) su koristili vlakna GL i SS, kako bi izdvojili kapi kerozina iz vode. Ogledi su realizovani u stacionarnom stanju sa orijentacijom toka fluida vertikalno nagore. Srednji prečnik kapi dispergovane faze bio je 20-25  $\mu\text{m}$ . Varirana je ulazna koncentracija od 100 do 1000 ppm pri intervalu promene brzine fluida od 11 do 60 m/h i debljini sloja od 10 do 40 cm. Na osnovu realizovanih eksperimenata, ovi istraživači su razvili model za prognoziranje količine zasićene uljne faze u porama vlaknastog sloja. Na slikama 41, 42 i 43, dati su rezultati eksperimenata zavisnosti izlazne koncentracije kerozina od brzine strujanja fluida pri tri debljine sloja za konstantnu ulaznu koncentraciju.



**Slika 41** Zavisnost izlazne koncentracije od brzine fluida za različite debljine sloja pri ulaznoj koncentraciji od 100 ppm (Fahim i Akbar 1984)



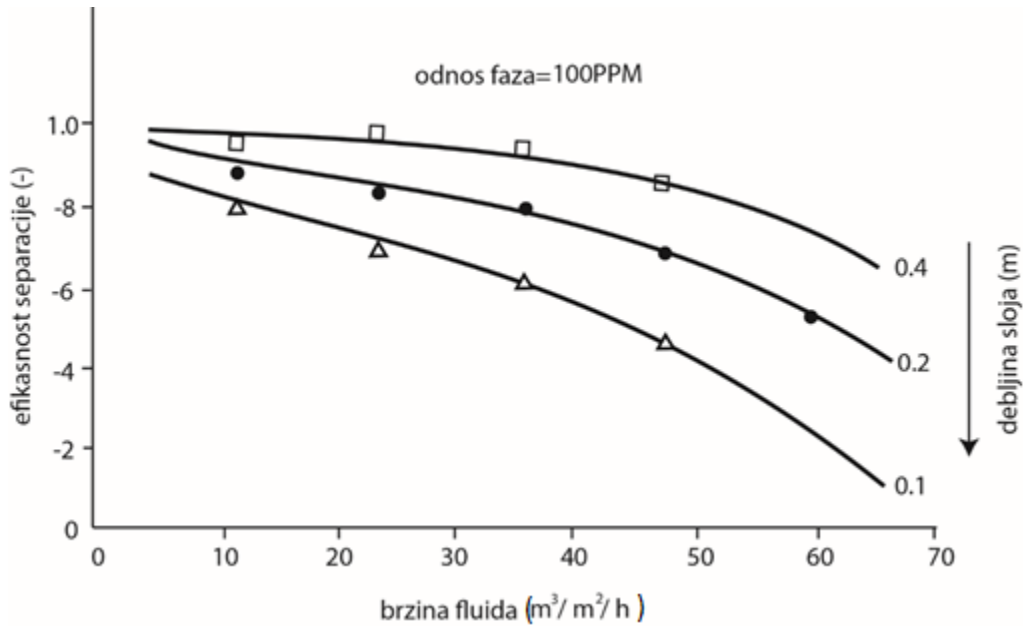
**Slika 42** Zavisnost izlazne koncentracije od brzine fluida za različite debljine sloja pri ulaznoj koncentraciji od 400 ppm (Fahim i Akbar 1984)



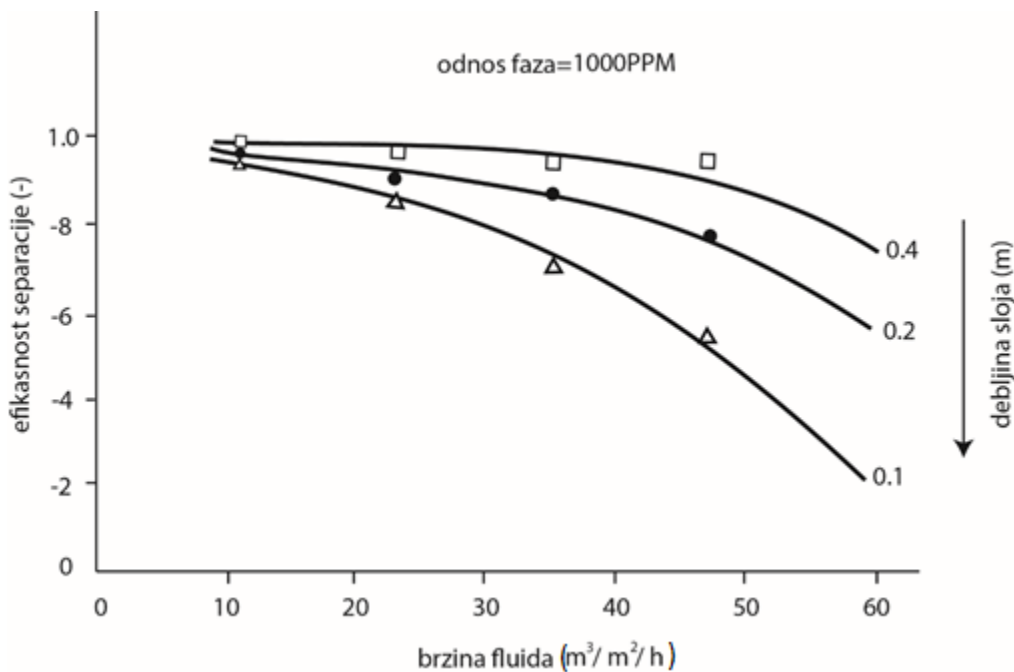
**Slika 43** Zavisnost izlazne koncentracije od brzine fluida za različite debljine sloja pri ulaznoj koncentraciji od 1000 ppm (Fahim i Akbar 1984)

Analizom prikazanih dijagrama može se konstatovati da su Fahim i saradnici realizovali ogledе u širokom rasponu brzine strujanja fluida, tako da je dostignuta eksponencijalna zavisnost izlazne koncentracije od brzine. Usvojili su da su im prihvatljivi uslovi rada za izlaznu koncentraciju od 20 ppm. Na osnovu toga, može se konstatovati da za ulaznu koncentraciju od 100 ppm za sve korišćene debljine, može da se ispuni željeni kvalitet izlazne koncentracije. Raspon radne brzine strujanja je širok i uslovljen debljinom sloja. Za debljinu sloja od 40 cm, maksimalna radna brzina strujanja je veća od 50 m/h. Porastom ulazne koncentracije praktično se gubi oblast pri kojoj se realizuje izlazna koncentracija od 20 ppm. To znači da porastom ulazne koncentracije raste izlazna koncentracija pri odabranim uslovima rada.

Na slici 44 data je zavisnost efikasnosti separacije od brzine strujanja fluida za sve tri debljine sloja i ulaznu koncentraciju od 100 ppm, dok je na slici 45 data ista ta zavisnost ali pri ulaznoj koncentraciji od 1000 ppm.



**Slika 44** Zavisnost efikasnosti separacije od brzine fluida za različite debljine sloja pri ulaznoj koncentraciji od 100 ppm (Fahim i Akbar 1984)



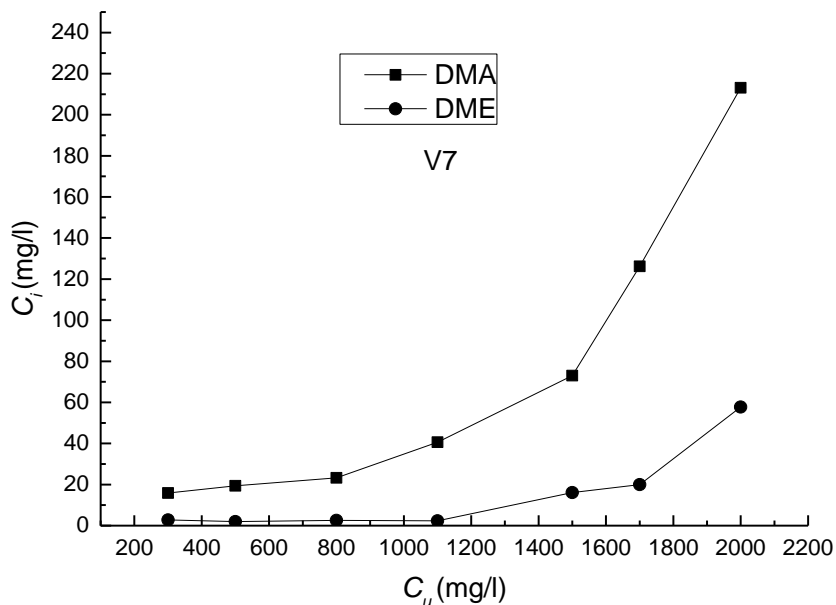
**Slika 45** Zavisnost efikasnosti separacije od brzine fluida za različite debljine sloja pri ulaznoj koncentraciji od 1000 ppm (Fahim i Akbar 1984)

---

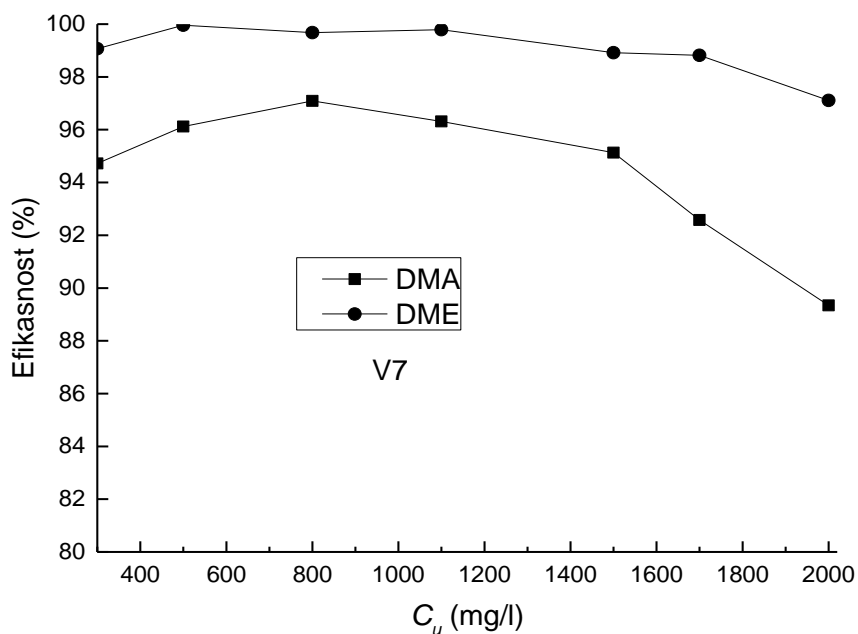
Ako se posmatra efikasnost separacije, jasno se vidi da porastom brzine strujanja fluida i smanjenjem debljine sloja efikasnost opada. Uticaj ulazne koncentracije za posmatrani opseg na efikasnost separacije nije značajan. Porastom ulazne koncentracije efikasnost separacije blago raste.

Šević (1992), u svojoj doktorskoj disertaciji, je istraživao separaciju nafte iz vode, kako na realnim sistemima ležišne vode iz bušotina domaćih naftnih polja, tako i na model sistemima u kojima je visok jonski sadržaj vode koji je odgovarao kvalitetu ležišnih voda. Koristio je otpadni PU kao filterski materijal pri vrednosti permeabilnosti sloja od  $5,389 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  i orijentaciji toka fluida odozgo nadole. Iako uticaj ulazne koncentracije nije bio predmet istraživanja ove doktorske disertacije, da bi dao dalje smernice za istraživanje, Šević je realizovao ogled na dva model sistema za rastući sadržaj nafte na ulazu u intervalu 500-2000 mg/l, slika 46. Brzina strujanja fluida je bila 7 m/h. Jasno se vidi da je realizovana eksponencijalna zavisnost izlazne od ulazne koncentracije dispergovane faze. Ovaj oblik zavisnosti nije do tada nađen u dostupnoj literaturi. Hazlett i Carhart (1972) su prikazali zavisnost izlazne koncentracije dispergovane faze od ulazne, slika 38, ali je oblik ove zavisnosti obrnut, tj. porastom ulazne koncentracije dispergovane faze izlazna koncentracija opada. Treba podvući da su ogledi Hazletta realizovani u nestacionarnom stanju u kome se tek formira kapilarno-provodna faza, te je to uzrok oblika ove zavisnosti. Uočljivo je sa slike 46, da priroda dispergovane uljne faze značajno utiče na predeo realizacije eksponencijalnog rasta izlazne koncentracije od ulazne koncentracije dispergovane faze.

Ako se analiza uticaja ulazne koncentracije dispergovane faze usmeri na efikasnost separacije, tada je situacija sledeća, slika 47. Pri orijentaciji toka vertikalno nadole, za posmatrani opseg ulazne koncentracije 300-2000 mg/l efikasnost separacije pokazuje maksimum za oba model sistema. Raspon vrednosti efikasnosti separacije drastično se razlikuje između dva model sistema. Za dispergovani model sistem DME ostvaruju se veće vrednosti efikasnosti separacije nego za model sistem DMA. Oznake E i A odnose se na određene domaće nafte. Vrednost efikasnosti za DME je 97-99 %, dok je za sistem DMA 89-97 %.



**Slika 46** Zavisnost izlazne koncentracije od ulazne koncentracije za model sistem nafte A (DMA) i nafte E (DME) (Šević 1992)

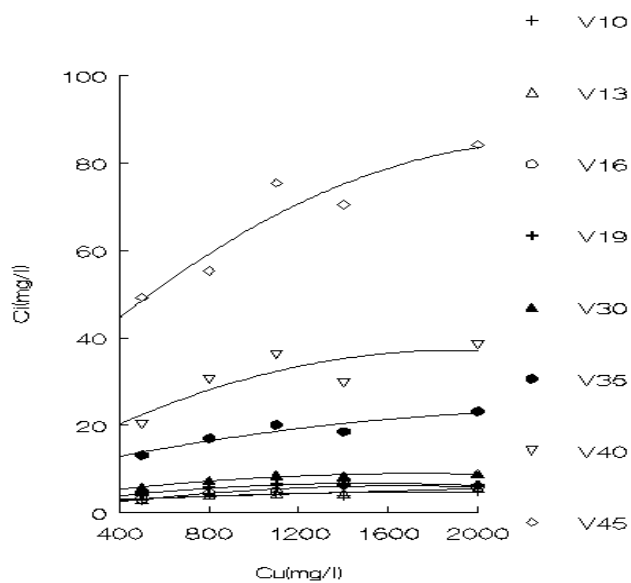


**Slika 47** Zavisnost efikasnosti separacije od ulazne koncentracije za model sistem nafte A i nafte E (Šević 1992)

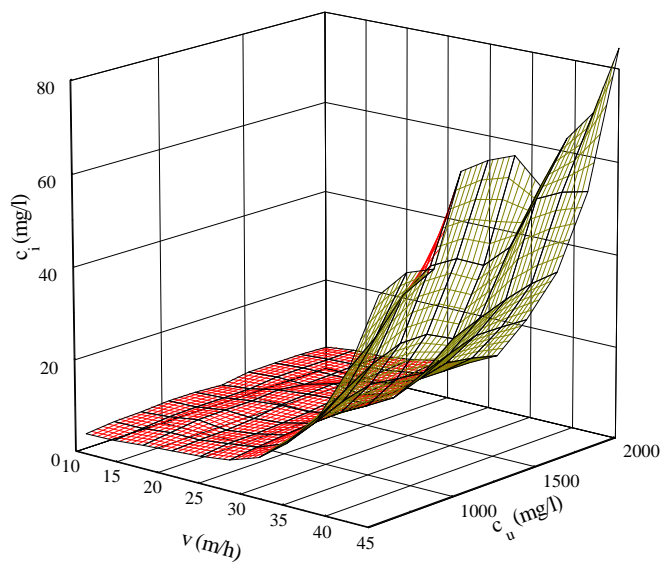
---

Đoković (1997) je, u svom magistarskom radu, proučavao uticaj ulazne koncentracije dispergovane uljne faze, brzine strujanja fluida i debljine sloja na koalescentnu filtraciju pri horizontalnoj orijentaciji toka fluida. Kao filterski materijal, koristio je vlakna PU pri jednakoj permeabilnosti sloja kao i Šević. Za svoje eksperimente, usvojio je raspon ulazne koncentracije koju je postavila Šević (1992). Oglеди su realizovani u širokom rasponu brzine strujanja 10-45 m/h. Đoković je usvajio pojam kritične brzine strujanja na dva načina: prema definiciji Grilca i saradnika (1984, 1986), simbol  $v_{gk}$ , i prema definiciji Fahima i saradnika (1984), simbol  $v_{fk}$ . Vrednost kritične brzine strujanja  $v_{gk}$  je određivao metodom ekstrapolacije iz eksperimentalne krive eksponencijalne zavisnosti izlazne koncentracije uljne faze od brzine strujanja. Vrednost  $v_{fk}$  je određivan očitavanjem brzine za koju se postiže izlazna koncentracija uljne faze od 20 mg/l iz iste eksperimentalne krive. Analiza uticaja ulazne na izlaznu koncentraciju uljne faze fokusirana je u poređenju sa uticajem brzine tako da se uočavaju dve oblasti uticaja: jedna ispod i druga iznad kritične brzine strujanja. Đoković je smatrao da je uticaj ulazne koncentracije uljne faze zanemarljiv ispod, a značajan iznad kritične brzine strujanja. Prikazani 2D i 3D dijagrami potvrđuju date konstatacije, slika 48 i slika 49.

Đoković (1997) je analizirao uticaj debljine sloja i ulazne koncentracije ulja na promenu obe kritične brzine strujanja, slika 50. Konstatovao je da za posmatarni opseg debljine sloja i ulazne koncentracije ulja kritična brzina  $v_{gk}$  ne zavisi značajno od ove dve veličine za odabrani filterski materijal, slika 50a. Kritična brzina  $v_{gk}$  postiže najveću vrednost od 29,00 m/h za debljinu sloja od 15 cm i ulaznu koncentraciju ulja od 500 mg/l, dok najmanju vrednost 23,40 m/h ostvaruje za debljinu sloja od 3 cm i koncentraciju ulja od 2000 mg/l. Data kritična brzina raste blago porastom debljine sloja i opada porastom ulazne koncentracije ulja. Ako se analizira uticaj debljine sloja i ulazne koncentracije ulja na kritičnu brzinu  $v_{fk}$ , tada se situacija menja, slika 50b. Ovako definisana kritična brzina značajno zavisi od promene ova dva parametra. Najmanja vrednost 21,54 m/h je ostvarena pri jednakim uslovima za debljinu 3 cm i koncentraciju ulja 2000 mg/l. Najveća vrednost  $v_{fg}$  je značajno veća od  $v_{gk}$  i iznosi 39,50 m/h pri jednakim uslovima debljini sloja od 15 cm i ulaznoj koncentraciji ulja od 500 mg/l.

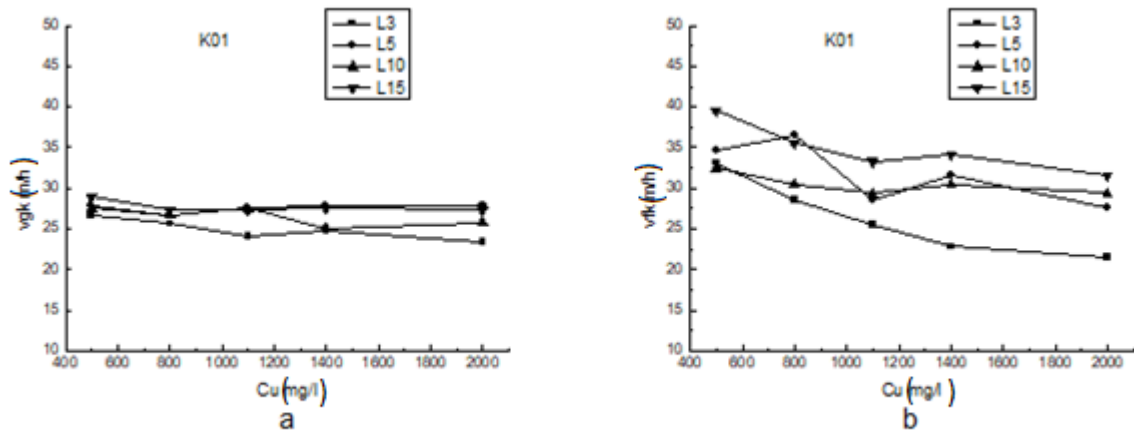


**Slika 48** Uticaj ulazne na izlaznu koncentraciju ulja za različite brzine strujanja (Đoković 1997)



**Slika 49** 3D dijagram uticaja brzine strujanja i ulazne na izlaznu koncentraciju ulja (Đoković 1997)





**Slika 50** Dijagram uticaja ulazne koncentracije dispergovane faze i debljine sloja na a. kritičnu brzinu  $v_{gk}$  i b. kritičnu brzinu  $v_{fk}$  (Đoković 1997)

U radu Šećerov Sokolović i saradnika (1997) je istaknut značaj uloge brzine strujanja na fenomene i zbivanja u poroznom sloju kroz koji protiče emulzija ulja i vode. Na osnovu istraživanja Đokovića (1997), kao bitne veličine za rad koalescentnog filtera potvrđene su brzina strujanja, debljina sloja i ulazna koncentracija dispergovane faze. Date su dve jednačine postavljene na bazi multilinerane regresione analize na osnovu kojih se može proceniti značaj navedenih promenljivih. Jednačina 4 daje zavisnost uticaja brzine strujanja, ulazne koncentracije dispergovane faze i debljine sloja na izlaznu koncentraciju dispergovane faze. Iz vrednosti realizovanih eksponenata može se prokomentarisati da brzina strujanja ima najveći značaj za izlaznu koncentraciju dispergovane faze, dok ulazna koncentracija dispergovane faze i debljina sloja imaju približno međusobno jednak značaj s tim što se razlikuju u predznaku.

$$C_e = 0.0092v^{0.774}C_u^{0.446}L^{-0.512} \quad (4)$$

Jednačina 5 daje uticaj navedenih veličina na efikasnost separacije:

$$E = 99.16v^{-0.0067}C_u^{0.0044}L^{0.004} \quad (5)$$

---

Može se konstatovati da je uticaj brzine strujanja neuporedivo manji na efikasnost nego na izlaznu koncentraciju dispergovane faze. Uticaj brzine strujanja, prema vrednosti eksponenata je jednak redu veličine sa ulaznom koncentracijom dispergovane faze i debljinom sloja.

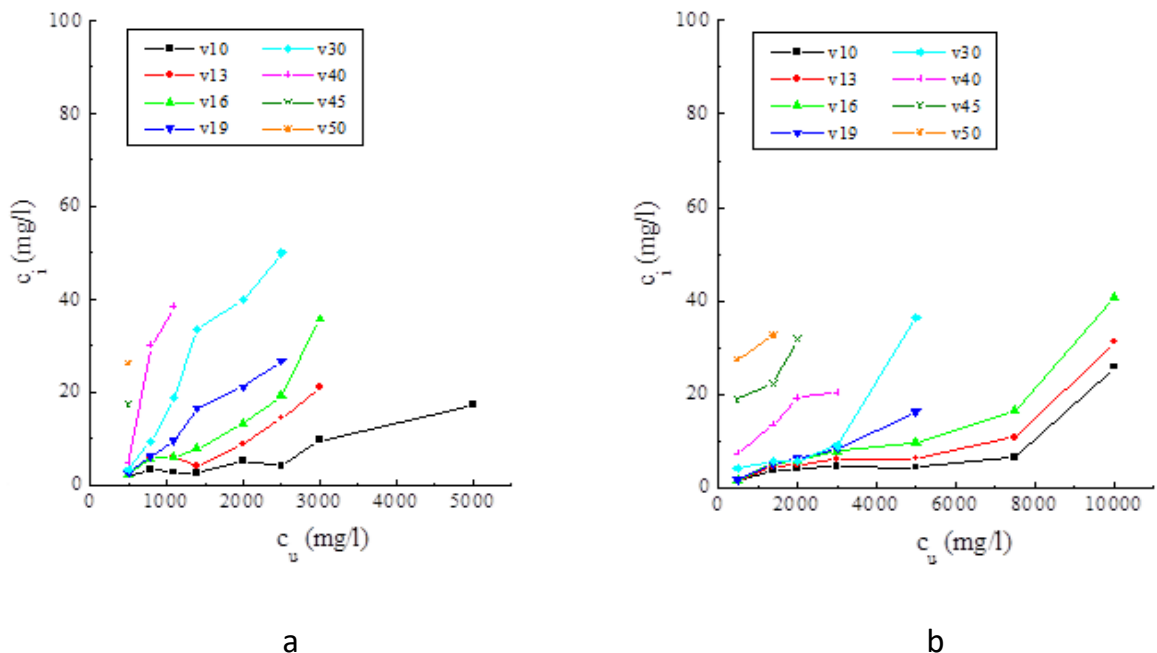
Šećerov Sokolović i saradnici (1997) su se, na osnovu istraživanja Đokovića (1997), suočili sa činjenicom da za horizontalnu orijentaciju toka fluida nije realizovana eksponencijalna zavisnost izlazne koncentracije dispergovane faze za primenjeni opseg ulazne koncentracije dispergovane faze kao u istraživanjima Šević (1992) u kojima je orijentacija toka fluida bila vertikalno nadole. To je otvorilo potrebu istraživanja uticaja, ne samo orijentacije toka fluida, nego i postavljanja ogleada za proučavanje uticaja ulazne koncentracije dispergovane faze. Pored toga, stoji otvoreno pitanje uticaja nasipne gustine materijala koji formira sloj na koalescenciju s obzirom da je dati materijal kompresibilan.

Šećerov Sokolović i saradnici (2003a, 2003b) su objasnili značaj promene nasipne gustine pri formiranju sloja od elastičnih polimernih vlakana kroz promenu njegove permeabilnosti i poroznosti. Prema njima, geometrija sloja vlakana PU je jednoznačno određena eksperimentalno određenom zavisnošću poroznosti od permeabilnosti. Takođe, utvrđeno je da, za date uslove rada i korišćeno ulje, postoji kritična permeabilnost pri kojoj se realizuje visoka koncentracija dispergovane faze na izlazu i taj predeo je nepovoljan za rad. Kritična permeabilnost se manifestovala u oblasti niskih vrednosti permeabilnosti, pri sve tri orijentacije toka fluida i svim debljinama sloja vlakana PU. U toj oblasti, vrednost kritične brzine  $vk_{15}$  je mala. Ova pojava je objašnjena time da sloj ima najmanje pore i najmanju poroznost kada je najviše nabijen. U tim okolnostima, u sloju egzistira minimalna količina kapilarno-provodne dispergovane faze, a lokalna brzina je maksimalna. Tada su uspostavljeni uslovi najnepovoljniji za koalescenciju na površinu kapilarno-provodne faze za sloj vlakana PU.

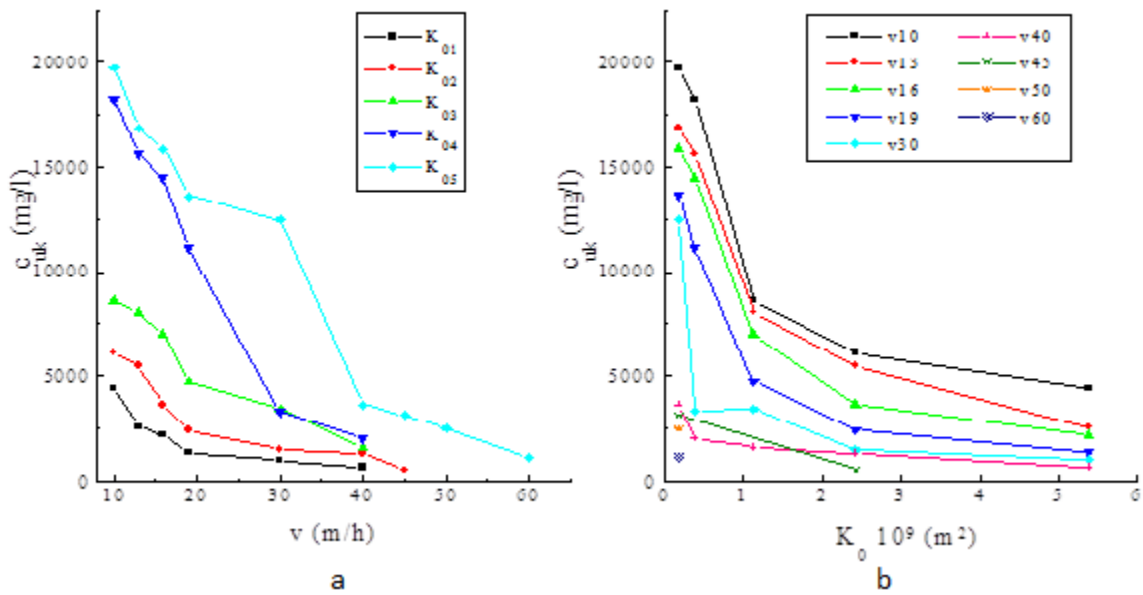
Stanimirović (2003) je, u svom magistarskom radu, istraživao uticaj ulazne koncentracije dispergovane faze na koalescenciju uz simultani uticaj promene geometrije sloja kroz promenu permeabilnosti. Postavljen je originalni prilaz kojim je jedino moguće da se sagleda pravi uticaj ulazne koncentracije dispergovane faze. Pri odabranoj brzini strujanja, ogled je ponavljan sve dok nije utvrđena ulazna koncentracija dispergovane faze pri kojoj

se ostvaruje izlazna koncentracija veća od 15 mg/l. Na taj način, došlo se do eksponencijalne zavisnosti izlazne od ulazne koncentracije dispergovane faze, koju je otkrila još Šević (1992) slučajnim odabirom korišćenog intervala ulazne koncentracije, slika 51.

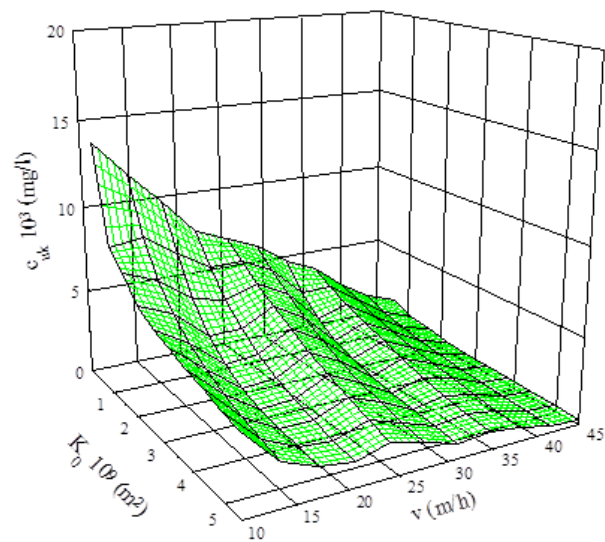
Stanimirović (2003) je uveo novu veličinu - kritičnu ulaznu koncentraciju dispergovane faze. To je ona ulazna koncentracija pri kojoj izlazna koncentracija dostiže vrednost od 15 mg/l za odabrane uslove rada. Vrednost kritične ulazne koncentracije  $c_{uk}$  se očitava sa dijagrama zavisnosti izlazne od ulazne koncentracije dispergovane faze koje su prikazane na slici 51. Stanimirović je utvrdio da kritična ulazna koncentracija  $c_{uk}$  drastično zavisi od brzine strujanja i permeabilnosti sloja, slika 52. Iz datog dijagrama, slika 52 a, upečatljivo se vidi da porastom brzine strujanja drastično opada ulazna koncentracija dispergovane faze za koju sloj može da obezbedi željeni kvalitet na izlazu iz sloja, i to važi za sve primenjene permeabilnosti. Takođe, jasno je da je veliki uticaj permeabilnosti na  $c_{uk}$ . Povećanjem permeabilnosti značajno opada vrednost  $c_{uk}$  za sve brzine strujanja. To znači da, ako je cilj raditi sa emulzijama većih koncentracija (20000 mg/l) na što većoj brzini strujanja, onda se to može postići pri najmanjoj primenjenoj permeabilnosti sloja. To je, takođe, vidljivo i na 3D dijagramu, slika 53.



