

Određivanje veličine kapi u Karrovoj koloni

Ančić, Ana

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:829369>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ

Ana Ančić

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2024

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ
KEMIJSKO INŽENJERSTVO

Ana Ančić

ODREĐIVANJE VELIČINA KAPI U KARROVOJ KOLONI

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: prof.dr.sc. Aleksandra Sander,

Članovi ispitnog povjerenstva:

prof.dr.sc. Aleksandra Sander

prof.dr.sc. Krunoslav Žižek

prof.dr.sc. Stanislav Kurajica

Zagreb, rujan 2024.

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Aleksandri Sander na prihvaćanju mentorstva, na stručnom vodstvu, razumijevanju i strpljivosti, te svom uloženom trudu i pomoći koju je pružala prilikom izrade ovog završnog rada. Zahvaljujem se i pok. dr. sc. Ani Petračić na pomoći prilikom izrade eksperimentalnog dijela. Zahvaljujem se mojoj obitelji, mojim prijateljima i dečku na neiscrпноj podršci, ljubavi i pomoći koju su mi pružali za vrijeme studiranja.

SAŽETAK:

U ovom radu eksperimentalno je određena veličina kapi u Karrovoj koloni s ciljem da se ispita utjecaj različitih brzina pulzacije plitica i utjecaj različite geometrije rupica na pliticama. Radi lakše interpretacije dobivenih podataka rezultati su prikazani kumulativnom funkcijom i funkcijom gustoće raspodjele te su izračunate statističke veličine (mod, medijan, širina raspodjele, Sauterov srednji promjer). Također su procijenjeni parametri položaja i parametri raspršenosti iz LN i RRSB funkcija raspodjele. Korištenjem plitice iste raspodjele i veličine rupica te povećanjem intenziteta miješanja ostvareni su najpovoljniji uvjeti za provođenje ekstrakcije u Karrovoj koloni jer osiguravaju najbolji kontakt dviju faza, odnosno najveću specifičnu međufaznu površinu nastankom više kapljica manjih dimenzija.

Ključne riječi: emulzija ulja i vode, raspodjela veličina kapi, Karrova kolona, Sauterov srednji promjer

ABSTRACT

In this work, the determination of the droplet sizes in the Karr column was carried out with the aim of investigating the influence of different pulsation rates of the plates and the influence of different geometries of the holes on the plates. To facilitate the interpretation of the data obtained, the results are represented by the cumulative function and the distribution density function and statistical quantities (mode, median, distribution width, Sauter mean diameter) are calculated. In addition, location parameters and parameters giving the spread of the distribution were estimated from LN and RRSB functions. When using plates with the same distribution and hole size and by increasing the mixing intensity, the most favorable conditions for performing the extraction in a Karr column were achieved, as they ensure the best contact between the two phases, meaning the largest interphase surface due to the formation of more droplets of smaller size.

Key words: oil and water emulsion, droplet size distribution, Karr column, Sauter mean diameter

SADRŽAJ:

SADRŽAJ:	7
1. UVOD	19
2. TEORIJSKI DIO	20
2.1. Disperzni sustavi	20
2.2. Emulzija	22
2.2.1. Stabilnost emulzija	24
2.2.2. Emulzija ulja i vode.....	25
2.3. Određivanje veličine kapi.....	26
2.3.1. Ekvivalentni promjer.....	26
2.3.2. Definiranje raspodjele veličina kapi.....	27
2.3.3. Statističke veličine.....	29
2.4. Karrova kolona.....	31
3. EKPERIMENTALNI DIO	34
3.1. Svrha eksperimenta	34
3.2. Materijali i metode	34
3.3. Eksperimentalni podaci:	36
4. REZULTATI I RASPRAVA	38
5. ZAKLJUČAK	48
6. POPIS KRATICA I SIMBOLA	49
7. LITERATURA.....	50
8. PRILOG:	51