**Slika 51** Zavisnost izlazne od ulazne koncentracije dispergovane faze za različite brzinestrujanja: a. za permeabilnost  $K_{02}$  i b. za permeabilnost  $K_{03}$  (Stanimirović 2003)

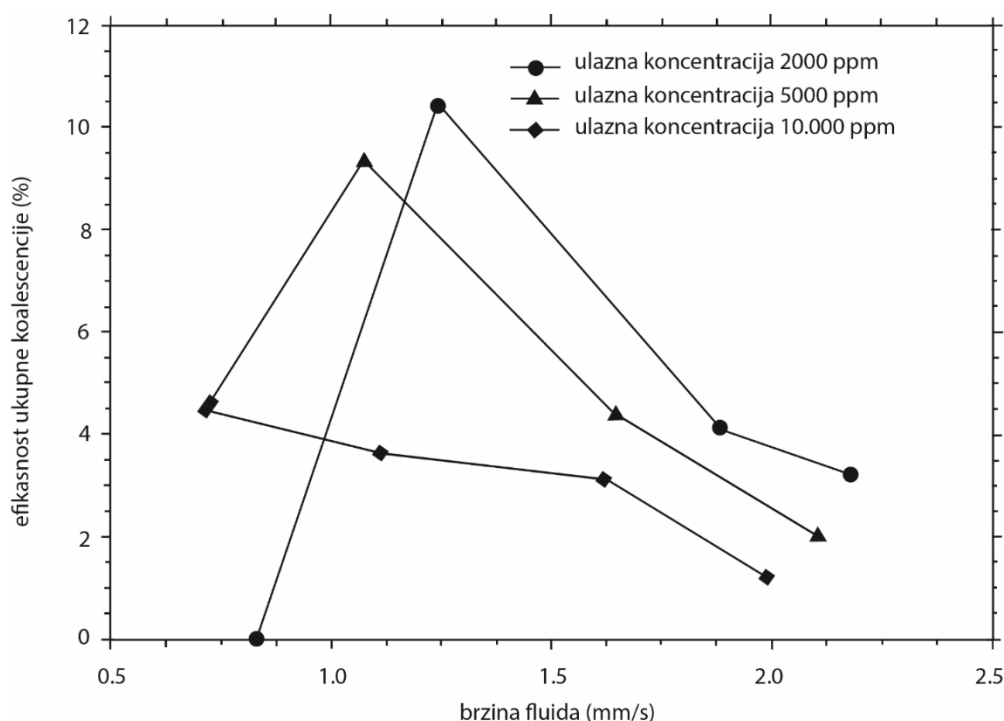


**Slika 52** Zavisnost kritične ulazne koncentracije  $c_{uk}$  od a. brzine strujanja za sve permeabilnosti sloja i b. permeabilnosti sloja za sve brzine strujanja (Stanimirović 2003)



**Slika 53** 3D dijagram zavisnosti kritične ulazne koncentracije  $c_{uk}$  od permeabilnosti sloja i brzine strujanja (Stanimirović 2003)

Li i Gu (2005) su istraživali koalescenciju u sloju vlakana PP i NA, kao i sloju granula PP pri horizontalnoj orijentaciji toka fluida, varirajući brzinu strujanja, ulaznu koncentraciju ulja, prirodu ulja i veličinu ulaznih kapi. Pratili su pad pritiska, specifično definisanu efikasnost koalescencije, koncentraciju ulja i promenu veličine kapi. Kako su merili pad pritiska, mogli su da konstatuju kada je postignuto stacionarno stanje. Ulazna koncentracija ulja u oglecima je bila 2000 ppm, 5000 ppm i 10000 ppm. Oni su konstatovali da porastom ulazne koncentracije ulja, za posmatrani opseg, opada efikasnost koalescencije, što je po njima neočekivano, slika 54. Iz analize rezultata, vidi se da su oni smatrali da u porama sloja dolazi samo do koalescencije između kapi i koalescencije na čvrstoj površini. Iako pričaju o zasićenju sloja, ne vidi se da su razumeli da je dominantna koalescencija, prema Spielmanu, na površinu zasićene faze koja se nalazi u porama, kapilarno-provodne faze.



**Slika 54** Zavisnost efikasnosti koalescencije od brzine strujanja u sloju granula za različite ulazne koncentracije ulja (Li i Gu 2005)

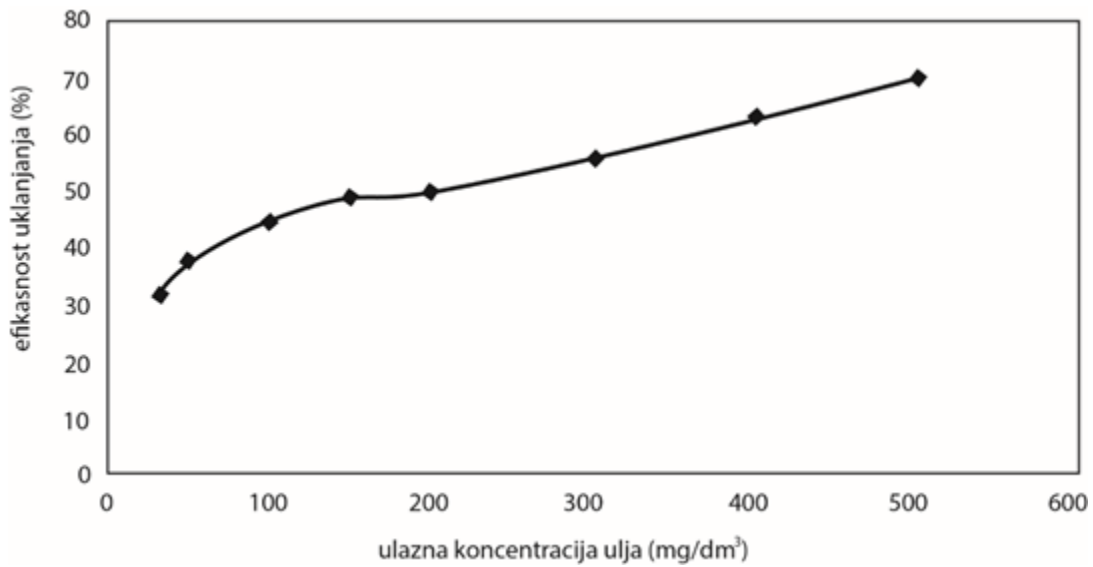
Zhou i saradnici (2009) su istraživali efikasnost vlakana od specijalno modifikovane smole organskog i neorganskog porekla u uklanjanju ulja iz otpadne vode. Njihovi ogledi

---

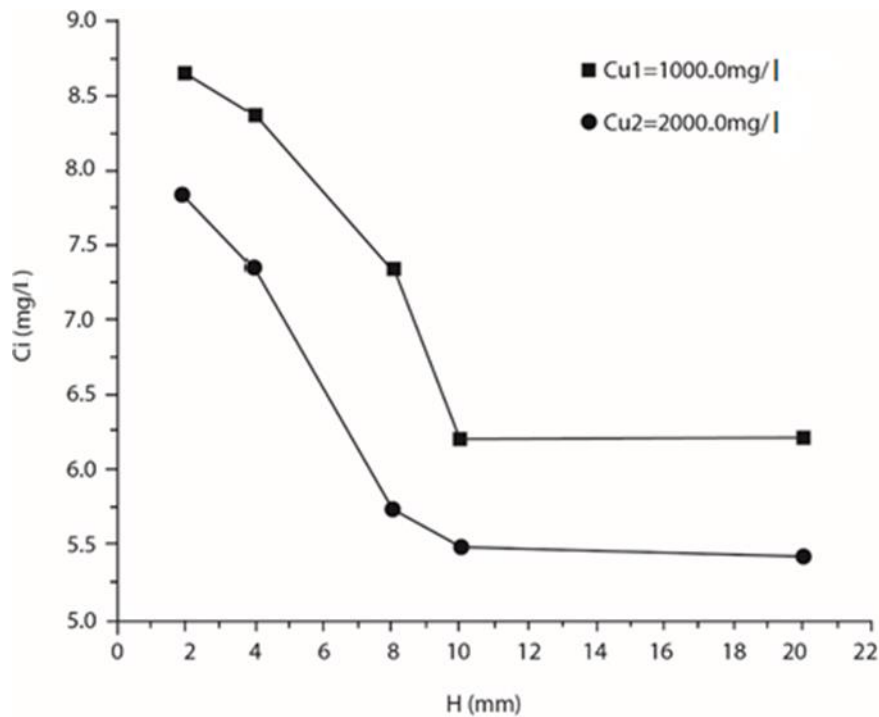
su realizovani pri orijentaciji toka fluida vertikalno nagore. Proučavali su uticaj brzine strujanja, promene pH, debljine sloja, temperature, ulazne koncentracije ulja i prirode smole na efikasnost separacije. Prema njima, u njihovim eksperimentima istovremeno se realizuje razbijanje stabilne emulzije, koalescencija kapi i delimično adsorpcija ulja. Kada je reč o uticaju ulazne koncentracije ulja, potrebno je istaći da su u ogleđima korišćene koncentracije 50, 100, 300 i 500 mg/l ulja u vodi. Prema njima, opseg koncentracije do 500 mg/l nema efekta na efikasnost separacije, što je u skladu sa istraživanjima Bitten-a (1970) i Bitten-a i Fochtman-a (1971) koji, takođe, tvrdi da koncentracija ispod 500 mg/l ne utiče na koalescenciju. Na osnovu toga, moglo bi se smatrati da postoji donja ulazna koncentracija ulja ispod koje je broj kapi toliko mali da je koalescencija otežana.

Maiti i saradnici (2011) su, takođe, istraživali efikasnost separacije ulja iz vode pomoću granula od jedne komercijalne smole. Kao i Zhou i saradnici (2009), istraživali su uticaj brzine strujanja fluida, debljine sloja i ulazne koncentracije ulja. Njihova eksperimentalna aparatura je ekvivalentna aparaturi Zhou i saradnika (2009). Oni su, takođe, odabrali jednak raspon ulazne koncentracije ulja kao i Zhou i saradnici. Kao rezultat dali su zavisnost efikasnosti separacije od ulazne koncentracije na kome je uočljivo da za dati opseg koncentracije ulja efikasnost separacije značajno raste, slika 55. Do sličnog zaključka su došli i Fahim i saradnici (1984, 1985, 1987). Šević (1992) je utvrdio da efikasnost separacije pokazuje maksimum u opsegu primenjenog intervala ulazne koncentracije ulja 300-2000 mg/l. Ako se posmatra opseg niskih koncentracija, taj deo krive raste sa porastom koncentracije.

Ma i saradnici (2014) su koristili vlakna GL za separaciju kapi ulja iz vode i posebnu konstrukciju koalescera »cev u cev«, pri čemu je sloj smešten u unutrašnjoj cevi i orijentacija toka fluida je vertikalno nagore. Istraživali su uticaj brzine strujanja, debljine i poroznosti sloja i ulazne koncentracije ulja na izlaznu koncentraciju ulja i efikasnost separacije. Vreme trajanja ogleđda bilo je 30 min. Oni nisu preduljivali sloj, niti su pratili promenu pada pritiska u vremenu. Opseg poroznosti sloja bio je 0,850-0,925. Opseg ulazne koncentracije ulja je bio 200-3000 mg/l. Efikasnost separacije je bila 96,4-99,8 %. Na slici 56 dati su rezultati zavisnosti izlazne koncentracije ulja od debljine sloja za dve ulazne koncentracije ulja od 1000 mg/l i 2000 mg/l. Jasno je uočljivo da za posmatrani opseg debljine sloja porastom debljine opada izlazna koncentracija ulja. Porastom ulazne koncentracije ulja realizuju se znatno niže vrednosti izlazne koncentracije ulja pri svim korišćenim debljinama sloja.

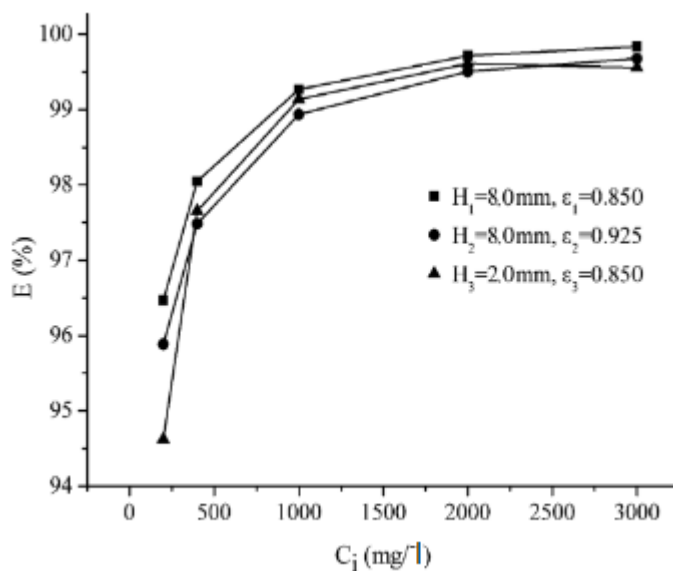


**Slika 55** Zavisnost efikasnosti koalescencije od ulazne koncentracije ulja (Maiti i saradnici 2011)



**Slika 56** Zavisnost izlazne koncentracije ulja od debljine sloja za dve ulazne Koncentracije ulja (Ma i saradnici 2014)

Na slici 57 data je zavisnost efikasnosti separacije od ulazne koncentracije ulja za različite debljine sloja. Porastom ulazne koncentracije ulja raste drastično efikasnost separacije pri svim primenjenim debljinama. Porast ulazne koncentracije ulja, za primenjeni opseg, pogoduje koalescenciji u sloju vlakana GL. Dati rezultati mogu se objasniti time da je eksperiment realizovan u nestacionarnom stanju. Na to ukazuju dve činjenice: jedna je kratko vreme ogleda uz odsutvo preduljivanja, a druga je orijentacija toka fluida vertikalno nagore. Pri toj orijentaciji, u sloju se zadržava minimalna količina zasićene uljne faze. Povećana ulazna koncentracija ulja efikasno popunjava pore u kojima zapravo nema ulja i tek treba da se formira kapilarno-provodna faza.

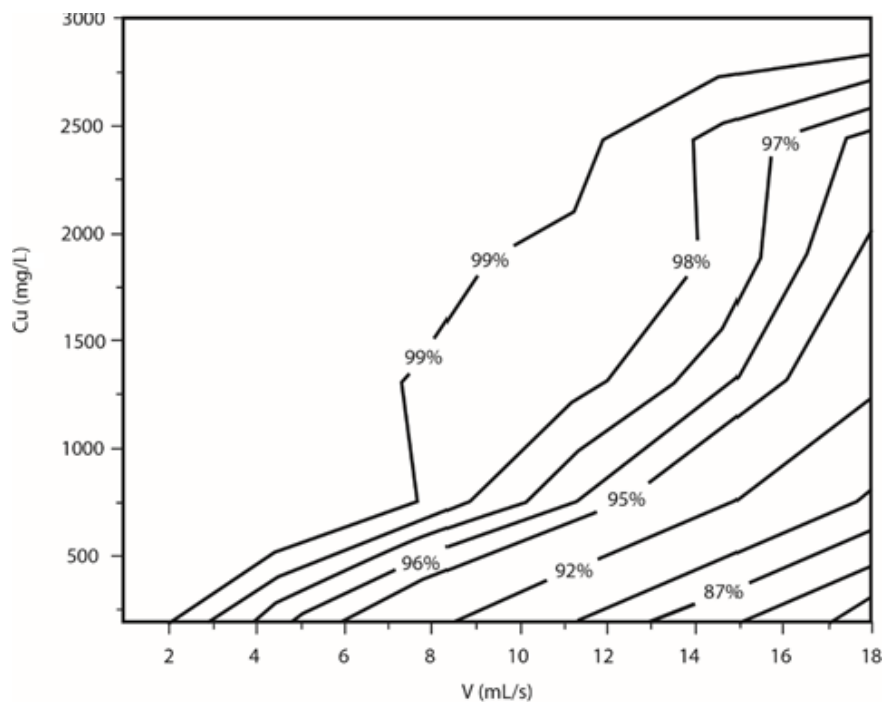


**Slika 57** Zavisnost efikasnosti koalescencije od ulazne koncentracije ulja za različite debljine sloja (Ma i saradnici 2014)

Ma i saradnici (2014) su dali i konturni dijagram na kome je moguće uočiti simultani uticaj brzine strujanja i ulazne koncentracije dispergovanog ulja, slika 58. Porastom brzine, efikasnost separacije značajno opada pri nižim ulaznim koncentracijama ulja. Što su veće ulazne koncentracije ulja, to je značaj brzine manji. Postoji široka površina pri kojoj se realizuje efikasnost od 99 %. Ona je veća i pokriva veće brzine strujanja kada su ulazne koncentracije ulja veće.



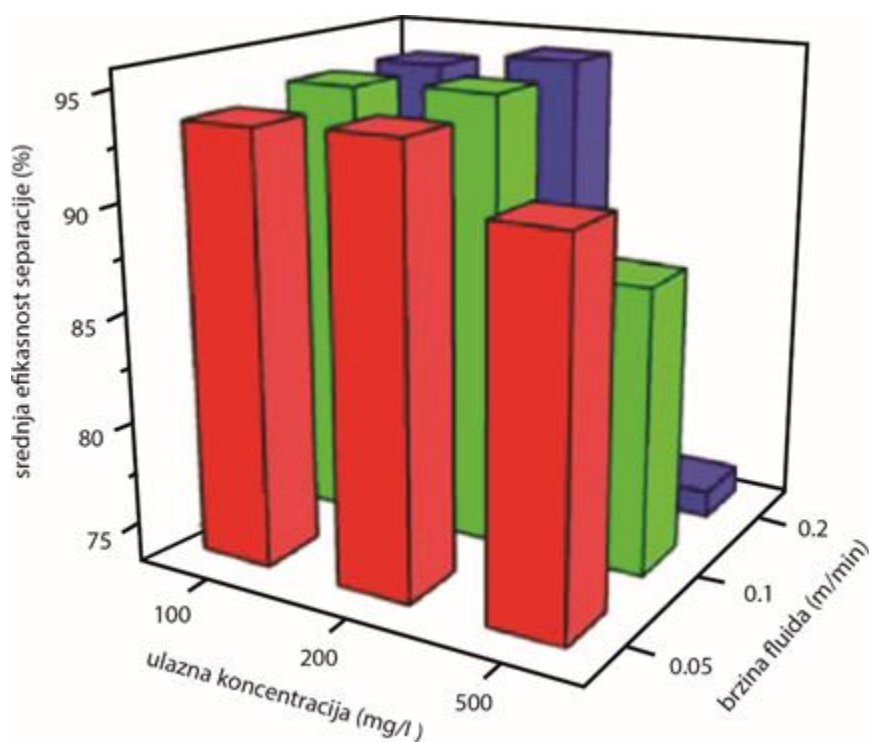
Relativno mali broj istraživača, s obzirom na posmatrani vremenski period od pedeset godina, jeste istraživao uticaj promene ulazne koncentracije dispergovane faze na koalescentnu filtraciju. Publikovana istraživanja su realizovana pri vrlo različitim uslovima rada, kao i u različitom opsegu koncentracije ulazne dispergovane faze: u rasponu od nekoliko stotina mg/l pa sve do nekoliko procenata. U većini istraživanja postoji potpuno odsustvo informacija o korišćenoj geometriji sloja. Eksperimenti su rađeni pri nestacionarnom ili stacionarnom režimu ili su pokrivali oba režima. Nekada se ne vidi da su istraživači bili svesni u kom režimu su realizovali eksperimente. Može se konstatovati da nedostaje jedna sveobuhvatna analiza uticaja i značaja ulazne koncentracije dispergovane faze. Istraživači nikada ne daju obrazloženje kako su usvojili ulaznu koncentraciju dispergovane faze za svoje oglede, odnosno koji su razlozi bili za usvajanje baš te primenjene koncentracije.



**Slika 58** Zavisnost efikasnosti koalescencije od brzine strujanja i ulazne koncentracije ulja (Ma i saradnici 2014)

Hu i saradnici (2016) su istraživali uticaj ulazne koncentracije organske faze u vodi u intervalu 100-500 mg/l na efikasnost formiranja zasićene faze u sloju vlakana GL.

Eksperimenti su realizovani na izrazito maloj aparaturi uz korišćenje malih količina fluida. Korišćena je orijentacija toka fluida vertikalno nagore. Cilj ovih istraživanja je bila procena mogućnosti regeneracije nekih solvenata u metalurgiji. Istraživan je simultani uticaj ulazne koncentracije dispergovane faze i brzine strujanja fluida na efikasnost separacije organske faze iz vode, slika 59. Konstatovali su da je uticaj brzine strujanja izrazito velik. Pri malim brzinama strujanja, efikasnosti separacije je preko 90 % nezavisno od ulazne koncentracije. Tek pri najvećoj primenjenoj brzini strujanja počinje da se uočava uticaj ulazne koncentracije dispergovane faze, i to tako da efikasnost separacije opada pri najvećoj ulaznoj koncentraciji dispergovane faze od 500 mg/l, slika 59.



**Slika 59** Istovremeni uticaj ulazne koncentracije dispergovane faze i brzine strujanja fluida na efikasnost separacije (Hu i saradnici 2016)

Lu i saradnici (2016b) su, pored proučavanja uticaja geometrije sloja, proučavali i uticaj ulazne koncentracije dispergovane faze pri konstantnoj brzini strujanja fluida. Opseg ulazne koncentracije dispergovane faze je bio 400-800 mg/l. Za posmatrani opseg,

---

ostvarena je maksimalna efikasnost separacije, a oblik zavisnosti jednak je obliku koji je utvrdio Šević (1992). Opseg vrednosti efikasnosti je bio 96,6-97,2 %.

Istraživačka grupa Šećerov Sokolović je realizovala opsežan eksperimentalni program istraživanja uticaja ulazne koncentracije dispergovane faze na efikasnost separacije mineralnih ulja iz vode kroz pojedinačne magistarske radove, ali nije dala do sada njihovu detaljnu i sveobuhvatnu analizu, kao ni analizu istovremenog uticaja geometrije sloja kroz promenu debljine i permeabilnosti sloja i promenu prirode uljne faze.

---

### **3. EKSPERIMENTALNI DEO**

---

### 3.1. Eksperimentalni program

Eksperimentalni program ove doktorske disertacije realizovan je u tri segmenta. Prvi segment je proučavanje morfologije, dimenzije, povezanosti vlakana i načina njihovog pakovanja u sloju. Drugi segment je istraživanje istovremenog uticaja debljine vlakana i geometrije sloja, pri čemu su realizovani eksperimenti na sloju homogene i heterogene strukture po dubini. Treći segment je proučavanje uticaja i značaja promene ulazne koncentracije dispergovane faze uz istovremeni uticaj promene debljine ili permeabilnosti sloja.

Eksperimentalni program je realizovan sa emulzijom tipa mineralno ulje u vodi primenom više filterskih materijala koji se razlikuju po prirodi i debljini vlakana. Kao mineralna ulja, korišćene su frakcije domaće nafte naftenskog porekla. Uzorci nose oznake A4, P1, B1 i B2. Kao kontinualna faza, korišćena je sanitarna voda konstantne temperature od 20 °C. Orijentacija toka fluida u svim ogledima bila je horizontalna. Svaki ogled je realizovan sa konstantnom ulaznom koncentracijom dispergovane faze, konstantnom debljinom i permeabilnosti sloja i konstantnom brzinom strujanja fluida. Posle trajanja od jednog sata, brzina strujanja fluida je povećana na drugu vrednost. Opseg vrednosti brzine strujanja fluida bio je 10-70 m/h. Opseg vrednosti permeabilnosti sloja bio je  $5,389 \cdot 10^{-9}$ - $0,180 \cdot 10^{-9}$  m<sup>2</sup>.

Prosečna veličina kapi ulja bila je konstantna u svim ogledima i kretala se u opsegu od  $10 \pm 2$  μm. Disperznost sistema je postignuta mešanjem napojne smeše propellerskom mešalicom u rezervoarima zapremine 80 l, 45 minuta pre početka ogleda, kao i tokom čitavog ogleda, brzinom od 650 o/min. Sloj je prethodno kvašen dispergovanom fazom, čime je smanjeno vreme postizanja stacionarnog stanja.

Proučavanje morfologije, dimenzije i povezanosti vlakana, kao i načina njihovog pakovanja u sloju, uključilo je ukupno devet materijala. Od toga je pet bilo od polimera i četiri od nerđajućeg čelika. Svi korišćeni materijali su otpadni materijali, te su jeftini i lako dostupni. Poliuretan (PU) je dobijen mlevenjem otpada iz proizvodnje nameštaja, a polipropilen (PP), je otpad pri proizvodnji tepiha. Polipropilen džak (PPDJ), je dobijen sečenjem otpadnih džakova za pakovanje voća i povrća. Polietilenteraftalt kvaliteta BA1 otpad od krojenja termopunjenja za zimske jakne. Polietilenteraftalat kvaliteta PE je otpad iz proizvodnje filtera za kuhinjske aspiratore. Korišćena su i vlakna od nerđajućeg

---

čelika različite debljine, koji su otpad pri proizvodnji žičane mreže ili upletene žice oznake SS40, SS20 i SS12. Oznake su dobili po debljini vlakna. Nerđajući čelik SSM je otpadna mreža za ručno ribanje posuđa. Neki od ovih materijala su korišćeni za realizaciju oglada u drugim segmentima ove disertacije. Na svim navedenim materijalima realizovan je ogled Darsy, čime su dobijeni podaci o padu pritiska u funkciji brzine strujanja, kao i vrednosti permeabilnosti sloja.

Prilikom istraživanja istovremenog uticaja debljine vlakana i permeabilnosti sloja ulazna koncentracija dispergovane faze je bila 500 mg/l i primenjene su četiri permeabilnosti pri debljini sloja od 5 cm. Kod oglada za sloj homogene strukture po debljini korišćena su vlakna od sledećih materijala: SS40, SS20, SS12, PP i PPDJ. Istraživanje istovremenog uticaja debljine vlakana i permeabilnosti sloja kod sloja heterogene geometrije po dubini realizovano je korišćenjem vlakana od materijala SS40 i SS20 na originalan način. Manje pore na ulazu u sloj ostvarene su manjom permeabilnošću (većom nasipnom gustinom materijala), a veće pore na izlazu većom permeabilnošću (manjom nasipnom gustinom) istog materijala. Na taj način, iako se menja veličina pora po dubini sloja, debljina vlakna u sloju ostaje jednaka, što kod drugih istraživača nije slučaj.

Proučavanje uticaja promene ulazne koncentracije ulja pri istovremenoj promeni debljine ili permeabilnosti sloja realizovano je slojem vlakana PU. Prilikom promene debljine sloja, korišćena je jedna i najveća permeabilnost dok su debljine sloja bile 3 cm, 5 cm, 10 cm i 15 cm. Opseg ulazne koncentracije mineralnog ulja bio je 500-2000 mg/l. Pri proučavanju istovremenog uticaja promene ulazne koncentracije ulja i permeabilnosti sloja, debljina sloja je bila 5 cm, opseg permeabilnosti je bio maksimalan od  $5,389 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  do  $0,180 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ . Ulazna koncentracija ulja je povećavana u svakom ogledu od 500 mg/l do realizacije eksponencijalnog rasta izlazne koncentracije ulja. U nekim ogledima ta je vrednost iznosila čak i 24.000 mg/l.

---

## 3.2. Metode rada, eksperimentalne tehnike i obrada rezultata

Način realizacije pojedinačnih tipova eksperimenata dat je u eksperimentalnom delu. Veličine koje su određivane se mogu podeliti na: osobine sloja, osobine filterskog 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

Od osobina sloja, određivane su poroznost, udeo čvrstog, i permeabilnost.

*Poroznost*,  $\varepsilon$ , je računata za svaku pojedinačnu nasipnu gustinu sloja, a na osnovu vrednosti gustine materijala, jednačinom 6:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_n}{\rho} \quad (6)$$

gde su:

$\rho_n$  - nasipna gustina sloja, kg/m<sup>3</sup> i

$\rho$  - gustina materijala, kg/m<sup>3</sup>.

*Udeo čvrste faze*,  $\Phi$ , može se izračunati ako je poznata vrednost poroznosti jednačinom 7:

$$\Phi = 1 - \varepsilon \quad (7)$$

*Permeabilnost*  $K_0$  je određivana Darcy-jevim ogledom, preko jednačine pada pritiska za određeni opseg brzine proticanja koja je merena eksperimentalno. Eksperimenti su rađeni sa sanitarnom vodom, temperature 15°C. Permeabilnost sloja,  $K_0$ , određene nasipne gustine računata je preko sledeće jednačine 8:

$$K_0 = \frac{K_F \cdot \mu}{\rho \cdot g} = \frac{\mu}{A \cdot \rho \cdot g} \quad (8)$$

---

gde su:

$K_0$  – permeabilnost  $m^2$ ,

$K_F$  - koeficijent filtracije po Darsy-ju  $m/s$ ,

$\mu$  - dinamička viskoznost fluida,  $\mu = 0.00141$  Pa s,

$\rho$  - gustina fluida,  $\rho = 1011.206$  kg/m<sup>3</sup> i

$g$  - gravitaciono ubrzanje,  $g = 9.81$  m/s<sup>2</sup>.

*Specifična aktivna površina vlakna,  $S$* , određivana je računskim putem, primenom jednačine 9:

$$S = \frac{P_v}{V_v} \quad (9)$$

gde su:

$P_v$  - površina vlakna, mm<sup>2</sup> i

$V_v$  - zapremina vlakna, mm<sup>3</sup>.

Ako je poprečni presek vlakna kružni, površina i zapremina vlakna se izračunavaju primenom jednačina za cilindar 10 i 11:

$$P_v = d_v \cdot \pi \cdot h \quad (10)$$

$$V_v = \frac{d_v^2}{4} \cdot \pi \cdot h \quad (11)$$

gde su:

$d_v$  - prečnik vlakna, mm

$h$  - dužina vlakna, mm.

Ako je poprečni presek vlakna pravougaonog oblika, površina i zapremina vlakna se izračunavaju primenom sledećih jednačina 12 i 13:

$$P_v = 2 \cdot (a + b) \cdot h \quad (12)$$

$$V_v = a \cdot b \cdot h \quad (13)$$



---

gde su:

$a, b$  – dužine stranica pravougaonika, mm.

### **3.2.2. Osobine filterskog materijala**

Od osobina filterskog materijala određivane su gustina, tačka topljenja, kritični površinski napon i morfologija i dimenzija vlakana.

*Gustina* filterskih materijala je određena piknometrijski.

*Tačka topljenja* je određena DSC metodom (Differential Scanning Calorimetry) na uređaju TA Instruments, Model Q20 za sve polimere, dok je za čelik preuzeta iz literature ([http://www.engineeringtoolbox.com/melting-temperature-metals-d\\_860.html](http://www.engineeringtoolbox.com/melting-temperature-metals-d_860.html)).

*Kritični površinski napon* materijala je usvojen na osnovu podataka dostupnih u literaturi (Sharifi i Shaw 1996).

Morfologija i dimenzije vlakana ispitane su skening elektronskim mikroskopom (model JEOL, JSM-6460 LV instrument) i optičkim mikroskopom (Olympus BH.2 RFCA).

### **3.2.3. Osobine ulja**

Za analizu fizičko-hemijskih osobina dispergovane faze korišćene su metode i tehnike koje su dominantno standardizovane. Određene su sledeće osobine: gustina, viskoznost, neutralizacioni broj, međupovršinski napon i molska masa.

*Gustina* ulja određena je na 20 °C metodom kapilarne oscilometrije na Anton Paar-ovom digitalnom gustinomeru tipa DMA 46.

*Viskoznost* ulja određivana je standardom Kanon-Fenske metodom, ASTM D445-64.

*Neutralizacioni broj* ulja, tj. sadržaj kiselina, određen je standardnom titracionom metodom ASTM D3242.

---

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

Molska masa ulja određivana je standardnom metodom ASTM D 2502-67.

### 3.2.4. Osobine emulzije

Model emulzija ulje u vodi na ulazu u koalescer imala je konstantnu prosečnu veličinu kapi. Veličina kapi ulja je određivana na dva načina: eksperimentalno i računski. Eksperimentalne tehnike koje su korišćene, su brojač čestica Elzone 280 PC i optički mikroskop Olympus BH.2 RFCA. Za računsko određivanje veličine kapi korišćena je jednačina za Sauterov srednji prečnik, 14:

$$d_{sr} = 0,053 D We^{-0,6} \quad (14)$$

gde su:

$D$  – prečnik impelera mešalice m i

$We$ - Weber broj.

Weber broj se računa pomoću jednačine 15:

$$We = \frac{\rho_c n^2 D^3}{\sigma} \quad (15)$$

gde su:

$\rho_c$  – gustina kontinualne faze  $\text{kg/m}^3$ ,

$n$  – brzina obrtaja mešalice  $\text{o/min}$  i

$\sigma$ - međupovršinski napon,  $\text{N/m}$ .

### 3.2.5. Obrada rezultata

Koncentracija dispergovane faze u vodi određivana je IR spektrofotometrijom na uređaju Thermo Niclet 5700. Uzorci su pripremani ekstrakcijom sa ugljentetrahloridom i konzervisani hlorovodoničnom kiselinom pri pH = 2.

Efikasnost separacije određivana je primenom jednačine 16:

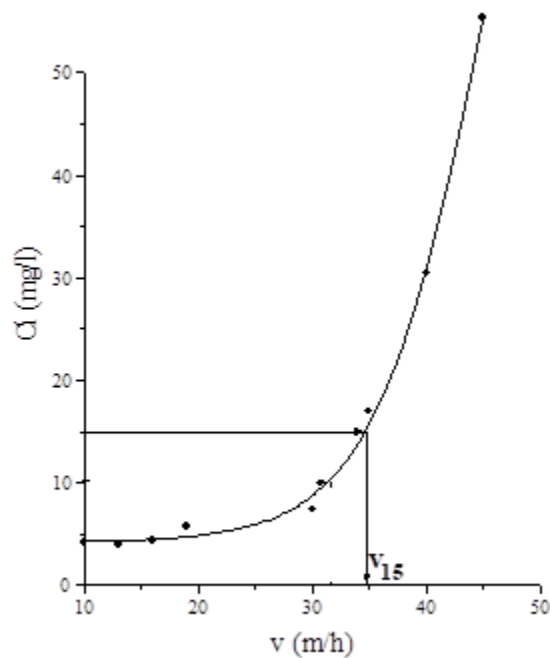
$$E = \frac{C_u - C_i}{C_u} \cdot 100 \quad (16)$$

gde su:

$C_u$ - ulazna koncentracija ulja mg/l i

$C_i$ - izlazna koncentracija ulja m/l.

Kritična brzina određivana je na osnovu eksperimentalne zavisnosti izlazne koncentracije ulja od brzine strujanja fluida za svaki ogled pojedinačno. Kritična brzina je ona brzina pri kojoj se postiže izlazna koncentracija dispergovane faze od 15 mg/l (Vulić 2000), slika 60.



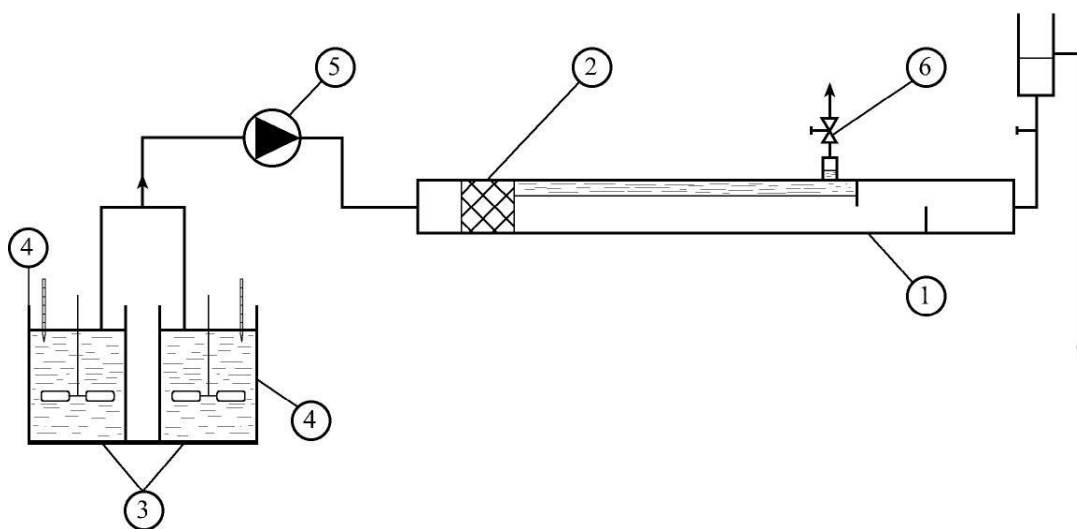
**Slika 60** Grafički prikaz određivanja kritične brzine

Kritična ulazna koncentracija ulja,  $c_{uk}$ , određuje se na adekvatan način kao i kritična brzina iz eksperimentalne krive zavisnosti izlazne od ulazne koncentracije ulja.

### 3.3. Eksperimentalni uređaji i uslovi rada

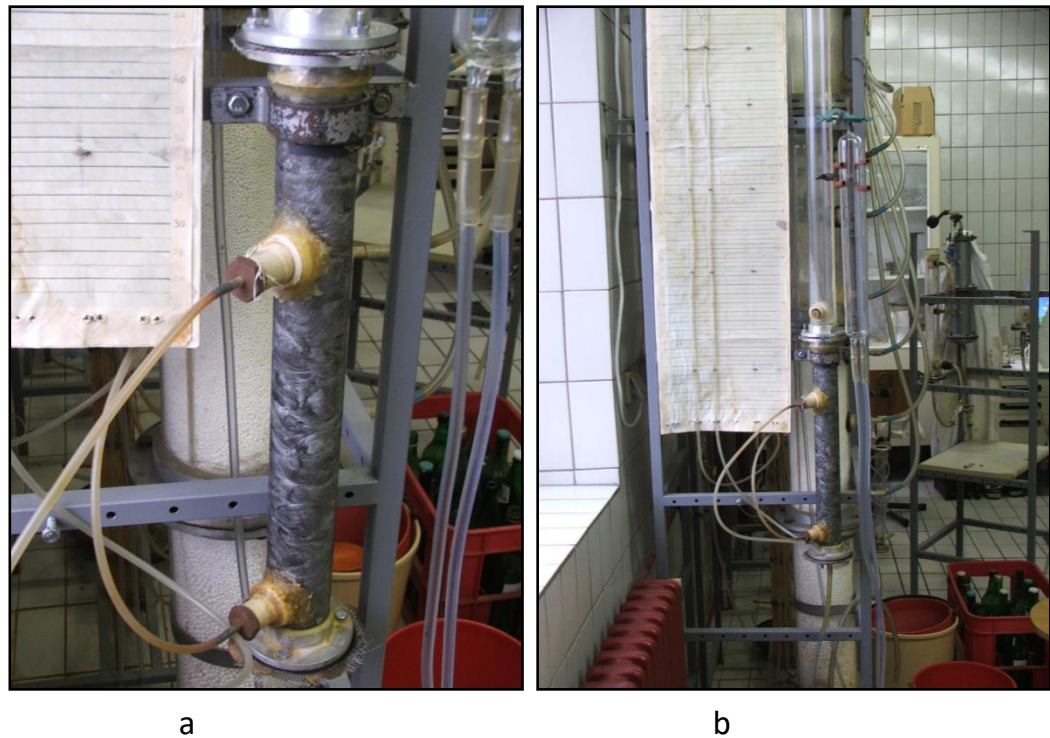
Poluindustrijski koalescer sa pratećom opremom prikazan je na slici 61. Eksperimentalni uređaj se sastoji od pleksiglas cevi prečnika 5 cm (1), ukupne dužine 1,2m. Debljina sloja (2) bila je 5 cm. Zauljena voda, temperature 20°C, pripremana je u dva rezervoara od 80 l (3). Ulje je dispergovano u vodi kontinualnim mešanjem propelerskim mešalicama u rezervoaru brzinom od 650 o/min (4) u trajanju od 45 min pre početka ogleda i kontinualno tokom ogleda, tako da se održava prosečna veličina kapi od  $10 \pm 2 \mu\text{m}$ . 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).

Ogled pri konstantnoj permeabilnosti kroz određeni filterski materijal realizovan je pri više brzina, tako što je jedna brzina držana konstantnom tokom jednog časa. Koncentracija ulja u vodi na izlazu praćena je analizom ugljentetrahlordnog ekstrakta pomoću FTIR spektrofotometra.



**Slika 61** Šema eksperimentalne aparature

U cilju određivanja pada pritiska kroz sloj i izračunavanja permeabilnosti sloja, realizovani su ogledi Darcy na aparaturi prikazanoj na slici 62. Aparatura predstavlja pleksiglas cev prečnika 5 cm i dužine 50 cm. Data cev ima nadogradnju od 1 m koja je montirana iznad sloja. Aparatura je opremljena sa dva piezometra koja se nalaze na međusobnom rastojanju od 30 cm, što je potrebna debljina sloja za precizno merenje permeabilnosti.



**Slika 62** Prikaz eksperimentalne aparature za Darcy ogled a. izgled spakovanog sloja vlakana SS i b. izgled aparature

---

### 3.4. Prikaz rezultata

#### 3.4.1. Osobine filterskog materijala

Kao što je već istaknuto, u ovoj doktorskoj disertaciji korišćena su vlakna od devet različitih materijala. Nerđajući čelik je zastupljen sa četiri uzorka različitih dimenzija vlakana. Polimeri su zastupljeni sa pet uzorka različite prirode i dimenzije vlakana, tabela 11.

**Tabela 11** Prikaz nekih osobina korišćenih valakana i materijala

Materijal	Gustina kg/m <sup>3</sup>	Tačka topljenja °C	Dimenzije vlakana μm	Kritični površinski napon mN/m
SS40	7597	1510	40±2	108
SS20	7597	1510	20±2	108
SS12	7597	1510	12±0.8	108
SSM	7597	1510	452±11 21±3	108
PU	1200	310	40 ± 4	23
PP	900	169	38 ± 3	30.5
PPDJ	900	169	1001±14 20±4	-
BA1	1400	254	31 ± 2	31
PE	1400	251	38 ± 2	-

#### 3.4.2. Osobine dispergovane faze

Korišćena su četiri mineralna ulja. Uzorci A4, B1 i B2 su vakuum frakcije jedne domaće nafte naftenskog porekla, dok je uzorak P1 blend sa povećanim sadržajem parafina bez aditiva, tabela 12.

---

**Tabela 12** Osobine korišćenih mineralnih ulja

<b>Analiza/uzorak</b>	<b>A4</b>	<b>P1</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>
<b>Gustina 20°C, kg/m<sup>3</sup></b>	918,9	879,0	844,7	902,5
<b>Viskoznost na 40°C, mPa s</b>	168,9	10,3	21,7	9,0
<b>Neutralizacioni broj, mg KOH/l</b>	1,71	0,13	0,23	1,23
<b>Tačka tečenja °C</b>	-3	+3	-30	-30
<b>Međupovršinski napon, mN/m</b>	30,5	32,4	-	15,0
<b>Molska masa, g/mol</b>	520	300	349	320
<b>Fracija °C</b>	315-550	320-415	350-400	320-400

---

## **4. ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA**



---

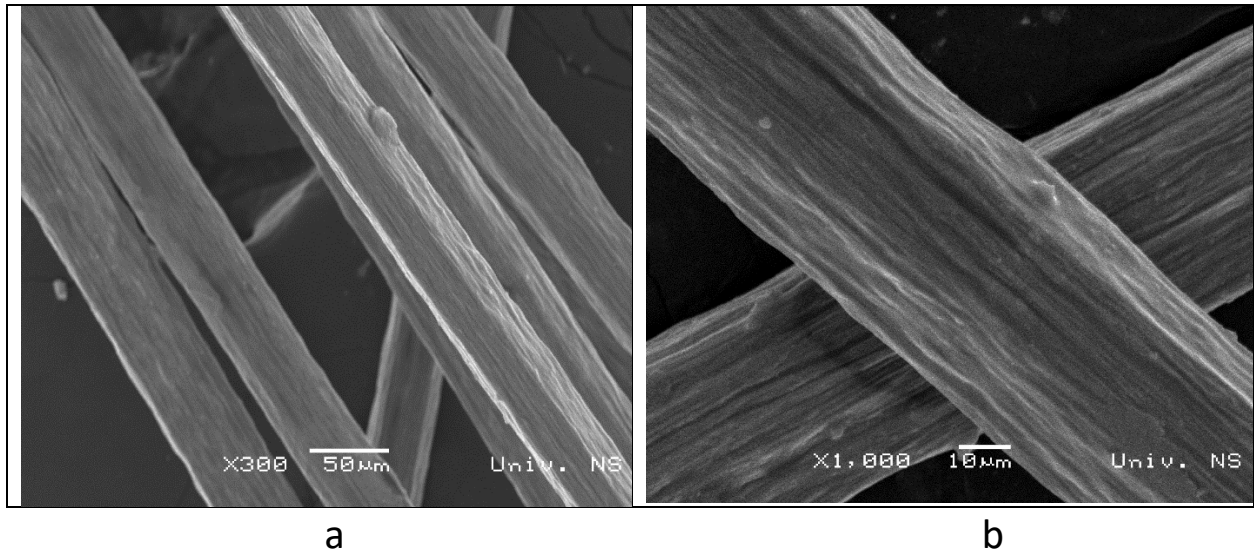
## 4.1. Proučavanje morfologije i osobine vlakana i sloja

Sloj formiran od vlakana je izuzetno složene strukture i u njemu se, pri strujanju sistema tečno-tečno, dešavaju kompleksni fenomeni. Takav sloj obezbeđuje visoku poroznost, čak i do 98%. Vlakna se, uslovljeno njihovim osobinama, pakuju na određeni način, tako da je teško spakovati jednak sloj dva puta.

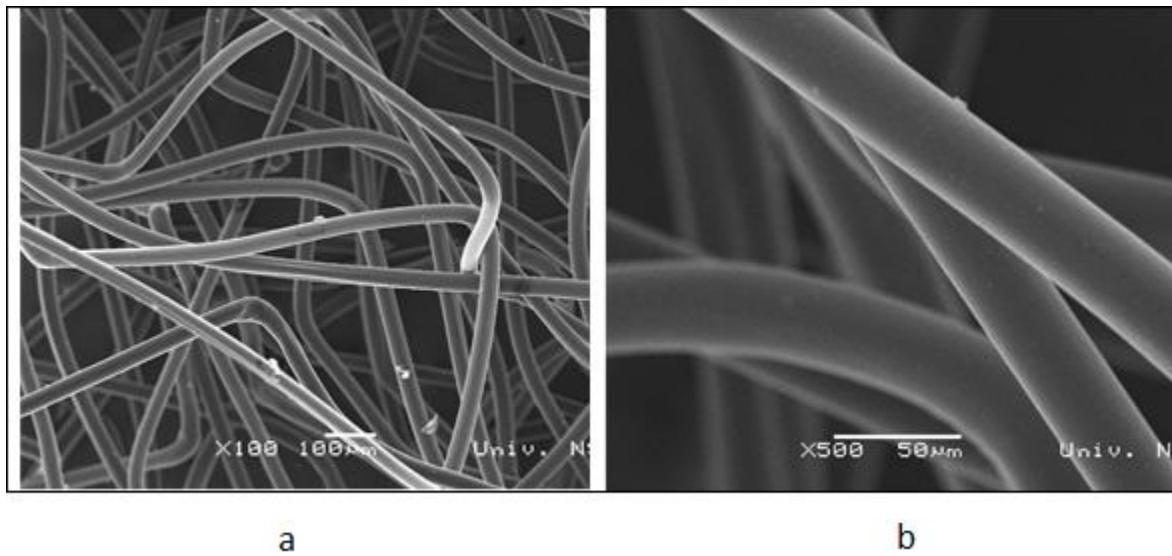
Vlakna se mogu razlikovati prema svojoj hemijskoj prirodi. Na osnovu hemijske prirode, vlakna se grubo mogu klasifikovati na vlakna od: metala, keramike, stakla i polimera. Već pri ovoj klasifikaciji može se konstatovati da se navedena vlakna značajno razlikuju, pored hemijske prirode, još po jednoj osobini bitnoj za način njihovog pakovanja. Ta osobina je krutost i/ili elastičnost. Većina polimernih vlakana su izrazito elastična. Elastičnost vlakana od metala uslovljena je njihovom debljinom. Vlakna od keramike i stakla mogla bi se smatrati neelastičnim, znači potpuno krutim. Može se konstatovati da je elastičnost/krutost vlakana uslovljena njihovom hemijskom prirodom i debljinom. Površina vlakana može da bude glatka ili hrapava, što predstavlja njihovu fizičku karakteristiku. U ovom radu su korišćena samo glatka vlakna, i to od nerđajućeg čelika i polimera.

Morfologija vlakana ispitivana je elektronskom mikroskopijom. Na SEM snimcima uočava se elastičnost vlakana jer su kruta vlakna izgleda štapa, a elastična manje ili više vijugava. Na slici 63, dat je SEM snimak vlakana od nerđajućeg čelika SS40 pri uvećanju od 300 i 1000 puta. Upečatljivo je da se radi o krutim vlaknima koja su izrazito debela. Debljina vlakana iznosi  $40 \pm 2 \mu\text{m}$ . Na slici 64, prikazani su SEM snimci vlakana PP bliske debljine  $38 \pm 3 \mu\text{m}$ . Jasno je uočljivo da su vlakna PP vijugava i da je njihov raspored u zapremini sloja značajno drugačiji od rasporeda vlakana SS40.

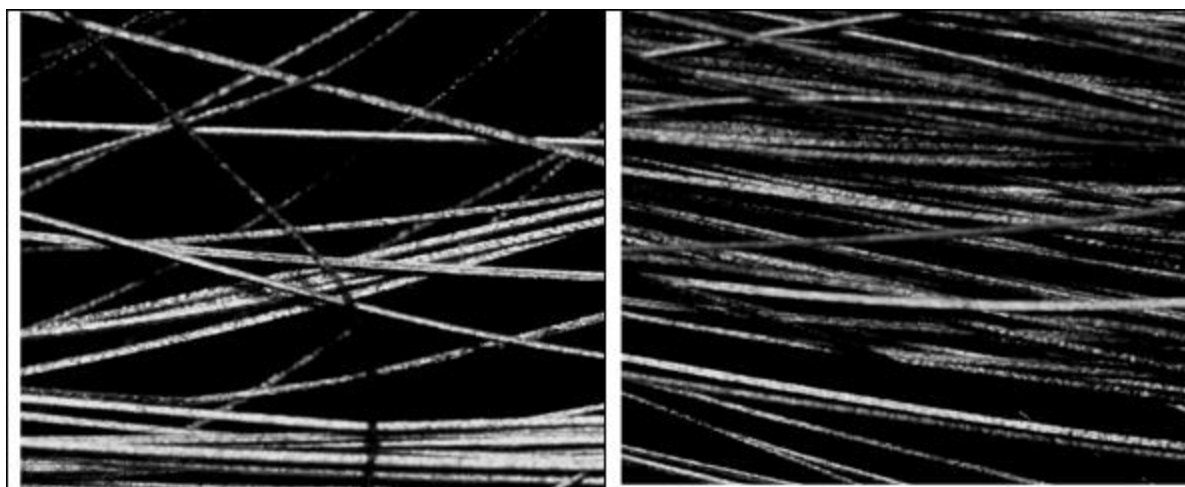
Izgled spakovanih vlakana u sloju jednake permeabilnosti i poroznosti proučavan je optičkom mikroskopijom. Na slici 65, dat je prikaz sloja vlakana SS40 pri uvećanju 40 puta za permeabilnost  $K_{01}$ . Data su dva snimka snimljena na različitim mestima sloja pri jednakim uslovima. Vidi se da slobodna, slučajno spakovana vlakna od nerđajućeg čelika SS40 realizuju relativno heterogeno pakovanje sloja. Na slici 65a, razmak između vlakana (pore) je veći, dok su vlakna na slici 65b bliža međusobno. Gusto pakovana vlakna nalaze se kao regioni, odvojene zapremine od vlakana koja realizuju veće pore.



**Slika 63** SEM snimak vlakana SS40 pri uvećanju od: a. 300x i  
b. 1000x



**Slika 64** SEM snimak vlakana PP pri uvećanju: a. 100x i  
b. 500x

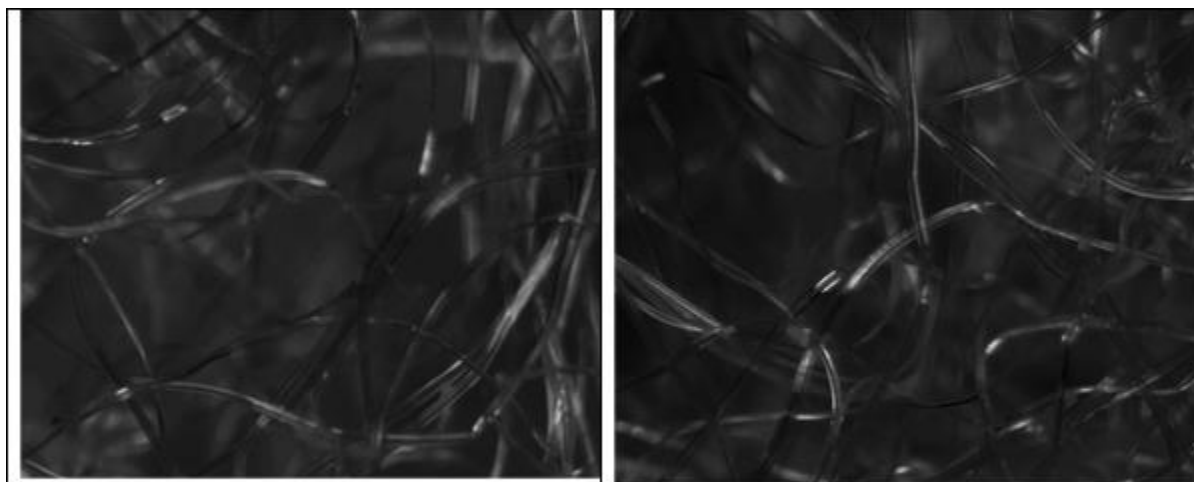


a

b

**Slika 65** Snimak sloja vlakana SS40 permeabilnosti sloja  $K_{01}$  realizovan optičkim mikroskopom pri uvećanju 40x

Kada je reč o sloju vlakana PP pri jednakim uslovima, slika 66, sloj je izgrađen od vijugavih vlakana koja, takođe, realizuju heterogeni porni prostor, ali je taj prostor drugačije raspoređen u zapremini sloja. Veće pore su distribuirane, tako da su ugrađene u polja manjih pora.



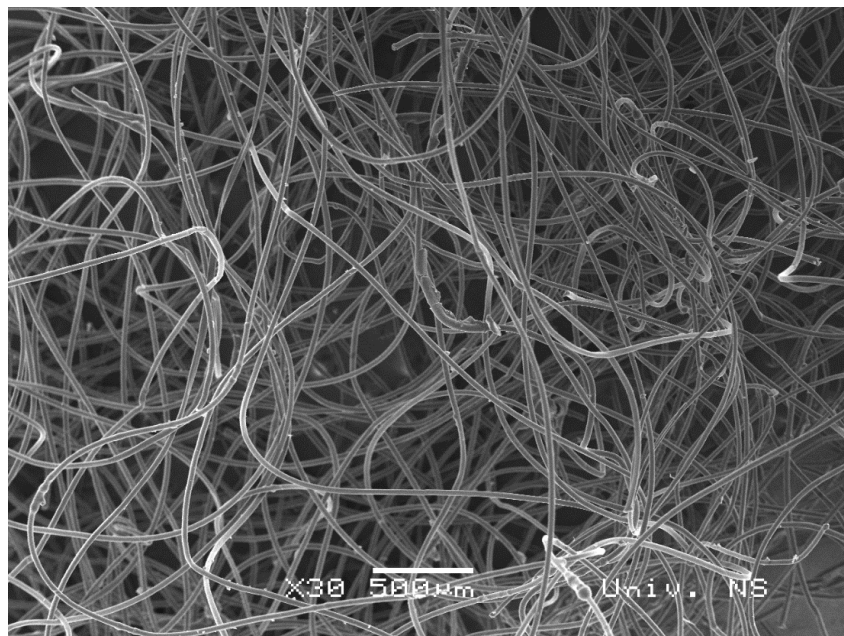
a

b

**Slika 66** Snimak sloja vlakana PP pri permeabilnosti sloja  $K_{01}$  realizovan optičkim mikroskopom pri uvećanju 40x

---

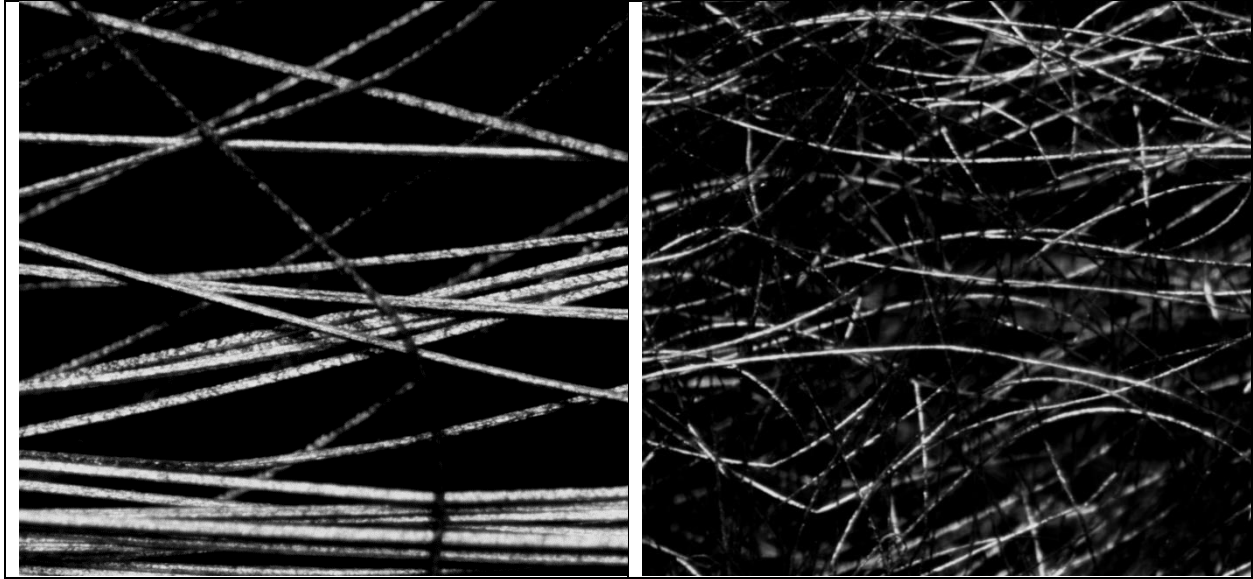
Uočeni fenomen distribucije većih i manjih pora još bolje se vidi na SEM snimku materijala BA1 slobodnih vlakana, pri uvećanju 30 puta, slika 67.



**Slika 67** SEM snimak vlakana BA1 pri uvećanju 30x

Da debljina metalnih vlakana značajno utiče na način njihovog pakovanja u sloju dokazuju sledeći snimci urađeni optičkim mikroskopom. Na slici 68, dati su snimci slojeva vlakana SS za permeabilnost  $K_{01}$  (slika 68a) za SS40 i SS12 (slika 68b) pri uvećanju 40 puta. Materijal SS12, koji ima debljinu vlakana  $12 \pm 0,8 \mu\text{m}$ , nema izrazito kruta vlakna kao SS40, te su njegova vlakna u sloju vijugava.

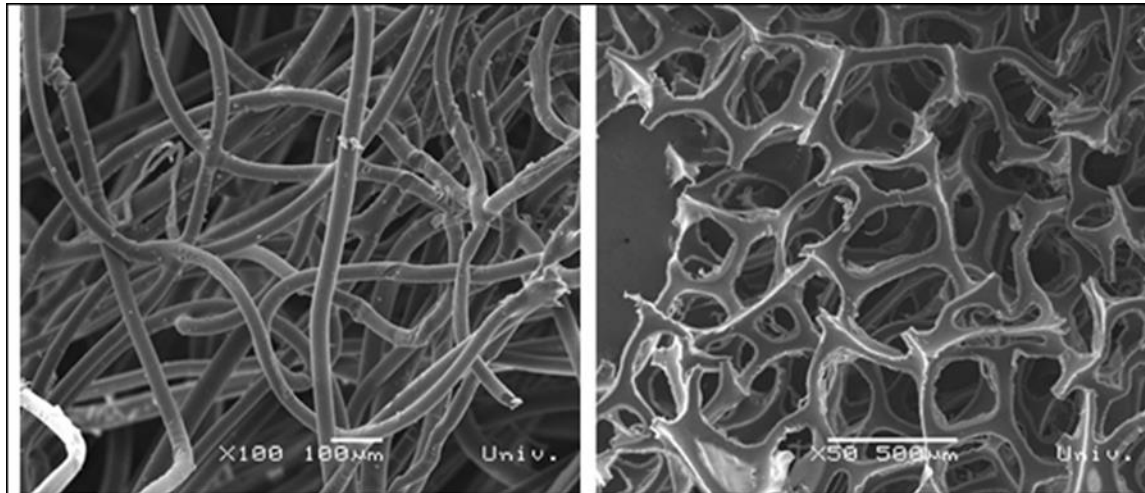
Vlakna mogu biti slobodna i povezana. Do sada prikazana vlakna bila su slobodna. Međutim, neki materijali imaju međusobno povezana vlakna. Na slici 69, prikazana su povezana vlakna polimera. Slika 69a daje SEM snimak vlakana PE pri uvećanju 100 puta. Vlakna materijala PE su na nekim mestima međusobno povezana. Na slici 69b dat, je SEM snimak vlakana PU, koja imaju izgled saća, sa porama heksagonalnog oblika. Vidi se da su vlakna PU povezana na sasvim drugačiji način nego vlakna PE.



a

b

**Slika 68** Snimak sloja vlakana SS različite debljine snimljen optičkim mikroskopom pri uvećanju 40x za permeabilnost  $K_{01}$  a. SS40 b. SS12



a

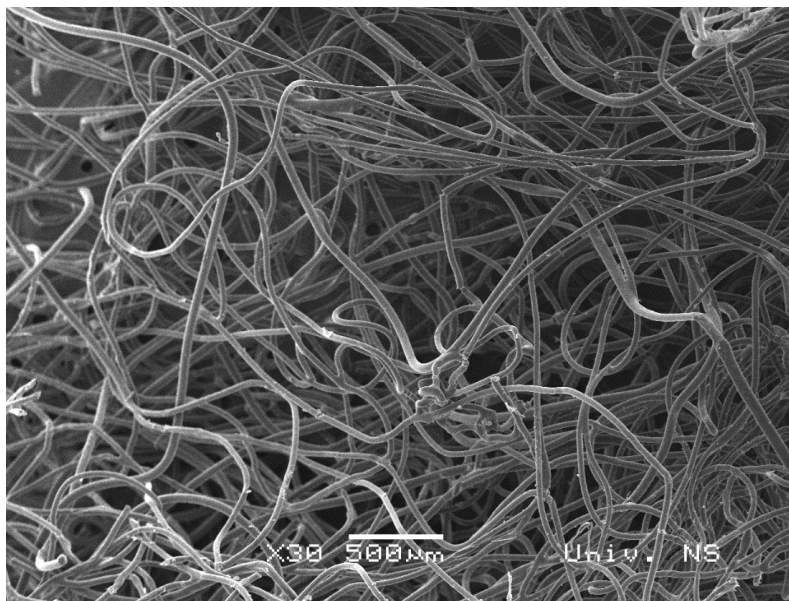
b

**Slika 69** SEM snimak vlakana polimera: a. PE pri uvećanju 100x i c. PU pri uvećanju 50x



---

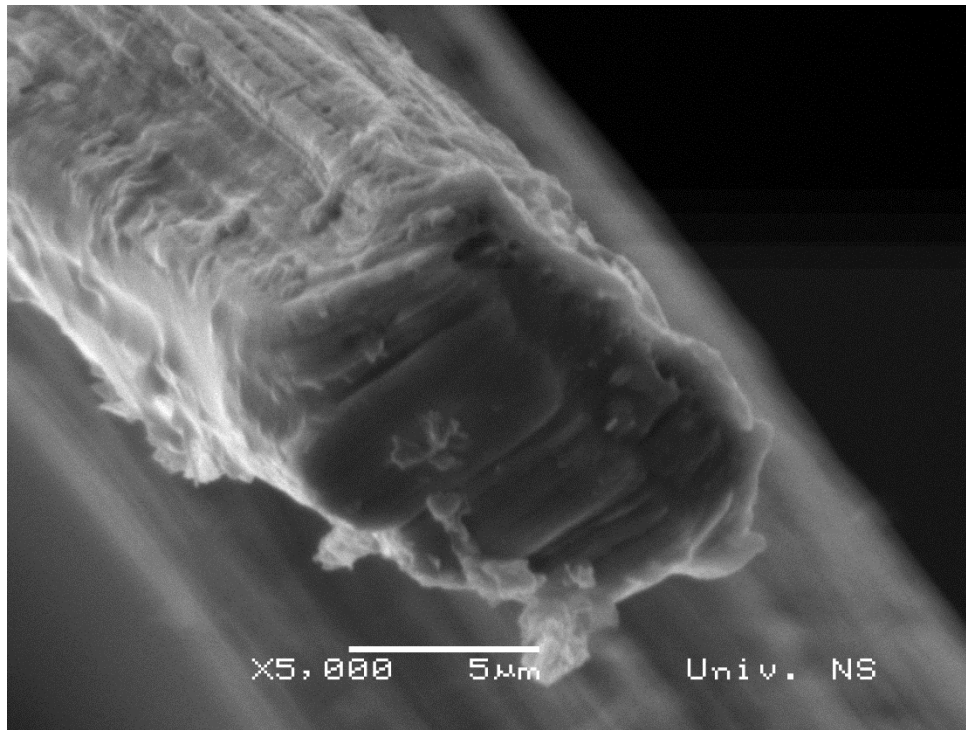
Ako se analizira SEM snimak vlakana PE pri uvećanju od 30 puta, nije vidljiva međusobna povezanost vlakana, slika 70.