1. UVOD

Disperzni sustavi su, zahvaljujući svojim specifičnim svojstvima, široko zastupljeni u industrijama kao što su farmaceutska, prehrambena, kozmetička, kemijska i mnogim drugim. Često se pojavljuju u obliku emulzija. Emulzije su vrsta disperznih sustava koje se sastoje od dvije nemješljive kapljevine, te se njihovim miješanjem ostvaruje disperzija kapljica u drugoj kapljevini. Ovisno o tome koja se faza odabire kao kontinuirana faza a koja kao disperzna razlikujemo emulziju ulja u vodi i vode u ulju. Iako su načinjene od istih kapljevina one mogu imati različita svojstva, što je od velike važnosti kada se provodi ekstrakcija. Ekstrakcija je tehnološki proces izdvajanja komponente pomoću selektivnog otapala. Budući da se tijekom ekstrakcije prijenos tvari odvija preko međufazne površine, potrebno je osigurati dobar kontakt dviju faza. Bolji kontakt, kada se provodi ekstrakcija u sustavu kapljevina-kapljevina, ostvaruje se podešavanjem volumnog udjela i intenziteta miješanja emulzije, na što se posebno mora paziti jer povećavanjem volumnog udjela i intenziteta miješanja može doći do inverzije faza. Za rad s velikim protocima kao i emulzijama koristi se kontinuirana Karrova kolona s pulzirajućim pliticama. Pulzacijom plitica omogućuje se miješanje kapljevina, a perforacijom plitice različitom geometrijom može se utjecati na raspodjelu veličina kapi koja nastaje.

Cilj ovog rada je istražiti utjecaj promjene brzine pulzacija plitica Karrove kolone i utjecaj korištenja plitica različite geometrije rupica na veličinu i raspodjelu veličina kapi koje nastaju. Raspodjela veličina kapi određena je metodom digitalne analize slike.

2. TEORIJSKI DIO

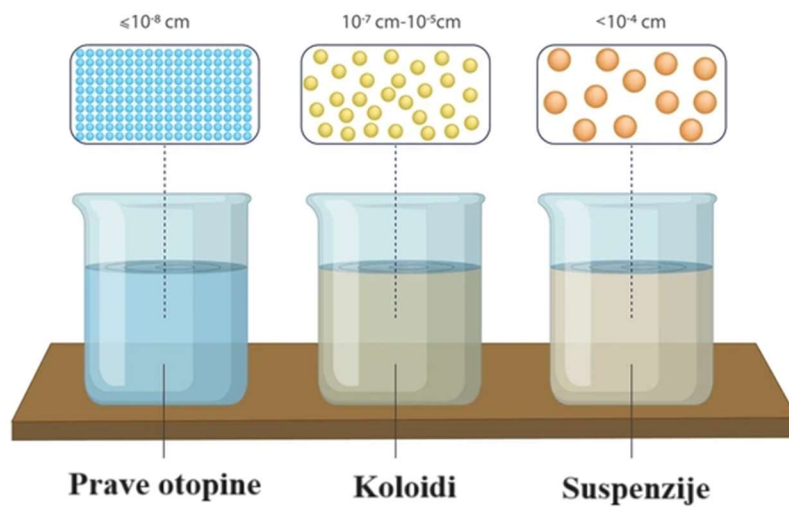
2.1. Disperzni sustavi

Disperzni sustav je sustav u kojem je jedna faza raspodijeljena (dispergirana) u drugoj fazi. Sastoji se od disperzne faze i disperznog sredstva. Disperzna faza je diskontinuirana faza, odnosno komponenta koja je raspršena u drugoj fazi. Disperzno sredstvo je kontinuirana faza u kojoj je disperzna faza raspršena, a nazivamo ju i dispergensom. Obje faze mogu biti u sva tri agregatna stanja (krutina, kapljevina ili plin), te njihovom kombinacijom nastaju različiti disperzni sustavi (Tablica 1.)[1].