**Slika 70** SEM snimak vlakana PE pri uvećanju 30x

Sledeća osobina vlakana koja bi mogla biti od uticaja na geometriju formiranog sloja jeste poprečni presek. Vlakna mogu biti kružnog, trougaonog, pravouganog, kvadratnog ili nepravilnog poprečnog preseka. Nije jednostavno proučavati poprečni presek vlakana pošto je neophodno vlakna preseći. Često se na taj način vlakno ošteti, naročito ako su u pitanju kruta vlakna, kao što ona od SS, slika 71.

Može se pouzdano tvrditi da su vlakna PE, BA1, PP i SS kružnog poprečnog preseka. Vlakna od PPDJ i SSM su pravougaonog preseka, zapravo ona izgledaju kao široke trake. Slika 72 prikazuje vlakna PPDJ i spužvu od nerđajućeg čelika SSM snimljenih optičkim mikroskopom na kojoj se vidi da je širina vlakana ovih materijala neuporedivo veća od debljine vlakana. Vlakna PPDJ imaju širinu  $1001 \pm 14$  i debljinu  $20 \pm 4$   $\mu\text{m}$ , dok je širina vlakana SSM  $452 \pm 11$ , a debljina  $21 \pm 3$   $\mu\text{m}$ .



**Slika 71** SEM snimak preseka vlakna SS40 pri uvećanju 5000x



a

b

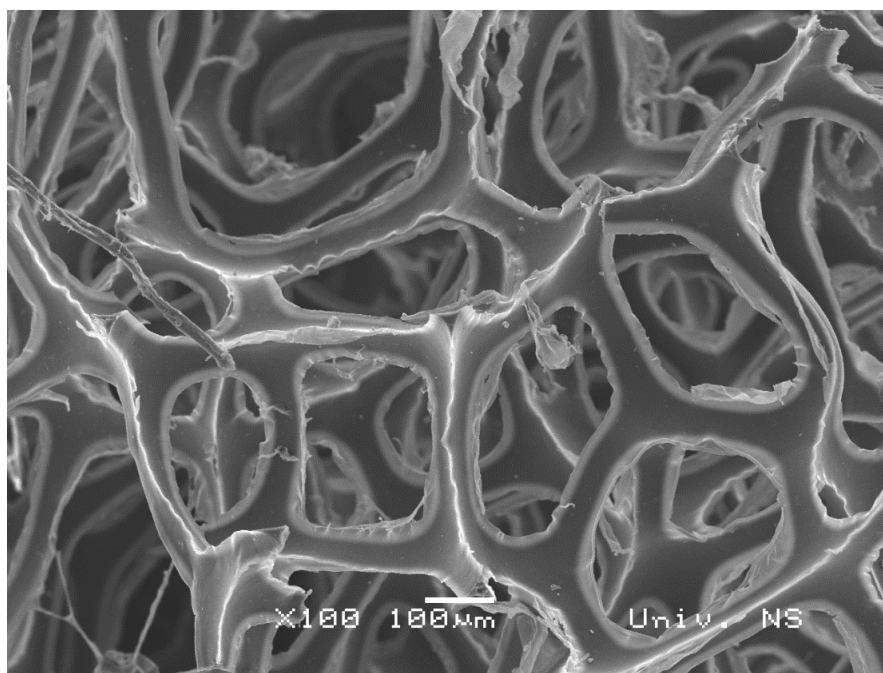
**Slika 72** Snimci sloja vlakana snimljeni optičkim mikroskopom a. PPDJ uvećanje 5x i  
b. SSM uvećanje 40x

---

Poprečni presek vlakana od PU je upitan. Ako se analizira SEM snimak ovog vlakna pri uvećanju 50 puta, slika 69, skoro se sa sigurnošću može reći da su vlakna trougaonog poprečnog preseka i da imaju oštre ivice. Međutim, ako se ista vlakna snime pri uvećanju 100 puta, slika je sasvim drugačija, slika 73. Na tom snimku nema oštih ivica i pre bi se moglo reći da su vlakna nepravilnog oblika bliskog elipsi.

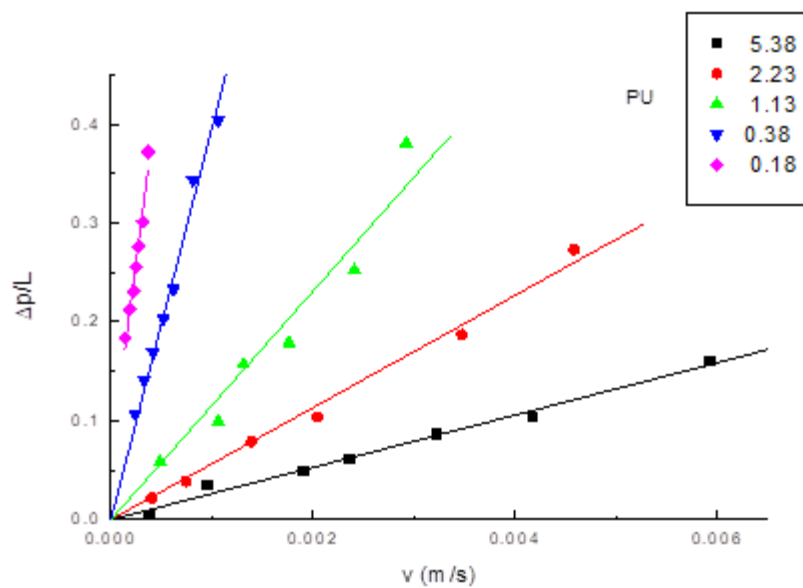
Postavlja se pitanje da li se i kako ove razlike u obliku, elastičnosti i debljini vlakana odražavaju na osobine njihovih slojeva i efikasnost separacije dispergovanog ulja iz vode.

Da bi se odredila permeabilnost sloja, realizovani su ogledi Darcy sa vlaknima od svih materijala za veći broj nasipnih gustina. Zavisnost pada pritiska po jedinici debljine sloja bila je linearna za sve primenjene brzine strujanja fluida, slika 74. Metodom merenja mase određivana je poroznost sloja, a istovremeno je poroznost računata i na osnovu poznate gustine materijala i korišćene nasipne gustine. U tabeli 13 dati su podaci za slojeve vlakana od PU.



**Slika 73** SEM snimak vlakana PU pri uvećanju 100x





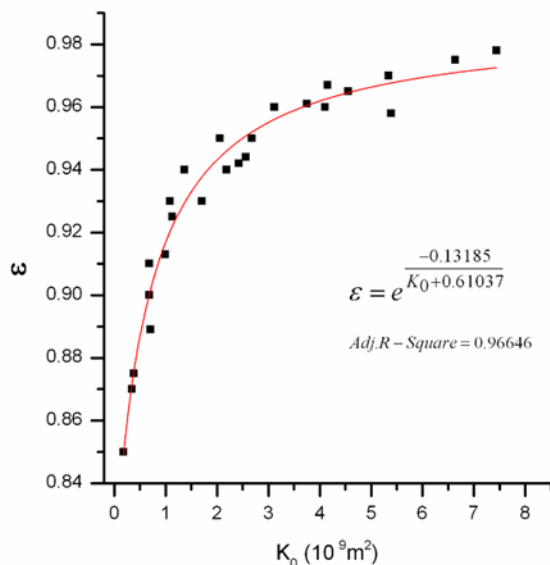
**Slika 74** Eksperimentalne prave zavisnosti pada pritiska po jedinici debljine sloja za slojeve vlakana od PU

**Tabela 13** Eksperimentalne vrednosti nagiba prave i poroznosti sloja za određenu nasipnu gustinu za materijal PU

Materijal	$\rho_n$ kg/m <sup>3</sup>	$K_0$ 10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup>	A	$\epsilon$
PU	50	5,389	26,377±0,169	0,958
	70	2,426	58,598±0,309	0,942
	90	1,128	125,975±0,543	0,928
	150	0,380	374,233±1,88	0,875
	180	0,180	791,640±3,308	0,850

Na opisani način, došlo se do dragocene eksperimentalne zavisnosti poroznosti od permeabilnosti sloja, slika 75. Takva zavisnost je omogućila formiranje sloja tačno definisane permeabilnosti, koja je u eksperimentima separacije ulja održavana konstantnom. Potrebno je istaći da su svi korišćeni materijali, osim jednog (PPDJ), pripadali prikazanoj eksperimentalnoj krivoj, slika 76. Kada je reč o vlaknima SSM, neophodno je objasniti da i ona pripadaju prikazanoj eksperimentalnoj krivoj, jedino je opseg permeabilnosti

bio veći od  $10 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ . Zbog debljine vlakana, bilo je nemoguće sabiti sloj da bi se obezbedile veće nasipne gustine, koje bi ostvarile vrednosti permeabilnosti u željenom opsegu.

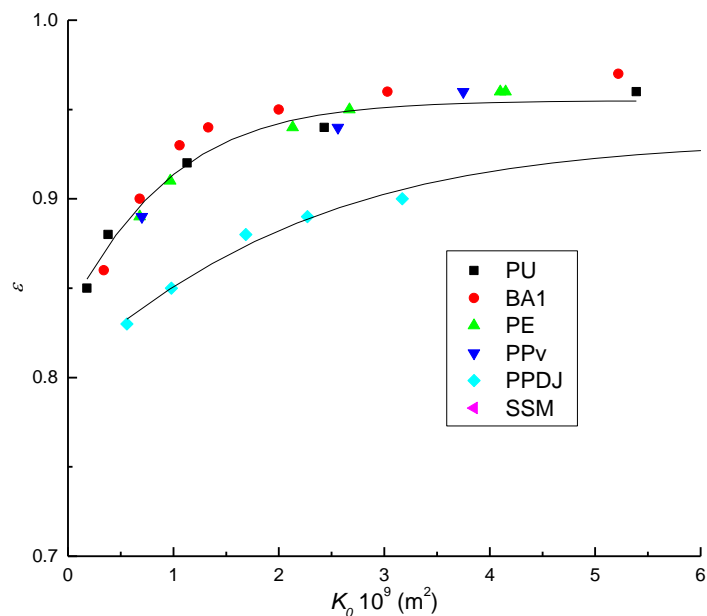


**Slika 75** Eksperimentalna kriva zavisnosti poroznosti od permeabilnosti sloja

Vlakna PPDJ za željeni opseg permeabilnosti sloja ostvaruje niže poroznosti sloja, tabela 14. Znači, kada je reč o ovim vlaknima, tada su realizovani eksperimentalni podaci zavisnosti poroznosti od željene permeabilnosti sloja, koji su prikazani na slici 76.

**Tabela 14** Eksperimentalne vrednosti nagiba prave i poroznosti za određenu nasipnu gustinu za material PPDJ

Materijal	$\rho_n$ $\text{kg/m}^3$	$K_0$ $10^9 \text{ m}^2$	A	$\varepsilon$
PPDJ	50	11,804	$12,161 \pm 0,102$	0,944
	70	10,704	$13,412 \pm 0,101$	0,922
	90	5,204	$27,586 \pm 0,089$	0,900
	100	3.259	$44,052 \pm 0,232$	0.889
	110	2.417	$59,392 \pm 0,211$	0.878
	130	1.409	$101,853 \pm 0,909$	0.856
	150	0.809	$177,370 \pm 1,231$	0.833



**Slika 76** Eksperimentalne krive zavisnosti poroznosti od permeabilnosti za sva korišćena vlakna materijale uključujući i PPDJ

Pošto su u ovoj disertaciji korišćena vlakna od različitih materijala, različitih dimenzija i oblika, u narednim tabelama daju se izračunate vrednosti specifične aktivne površine za neke od njih, tabela 15. Kao što se vidi, raspon specifične aktivne površine je u opsegu  $100\text{-}333\text{ mm}^{-1}$ .

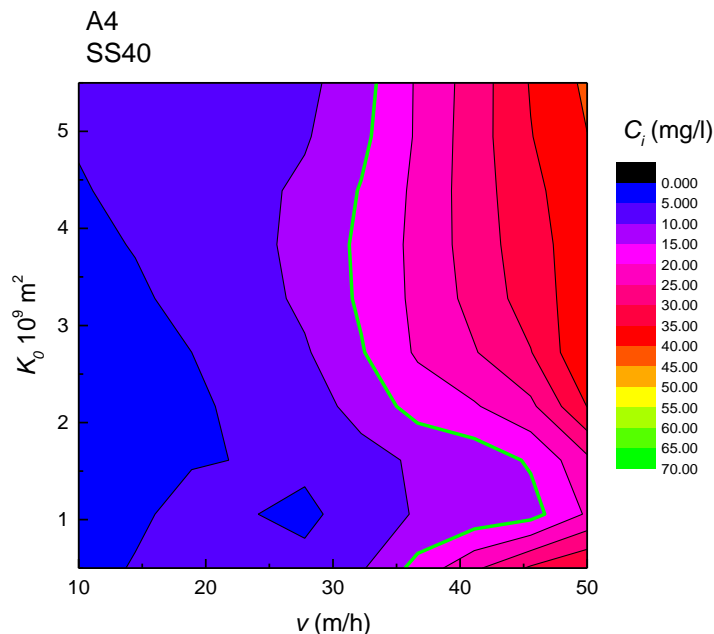
**Tabela 15** Računske vrednosti specifične aktivne površine za neke od korišćenih vlakna

Materijal	Dimenzije vlakna $\mu\text{m}$	Specifična aktivna površina $\text{mm}^{-1}$
PU	$40\pm 4$	100
SS40	$40\pm 2$	100
SS20	$20\pm 2$	200
SS12	$12\pm 0.8$	333
PPDJ	$1001\pm 14$ $20\pm 4\ \mu\text{m}$	102

## 4.2. Uticaj geometrije sloja na koalescentnu filtraciju

### 4.2.1 Analiza istovremenog uticaja permeabilnosti sloja i debljine vlakana kod homogenog sloja

Istraživanja su pokazala (Kiralj 2017, Kiralj i saradnici 2017) da je količina kapilarno-provodne faze u sloju vlakana SS40 pri najvećoj permeabilnosti mala ili se čak ova faza i ne formira. Nasuprot tome, pri najmanjoj permeabilnosti sloja, pore u sloju su najmanje, te su kapi u porama najbliže jedna drugoj. Tada postoje uslovi da se realizuje mehanizam koalescencije između dve kapi kao dominantan mehanizam i da se tako obezbede početni uslovi za formiranje bogatije kapilano-provodne faze, slika 34. Iz tih razloga je kod ovih vlakana predeo malih permeabilnosti povoljniji za rad jer se mogu realizovati veće radne brzine strujanja, slika 77.

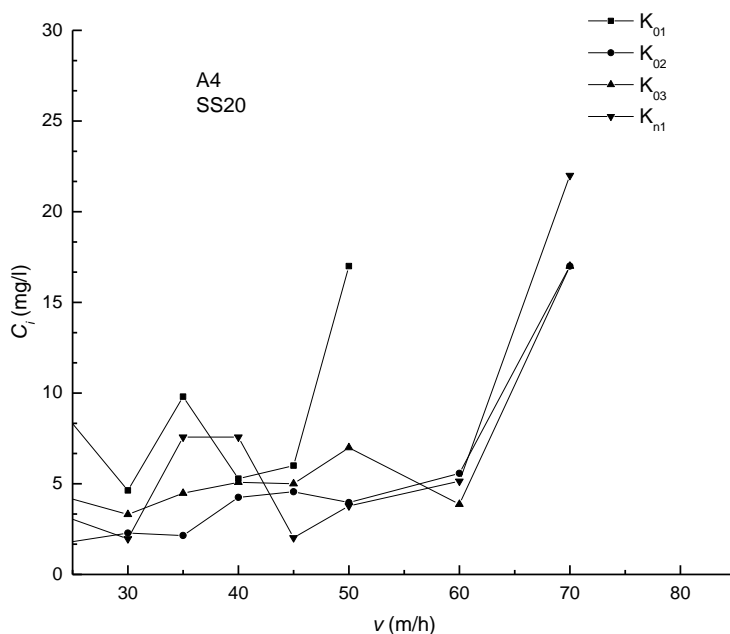


**Slika 77** Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja od brzine strujanja fluida i permeabilnosti sloja vlakana SS40

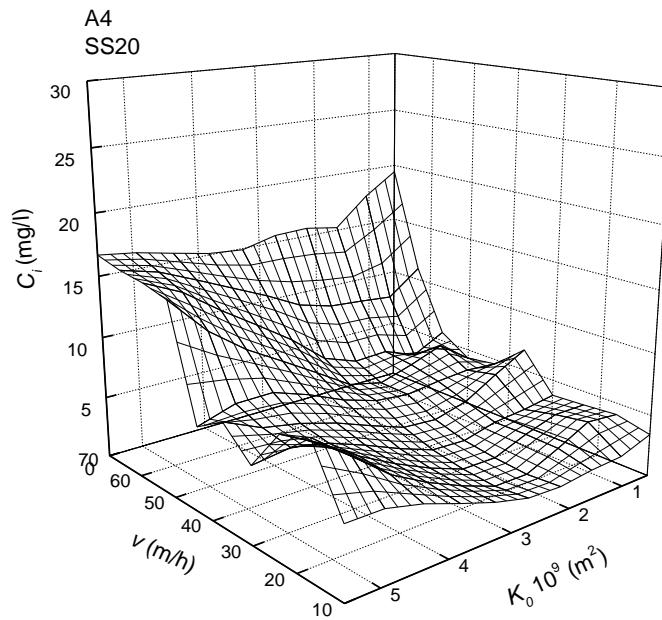
Postavlja se pitanje da li se fenomen formiranja kapilarno-provodne faze pri maloj permeabilnosti sloja vlakana SS40 javlja i kod tanjih vlakana SS20 i SS12, prečnika  $20 \mu\text{m}$  i  $12 \mu\text{m}$ , redom. Pored toga, interesantno je kako će smanjenje debljine vlakana od

nerđajućeg čelika, uz istovremenu promenu permeabilnosti sloja, uticati na efikasnost separacije kapi ulja iz vode.

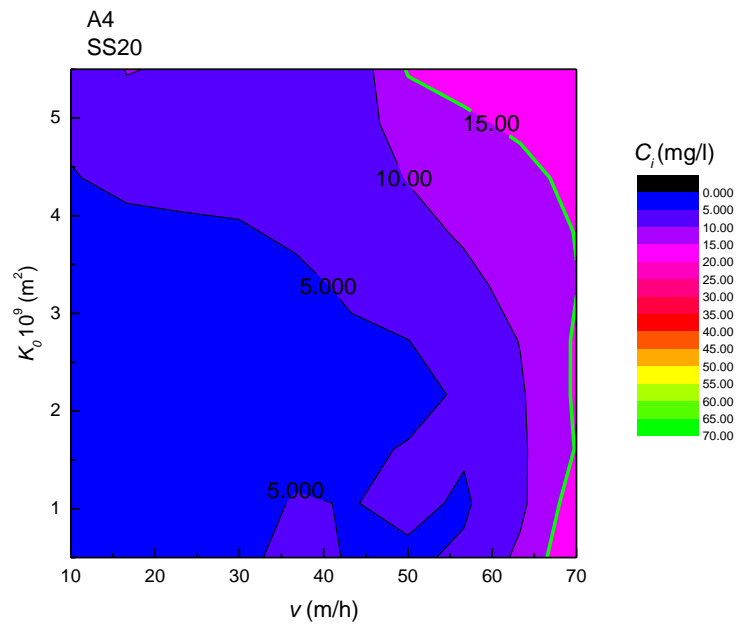
Na slici 78 data je zavisnost izlazne koncentracije ulja od brzine strujanja fluida za sloj vlakana SS20 za sve primenjene permeabilnosti sloja. Može se konstatovati da izlazna koncentracija ulja počinje eksponencijalno da raste prvo za najveću permeabilnost. Kako je izlazna koncentracija od 15 mg/l postavljeni limit kvaliteta, granica oblasti povoljne za rad bolje je uočljiva na 3D i na konturnom dijagramu, slike 79 i 80.



**Slika 78** Grafička zavisnost izlazne koncentracije od brzine fluida za sve primenjene permeabilnosti slojeva SS20



**Slika 79** 3D dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja od brzine strujanja fluida i permeabilnosti sloja vlakana SS20



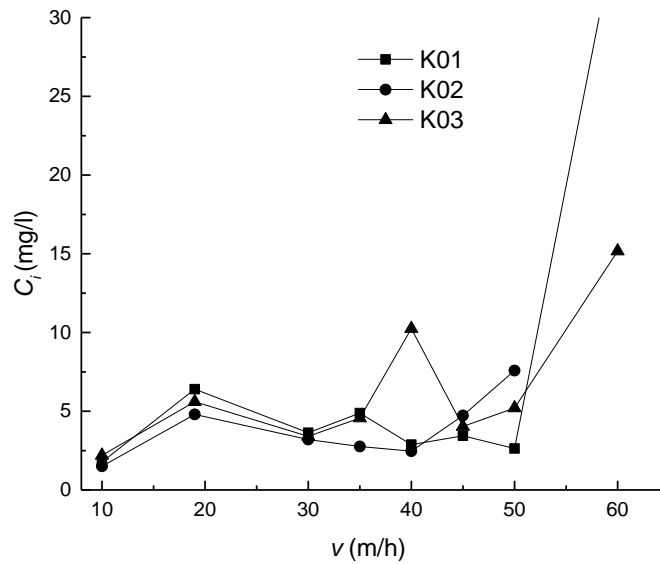
**Slika 80** Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja i permeabilnosti sloja vlakana SS20

---

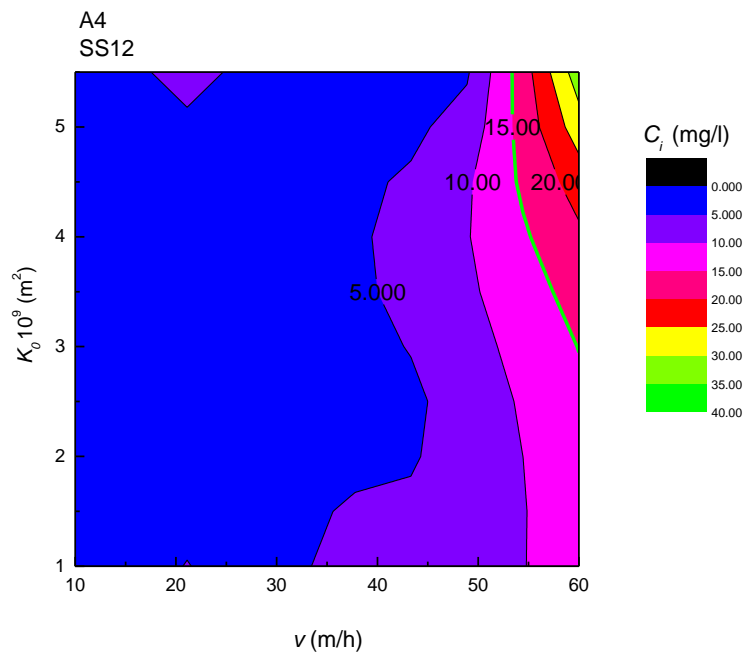
Analizom prikazanog 3D i konturnog dijagrama može se ustanoviti da je oblast povoljna za rad sa slojem vlakana SS20 mnogo veća nego sa slojem vlakana SS40 za posmatrani opseg brzine strujanja fluida i permeabilnosti sloja. Sa slojem vlakana SS20 moguće je realizovati brzine strujanja fluida čak preko 60 m/h za skoro čitav opseg permeabilnosti sloja, odnosno 70 m/h pri malim permeabilnostima. Posebno će biti urađena analiza pada pritiska za ovako visoke radne brzine strujanja s obzirom da visok pad pritiska uslovljava veću potrošnju električne energije za rad pumpe.

Sledeća serija eksperimenata realizovana je sa vlaknima SS12. Kao što je istaknuto u teorijskom delu, većina istraživača je utvrdila da je smanjenje prečnika vlakna pogodovalo boljoj separaciji kapi dispergovane faze. Za razliku od ranijih istraživanja, u ovom radu je menjan prečnik vlakana dok su permeabilnost i poroznost sloja bili nepromenjeni. Drugi istraživači nikad nisu razmatrali uticaj permeabilnosti, koja je najčešće bila nepoznata, odnosno nije bila pod kontrolom. Neki istraživači su pokušali da drže konstatnom površinu materijala koja gradi sloj, ali je time poroznost sloja bila značajno različita. Veliko je pitanje koji su to adekvatni uslovi pri kojima je neophodno proučavati uticaj debljine vlakana. Očuvanjem jednake permeabilnosti sloja, za njegovo formiranje se koristi jednaka masa materijala pošto prečnici svih korišćenih vlakana pripadaju istoj krivoj zavisnosti poroznosti od permeabilnosti sloja. Na taj način, broj vlakana u sloju smanjenjem prečnika je značajno veći, kao i specifična površina vlakana, dok je udeo čvrstog materijala koji gradi sloj jednak.

Na slikama 81 i 82 date su zavisnosti izlazne koncentracije ulja od brzine strujanja fluida za sve primenjene permeabilnosti sloja vlakana SS12. Neophodno je istaći da zbog velikog pada pritiska nije bilo moguće realizovati ogled za najmanju permeabilnost  $K_{n1}$ .



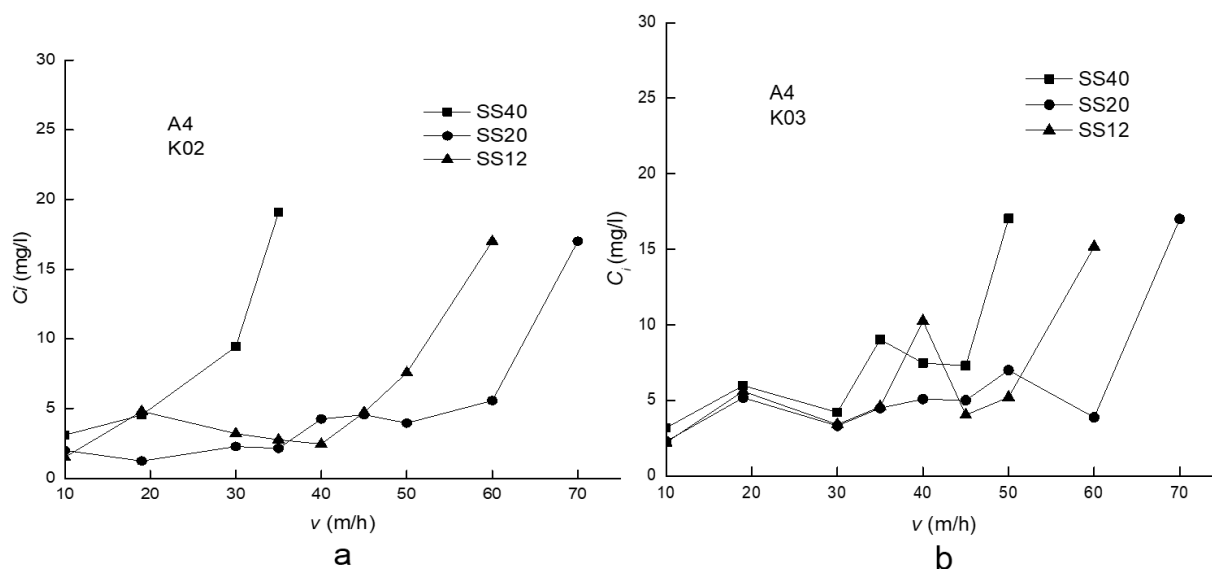
**Slika 81** Zavisnost izlazne koncentracije ulja od brzine strujanja fluida za sve primenjene permeabilnosti sloja vlakana SS12



**Slika 82** Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja i permeabilnosti sloja vlakana SS12



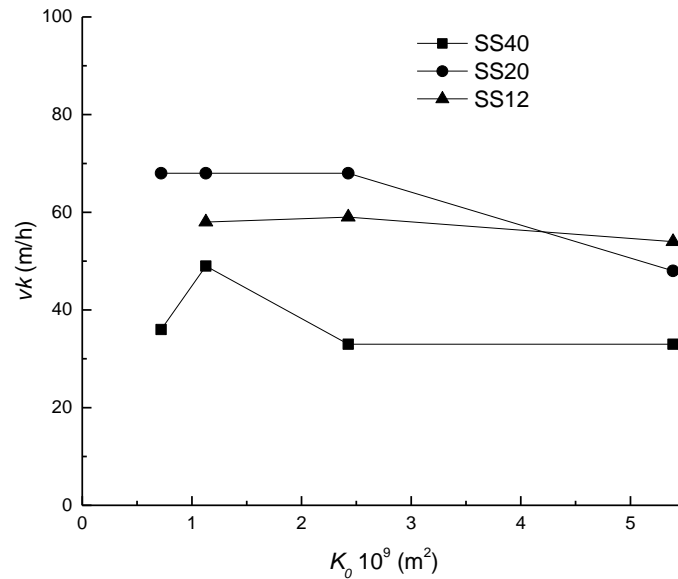
Analizom prikazanih rezultata može se konstatovati da je moguće realizovati veliku radnu brzinu strujanja od 60 m/h za širok opseg vrednosti permeabilnosti sloja vlakana SS12. Uočljivo je da se i sa slojem vlakana SS12 postižu veće radne brzine strujanja nego sa slojem vlakana SS40, kao što se može videti na slici 83, ali je opseg brzine manji nego za vlakna SS20. Takva situacija nije nađena u literaturi. To bi moglo da znači da pod obezbeđenim okolnostima postoji optimalna debljina vlakana filterskog materijala.



**Slika 83** Zavisnost izlazne koncentracije ulja od brzine strujanja fluida za sve primenjene permeabilnosti sloja i slojeve vlakana od svih korišćenih vrsta nerđajućeg čelika

Ako se analizira uticaj debljine vlakana preko kritične brzine, tada je slika uticaja mnogo jasnija, slika 84. Uočljivo je da se za vlakna SS40 realizuju najmanje vrednosti kritičnih brzina za ceo opseg primenjene permeabilnosti sloja. Što se tiče odnosa vlakana od SS20 i SS12, situacija je sledeća. U predelu male permeabilnosti sloja vlakana SS20 ostvaruju se značajno veće vrednosti kritične brzine nego kod sloja vlakana SS12. Samo za najveću permeabilnost, sloj vlakana SS12 je bolji.

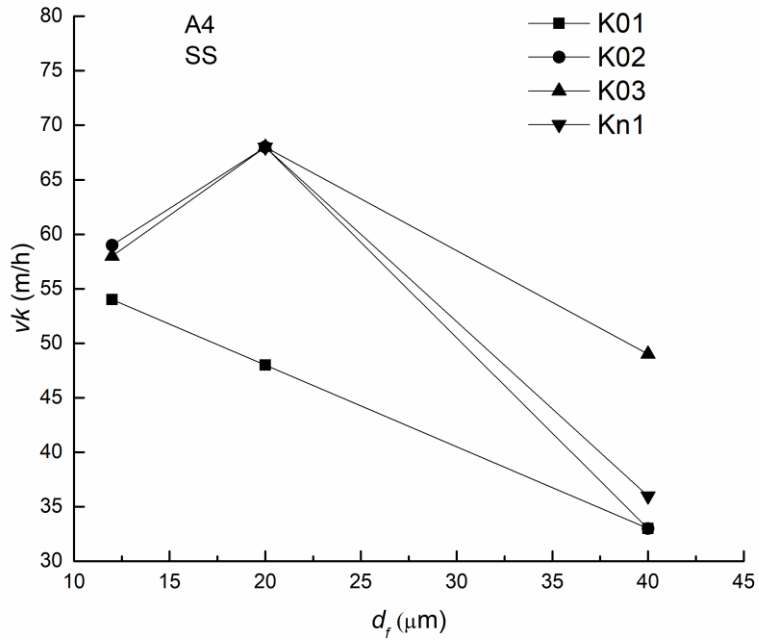
Ako se kao zavisno promenjiva uzme prečnik vlakna, tada se vidi da postoji, za odabrane uslove rada, optimalna debljina vlakna pri kojoj se realizuje maksimalna kritična brzina, slike 85, 86 i 87.



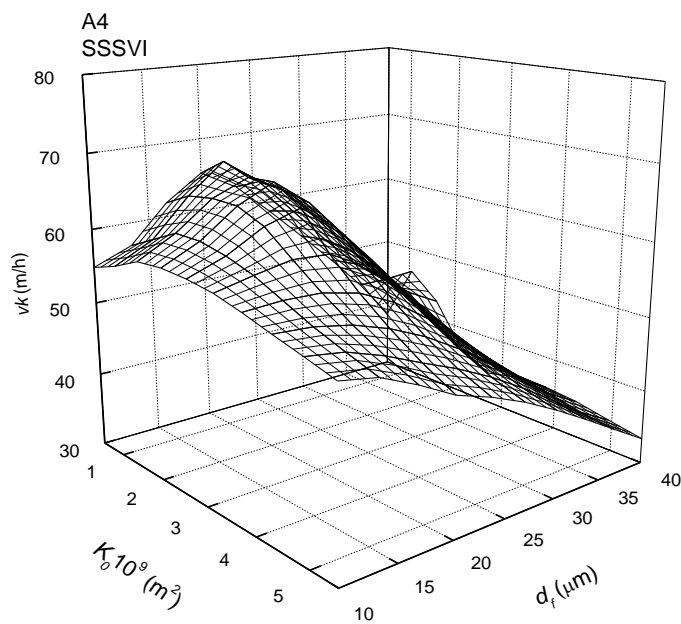
**Slika 84** Zavisnost kritične brzine od permeabilnosti sloja vlakana od nerđajućeg čelika različitog prečnika

Na slici 85, maksimalna kritična brzina od 70 m/h realizovana je sloja vlakana od SS20 pri svim permeabilnostima osim pri  $K_{01}$ . Potrebno je istaći da je i za sloja vlakana od SS20 najnepovoljnija najveća permeabilnost. Slika 86, koja daje 3D dijagram, to još slikovitije prikazuje.

Optimalna vrednost prečnika vlakna od 20  $\mu\text{m}$  smeštena je u region malih permeabilnosti sloja. Da nije varirana permeabilnost sloja, kao veličina koja opisuje geometriju sloja, dati fenomen ne bi bio otkriven. I to je uzrok što ga drugi istraživači nisu uočili. Ranija istraživanja, po svemu sudeći, nalazila su se u oblasti u kojoj smanjenjem prečnika vlakna raste efikasnost separacije dispegovane faze. Ta oblast je jasno uočljiva na slikama 86 i 87 i nalazi se u predelu velike permeabilnosti sloja.

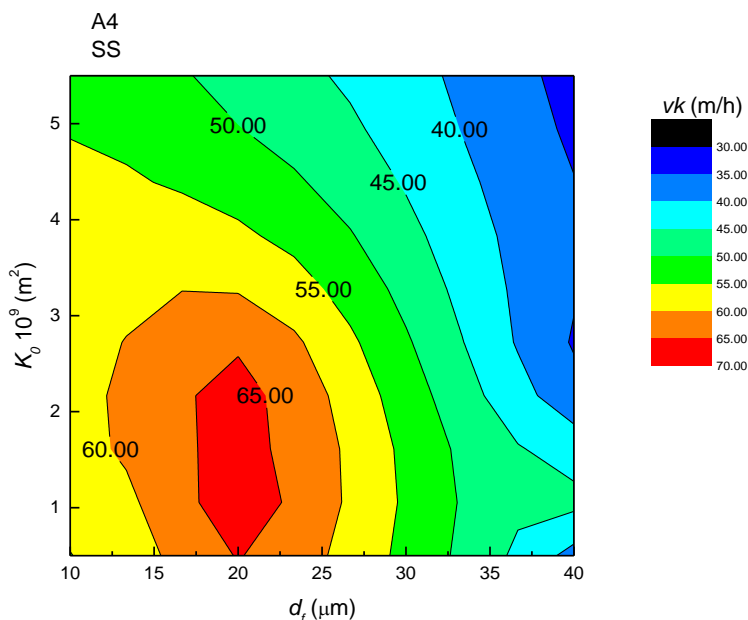


**Slika 85** Zavisnost kritične brzine od prečnika vlakna materijala SS za sve permeabilnosti



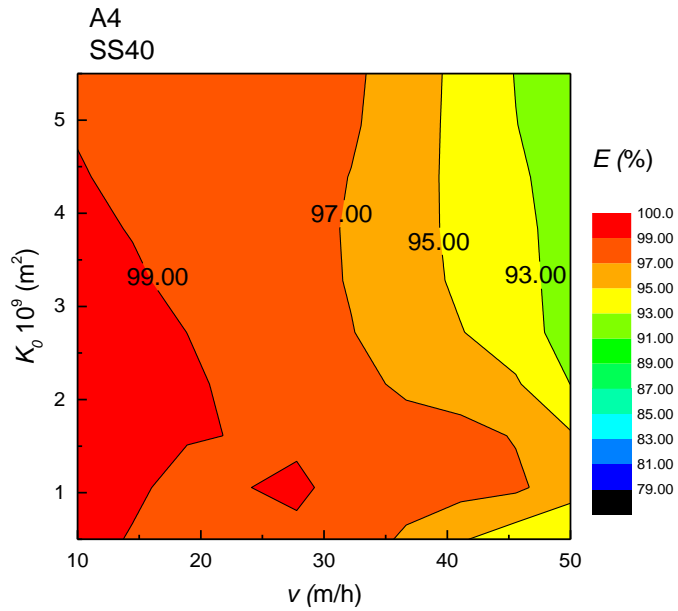
**Slika 86** 3D dijagram zavisnosti kritične brzine od permeabilnosti i prečnika vlakana SS

Ako se analizira konturni dijagram zavisnosti kritične brzine od prečnika vlakna i permeabilnosti sloja, može se istaći da se maksimalne vrednosti kritične brzine nalaze u domenu preko 65 m/h. Takođe, potrebno je istaći da se za ceo posmatrani opseg prečnika vlakna i permeabilnosti sloja ostvaraju relativno velike kritične brzine.

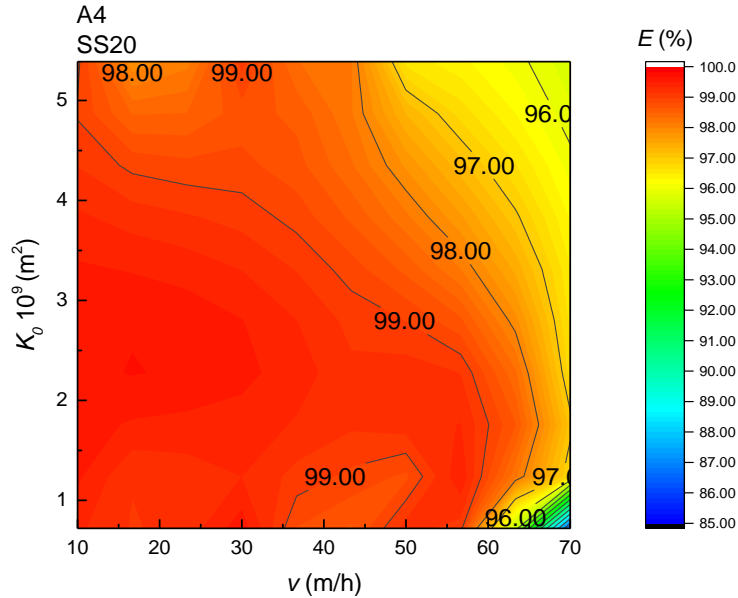


**Slika 87** Konturni dijagram zavisnosti kritične brzine od permeabilnosti i prečnika vlakna materijala SS

Uticaj promene debljine vlakana od nerđajućeg čelika na efikasnost separacije može se sagledati na bazi konturnih dijagrama prikazanih na slikama 88 i 89. Pri rasponu brzine strujanja fluida 10-50 m/h, sloj vlakana SS40 ostvaruje efikasnost 99-93 %. Naravno, sa porastom brzine strujanja opada efikasnost separacije. Predeo nižih vrednosti permeabilnosti omogućava rad pri većim brzinama strujanja fluida. Ako se posmatra efikasnost od 97 %, tada se ona realizuje do brzine od 35 m/h za veće permeabilnosti sloja, a za manje može da se ostvari brzina strujanja i preko 45 m/h. Efikasnost separacije sloja vlakana SS20 značajno je veća nego sloja vlakana SS40 pri jednakim uslovima. Efikasnost od 97 % ostvaruje se čak pri brzini strujanja od 70 m/h. Uticaj permeabilnosti sloja mnogo je veći kod sloja vlakana SS20. U oblasti manjih permeabilnosti sloja, efikasnost separacije od 97% osvaruje se i pri brzinama strujanja većim od 60 m/h.



**Slika 88** Konturni dijagram zavisnosti efikasnosti separacije od brzine strujanja i permeabilnosti sloja vlakana SS40



**Slika 89.** Konturni dijagram zavisnosti efikasnosti od brzine strujanja i permeabilnosti sloja vlakana SS20

---

Analiza uticaja dimenzije vlakana bila je moguća još na jednom materijalu, i to na PP, koji je kvašljiv uljnom fazom. Vlakna od raspoloživih materijala su se razlikovala, ne samo u dimenziji, nego i u obliku poprečnog preseka. Vlakna PP imaju kružni poprečni presek i prečnik  $38\pm 3\ \mu\text{m}$ , dok vlakna PPDJ imaju pravougaoni porečni presek i širinu traka  $1001\pm 14\ \mu\text{m}$ , dok je njihova debljina  $20\pm 4\ \mu\text{m}$ . Za ovu analizu, odabrano je mineralno ulje P1 koje je male viskoznosti, te stoga vlakna imaju poteškoća da ga separišu kao dispergovanog iz vode. Vizuelni izgled vlakana PP dat je na fotografiji, slika 90, dok je vizuelni izgled vlakana PPDJ dat na slici 91. Ova vlakna predstavljaju trake koje su na određenim mestima povezane karikom kao lanac, slika 92. Iako su slojevi formirani od ove dve vrste vlakana jednakog opsega permeabilnosti, značajno im se razlikovala poroznost pošto ova dva materijala ne pripadaju istoj krivoj zavisnosti permeabilnosti od poroznosti sloja, slika 76.



**Slika 90** Fotografija vlakana PP



**Slika 91** Fotografija vlakana PPDJ



**Slika 92** Snimak vlakana PPDJ optičkim mikroskopom pri uvećanju 5x

---

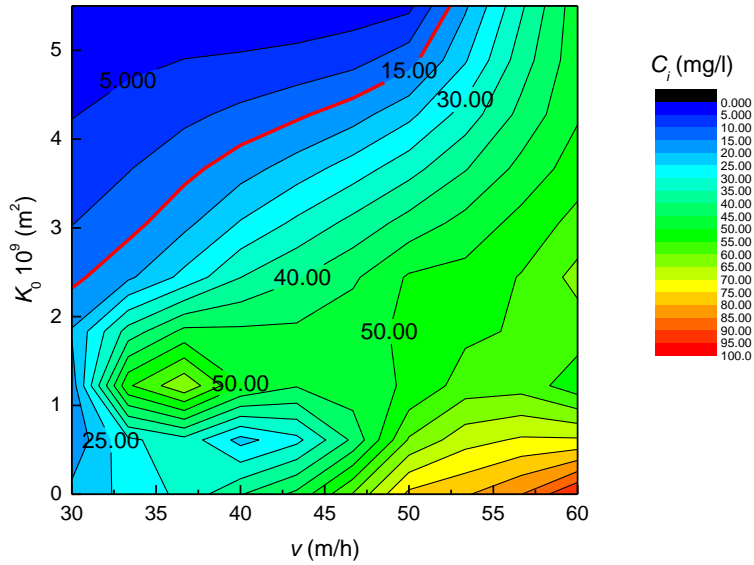
Prema kriterijumima usvojenim od strane Šećerov Sokolović i Sokolović S. (2000) ova dva sloja nemaju sličnu ili blisku geometriju. U praktičnom smislu to znači da su uslovi za formiranje kapilarno-provodne faze nepovoljniji kod sloja vlakana PPDJ pošto je zapremina pora manja. Kako su raniji istraživači često koristili vlakna različite geometrije i prirode materijala (Sharifi i Shaw 1996, Chawaloeshonsiya i Painmanakul 2014), oglеди prikazani ovde su vrlo dragoceni jer ilustruju koliko su ona neadekvatna za istraživanje fenomena koalescencije u sloju.

Analiza konturnog dijagrama za slojeve vlakana PP, slika 93, pokazuje da postoji izrazito mala oblast povoljna za rad, koja se nalazi pri vrednostima permeabilnosti sloja većim od  $2,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  i raspone brzine strujanja 30-50 m/h. Oblik radne površine za vlakna PPDJ je drugačiji, slika 94, s tim što ona deluje veća. I kod ovih vlakana, povoljna permeabilnost sloja je veća od  $2,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ , a brzine strujanja je 20-45 m/h.

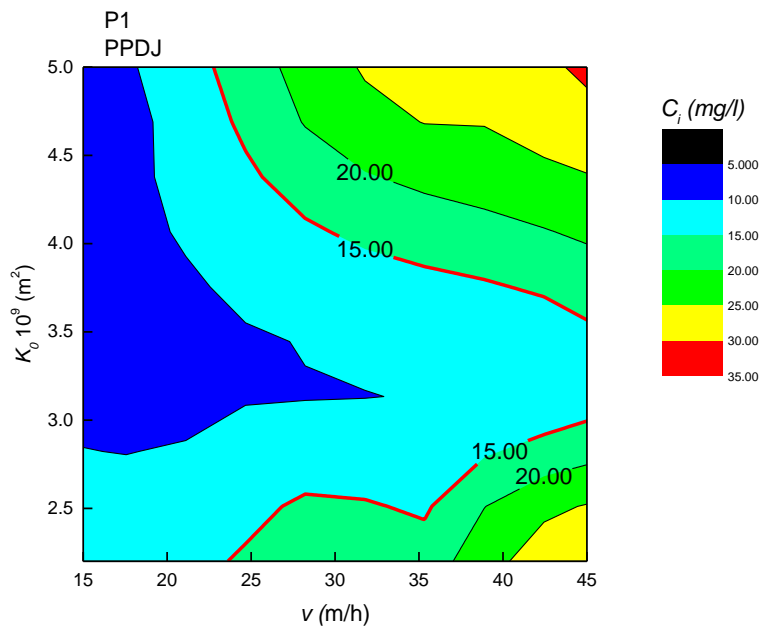
Kada se rezultati analiziraju preko kritične brzine strujanja, tada je situacija jasnija, slika 95. Pri najvećoj permeabilnosti, vlakna PP ostvaruju  $v_k$  od 50 m/h dok vlakna PPDJ ostvaruju istu vrednost kritične brzine za permeabilnost sloja od  $2,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ . Pri ostalim permeabilnostima situacija je promenljiva. Materijal PP ima još jednu regiju povoljnu za rad jer za malu permeabilnost sloja ostvaruje isto visoku vrednost  $v_k$ . Ova vrednost je možda rezultat fenomena uslovljenih malom debljinom vlakna.

Opšte zapažanje je da PP i PPDJ vlakna tačkasto ostvaruju povoljne vrednosti kritične brzine  $v_k$ , pa nisu pogodni za rad pošto je teško „napipati“ tačku u kojoj su oni uspešni. Materijal PP je ipak kurentniji pošto je, kao i drugi polimeri, dobar pri velikoj vrednosti permeabilnosti sloja. Iz tog razloga, istraživačka grupa Šećerov Sokolović bi prvo realizovala oglede pri toj permeabilnosti. Iz ovih oglada može se još zaključiti da su eksperimenti prethodnih istraživača, koji su realizovani samo pri jednoj permeabilnosti sloja, zapravo nepredvidivi i mogu dati sasvim pogrešne zaključke.

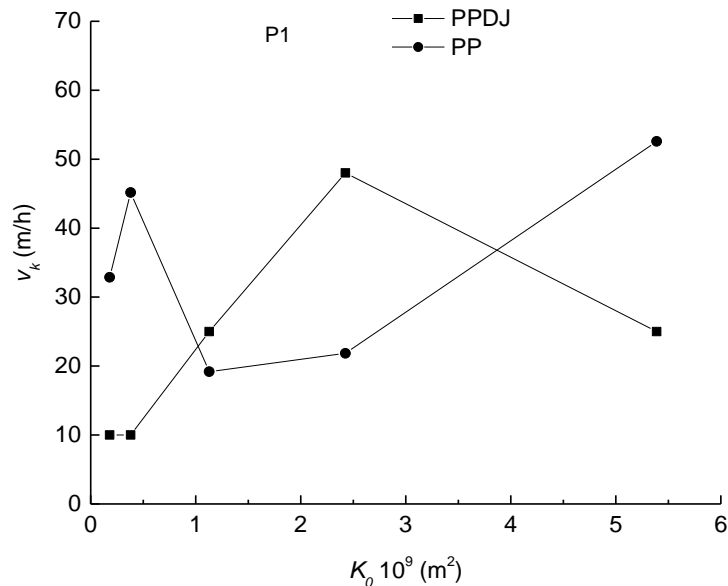




**Slika 93** Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije od permeabilnosti sloja i brzine strujanja za vlakna PP i ulje P1



**Slika 94** Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije od permeabilnosti sloja i brzine strujanja za vlakna PPDJ i ulje P1



**Slika 95** Dijagram zavisnosti  $v_k$  za vlakna PP i PPDJ od permeabilnosti sloja za ulje P1

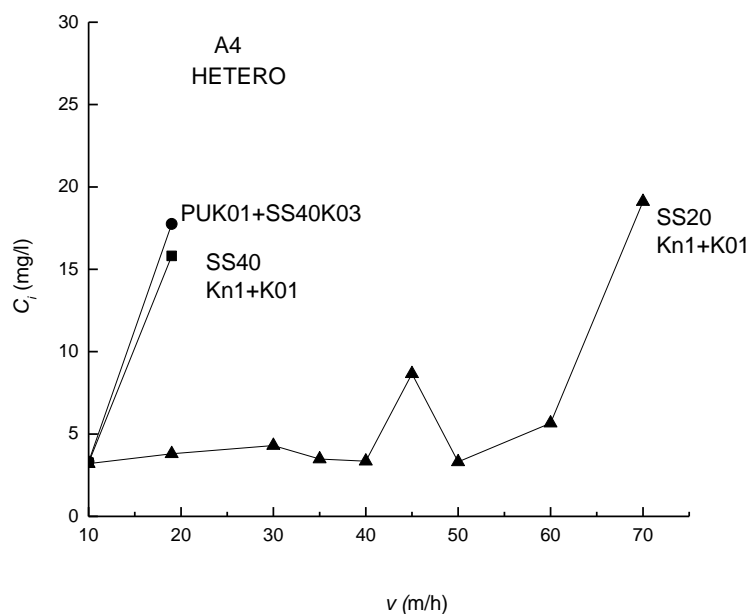
#### **4.2.2. Analiza istovremenog uticaja permeabilnosti sloja i debljine vlakna kod heterogenog sloja**

Pored eksperimenata na sloju koji ima uniformnu permeabilnost u celoj svojoj zapremini, bez obzira na prečnik vlakna, realizovana su i istraživanja sa heterogenim slojem, čija permeabilnost nije jednaka po dubini. U literaturi su mnogo više zastupljena istraživanja pri heterogenoj strukturi sloja po dubini. Ranija istraživanja ukazuju da je sloj koji ima manje pore na ulazu, a veće na izlazu efikasniji u separaciji dispergovane faze. Takva heterogena struktura sloja je građena kao sendvič sistem. Za razliku od drugih istraživača, u oglede prikazane ovde uvedena je permeabilnost sloja kao jedna od odrednica geometrije sloja. Kako se promenom permeabilnosti sloja može uticati na veličinu pora, taj fenomen je ispitivan kod heterogenog sloja. Realizovana su dva oglede kod kojih je ulazni sloj od 2 cm bio pri najmanjoj permeabilnosti sloja  $K_{n1}$ , a izlazni deo od 3 cm pri najvećoj permeabilnosti sloja od  $K_{o1}$ . Najmanja permeabilnost obezbeđuje najmanje pore, a najveća - najveće pore, što su merenja na optičkom mikroskopu potvrdila. Oba sloja bila su jednake debljine vlakana, ali je permeabilnost sloja varirana po

dubini. U prvom ogledu su korišćena vlakna SS40, a u drugom - vlakna SS20, slika 96. Na ovaj način, izbegnuta je situacija da je istovremeno varirana i veličina pora i debljina vlakna u sloju, što je bio slučaj kod velikog broja ranijih istraživanja. Veći broj istraživača je postizao manje pore koristeći gusto pakovana tanja vlakna. Ogledi su realizovani sa uljem A4 najveće viskoznosti, te su odabrana vlakna ostvarila visoku efikasnost njegove separacije. Sloj sa vlaknima SS40 je omogućio izrazito kratak rad jer je već brzina od 20 m/h prešla izlaznu koncentraciju od 15 mg/l, dok je sloj sa vlaknima SS20 realizovao radnu brzinu preko 60 m/h. Analiza pada pritiska će pokazati da li ovaj sloj predstavlja dobro rešenje za praktičnu primenu.

Realizovan je još jedan ogled u kome su kombinovana vlakna od dva materijala, i to PU, pri svojoj najvećoj permeabilnosti, i SS40, pri permeabilnosti pri kojoj ima manje pore ali ne uzrokuje značajno visok pad pritiska, slika 96. U ovoj kombinaciji, prečnik vlakana je blizak, napravljena je kombinacija polimera i čelika i ostvarene veće pore na ulazu nego na izlazu. I ova kombinacija se pokazala neuspešnom.

Ono što se može zaključiti iz prikazanih oglada jeste da distribucija veličine pora po dubini značajno utiče na radne uslove, ali da je ona uslovljena istovremenim uticajem debljine vlakna.



**Slika 96** Zavisnost izlazne koncentracije od brzine fluida za sloj heterogene strukture

### 4.2.3. Izbor optimalne geometrije sloja za realizaciju maksimalne kritične brzine

Kako je prethodnom analizom utvrđeno da je za realizaciju maksimalne kritične brzine od značaja debljina vlakana, permeabilnost sloja i veličina pora po dubini, potrebno je ovome priključiti još jedan segment. U optimizaciju geometrije sloja neophodno je uključiti i prirodu vlakana. Cilj ostvarenja maksimalne kritične brzine mora da prati realizacija minimalnog pada pritiska, što je, do sada, bila potpuno zanemarena činjenica.

Da bi se stekao uvid o vrednostima pada pritiska o kojima se radi, u tabeli 16 dat je pregled pada pritiska za primenjene permeabilnosti sloja i brzine strujanja fluida u ogledu Darsy. Opseg vrednosti pada pritiska za sloj vlakana debljine 5 cm i najveću permeabilnost sloja  $5,389 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 (K_{01})$  za brzine strujanja fluida od 30-70 m/h iznosi 108-255 Pa, dok je za najmanju permeabilnost  $0,180 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 (K_{05})$  i jednak raspon brzina strujanja fluida od 3236 do 7551 Pa. Pad pritiska pri brzini fluida od 70 m/h je skoro 30 puta veći za najmanju permeabilnost sloja pošto su pore tada najmanje i otpor proticanju najveći.

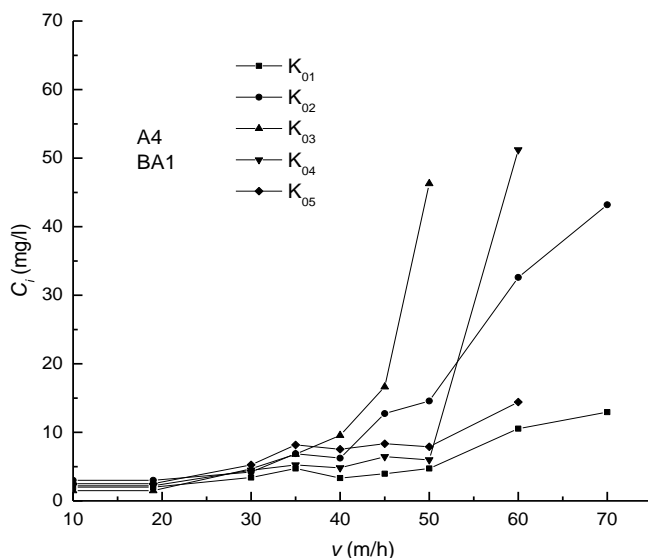
**Tabela 16** Vrednosti pada pritiska u funkciji permeabilnosti sloja i brzine strujanja tečnosti

<b>Pad pritiska <math>\Delta P</math> pri proticanju vode kroz sloj L5 Pa</b>				
<b>Brzina m/h</b>	<b>K01</b>	<b>K03</b>	<b>K05</b>	<b>Kn1</b>
<b>30</b>	108	515	3236	834
<b>35</b>	127	600	3776	973
<b>40</b>	147	686	4315	1111
<b>45</b>	157	772	4854	1250
<b>50</b>	177	858	5394	1390
<b>60</b>	216	1030	6472	1667
<b>70</b>	255	1201	7551	1945
<b>Interval</b>	108-255	515-1201	3236-7551	834-1945

Uticaj debljine vlakana analiziran je korišćenjem vlakana SS, pošto su na tržištu jedino dostupna vlakna SS različitog prečnika u željenom opsegu vrednosti. Pored toga,

iz nerazumljivih razloga, značajan broj autora koristi vlakna SS, kao i vlakna GL za separaciju kapi ulja iz vode. Realno je bilo moguće još samo istražiti uticaj debljine vlakana primenom PP, ali je geomrija sloja formirana od vlakana otpadnih džakova značajno drugačija od geometrije sloja vlakana PP koji su otpad od proizvodnje tepiha. Na tržištu su raspoloživa vlakna polipropiena prečnika 15  $\mu\text{m}$  koja su sečena na dužinu manju od 1 cm, te se takva vlakna gusto pakuju i otežan je protok fluida kroz takav sloj. Ta vlakna se proizvode da se namešavaju sa betonom dajući mu bolja svojstva. Znači moguća ispitivanja uticaja geometrije sloja, a naročito prečnika vlakana imaju svoja realna ograničenja u izboru raspoloživih materijala. Vlakna polimera manje debljine nisu dovoljno kruta, te i nije moguće formirati od njih sloj slobodnih nasutih vlakana.

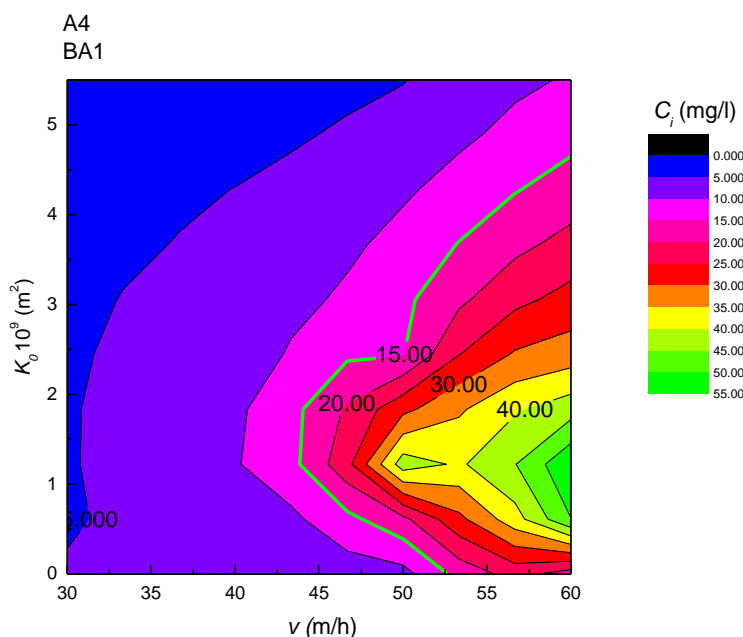
Primena vlakana BA1 kao materijala za separaciju kapi ulja pokazala je zadovoljavajuće rezultate (Šećerov Sokolović 2014). Na slici 97 data je grafička zavisnost izlane koncentracije ulja od brzine fluida za sve ispitivane permeabilnosti sloja za ulje A4.



**Slika 97** Zavisnost izlazne koncentracije od brzine fluida za sloj BA1 i ulje A4 za sve ispitivane permeabilnosti sloja

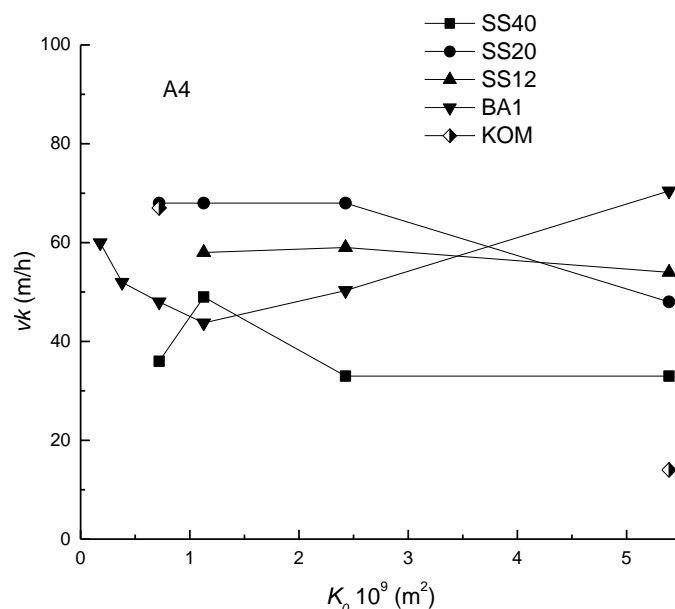
Konturni dijagram dat na slici 98 za materijal BA1 i ulje A4 pri odabranim uslovima rada, pokazuje da ovaj materijal ima široku oblast rada, da za sve permeabilnosti sloja ostvaruje

radnu brzinu od oko 45 m/h dok pri visokim permeabilnsima ostvaruje brzine i preko 60 m/h.