Tablica 1. Disperzni sustavi [1]

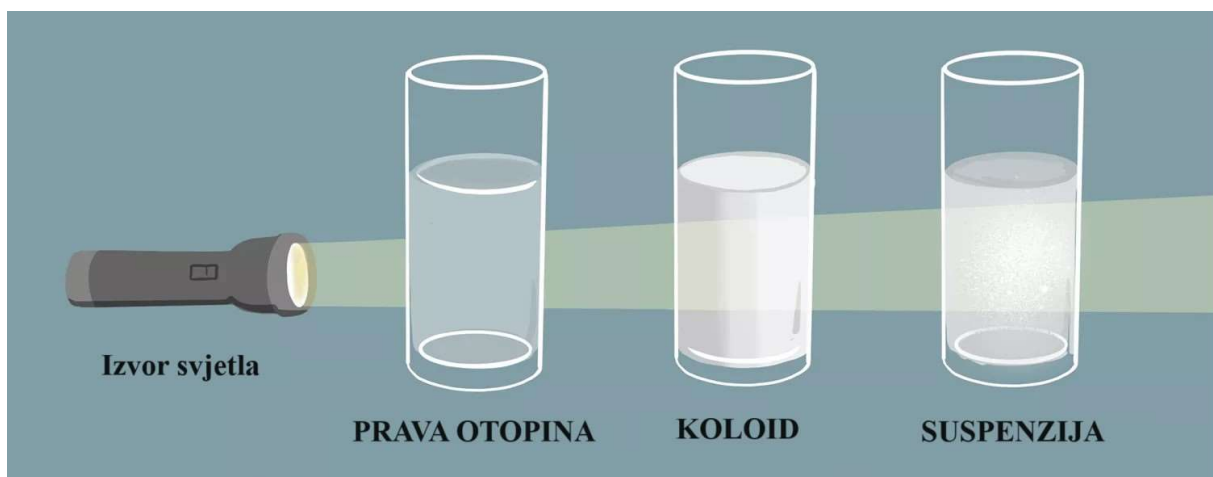
	DISPERZNO SREDSTVO			
DISPERZNA FAZA		Krutina	Kapljevina	Plin
	Krutina	Čvrsti sol	Suspencija, sol	Dim
	Kapljevina	Čvrsta emulzija, gel	Emulzija	Aerosol
	Plin	Čvrsta pjena	Pjena	

Disperzni sustavi se koriste u industrijama kao što su farmaceutska, prehrambena, kozmetička te mnoge druge, a upotrebljavaju se ovisno o specifičnim svojstvima i karakteristikama koji odgovaraju zahtjevima procesa. Neka od glavnih svojstava disperznih sustava su veličina, oblik i raspodjela veličina čestica, gustoća, viskoznost fluida, stabilnost sustava i površinska svojstva. Veličina čestica utječe na svojstva kao stabilnost, poroznost, optička svojstva i boju. [2] Disperzni se sustavi prema veličini dispergiranih čestica dijele na grubo disperzne, koloidno disperzne i molekulsko disperzne sustave. (Slika 1)



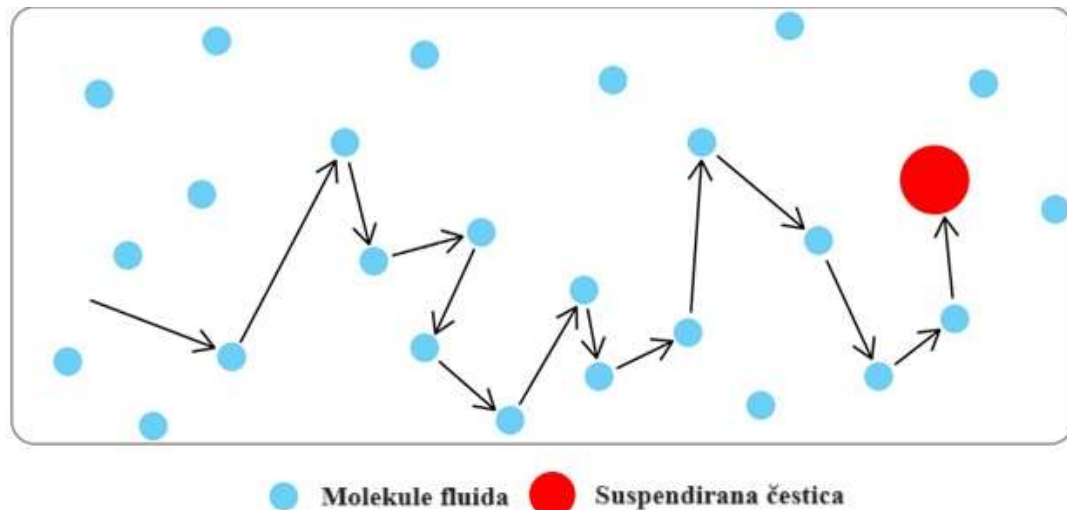
Slika 1. Prikaz veličina disperznih sustava