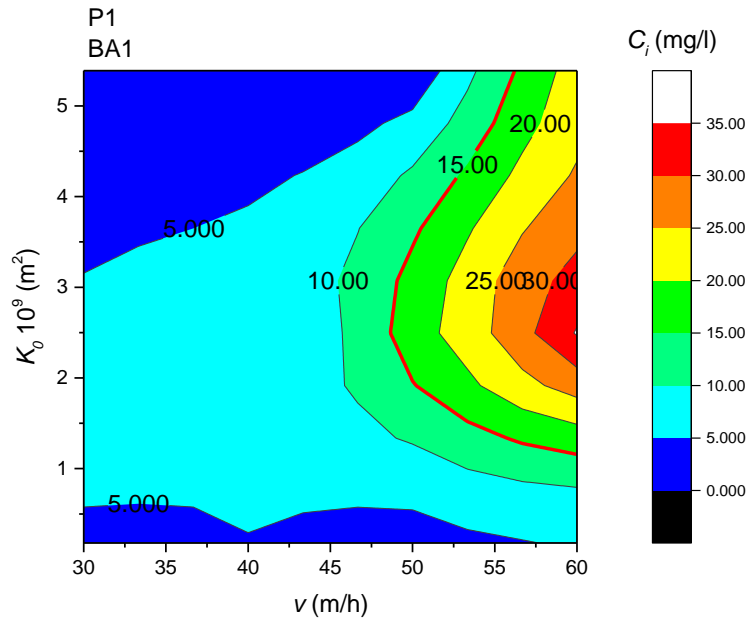
**Slika 98** Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije od permeabilnosti i brzine za materijal BA1 i ulje A4

Na slici 99 date su vrednosti kritične brzine za ceo ispitivani opseg permeabilnosti sloja za materijale SS40, SS20, SS12, BA1 i KOM/SS20  $K_{n1}+K_{05}$  za ulje A4 koje ima najvišu viskoznost, te ga materijali najlakše separišu. Na slici se jasno vidi pri kojim uslovima je realizovana kritična brzina od 60 m/h i veća. Pri najvećoj permeabilnosti sloja to je materijal BA1 sa kritičnom brzinom od 70,45 m/h, dok su to pri najmanjoj permeabilnosti sloj SS20 i KOM. Materijal SS20 realizuje kritičnu brzinu od 68 m/h pri permeabilnosti sloja od  $0,720 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ . Bliska vrednost kritične brzine postiže se sa materijalom SS20 koji ima permeabilnost na ulazu od  $0,720 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ , a na izlazu permeabilnost od  $5,389 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ . Taj sloj ima nešto manji pad pritiska. Znači maksimalnu vrednost kritične brzine pri najmanjem padu pritiska realizuje sloj BA1, vidi tabelu 16.

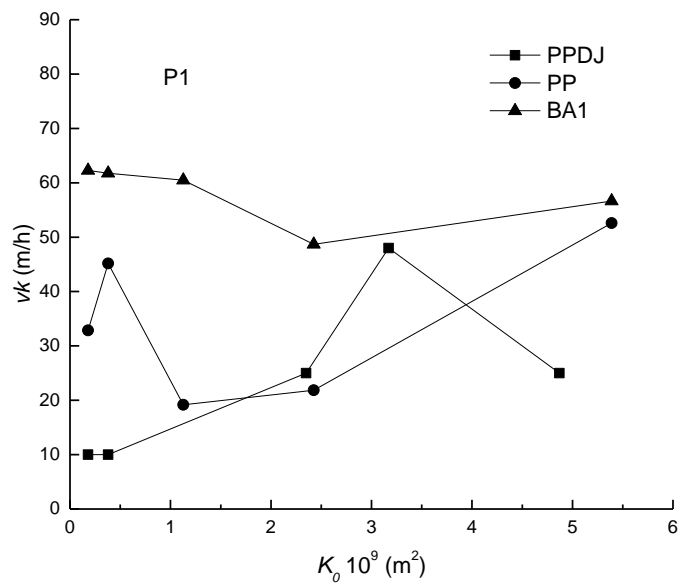


**Slika 99** Zavisnost kritične brzine od permeabilnosti za neke ispitivane materijale

Kada je reč o ulju P1 koje ima najmanju viskoznost, situacija je slična. Na slici 100, data je zavisnost izlazne koncentracije ulja od brzine strujanja fluida i permeabilnosti sloja za vlakna BA1. Jasno je uočljivo da se izlazna koncentracija ulja manja od 15 mg/l ostvaruje u čitavom rasponu permeabilnosti sloja, dok se pri najvećoj i najmanjoj permeabilnosti realizuju još veće radne brzine. Kritična brzina, za najveću permeabilnost sloja i ulje P1, iznosi 56,64 m/h, dok je za najmanju permeabilnost sloja 62,28 m/h, slika 101. Vlakna PP za najveću permeabilnost sloja ostvaruju kritičnu brzinu 52,50 m/h. Znači, vlakna BA1 postižu najveću kritičnu brzinu pri najmanjoj vrednosti pada pritiska i za ulje P1.



**Slika 100** Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja od permeabilnosti sloja i brzine strujanja fluida za sloj vlakana BA1 i ulje P1



**Slika 101** Zavisnost kritične brzine od permeabilnosti sloja za vlakna PPDJ, PP i BA1 i ulje P1



---

### **4.3.Uticaj ulazne koncentracije na koalescentnu filtraciju**

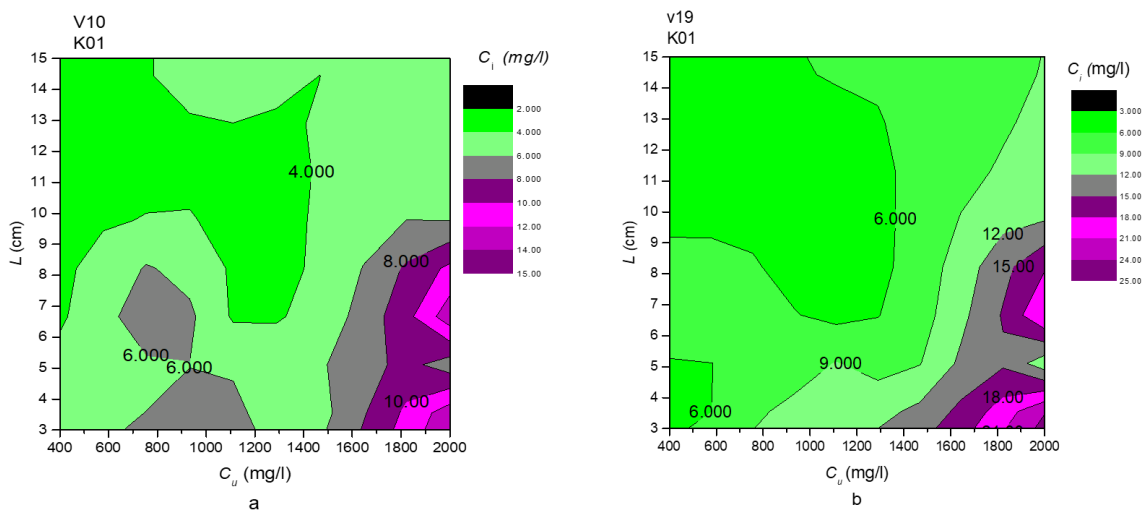
Ulazna koncentracija dispergovane faze je nezavisno promenljiva veličina, te se na njenu vrednost kod realnih sistema ne može uticati. To je projektna promenljiva. Pored toga, u realnom sistemu, ulazna koncentracija ulja je promenljiva u vremenu i na to se, takođe, ne može uticati. Neophodno je monitoringom utvrditi opseg vrednosti ulazne koncentracije ulja i prirodu njene promene u vremenu.

Druga bitna činjenica je da koalescentni filter može da bude samostalni korak za separaciju zauljenih voda. U tim okolnostima, taj uređaj treba da postigne zahtevani kvalitet efluenta. Međutim, kada je ulazni sadržaj ulja veliki, često se, u prvom koraku separacije, koristi taložnik (API separator). Na taj način, ulazna koncentracija ulja u koalescentni filter značajno se smanjuje. Iz navedenih razloga, važno je utvrditi osetljivost filtera i odabranih operativnih uslova na promenu ulazne koncentracije ulja.

#### ***4.3.1. Uticaj ulazne na izlaznu koncentraciju ulja pri različitoj debljini sloja***

Kao što je već istaknuto, uticaj ulazne koncentracije ulja na koalescentnu filtraciju istraživana je pri konstantnoj i najvećoj permeabilnosti sloja vlakana PU od  $5,389 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  za opseg ulazane koncentracije ulja 500-2000 mg/l i debljine sloja 3, 5, 10 i 15 cm. Na slikama 102 i 103, vidi se uticaj ulazne koncentracije ulja i debljine sloja na izlaznu koncentraciju ulja za četiri radne brzine strujanja fluida.

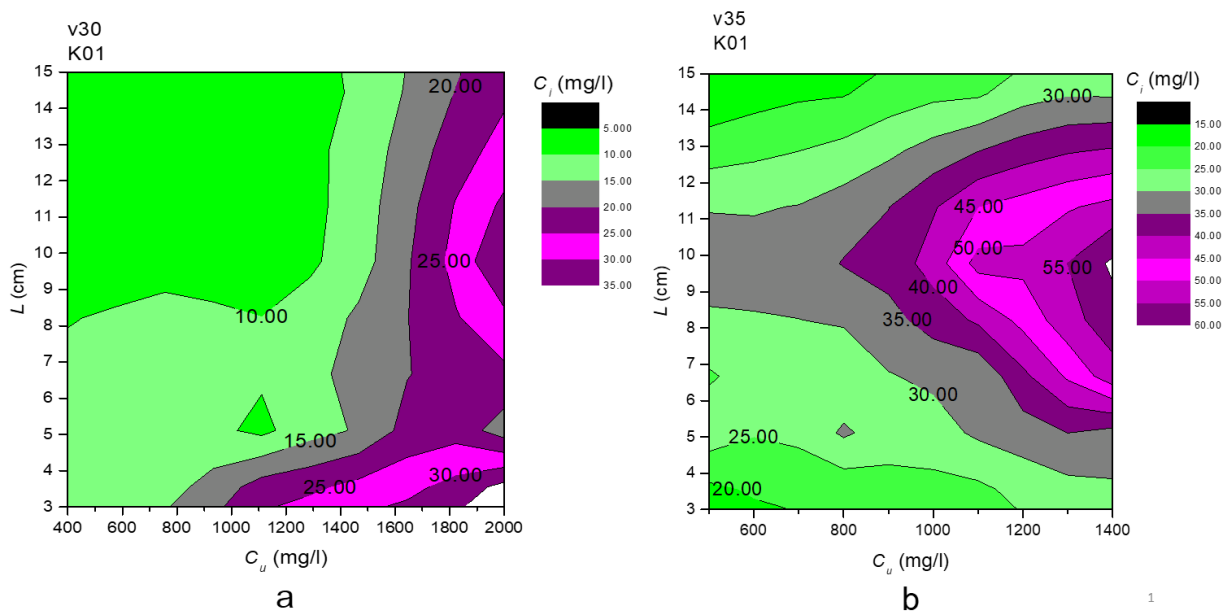
Analizom prikazanih dijagrama može se dati sledeći komentar. Za brzinu 10 m/h (slika 102a), pri svim primenjenim debljinama sloja i ulaznim koncentracijama ulja, izlazna koncentracija ulja je manja od 15 mg/l. Ako se posmatra dijagram, slika 102b, za brzinu strujanja 19 m/h može se uočiti da se za ulazne koncentracije ulja veće od 1600 mg/l i debljinama sloja manjim od 10 cm pojavljuju regioni malih površina nepovoljnih za rad pošto izlazna koncentracija prelazi vrednost od 15 mg/l.



**Slika 102** Konturni dijagram zavisnosti izlazne od ulazne koncentracije ulja i debljine sloja pri brzini strujanja a. 10 m/h i b. 19 m/h

Kada je reč o brzini od 30 m/h, tada je, pri debljini sloja 5 cm, nepovoljna ulazna koncentracija već od 800 mg/l, slika 103a. Porastom debljine sloja, oblast nepovoljne ulazne koncentracije ulja se pomera na 1400 mg/l i egzistira za sve debljine sloja. Dalje povećanje brzine strujanja drastično sužava oblast ulazne koncentracije ulja povoljne za rad. Praktično, za primenjeni opseg ulazne koncentracije od 500 mg/l pa naviše ne vidi se da postoji radna oblast povoljna za rad pri brzini strujanja 35 m/h, slika 103b.

Može se istaći da je koalescentna filtracija, za odabrane uslove rada, izuzetno osetljiva na promenu ulazne koncentracije dispergovane faze, te da veća debljina sloja pomera granicu ulazne koncentracije ulja.



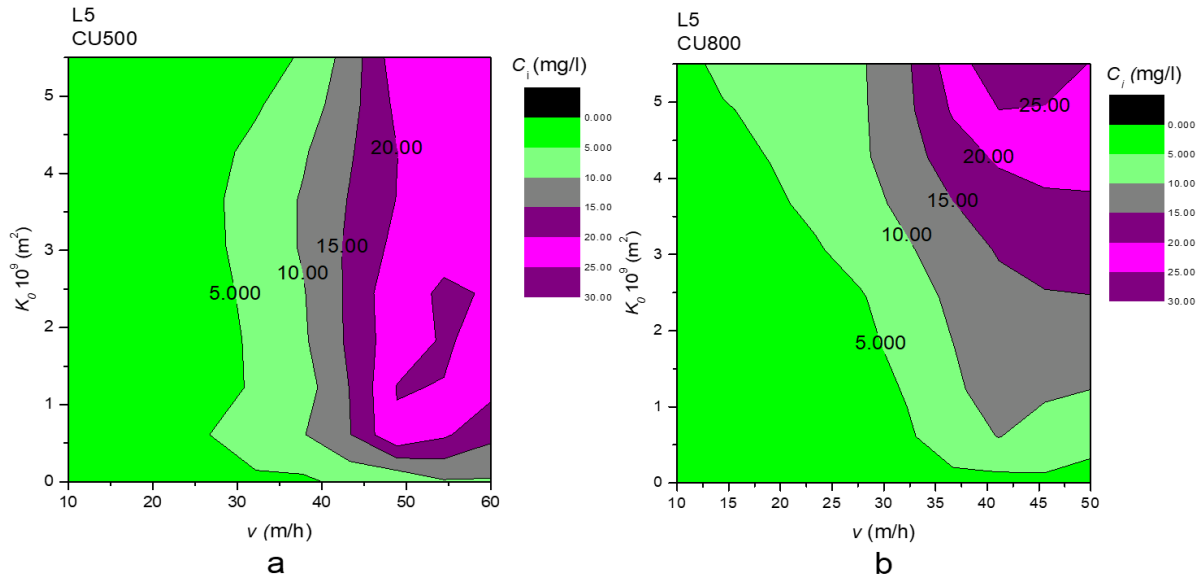
**Slika 103** Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije od ulazne koncentracije ulja i debljine sloja pri brzini strujanja a. 30 m/h i b. 35 m/h

#### 4.3.2. Uticaj ulazne na izlaznu koncentraciju ulja pri različitoj permeabilnosti sloja

Istraživanje uticaja ulazne koncentracije ulja prošireno je na pet permeabilnosti sloja, a opseg koncentracije ulja nije limitiran unapred, nego su ogledi ponavljani za datu permeabilnost sloja i brzinu strujanja dokle god izlazna koncentracija ulja nije prešla graničnu vrednost od 15 mg/l, dok se nije realizovala eksponencijalna zavisnost izlazne od ulazne koncentracije ulja. Na taj način, utvrđene su maksimalne granice za rad sa aspekta vrednosti ulazne koncentracije dispergovane faze za određene uslove rada. Debljina sloja vlakana PU u ovim eksperimentima je 5 cm, koja obezbeđuje dobar kvalitet izlazne struje i mali pad pritiska.

U nizu konturnih dijagrama datih dalje u tekstu u kojima je data zavisnost izlazne koncentracije ulja od brzine strujanja i permeabilnosti sloja pri konstantnoj ulaznoj koncentraciji ulja mogu se detaljno sagledati uticaji ove tri tako važne promenljive na koalescentnu filtraciju.

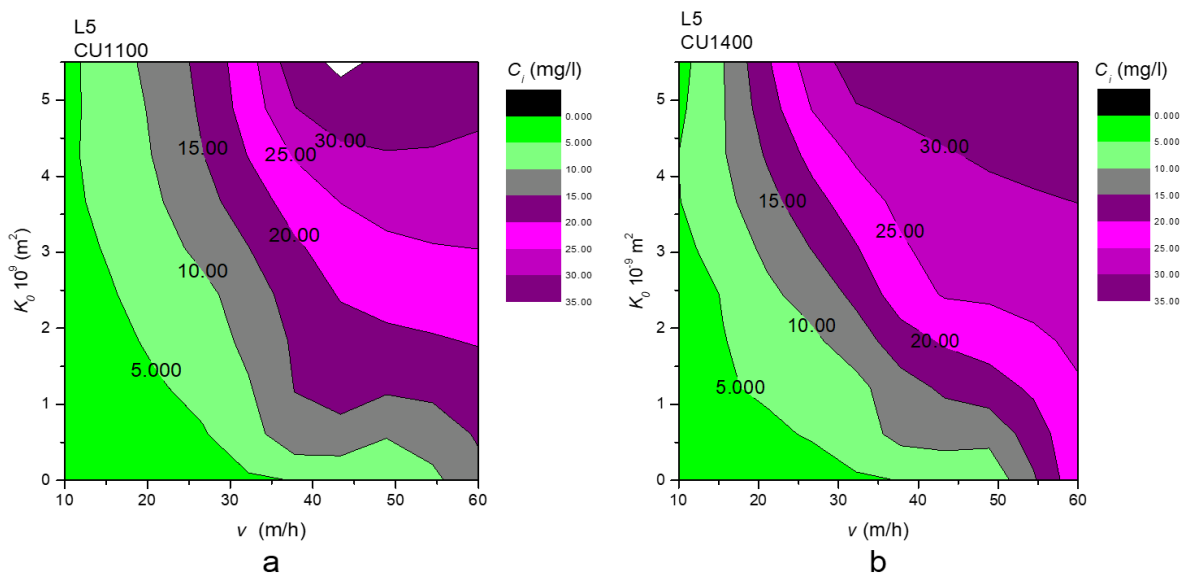
Na slici 104, dati su konturni dijagrami za ulaznu koncentraciju 500 mg/l i 800 mg/l.



1

**Slika 104** Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja od brzine strujanja i permeabilnosti sloja za ulaznu koncentraciju ulja a. 500 mg/l i b. 800 mg/l

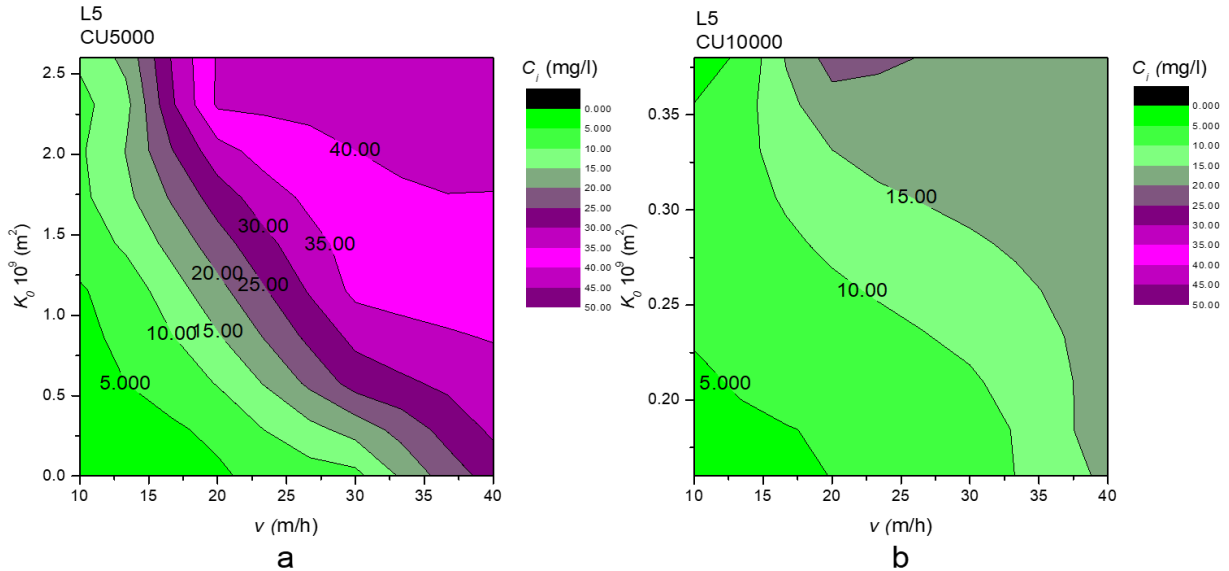
Pri ulaznoj koncentraciji ulja do 500 mg/l, slika 104a, postoji široka oblast povoljna za rad. Ona je ograničena brzinom strujanja većom od 40 m/h dok permeabilnost sloja nema uticaja na nju, tj. sve permeabilnosti sloja su odgovarajuće. Ako se posmatra dijagram za ulaznu koncentraciju ulja 800 mg/l, slika 104b, tada se može uočiti pojava asimetrije po pitanju uticaja permeabilnosti sloja. I dalje je oblast pogodna za rad velika, čak veća od one pri koncentraciji 500 mg/l, na račun proširenja za male permeabilnosti sloja kada je moguće ostvariti radne brzine strujanja veće od 50 m/h. Daljim povećanjem ulazne koncentracije ulja, radna površina se značajno smanjuje i dalje na način da su male permeabilnosti nešto povoljnije od velikih, slika 105. Takav trend zavisnosti manifestuje se sve do ulazne koncentracije ulja 3000 mg/l. Daljim povećanjem ulazne koncentracije ulja, velike vrednosti permeabilnosti sloja postaju nepovoljne za rad, te se radne površine manifestuju samo pri malim permeabilnostima sloja.



1

**Slika 105** Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije od brzine i permeabilnosti sloja za ulaznu koncentraciju od a. 1100 mg/l i b. 1400 mg/l

Na slici 106 dati su konturni dijagrami zavisnosti izlazne koncentracije ulja od brzine i permeabilnosti sloja za ulaznu koncentraciju od 5000 mg/l i 10000 mg/l. Za niže koncentracije, opseg permeabilnosti sloja je bio do  $5,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ . Kod dijagrama za ulaznu koncentraciju ulja od 5000 mg/l, opseg permeabilnosti sloja je do  $2,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ , dok je za velike koncentracije opseg do  $0,4 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ . Stoga, opseg za rad pri koncentraciji 5000 mg/l se nalazi u predelu brzine strujanja do 25 m/h za najmanje permeabilnosti, a za permeabilnosti sloja veće od  $1,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  nema radne oblasti. Kada je reč o ulaznoj koncentraciji od 10000 mg/l, tada je moguće realizovati brzine strujanja od 20 m/h pri permeabilnosti sloja manjoj od  $0,30 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ . Povećanjem ulazne koncentracije ulja na 15000 mg/l i 18000 mg/l moguće je raditi pri permeabilnosti manjoj od  $0,30 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ , ali pri značajno manjoj brzini strujanja, manjoj od 16 m/h ili čak 12 m/h, slika 107. Potrebno je ponoviti da je pri manjoj permeabilnosti sloja, pad pritiska veći, tabela 16.



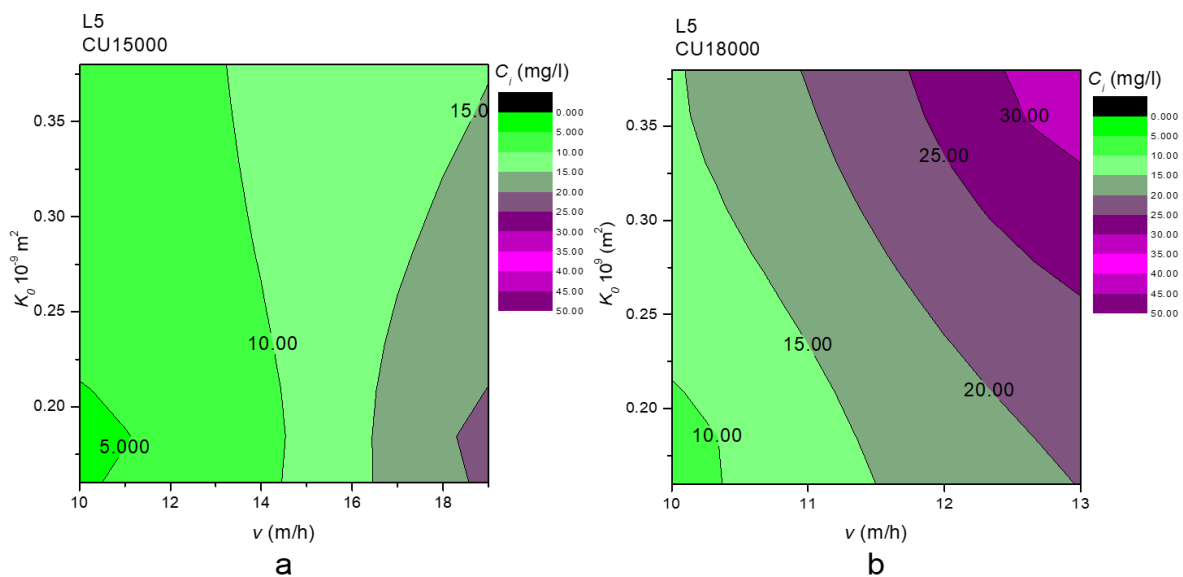
1

**Slika 106** Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja od brzine i permeabilnosti sloja za ulaznu koncentraciju ulja od a. 5000 mg/l i b. 10000 mg/l

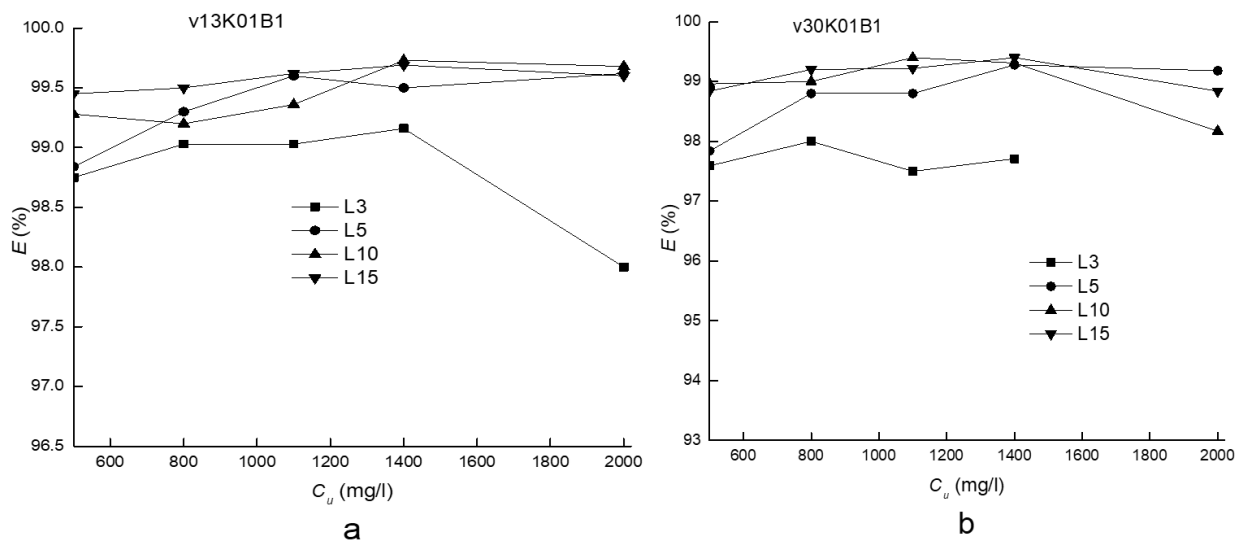
#### 4.3.3. Uticaj ulazne koncentracije ulja na efikasnost separacije pri promeni debljine ili permeabilnosti sloja

Ako se analizira promena efikasnosti separacije, tada odsustvuje informacija o kvalitetu vode na izlazu, što je jedna od manjkavosti ove analize. S druge strane, ako se želi povećati efikasnost separacije, može se sagledati način kako to postići, tj. koje od promenljivih promeniti da bi se postigao željeni efekat. Deo rezultata u literaturi je dat preko efikasnosti separacije, te je i to način da se mogu vršiti poređenja različitih istraživanja i dati određeni komentari.

Zavisnost efikasnosti separacije sloja vlakana PU od ulazne koncentracije ulja u opsegu 500-2000 mg/l za različite debljine sloja u opsegu 3-15 cm, pri najvišoj permeabilnosti  $K_{01}$  za dve korišćene brzine strujanja prikazana je na slici 108. Pri brzini strujanja 13 m/h, zavisnost efikasnosti separacije sloja od ulazne koncentracije ulja pokazuje maksimum, dok za ostale debljine sloja s porastom ulazne koncentracije ulja efikasnost separacije blago raste. Ako se posmatra situacija pri brzini strujanja 30 m/h, tada se za debljine sloja 5, 10 i 15 cm konstatuju zavisnosti sa blagim maksimumom.

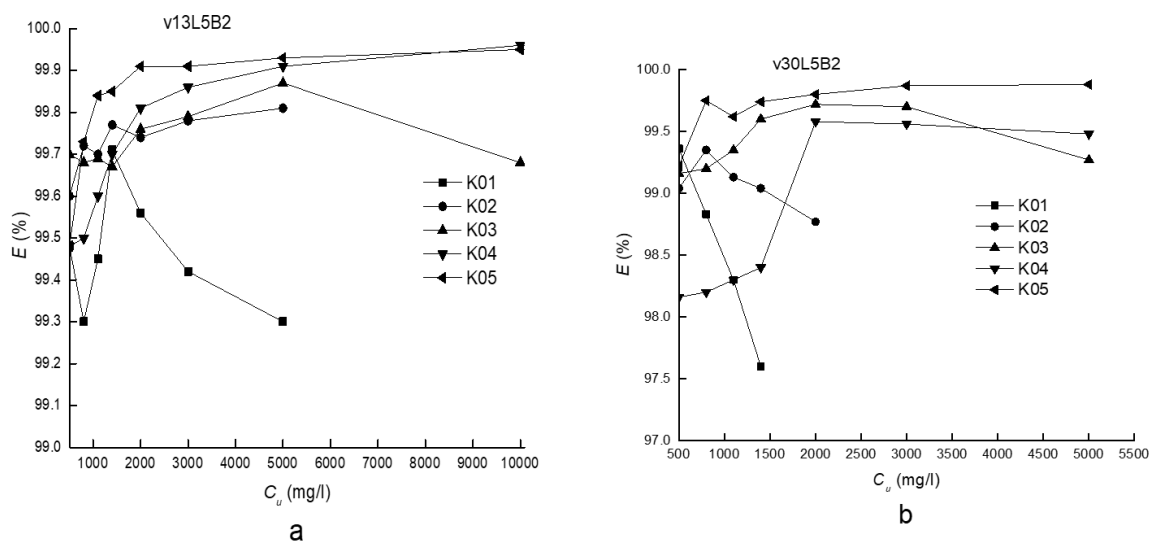


**Slika 107** Konturni dijagram zavisnosti izlazne koncentracije ulja od brzine strujanja i permeabilnosti sloja za ulaznu koncentraciju ulja od a. 15000 mg/l i b. 18000 mg/l



**Slika 108** Grafički prikaz zavisnosti efikasnosti separacije od ulazne koncentracije ulja za sve korišćene debljine sloja pri brzini strujanja od a. 13 m/h i b. 30 m/h

Uticaj promene ulazne koncentracije ulja na efikasnost separacije pri promeni permeabilnosti sloja debljine 5 cm može se sagledati na slici 109. Upadljivo je da je uticaj ulazne koncentracije ulja na efikasnost separacije značajno uslovljen vrednošću permeabilnosti sloja. Uticaj permeabilnosti sloja je najveći pri nižim ulaznim koncentracijama ulja. Povećanjem ulazne koncentracije ulja, neke permeabilnosti sloja ne omogućavaju rad. Oblik zavisnosti efikasnosti separacije od ulazne koncentracije ulja je, u svim slučajevima, takav da se ostvaruje maksimum u nekom predelu. U tim okolnostima, može se sa pouzdanošću tvrditi da je taj oblik zavisnosti realizovan zato što su ogledi rađeni do one ulazne koncentracije ulja koja realizuje graničnu izlaznu koncentraciju ulja 15 mg/l. Šević (1992) je dobio takav oblik zavisnosti, ali je taj uslov slučajno bio zadovoljen. Može se zaključiti da, ako je pokriven maksimalni opseg ulazne koncentracije dispergovanog ulja koji uključuje postizanje izlazne koncentracije od 15 mg/l za svaku radnu brzinu, zavisnost efikasnosti separacije od ulazne koncentracije ulja će imati maksimum.