Grubo disperzni sustavi se još zovu i suspenzije. Čestice su im veće od 100nm i vidljive su pod mikroskopom, te raspršuju svjetlost prilikom sudara s česticom što je poznato kao optičko svojstvo pod nazivom Tyndallov efekt.[1,3] (Slika 2) Grubo disperzni sustavi su nestabilni i s vremenom će sedimentirati (npr. brašno i voda).



Slika 2. Pojava Tyndallovog efekta kod disperznih sustava

Koloidi sadrže čestice veličine od 1nm do 100nm te za razliku od suspenzija ne sedimentiraju ili sedimentiraju jako sporo. Za njih je također karakterističan Tyndallov efekt i Brownovo gibanje. Brownovo gibanje je nasumično gibanje čestica nastalo kao posljedica kinetičke energije molekula fluida zbog koje se te molekule gibaju i sudaraju s česticama u koloidu (Slika 3.). [4,8,9]

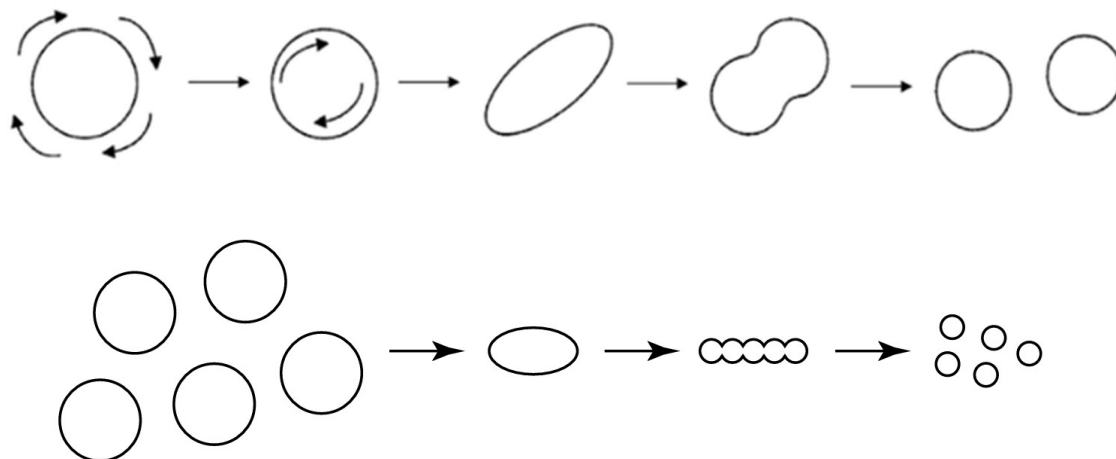


Slika 3. Brownovo gibanje

Molekulske disperzni sustavi nazivaju se i prave otopine, bistre su i sadrže čestice manje od 1nm, nema vidljivih čestica prema tome nemaju optička svojstva i ne dolazi do sedimentacije (npr. morska voda). [1,3]

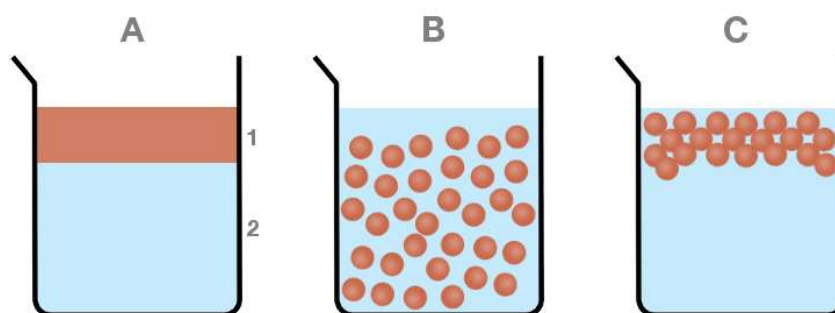
2.2. Emulzija

Emulzija je nestabilna smjesa dvije ili više nemješljivih kapljevina. Nastaje emulgiranjem, odnosno raspršivanjem jedne kapljevine u drugoj što se može ostvariti miješanjem, ultrazvučnom homogenizacijom i homogenizacijom pri povišenom tlaku. [2] Cilj u pripremi emulzija je dobivanje što sitnijih kapljica a to se postiže razbijanjem većih kapi (Slika 4.). Time se povećava međufazna površina, a to rezultira i porastom Gibbsove energije što čini sustav nestabilnim. [9]



Slika 4. Proces deformacije i pucanja kapi u kapljice [2 i 9]

Kako bi pripravljena emulzija ostala stabilna dodaju se emulgatori. Emulgatori su površinski aktivne amfipatske molekule¹ čija je funkcija pripomoći stvaranju sitnih kapljica te održati nastalu emulziju u stanju homogene disperzije. Djeluju tako što stvaraju monomolekularni sloj između površina faza kapljevine čime smanjuju površinsku napetost i sprječavaju njihovo spajanje [9]. Prestankom miješanja ili dodatkom demulgatora² dispergirane se kapljice spajaju u nakupine te se emulzija ponovno razdvaja na faze (Slika 5.). [5,6]



Slika 5. A) Sustav s dvije nemješljive kapljevine

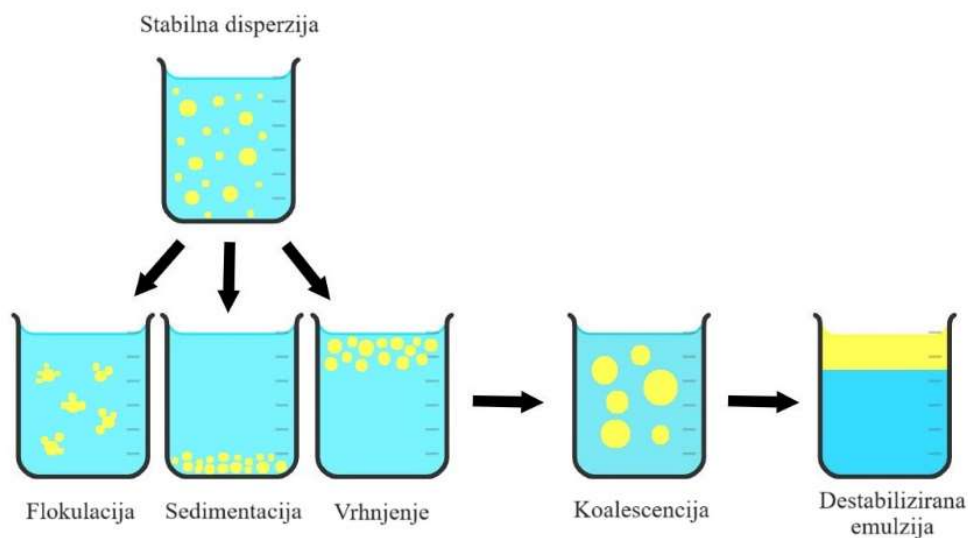
B) Emulzija u stanju homogene disperzije C) Separacija nestabilne emulzije

¹ Amfipatske molekule su one koje posjeduju hidrofoban (netopiv u vodi) i hidrofilan (topiv u vodi) kraj [7]

² Vrsta spojeva koja ima učinak suprotan emulgatorima te služi razdvajanju emulzija