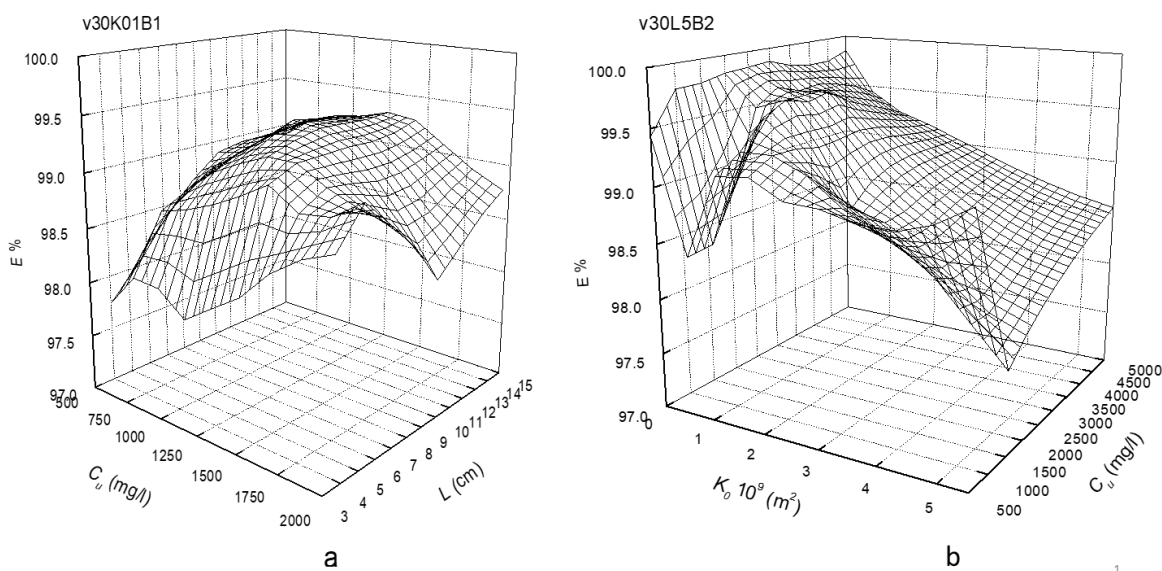


**Slika 109** Grafički prikaz zavisnosti efikasnosti separacije od ulazne koncentracije ulja za sve primenjene permeabilnosti sloja pri brzini strujanja od a. 13 m/h i b. 30 m/h



Postojanje maksimuma je upečatljivije na 3D dijagramima zavisnosti efikasnosti separacije od ulazne koncentracije ulja i debljine sloja, slika 110a, ili od ulazne koncentracije i permeabilnosti sloja, slika 110b.

Znači, za određeni opseg permeabilnosti sloja i za primenjene debljine sloja postoji optimalna vrednost ulazne koncentracije ulja pri kojoj se postiže maksimalna efikasnost separacije.

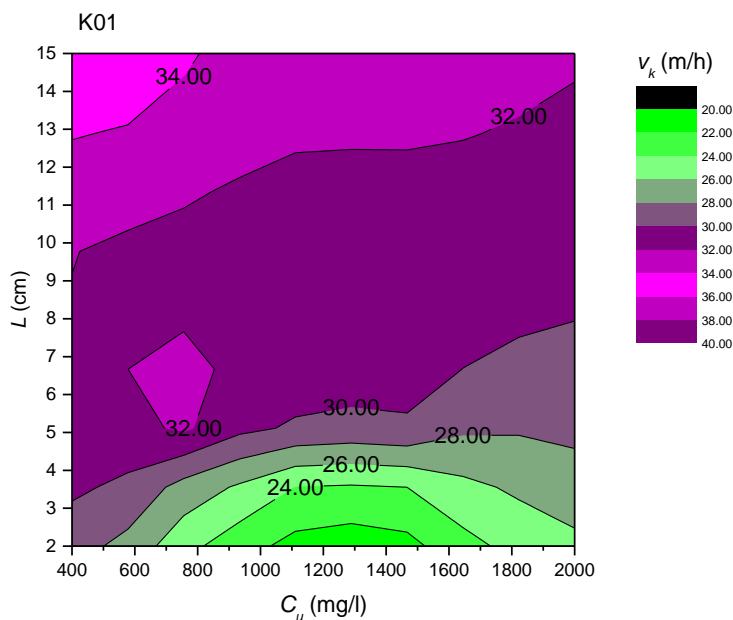


**Slika 110** 3D dijagrami zavisnosti efikasnosti separacije za brzinu od 30 m/h od ulazne koncentracije i a. debljine sloja b. permeabilnosti sloja

#### **4.3.4. Uticaj ulazne koncentracije na kritične veličine pri promeni debljine ili permeabilnosti sloja**

Najbolji način za analizu rezultata, kao što je već istaknuto, jeste analiza zavisnosti kritične brzine od operativnih parametara. Na slici 111, prikazana je zavisnost kritične brzine od ulazne koncentracije ulja u opsegu od 500-2000 mg/l i debljine sloja u opsegu od 3-15 cm pri najvećoj permeabilnosti sloja za ulje B1. Za posmatrane uslove rada može se konstatovati da kritična brzina opada sa porastom ulazne koncentracije ulja za sve

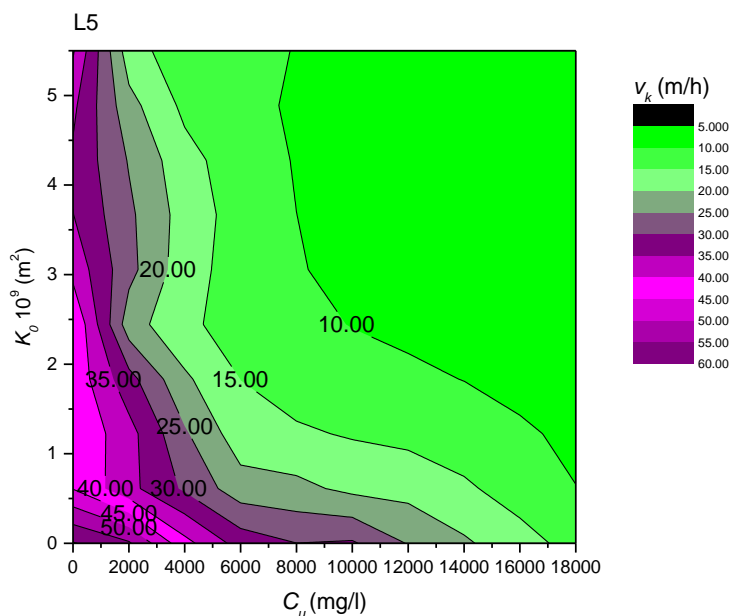
korišćene debljine. Očigledno je debljina 3 cm nedovoljna za ovu separaciju i nalazi se ispod minimuma za odabrane ostale uslove rada. Promena kritične brzine za ostale tri debljine je bliska po obliku i apsolutnim vrednostima kritične brzine. Iz tih razloga, debljina sloja od 5 cm može se usvojiti kao adekvatna za rad i dalja istraživanja. Kritična brzina je, naravno, najveća za najveću debljinu sloja i najmanju ulaznu koncentraciju ulja i iznosi oko 34 m/h. Za debljinu od 10 cm, postoji široka radna površina sa brzinom strujanja u opsegu od 30-32 m/h za ceo opseg ulazne koncentracije, slika 111. Na slici 112 prikazana je zavisnost kritične brzine od ulazne koncentracije ulja za opseg 500-10000 mg/l i permeabilnosti sloja pri debljini sloja 5 cm za ulje B2. Lako je uočljivo da kritična brzina opada s porastom ulazne koncentracije ulja za sve primenjene permeabilnosti sloja, ali je intenzitet opadanja drastično različit za različite permeabilnosti. Što je permeabilnost sloja veća, to više opada njena vrednost s porastom ulazne koncentracije ulja. Zbog toga je kritična



**Slika 111** Konturni dijagram zavisnosti kritične brzine od ulazne koncentracije i debljine sloja

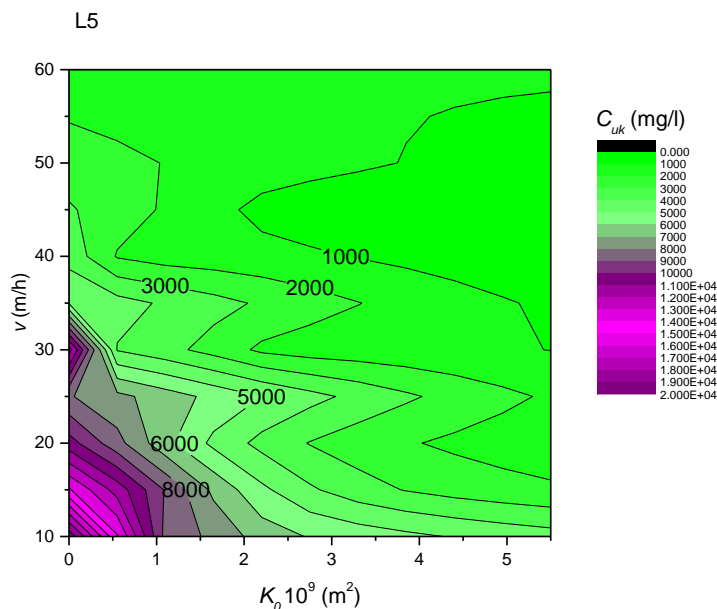
brzina najveća za najmanju permeabilnost sloja i najmanju ulaznu koncentraciju ulja i iznosi čak 60 m/h, a najmanja za najveću permeabilnost sloja i iznosi 10 m/h. Mora se konstatovati da su ovo drastične razlike u vrednosti kritične brzine i da je neophodno za

neku aplikaciju optimizovati permeabilnost sloja za postojeće uslove ulazne koncentracije ulja.



**Slika 112** Konturni dijagram zavisnosti kritične brzine od ulazne koncentracije ulja i debljine sloja

Druga kritična veličina, koja će biti analizirana, je kritična ulazna koncentracija ulja,  $c_{uk}$ . Kritična ulazna koncentracija ulja zapravo govori, kako je već istaknuto, pri kojoj ulaznoj koncentraciji ulja je postignuta granična izlazna koncentracija od 15 mg/l za date uslove rada (Stanimirović 2003). Vidi se da je kritična ulazna koncentracija ulja drastično uslovljena brzinom strujanja i permeabilnošću sloja, slika 113. Pri malim brzinama strujanja i najmanjoj permeabilnosti sloja, uređaj date konstrukcije može da obradi i 20000 mg/l ulja na ulazu. Povećanjem brzine strujanja, smanjuje se vrednost ulazne koncentracije ulja koja može da se obradi do nivoa 2000-4000 mg/l, pa u tom opsegu permeabilnost sloja praktično nema značaja.



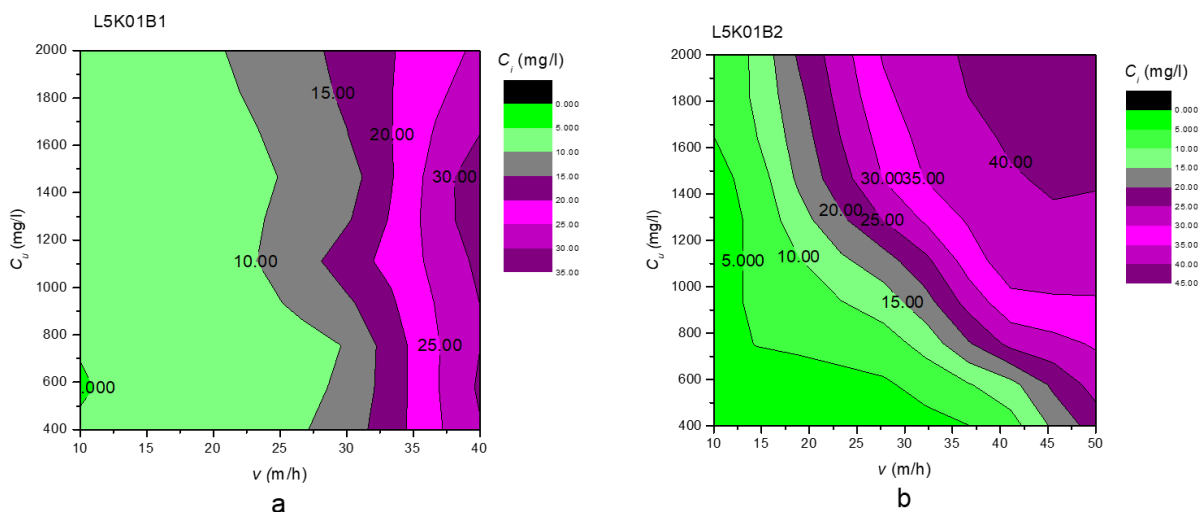
**Slika 113** Konturni dijagram zavisnosti kritične ulazne koncentracije ulja od brzine strujanja i permeabilnosti sloja

Neophodno je podvući da je kritična ulazna koncentracija ulja drastično uslovljena brzinom strujanja, te da pri brzinama strujanja većim od 50 m/h ona gubi značaj za primenjene uslove rada. To bi značilo da je koncentrovanije zauljene vode neophodno separisati pri manjim brzinama strujanja i da poluindustrijska istraživanja treba da budu realizovani za očekivane maksimalne ulazne koncentracije ulja.

#### **4.3.5. Uticaj ulazne koncentracije ulja na kritičnu brzinu za dispergovano ulje različite prirode**

Šećerov Sokolović i saradnici su sprovedli ospežna istraživanja uticaja prirode dispergovane uljne faze na koalescentnu filtraciju (Šećerov Sokolović i Sokolović 2000, Šećerov Sokolović i saradnici 2010, 2014, 2016). Oni su konstatovali da za mineralna ulja, pored njihove viskoznosti i gustine, veliki uticaj na koalescenciju i separaciju u sloju ima njihova polarnost. Najupotrebljiviji parametar za merenje polarnosti kod mineralnih ulja je neutralizacioni broj. Kako su navedena istraživanja uticaja ulazne koncentracije ulja uz promenu debljine sloja realizovana sa jednim uljem, B1, a uticaja ulazne koncentracije ulja pri promeni permeabilnosti sloja sa drugim uljem, B2, jednakog porekla, neophodno je

utvrditi koliko je značajna priroda ulja. Oba ulja su frakcije jedne domaće nafte naftenskog porekla, nafta A. Ulja B1 i B2 imaju bliske vrednosti viskoznosti i gustine, ali se drastično razlikuju u polarnosti. Vrednost neutralizacionog broja za ulje B1 je 0,229 mg KOH/l, dok je za ulje B2 1,23 mg KOH/l. Na slici 114, prikazane su zavisnosti izlazne koncentracije ulja od brzine strujanja i ulazne koncentracije ulja za oba ulja.

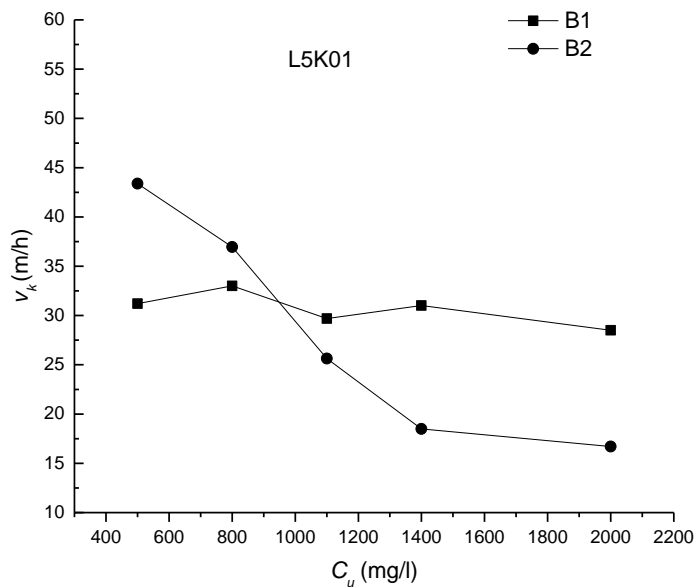


1

**Slika 114** Konturni dijagrami zavisnosti izlazne koncentracije ulja od brzine strujanja i ulazne koncentracije ulja za permeabilnost sloja  $K_{01}$  pri debljini sloja 5 cm  
a. za ulje B1 i b. Za ulje B2

Analizom prikazanih dijagrama može se konstatovati da je uticaj prirode ulja značajan, pošto su radne površine pri kojima je izlazna koncentracija manja od 15 mg/l različite. Sa uljem B1 može se uspešno raditi u celom opsegu ulazne koncentracije ulja pri brzinama strujanja i preko 30 m/h. Kod ulja B2, ta radna brzina strujanja je mnogo manja i zavisna od povećanja ulazne koncentracije ulja, tj. smanjuje se sa povećanjem ulazne koncentracije ulja u primenjenom opsegu. Još se bolje može sagledati uticaj prirode ulja ako se da prikaz zavisnosti kritične brzine od ulazne koncentracije ulja, slika 115. Kritična brzina za ulje B1 neznatno opada s povećanjem ulazne koncentracije ulja i njena vrednost se kreće oko 30 m/h, dok kritična brzina za ulje B2 drastično zavisi od posmatranog opsega

ulazne koncentracije ulja i pokazuje širok raspon promene vrednosti od oko 45 m/h za koncentraciju 500 mg/l do 15 m/h za koncentraciju od 2000 mg/l.



**Slika 115** Grafički prikaz zavisnosti kritične brzine od ulazne koncentracije ulja za debljinu sloja od 5 cm i permeabilnost sloja  $K_{01}$  za ulja B1 i B2

---

## 5. ZAKLJUČAK

Mikroskopskim proučavanjem vlakana i njihovog načina pakovanja u sloj, došlo se do sledećih zaključaka. Proučavana vlakna mogu biti slobodna ili međusobno povezana. Vlakna PU i PE su međusobno povezana, a ostala vlakna su slobodna. Proučavana vlakna se razlikuju po obliku poprečnog preseka. Najveći broj vlakana je kružnog poprečnog preseka, vlakna PPDJ i SSM su pravouganog poprečnog preseka, a vlakna PU nepravilnog elipsoidnog poprečnog preseka. Korišćena vlakna mogu se klasifikovati u dve grupe sa aspekta elastičnosti: kruta i elastična, što je uslovljeno prirodom i dimenzijom vlakana. Kruta vlakna su jedino vlakna SS40. Sva ostala vlakna su manje ili više elastična, te time i vijugava. Što se tiče načina pakovanja vlakana, može se zaključiti sledeće. Način pakovanja vlakana uslovljen je njihovom dimenzijom i količinom spakovanom u određenoj zapremini, tj. nasipnom gustinom. Slobodna, slučajno spakovana vlakna SS40 formiraju relativno heterogeno pakovan sloj. Kod pakovanja ovih vlakana u sloj mogu se uočiti dve oblasti, od kojih jednu čine gusto pakovana vlakna, a drugu razdvojena vlakna koja formiraju veće pore, nezavisno od permeabilnosti sloja, tj. nasipne gustine. Elastičnija vlakna od ostalih materijala pakuju se tako da obrazuju heterogeni porni prostor, ali je taj prostor drugačije raspoređen u zapremini sloja. Veće pore su distribuirane tako da su ugrađene u polja manjih pora.

Eksperimentalno je utvrđeno da postoji zavisnost poroznosti sloja od njegove permeabilnosti i da vlakna svih korišćenih materijala, osim PPDJ, pripadaju istoj eksperimentalnoj krivoj.

Proučavanjem istovremenog uticaja permeabilnosti sloja i debljine vlakana na efikasnost sepracije kapi mineralnih ulja kod sloja homogene strukture po dubini došlo se do sledećih zaključaka. Sloj vlakana SS40 realizuje najmanje vrednosti kritičnih brzina za ceo opseg primenjene permeabilnosti. Što se tiče slojeva vlakana SS20 i SS12, situacija je sledeća. U predelu male permeabilnosti, sloj vlakana SS20 omogućava značajno veće vrednosti kritične brzine od sloja vlakana SS12. Samo za najveću permeabilnost, sloj vlakana SS12 je bolji od sloja vlakana SS20. Konstatovano je da, za odabrane uslove rada i korišćena vlakna SS, postoji optimalna debljina vlakna pri kojoj se postiže maksimalna kritična brzina (veća od 65 m/h). Optimalna vrednost prečnika vlakna SS20 je  $20 \pm 2 \mu\text{m}$ . Vrednost maksimalne kritične brzine smeštena je u region malih vrednosti permeabilnosti

---

sloja. Fenomen postojanja optimalne debljine vlakana nije, do sada, otkriven jer raniji istraživači, koji su proučavali uticaj debljine vlakana, nisu varirali permeabilnost sloja.

Kada je u pitanju sloj heterogene strukture po dubini, tada veličina pora nije jednaka po dubini sloja. Istraživači su utvrdili da sloj koji ima manje pore na ulazu, a veće na izlazu postiže veću efikasnost separacije. Istraživači su menjali veličinu pora primenom vlakana različite debljine po dubini sloja. Adekvatna istraživanja realizovana u ovoj doktorskoj disertaciji potvrđuju dati zaključak. Međutim, različitu veličinu pora moguće je obezbediti još na jedan način, a to je primenom različite permeabilnosti po dubini sloja, pri čemu se primenjuju vlakna jednakog prečnika u celoj zapremini sloja. Ovakva geometrija sloja nije do sada proučavana. Najmanja permeabilnost obezbeđuje najmanje pore, a najveća - najveće pore. Sloj heterogene strukture formiran na opisani način od vlakana SS20 obezbedio je kritičnu brzinu veću od 60 m/h.

Cilj optimizacije rada koalescera u ovoj doktorskoj disertaciji je bio da se postigne maksimalna vrednost kritične brzine uz minimalni pad pritiska. Opseg vrednosti pada pritiska je utvrđen za sloj vlakana debljine 5 cm i najveću permeabilnost sloja  $K_{01}$  koja iznosi  $5,389 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ . Za brzine strujanja fluida 30-70 m/h, taj opseg je 108-255 Pa, dok je za najmanju permeabilnost sloja od  $0,180 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  ( $K_{05}$ ) i jednak raspon brzine strujanja fluida, opseg pada pritiska je 3236-7551 Pa. Pad pritiska pri brzini strujanja fluida od 70 m/h je skoro 30 puta veći za najmanju permeabilnost sloja pošto su pore tada najmanje i otpor proticanju najveći. To znači da sloj sa malom permeabilnošću, nevezano od vrednosti kritične brzine, nije povoljan za rad jer troši značajno veću energiju za rad pumpe. Primenom sloja vlakana SS, oblast malih permeabilnosti obezbeđuje veće vrednosti kritične brzine pošto se pri tim uslovima formira bogatija kapilarno-provodna faza. Primena vlakana otpadnih polimera za separaciju mineralnih ulja iz vode ukazuje da je oblast visoke permeabilnosti sloja ta koja, takođe, obezbeđuje velike vrednosti kritične brzine. Materijal BA1 ostvaruje najveće vrednosti kritične brzine za najveću permeabilnost sloja, nezavisno od viskoznosti ulja, uz minimalni pad pritiska. Ovi zaključci se odnose na ulaznu koncentraciju ulja od 500 mg/l.

Prilikom proučavanja istovremenog uticaja promene ulazne koncentracije ulja i debljine sloja vlakana PU, debljine 3-15 cm, na efikasnost separacije mineralnih ulja pri najvećoj permeabilnosti sloja, došlo se do sledećih zaključaka. Može se istaći da je koalescentna filtracija, za odabrane uslove rada, izuzetno osetljiva na promene ulazne



---

koncentracije dispergovane faze i brzine strujanja fluida. Veće debljine sloja pomeraju granicu limita ulazne koncentracije ulja. Za posmatrane uslove rada, kritična brzina opada s porastom ulazne koncentracije ulja, nezavisno od debljine sloja. Međutim, intenzitet tog opadanja je različit za različite debljine sloja. Očigledno je debljina sloja 3 cm nedovoljna za ovu separaciju i nalazi se ispod minimuma za odabrane ostale uslove rada. Promena kritične brzine za ostale tri debljine je bliska po obliku i apsolutnim vrednostima kritične brzine. Iz tih razloga, debljina sloja od 5 cm može se usvojiti kao adekvatna za rad i dalja istraživanja jer je tada manji pad pritiska nego pri većim debljinama sloja. Kritična brzina je, naravno, najveća za najveću debljinu sloja i najmanju ulaznu koncentraciju ulja i iznosi oko 34 m/h. Za debljinu sloja od 5 cm, kritična brzina se kreće od 30 m/h do 32 m/h za ceo opseg ulazne koncentracije ulja.

Istovremeni uticaj promene ulazne koncentracije ulja i permeabilnosti sloja na koalecentu filtraciju proučavan je na sloju vlakana PU debljine 5 cm. Ogledi su rađeni do postizanja eksponencijalne zavisnosti izlazne od ulazne koncentracije dispergovane faze. Kritična brzina opada s porastom ulazne koncentracije ulja za sve primenjene permeabilnosti sloja, ali je intenzitet opadanja drastično različit za različite permeabilnosti sloja. Što je permeabilnost sloja veća, to više opada njena vrednost s porastom ulazne koncentracije ulja. Kritična brzina je najveća za najmanju permeabilnost sloja i najmanju ulaznu koncentraciju ulja i iznosi čak 60 m/h, a najmanja za najveću permeabilnost sloja i iznosi 10 m/h. Druga kritična veličina koja je analizirana jeste kritična ulazna koncentracija ulja. Ona je drastično uslovljena brzinom strujanja fluida i permeabilnošću sloja. Pri malim brzinama strujanja i najmanjoj permeabilnosti sloja, uređaj date konstrukcije može da obradi 20.000 mg/l ulja na ulazu. Povećanjem brzine strujanja smanjuje se vrednost ulazne koncentracije ulja koja može da se obradi na 2000-4000 mg/l, u tom opsegu, permeabilnost sloja praktično nema uticaja na separaciju ulja. Bliske su vrednosti  $c_k$  za sve permeabilnosti sloja pri većim brzinama strujanja.

Istraživanja uticaja prirode mineralnih ulja na uticaj promene ulazne koncentracije pokazala su da kritična brzina kod ulja B1 praktično ne zavisis od promene ulazne koncentracije, za posmatrani opseg i odabrane uslove rada. Kod ulja B2 povećanjem ulazne koncentracije kritična brzina rastično opada od 45 m/h na 15 m/h.

---

## 6. LITERATURA

Abolghasemibizaki, M., Mohammadi, R.

Droplet impact on superhydrophobic surfaces fully decorated with cylindrical macrotextures. *J. Colloid. Interf. Sci.* 2018. 509, 422–431.

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 foalescer geometry and operating conditions on emulsion separation. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2013b. 52, 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, 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.

Amrei, M.M., Venkateshan, D.G., D'Souza, N., Atulasimha, J., Tafreshi, H.V.

Novel approach to measuring the droplet detachment force from fibers. *Langmuir* 2016. 32, 13333-13339.

Amrei, M.M., Davoudi, M., Chase, G.G., Tafreshi, H.V.

Effects of roughness on droplet apparent contact angles on a fiber. *Sep. Purif. Technol.* 2017. 180, 107-113.

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, 45–50.

Bhattad, P., Willson, C.S., Thompson, K.E.

Effect of network structure on characterization and flow modeling using X-ray microtomography images of granular and fibrous porous media. *Transp. Porous Media* 2011. 90, 363-391.

- 
- Bitten, J.F.  
Coalescence of water droplets on single fibers. *J. Colloid. Interf. Sci.* 1970. 33, 265-271.
- Bitten, J.F., Fochtman, E.G.  
Water distribution in fiber-bed coalescers. *J. Colloid. Interf. Sci.* 1971. 37, 312-317.
- Borcia, R., Bestehorn, M.  
Partial coalescence of sessile drops with different miscible liquid. *Langmuir.* 2013. 29, 4426-4429.
- Bradford, S.A., Torkzaban, S., Shapiro, A.  
A theoretical analysis of colloid attachment and straining in chemically heterogeneous porous media. *Langmuir.* 2013a. 29, 6944-6952.
- Bradford, S.A., Torkzaban, S.  
Colloid interaction energies for physically and chemically heterogeneous porous media. *Langmuir.* 2013b. 29, 3668-3676.
- Cao, H., Fu, J., Liu, Y., Chen, S.  
Facile design of superhydrophobic and superoleophilic copper mesh assisted by candle soot for oil water separation. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 2018. 537, 294-302.
- Chang, C., Ji, Z., Zeng, F.  
The effect of a drainage layer on filtration performance of coalescing filters. *Sep. Purif. Technol.* 2016. 170, 370-376.
- Chawaloeshonsiya, N., Painmanakul, P.  
Study of cutting-oil emulsion separation by coalescer process in terms of medium characteristics and bed packing. *Separ. Sci. Technol. (Philadelphia)*, 2014. 49, 2960-2967.
- Cheng, L., Wang, D. M., Shaikh, A. R., Fang, L. F., Jeon, S., Saeki, D., Zhang, L., Liu, C. J., Matsuyama, H.  
Dual superlyophobic aliphatic polyketone membranes for highly efficient emulsified oil-water separation: performance and mechanism. *ACS Appl. Mater. Inter.* 2018. 10, 30860-30870.
- Choong, L.T., Khan, Z., Rutledge, G.C.  
Permeability of electrospun fiber mats under hydraulic flow. *J. Membr. Sci.* 2014. 451, 111-116.

---

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, 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 Interf. Sci.* 1985b. 104, 512–519.

Cui, X., Liu, Q., Zhang, C.  
Detachment characteristics of deposited particles in porous medium: experimentation and modeling. *Transp. Porous Media.* 2017. 119, 633-647.

Das, D., Ishtiaque, S.M., Das, S.  
Influence of fibre cross-sectional shape on air permeability of nonwovens. *Fiber Polym.* 2015. 16, 79-85.

Dawar, S., Chase, G.G.  
Drag correlation for axial motion of drops on fibers. *Sep. Purif. Technol.* 2008. 60, 6-13.

Dawar, S., Chase, G.G.  
Correlations for transverse motion of liquid drops on fibers. *Sep. Purif. Technol.* 2010. 72, 282-287.

Davoudi, M., Fang, J., Chase, G.G.  
Barrel shaped droplet movement at junctions of perpendicular fibers with different orientations to the air flow direction. *Sep. Purif. Technol.* 2016. 162, 1-5.

Davoudi, M., Moore, E.J., Chase, G.G.  
Motion of water drops on hydrophobic expanded polymer mat surfaces due to tangential air flow. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2017. 1-7.

Du, Y., Shen, C., Zhang, H., Huang, Y.  
Effects of flow velocity and nonionic surfactant on colloid straining in saturated porous media under unfavorable conditions. *Transp. Porous Media.* 2013. 98, 193-208.

Dullien, F. A. L., Azzam, M. I. S.  
Flow rate-pressure gradient measurements in periodically nonuniform capillary tubes. *AIChE J.* 1973. 19, 222–229.

---

Dullien, F. A. L., Dhawan, G. K.

Characterization of pore structure by a combination of quantitative photomicrography and mercury porosimetry. *J. Colloid Interface Sci.* 1974. 47, 337–349.

Dullien, F. A. L.

Single phase flow through porous media and pore structure. *Chem. Eng. J.* 1975a. 10, 1–34.

Dullien, F. A. L.

New network permeability model of porous media. *AIChE J.* 1975b. 21, 299–307.

Dullien, F. A. L., Zarcone, C., Macdonald, I. F., Collins, A., Bochar, R. D. E.

The effects of surface roughness on the capillary pressure curves and the heights of capillary rise in glass bead packs. *J. Colloid Interface Sci.* 1989. 127, 362–372.

Dullien F. A. L.

Porous media: Fluid transport and pore structure, *Academic Press Inc., San Diego*, 1992. 5-110.

Đoković, B.

Ispitivanje fenomena koalescentne filtracije, magistarski rad, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 1997.

Elimelech, M., O'Melia, C. R.

Kinetics of deposition of colloidal particles in porous media. *Environ. Sci. Technol.* 1990a. 24, 1528–1536.

Elimelech, M., O'Melia, C.R.

Effect of particle size on collision efficiency in the deposition of Brownian particles with electrostatic energy barriers. *Langmuir.* 1990b. 6, 1153–1163.

Elimelech, M.

Predicting collision efficiencies of colloidal particles in porous media. *Water Res.* 1992. 26, 1–8.

Elimelech, M., Gregory, J., Jia, X., Williams. R. A.

Particle deposition and aggregation: measurement, modeling and simulation. Butterworth-Heinemann. Woburn, 1998.

---

Elimelech, M., Chen, J. Y., Kuznar, A. Z.

Particle deposition on to solid surfaces with micropatterned charge heterogeneity: The “Hydrodynamic bump” effect. *Langmuir*. 2003. 19, 6594-6597.

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.A.

Prediction of oil saturation in fibrous bed-coalescer by dynamic pulse technique. *Chem. Eng. Commun.* 1985. 35, 141-147.

Fahim, M., Othman, F.

Coalescence of secondary dispersions in composite packed beds. *J. Dispersion Sci. Technol.* 1987. 8, 507–523.

Fang, J., Davoudi, M., Chase, G.G.

Drop movement along a fiber axis due to pressure driven air flow in a thin slit. *Sep. Purif. Technol.* 2015. 140, 77-83.

Fang, J., Aljuhani, A., Chase, G.G.

Water drop movement on woven fiber mat surfaces due to flow of diesel fuel. *Sep. Purif. Technol.* 2016. 123-130.

Fazeli, M., Hinebaugh, J., Fishman, Z., Tötzke, C., Lehnert, W., Manke, I., Bazylak, A.

Pore network modeling to explore the effects of compression on multiphase transport in polymer electrolyte membrane fuel cell gas diffusion layers. *J. Power Sources* 2016. 335, 162-171.

Grilc, V., Golob, J., Modic, R.

Drop coalescence in liquid/liquid dispersions by flow through glass fibre beds. *Chem. Eng. Res. Des.* 1984. 62, 48–52.

Grilc, V., Golob, J., Modic, R.

Drop coalescence in liquid/liquid dispersions by flow through glass fibre beds. Part II. *Chem. Eng. Res. Des.* 1986. 64, 67–70.

Govedarica, D.

Koalescencija mineralnih ulja u vlaknastom sloju, doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2011.

---

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., Sokolović, D.  
Separacija emulzija koalscencijom u sloju vlakana, monografija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, 2014.

Govedarica, D.D., Šećerov-Sokolović, R.M., Kiralj, A.I., Govedarica, O.M., Sokolović, D.S., Hadnađev-Kostić, M.S. Separation of mineral oil droplets using polypropylene fibre bed coalescence. *Hem. ind.* 2015. 69, 339–345.

Guilizzoni, M.  
Drop shape visualization and contact angle measurement on curved surfaces. *J. Colloid. Interf. Sci.* 2011. 364, 230-236.

Guo, G., Liu, L., Dang, Z., Fang, W.  
Recent progress of polyurethane-based materials for oil/water separation. *Nano* 2017. 12, 1-13.

Han, Y., He, L., Luo, X., Lü, Y., Shi, K., Chen, J., Huang, X.  
A review of the recent advances in design of corrugated plate packs applied for oil–water separation. *J. Ind. Eng. Chem.* 2017. 53, 37-50.

Hazlett, R. N.  
Fibrous bed coalescence of water—steps in the coalescence process. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 1969a. 8, 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, 633–640.

Hazlett, R. N., Carhart, H. W.  
Removal of water from fuel using a fibrous bed. *Filtr. Sep.* 1972. 9, 456–462.

He, X., Zhao, L., Cheng, J.  
Coalescence-induced swift jumping of nanodroplets on curved surfaces. *Langmuir.* 2019. 35, 9979-9987.

---

Himma, N. F., Wardani, A. K., Wenten, I. G.

The effects of non-solvent on surface morphology and hydrophobicity of dip-coated polypropylene membrane. *Mater. Res. Express*. 2017a. 4, 1-7.

Himma, N. F., Wardani, A. K., Wenten, I. G.

Preparation of superhydrophobic polypropylene membrane using dip-coating method: the effects of solution and process parameters. *Polym-Plast. Technol*. 2017b. 56, 184-194.

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, 444–452.

Hosseini, S. A., Tafreshi, H. V.

Modeling permeability of 3-D nanofiber media in slip flow regime. *Chem. Eng. Sci*. 2010. 65, 2249-2254.

Hu, D., Li, X., Li, L., Yang, C.

Designing high-caliber nonwoven filter mats for coalescence filtration of oil/water emulsions. *Sep. Purif. Technol*. 2015a. 149, 65-73.

Hu, D., Li, X., Li, L., Yang, C.

Designing high-caliber nonwoven filter mats for coalescence filtration of oil/water emulsions. *Sep. Purif. Technol*. 2015b. 149, 65-73.

Hu, D., Li, L., Li, Y., Yang, C.

Fibrous coalescer for the treatment of hydrometallurgical oil dispersions. *Ind. Eng. Chem. Res*. 2016. 55, 11809-11817.

Hu, D., Li, L., Li, Y., Yang, C.

Restructuring the surface of polyurethane resin enforced filter media to separate surfactant stabilized oil-in-water emulsions via coalescence. *Sep. Purif. Technol*. 2017. 172, 59-67.

Huang, X., Zhao, Y., Wang, H., Qin, H., Wen, D., Zhou, W.

Investigation of transport property of fibrous media: 3D virtual modeling and permeability calculation. *Eng. Comput*. 2017. 33, 997-1005.



---

Hubbe, M. A.

Theory of detachment of colloidal particles from flat surfaces exposed to flow. *Colloids Surf.* 1984. 12, 151–178.

Hubbe, M. A.

Detachment of colloidal hydrous oxide spheres from flat solids exposed to flow 1. Experimental system. *Colloids Surf.* 1985a. 16, 227–248.

Hubbe, M. A.

Detachment of colloidal hydrous oxide spheres from flat solids exposed to flow 2. Mechanism of release. *Colloids Surf.* 1985b. 16, 249–270.

Ives, K. J.

The scientific basis of filtration: Procs. NATO advanced study Inst. on the scientific basis of filtration, Noordhoff Int. Publishing, Leyden: Cambridge, 1975.

Ives, K. J., Fitzpatrick, C. S. B.

Detachment of deposits from sand grains. *Colloids Surf.* 1989. 39, 239–253.

Jackson, G. W., James, D. F.

The permeability of fibrous porous media. *Can. J. Chem. Eng.* 1986. 64, 364–374.

James, D. F., Davis, A. M. J.

Flow at the interface of a model fibrous porous medium. *J. Fluid Mech.* 2001. 426, 47–72.

Jaganathan, S., Vahedi Tafreshi, H., Pourdeyhimi, B.

A realistic approach for modeling permeability of fibrous media: 3-D imaging coupled with CFD simulation. *Chem. Eng. Sci.* 2008a. 63, 244–252.

Jaganathan, S., Tafreshi, H. V., Pourdeyhimi, B.

A case study of realistic two-scale modeling of water permeability in fibrous media. *Separ. Sci. Technol.* 2008b. 43, 1901–1916.

Jeater, P., Rushton, E., Davies, G.A.

Coalescence in fibre beds. *Filtr. Sep.* 1980. 17, 129–133.

Johnson, P. R., Elimelech, M.

Dynamics of colloid deposition in porous media: Blocking based on random sequential adsorption. *Langmuir.* 1993. 11, 801–812.

---

Khan, I., Aidun, C. K.

Investigating the effect of micro-structure on the deformation of saturated fibrous media using direct numerical simulations. *Comput. Fluids* 2017. 143, 48-58.

Kiralj, A.

Simultani uticaj energije površine vlakana, geometrije sloja i prirode uljne faze na obradu zauljenih voda koalescentnom filtracijom, doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2017.

Kiralj, A., Vulić, T., Sokolović, D., Šećerov Sokolović, R., Dugić, P.

Separation of oil drops from water using stainless steel fiber bed. *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.* 2017. 23, 269-277.

Koponen, A., Ekman, A., Mattila, K., Al-Qararah, A. M., Timonen, J.

The effect of void structure on the permeability of fibrous networks. *Transp. Porous Media.* 2017. 117, 247-259.

Krasinski, A.

Filter media: Multilayer PP filters for the separation of O/W emulsions. *Filtr. Sep.* 2014. 51, 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, 1541–1547.

Krasinski A.

Separation of oil-in-water emulsions using polymer coalescence structures. *Environ. Protect. Eng.* 2016. 42, 19-39.

Kulkarni, P. S., Patel, S. U., Chase, G. G.

Coalescence filtration performance of blended microglass and electrospun polypropylene fiber filter media. *Sep. Purif. Technol.* 2014. 124, 1-8.

Kundu, P., Mishra, I. M.

Removal of emulsified oil from oily wastewater (oil-in-water emulsion) using packed bed of polymeric resin beads. *Sep. Purif. Technol.* 2013. 118, 519-529.

---

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, 669–676.

Lee, M.W., Kang, D.K., Yoon, S.S., Yarin, A.L.  
Coalescence of two drops on partially wettable substrates. *Langmuir*. 2012. 28, 3791-3798.

Li, B., Xin, F., Tan, W., Zhu, G.  
A new theoretical model for coalescence-induced droplet jumping on hydrophobic fibers. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2018. 57, 8299-8307.

Li, B., Xin, F., Zhu, G., Tan, W.  
Asymmetric coalescence-induced droplet jumping on hydrophobic fibers. *Chem. Eng. Sci.* 2019. 201, 298-308.

Li, J.  
Coalescence of the oil-in-water emulsions in fibrous and granular beds, master thesis, University of Regina, Saskatchewan, 2003.

Li, J., Gu, Y.  
Coalescence of oil-in-water emulsions in fibrous and granular beds. *Sep. Purif. Technol.* 2005. 42, 1–13.

Li, S., Chu, F., Zhang, J., Brutin, D., Wen, D.  
Droplet jumping induced by coalescence of a moving droplet and a static one: Effect of initial velocity. *Chem. Eng. Sci.* 2020. 211, art. no. 115252.

Li, X., Hu, D., Cao, L., Yang, C.  
Sensitivity of coalescence separation of oil-water emulsions using stainless steel felt enabled by LBL self-assembly and CVD. *RSC Adv.* 2015. 5, 71345-71354.

Li, Y., Gong, H., Dong, M., Liu, Y.  
Separation of water-in-heavy oil emulsions using porous particles in a coalescence column. *Sep. Purif. Technol.* 2016. 166, 148-156.

Li, Y., Zhang, Z., Ge, B., Men, X., Xue, Q.  
A versatile and efficient approach to separate both surfactant-stabilized water-in-oil and oil-in-water emulsions. *Sep. Purif. Technol.* 2017a. 176, 1-7.

---

Li, Y., Cao, L., Hu, D., Yang, C.

Uncommon wetting on a special coating and its relevance to coalescence separation of emulsified water from diesel fuel. *Sep. Purif. Technol.* 2017b. 176, 313-322.

Liu, L., Hou, L., Tan, W., Zhu, G.

A visible coalescence of droplets on hydrophobic and hydrophilic fibers in water-in-oil emulsion. *Disper. Sci. Technol.* 2017. 38, 1719-1725.

Liu, Y. Cameron, I. T.

A new wavelet-based method for the solution of the population balance equation. *Chem. Eng. Sci.* 2001. 56, 5283–5294.

Liu, Y., Zhan, B., Zhang, K., Kaya, C., Stegmaier, T., Han, Z., Ren, L.

On-demand oil/water separation of 3D Fe foam by controllable wettability. *Chem. Eng. J.* 2018. 331, 278-289.

Lu, H., Yang, Q., Liu, S., Xie, L. S., Wang, H.L.

Effect of fibrous coalescer redispersion on W/O emulsion separation. *Sep. Purif. Technol.* 2016a. 159, 50-56.

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.* 2016b. 39, 255-262.

Luo, H., Yang, X., Lu, Z., Bai, Z., Wang, H., Shou, L.

Effect of drainage layer on oil distribution and separation performance of fiber-bed coalescer. *Sep. Purif. Technol.* 2019. 218, 173-180.

Ma, S., Kang, Y., Cui, S.

Oil and water separation using a glass microfiber coalescing bed. *J. Disper. Sci. Technol.* 2014. 35, 103-110.

Magiera, R., Blass, E.

Separation of liquid-liquid dispersions by flow through fibre beds. *Filtr. Sep.* 1997. 34, 369–376.

Maini, B., Wassmuth, F., Schramm, L.L.

Fines migration in petroleum reservoirs. *Adv. Chem. Ser.* 1996. 251, 369–373.

---

Maiti, S., Mishra, I.M., Bhattacharya, S.D., Joshi, J.K.

Removal of oil from oil-in-water emulsion using a packed bed of commercial resin. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 2011. 389, 291-298.

Masoud, H., Alexeev, A.

Permeability and diffusion through mechanically deformed random polymer networks. *Macromolecules.* 2010. 43, 10117-10122.

Mead-Hunter, R., Mullins, B.J., Becker, T., Braddock, R.D.

Evaluation of the force required to move a coalesced liquid droplet along a fiber *Langmuir* 2011. 27, 227-232.

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, 3483-3488.

Nordlund, M., Lopez Penha, D.J., Stolz, S., Kuczaj, A., Winkelmann, C., Geurts, B.J.

A new analytical model for the permeability of anisotropic structured porous media. *Int. J. Eng. Sci.* 2013. 68, 38-60.

Otitoju, T.A., Ahmad, A.L., Ooi, B.S.

Polyvinylidene fluoride (PVDF) membrane for oil rejection from oily wastewater: A performance review. *J. Water Process Eng.* 2016. 14, 41-59.

Othman, F.M., Fahim, M.A.

Prediction of predominant mechanisms in the separation of secondary dispersions in a fibrous bed. *J. Disper. Sci. Technol.* 1988. 9, 91-113.

Pak, T., Archilha, N.L., Mantovani, I.F., Moreira, A.C., Butler, I.B.

The dynamics of nanoparticle-enhanced fluid displacement in porous media: A pore-scale study. *Sci. Rep.* 2018. 8, art. no. 11148.

Park, S.

Computational modeling for prediction of the shear stress of three-dimensional isotropic and aligned fiber networks. *Comput. Methods Programs Biomed.* 2017. 148, 91-98.

Patel, N. M.

Wastewater treatment using combined techniques of sand filtration and coalescence in fibrous media, *master thesis*, University of Texas at Austin, Austin, 1975.

---

Pedersen, J.A., Boschetti, F., Swartz, M.A.

Effects of extracellular fiber architecture on cell membrane shear stress in a 3D fibrous matrix. *J. Biomech.* 2007. 40, 1484-1492.

Pradhan, A.K., Das, D., Chattopadhyay, R., Singh, S.N.

Effect of 3D fiber orientation distribution on transverse air permeability of fibrous porous media. *Powder. Technol.* 2012. 221, 101-104.

Rebelein, F., Blass, E.

Separation of micro-dispersions in fibre-beds. *Filtr. Sep.* 1990. 27, 360-363.

Rege, S. D., Fogler, H. S.

Network model for deep bed filtration of solid particles and emulsion drops. *AIChE J.* 1988a. 34, 1761-1772.

Rege, S. D., Fogler, H. S.

Network model for straining dominated particle entrapment in porous media. *Chem. Eng. Sci.* 1988b. 42, 1553-1564.

Ryan, J. N., Elimelech, M.

Review: Colloid mobilization and transport in groundwater. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 1996. 107, 1-56.

Salama, A., Zoubeik, M., Henni, A., Ng, K.T.W., Ibrahim, H.

On the design of sustainable antifouling system for the crossflow filtration of oily water systems: A multicontinuum and CFD investigation of the periodic feed pressure technique *Sci. Total Environ.* 2020. 698, art. no. 134288.

Sareen, S. S., Rose, P., Gudesen, R. C., Kintner, R. C.

Coalescence in fibrous beds. *AIChE J.* 1966. 12, 1045-1050.

Seymour, M.B., Chen, G., Su, C., Li, Y.

Transport and retention of colloids in porous media: Does shape really matter? *Envir. Sci. Tech. Lib.* 2013. 47, 8391-8398.

Sharifi, H., Shaw, J.

Secondary drop production in packed-bed coalescers. *Chem. Eng. Sci.* 1996. 51, 4817-4826.

---

Shen, C., Wang, F., Li, B., Jin, Y., Wang, L.-P., Huang, Y.  
Application of DLVO energy map to evaluate interactions between spherical colloids and rough surfaces. *Langmuir*. 2012. 28, 14681–14692.

Shen, C., Lazouskaya, V., Zhang, H., Li, B., Jin, Y., Huang, Y.  
Influence of surface chemical heterogeneity on attachment and detachment of microparticles. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 2013. 433, 14–29.

Shen, C., Jin, Y., Li, B., Zheng, W., Huang, Y.  
Facilitated attachment of nanoparticles at primary minima by nanoscale roughness is susceptible to hydrodynamic drag under unfavorable chemical conditions. *Sci. Total Environ.* 2014. 466–467, 1094–1102.

Sherony, D. F., Kintner, R. C.  
Coalescence of an emulsion in a fibrous bed: Part I. Theory. *Can. J. Chem. Eng.* 1971a. 49, 314-320.

Sherony, D. F., Kintner, R. C.  
Coalescence of an emulsion in a fibrous bed: Part II. Experimental. *Can. J. Chem. Eng.* 1971b. 49, 321-325.

Shin, C., Chase, G. G.  
Water-in-oil coalescence in micro-nanofiber composite filters. *AIChE J.* 2004. 50, 343-350.

Shin, C., Chase, G. G., Reneker, D. H.  
The effect of nanofibers on liquid-liquid coalescence filter performance. *AIChE J.* 2005. 51, 3109-3113.

Shin., Chase G. G.  
Separation of liquid drops from air by glass fiber filters augmented with polystyrene nanofibers. *J. Disper. Sci. Technol.* 2006a. 27, 5-9.

Shin., Chase G. G.  
Separation of water-in-oil emulsions using glass fiber media augmented with polymer nanofibers. *J. Disper. Sci. Technol.* 2006b. 27, 517-522.

Shou, D., Fan, J., Zhang, H., Qian, X., Ye, L.

---

Filtration efficiency of non-uniform fibrous filters. *Aerosol. Sci. Tech.* 2015. 49, 912-919.  
Soltani, P., Johari, M.S., Zarrebini, M.

Effect of 3D fiber orientation on permeability of realistic fibrous porous networks.  
*Powder. Technol.* 2014. 254, 44-56.

Sokolović, D.S., Sokolović, R.M.Š., Sokolović, S.M.  
Proučavanje reoloških osobina nestabilnih emulzija mineralnog porekla. *Hem. Ind.* 2013.  
67, 293-301.

Sokolović, D.S., Govedarica, D.D., Šećerov Sokolović, R.M.  
Influence of fluid properties and solid surface energy on efficiency of bed coalescence  
*Chem. Ind. Chem. Eng. Q.* 2018a. 24, 221-230.

Sokolović, D.S., Hadnadjev-Kostic, M.S., Kiralj, A.I., Šećerov Sokolović, R.M.  
Prediction of oily water separation efficiency by fiber beds using a new filter media prop-  
erty. *Hem. Ind.* 2018b. 72, 253-264.

Soo, H., Radke, C. J.  
The flow mechanism of dilute, stable emulsions in porous media. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*  
1984a. 23, 342-347.

Soo, H., Radke C. J.  
Velocity effects in emulsion flow through porous media. *J. Colloid Interf. Sci.* 1984b. 102,  
462-476.

Soo, H., Radke C. J.  
Flow of dilute, stable liquid and solid dispersions in underground porous media. *AIChE J.*  
1985. 31, 1926-1928.

Soo, H., Radke C. J.  
A filtration model for the flow of dilute, stable emulsions in porous media-I. Theory. *Chem.*  
*Eng. Sci.* 1986. 41, 263-272.

Speth, H., Pfennig, A., Chatterjee, M., Franken, H.  
Coalescence of secondary dispersions in fiber beds. *Sep. Purif. Technol.* 2002. 29, 113-119.

Spielman, L. A.  
Separation of finely dispersed liquid-liquid suspensions by flow through fibrous media,  
doctoral thesis, University of California, Berkeley, 1968.



---

Spielman, L., Goren, S.L.

Model for predicting pressure drop and filtration efficiency in fibrous media. *Environ. Sci. Technol.* 1968b. 2, 279–287.

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, 10–24.

Spielman, L.A., Goren, S.L.

Theory of coalescence by flow through porous media. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 1972a. 11, 66–72.

Spielman, L. A., Goren, S. L.

Experiments in coalescence by flow through fibrous mats. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 1972b. 11, 73–83.

Spielman, L. A., Su, Y.

Coalescence of oil-in-water suspensions by flow through porous media. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 1977. 16, 272–282.

Stanimirović, O.

Fluidodinamika i koalescencija u kontaktoru sa poroznim slojem, magistarski rad, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2003.

Sun, Z., Wen, J., Luo, X., Du, W., Liang, Z., Fu, K.

An improved CFD model of gas flow and particle interception in a fiber material. *Chinese J. Chem. Eng.* 2017. 25, 264-273.

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, 4949–4953.

Šecerov Sokolović, R. M., Sokolović, S. M.

Koalescencija u poroznom sloju, monografija, 2000, Tehnološki fakultet, Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu.

Šecerov 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.* 2003a. 42, 3098–3102.

- 
- Šećerov Sokolović R., O. Stanimirović, Sokolović S.  
Uticaj promene nasipne gustine na osobine sloja vlaknastih materijala, *Hem. Ind.* 2003b. 57, 335-340.
- 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, 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, 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, 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, 2484– 2490.
- Šećerov-Sokolović, R. M., Sokolović, D. S., Govedarica, D. D.  
Review: Liquid-liquid separation using steady-state bed coalescer. *Hem. Ind.* 2016. 70, 367–381.
- Šević, S.  
Ispitivanje efikasnosti separacije sistema nafta-ležišna voda metodom koalescentne filtracije, doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 1992.
- Tamayol, A., Bahrami, M.  
Analytical determination of viscous permeability of fibrous porous media. *Int. j. Heat. Mass. Tran.* 2009. 52, 2407-2414.
- Thompson, K.L., Giakoumatos, E.C., Ata, S., Webber, G.B., Armes, S.P., Wanless, E.J.  
Direct observation of giant pickering emulsion and colloid some droplet interaction and stability. *Langmuir.* 2012. 28, 16501-16511.
- Tufenkji, N., Elimelech, M.  
Correlation equation for predicting single-collector efficiency in physicochemical filtration in saturated porous media. *Environ. Sci. Technol.* 2004. 38, 529-536.

---

Uredba o graničnim vrednostima zagađujućih materijau površinskim i podzemnim vodama i sedimentu i rokovima za njihovo dostizanje. Službeni glasnik RS. br. 67. 2011. br. 48. 2012.

Vulić, T.

Uticao permeabilnosti sloja i orijentacije toka fluida na koalescenciju emulzije u poroznom sloju, magistarski rad, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2000.

Wang, J., Geng, G., Liu, X., Han, F., Xu, J.

Magnetically superhydrophobic kapok fiber for selective sorption and continuous separation of oil from water. *Chem. Eng. Res. Des.* 2016. 115, 122-130.

Wang, J., Ponting, M., Zhang, C., Olah, A., Baer, E.

Fuel filtration properties and mechanism of a novel fibrous filter produced by a melt-process. *J. Membr. Sci.* 2017. 526, 229-241.

Wang, J., Hou, L., Yan, K., Zhang, L., Yu, Q.J.

Polydopamine nanocluster decorated electrospun nanofibrous membrane for separation of oil/water emulsions. *J. Membr. Sci.* 2018. 547, 156-162.

Wei, W., M., Zhang, L., Zhao, S., Wu, J., Wang, J.

Underwater oleophobic PTFE membrane for efficient and reusable emulsion separation and the influence of surface wettability and pore size. *Sep. Purif. Technol.* 2017. 189, 32-39.

Wei, X., Chen, F., Wang, H., Zhou, H., Ji, Z., Lin, T.

Efficient removal of aerosol oil-mists using superoleophobic filters. *J. Mater. Chem. A.* 2018. 6, 871-877.

Wei, X., Zhou, H., Chen, F., Wang, H., Ji, Z., Lin, T.

High-efficiency low-resistance oil-mist coalescence filtration using fibrous filters with thickness-direction asymmetric wettability. *Adv. Funct. Mater.* 2019. 29, art. no. 1806302.

Woudberg, S., Van Heyningen, M.C., Le Coq, L., Legrand, J., Du Plessis, J.P.

Analytical determination of the effect of compression on the permeability of fibrous porous media. *Chem. Eng. Sci.* 2014. 112, 108-115.

---

Woudberg, S.

Permeability prediction of an analytical pore-scale model for layered and isotropic fibrous porous media. *Chem. Eng. Sci.* 2017. 164, 232-245.

Woudberg, S., Theron, F., Lys, E., Le Coq, L.

Investigating the influence of local porosity variations and anisotropy effects on the permeability of fibrous media for air filtration. *Chem. Eng. Sci.* 2018. 180, 70-78.

Yang, X., Wang, H., Chase, G.G.

Performance of hydrophilic glass fiber media to separate dispersed water drops from ultralow sulfur diesel supplemented by vibrations. *Sep. Purif. Technol.* 2015. 156, 665-672.

Yang, X., Zhang, X., Wang, H., Chase, G.G.

Vibration assisted water-diesel separation by electrospun PVDF-HFP fiber mats. *Sep. Purif. Technol.* 2016. 171, 280-288.

Yazdchi, K., Srivastava, S., Luding, S.

Microstructural effects on the permeability of periodic fibrous porous media. *Int. J. Multiphas Flow.* 2011. 37, 956-966.

Zakon o vodama. Službeni glasnik RS. 30. 2010.

Zampogna, G.A., Bottaro, A.

Fluid flow over and through a regular bundle of rigid fibres. *J. Fluid. Mech.* 2016. 792, 5-35.

Zang, D., Liu, F., Zhang, M., Niu, X., Gao, Z., Wang, C.

Superhydrophobic coating on fiberglass cloth for selective removal of oil from water. *Chem. Eng. J.* 2015. 262, 210-216.

Zhang, J., Chen, R., Liu, J., Liu, Q., Yu, J., Zhang, H., Jing, X., Liu, P., Wang, J.

Superhydrophobic nanoporous polymer-modified sponge for in situ oil/water separation. *Chemosphere.* 2020. 239, art. no. 124793.

Zhang, K., Liu, F., Williams, A.J., Qu, X., Feng, J.J., Chen, C.H.

Self-propelled droplet removal from hydrophobic fiber-based coalescers. *Phys. Rev. Lett.* 2015. 115, 1-5.

---

Zhang, P., Wang, S., Wang, S., Jiang, L.

Superwetting surfaces under different media: Effects of surface topography on wettability. *Small* 2015. 11, 1939-1946.

Zhao, P., Qin, N., Ren, C.L., Wen, J.Z.

Polyamide 6.6 separates oil/water due to its dual underwater oleophobicity/underoil hydrophobicity: Role of 2D and 3D porous structures. *Appl. Surf. Sci.* 2019. 466, 282-288.

Zhou, Y.B., Chen, L., Hu, X.M., Lu, J. Modified resin coalescer for oil-in-water emulsion treatment: Effect of operating conditions on oil removal performance. *Ind. Eng. Chem.* 2009. 48, 1660-1664.

Zhu, P., Kong, T., Tian, Y., Tang, X., Tian, X., Wang, L.

Superwettability with antithetic states: Fluid repellency in immiscible liquids *Mater. Horizons*. 2018. 5, 1156-1165.

Zhu, Z., Wang, Q., Wu, Q.

On the examination of the Darcy permeability of soft fibrous porous media, new correlations. *Chem. Eng. Sci.* 2017. 173, 525-536.

Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укоричити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.

## План третмана података

Назив пројекта/истраживања
Истовремени утицај пермеабилности слоја, пречника влакна и улазне концентрације уљне фазе на сепарацију минералних уља из отпадних вода
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
а) Технолошки факултет Нови Сад, Универзитет у Новом Саду, (Србија) б) в)
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
Пројекат који се реализује у оквиру програма Министарства просвете, науке и технолошког развоја (пројектни циклус 2011 - 2015): Развој ефикаснијих хемијско-инжењерских процеса заснован на истраживањима феномена преноса и принципима интензификације процеса (ОИ172022)
1. Опис података
<p>1.1 Врста студије</p> <p><i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i></p> <p>Докторска дисертација</p> <hr/> <hr/> <hr/>
<p>1.2 Врсте података</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> а) квантитативни</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> б) квалитативни</p>

### 1.3. Начин прикупљања података

- a) анкете, упитници, тестови
- б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи
- в) генотипови: навести врсту \_\_\_\_\_
- г) административни подаци: навести врсту \_\_\_\_\_
- д) узорци ткива: навести врсту \_\_\_\_\_
- ђ) снимци, фотографије: навести врсту \_\_\_\_\_
- е) текст, навести врсту \_\_ литература \_\_\_\_\_
- ж) мапа, навести врсту \_\_\_\_\_
- з) остало: описати вебсадржаји \_\_\_\_\_

### 1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

#### 1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

- a) Excel фајл, датотека \_\_\_\_\_
- б) SPSS фајл, датотека \_\_\_\_\_
- в) PDF фајл, датотека \_\_\_\_\_
- г) Текст фајл, датотека \_\_\_\_\_
- д) JPG фајл, датотека \_\_\_\_\_
- е) Остало, датотека \_\_\_\_\_

#### 1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

- a) број варијабли велики број \_\_\_\_\_
- б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) велики број \_\_\_\_\_

#### 1.3.3. Поновљена мерења

- а) да
- б) не

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

- a) временски размак између поновљених мера је \_\_нема правила \_\_\_\_\_
- б) варијабле које се више пута мере односе се на \_садржај уља у води, површине пикова, брзине струјања воде, пад притиска , мерења масе, температуре, вискозност, густина, тачка топљења

в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као \_\_\_\_\_

Напомене: \_\_\_\_\_

*Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?*

а) Да

б) Не

*Ако је одговор не, образложити* \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## 2. Прикупљање података

### 2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

#### 2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

а) експеримент, навести тип експеримент *на полуиндустријској опреми, хемијска анализа*

б) корелационо истраживање, навести тип \_\_\_\_\_

ц) анализа текста, навести тип \_\_\_\_\_

д) остало, навести шта \_\_\_\_\_

*2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).*

IR spektrofotometar Thermo Niclet 5700, DSC metoda (Differential Scanning Calorimetry), skening elektronski mikroskop (model JEOL, JSM-6460 LV instrument), optičkim mikroskopom (Olympus BH.2 RFCA), brojač čestica Elzone 280 PC, Anton Paar digitalni gustinomer tipa DMA 46, Kanon-Fenske metoda ASTM D445-64, titraciona metoda ASTM D3242, ASTM D971:99 i ASTM D1331, ASTM D 2502-67,

### 2.2 Квалитет података и стандарди

#### 2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да  Не



Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

- а) Колики је број недостајућих података? \_\_\_\_\_
- б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да Не
- в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

Квалитет података је контролисан применом статистичких тестова и одбацивањем екстрема.

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

Контрола уноса података у матрицу је изведена поређењем добијених података са литературним подацима

### 3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у \_\_\_\_\_ репозиторијум.

3.1.2. URL адреса \_\_\_\_\_

3.1.3. DOI \_\_\_\_\_

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

- а) Да
- б) Да, али после ембарга који ће трајати до \_\_\_\_\_
- в) Не

Ако је одговор не, навести разлог \_\_\_\_\_

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

---

---

3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен? \_\_\_\_\_

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

---

---

*Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.*

---

---

---

---

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? \_\_\_\_\_

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? Да  Не

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? Да  Не

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

Да  Не

Образложити

---

---

#### 4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

##### 4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности ([https://www.paragraf.rs/propisi/zakon\\_o\\_zastiti\\_podataka\\_o\\_licnosti.html](https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html)) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

##### 4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да Не

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

---

##### 4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да Не

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- а) Подаци нису у отвореном приступу
  - б) Подаци су анонимизирани
  - ц) Остало, навести шта
- 
- 

#### 5. Доступност података

##### 5.1. Подаци ће бити

- а) јавно доступни
- б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области
- ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

---

---

*Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:*

---

---

*5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.*

---

## **6. Улоге и одговорност**

*6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података*

\_\_\_\_\_ Срђан Соколовић srdjan0083@gmail.com \_\_\_\_\_

*6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима*

\_\_\_\_\_ Срђан Соколовић srdjan0083@gmail.com \_\_\_\_\_

*6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима*

\_\_\_\_\_ Срђан Соколовић srdjan0083@gmail.com \_\_\_\_\_