2.2.1. Stabilnost emulzija

Sustav smatramo stabilnim kada se nalazi u stanju homogene disperzije i ostaje nepromijenjen tijekom vremena.[2] Nestabilnost emulzija prouzrokovana je velikom Gibbsovom energijom koja je posljedica međupovršinske napetosti između kapljevina koje se ne miješaju. Povećanje stupnja disperzije rezultira velikom ukupnom površinom, zbog čega je potrebno više energije da bi se takav sustav održao. Sustav prirodno teži smanjenju potrošnje energije zbog čega nastoji smanjiti nastalu površinu odjeljivanjem faza (sustav se destabilizira). Postoje različiti načini na koje dolazi do destabilizacije a to su flokulacija, koalescencija, vrhnjenje, sedimentacija, Ostwaldovo zrenje i inverzija faza. [10] Flokulacija je proces grupiranja kapljica, tvorba nakupina, kao posljedica privlačnih Van der Waalsovih sila. Do flokulacije dolazi samo kada se kapi sudare. [13] Koalescencija se pojavljuje između dviju kapljica u dodiru. Film koji dijeli kapljice se zbog razlike u tlakovima stanjuje, što dovodi do puknuća filma, te se kapljice spajaju u veće kapi. Na koalescenciju najviše utječu sudari kapljica, pojava turbulencija, ionska jakost, promjene u pH ili temperaturi otopine. Brzina koalescencije ovisi o brzini stanjivanja i puknuća filma. Do koalescencije mogu dovesti vrhnjenje i sedimentacija (Slika 5.). [9]



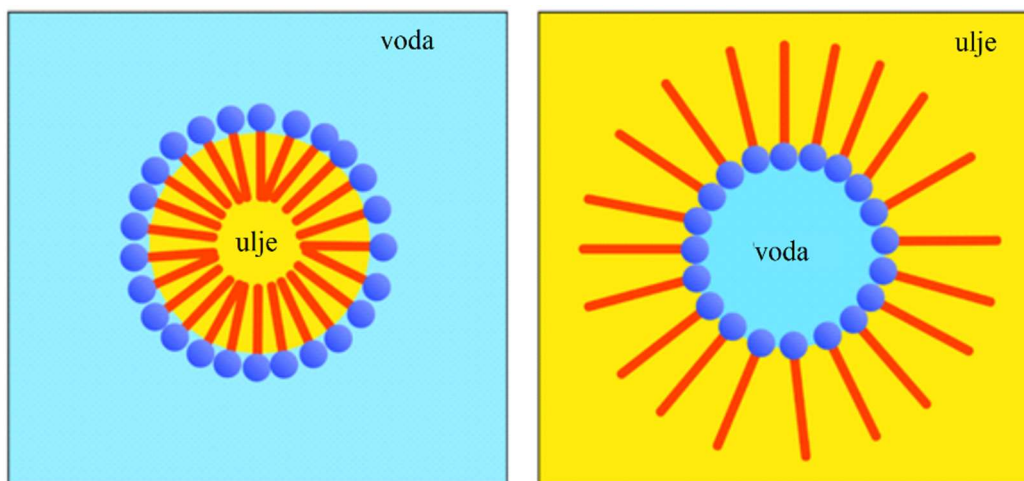
Slika 6. Razdvajanje emulzije

Vrhnjenje i sedimentacija nastaju zbog razlike u gustoćama kapljevina ili zbog dimenzija kapi. Pri vrhnjenju se lakše kapljice skupljaju na površini, dok se kod sedimentacije one gušće skupljaju na dnu zbog utjecaja gravitacijske sile. Ako su čestice manje, ako je razlika u gustoćama faza mala ili ako je viskoznost kontinuirane faze velika, manja je i vjerojatnost da će utjecaj gravitacije i Brownovog gibanja rezultirati vrhnjenjem ili sedimentacijom.

Često se ti uvjeti osiguravaju dodavanjem aditiva. Ostwaldovo zrenje je posljedica slabe topljivosti disperzne faze u kontinuiranoj. Tlak u kapljicama povećava topljivost disperzne faze, a on je veći u manjim kapljicama. Zbog toga su manje čestice topljivije od većih pa velike kapljice rastu zbog srastanja s manjima. [9] Na stabilnost emulzije utječu koncentracija, brzina miješanja i temperatura [2]. Što je više emulzija dispergirana to je ona kinetički stabilnija. [13]

2.2.2. Emulzija ulja i vode

Emulzija koja nam nastaje kada miješamo ulje i vodu ovisi o tome koju kapljevinu odabiremo kao disperznu a koju kao kontinuiranu fazu. Stoga postoje voda/ulje (npr. maslac), te ulje/voda (npr. majoneza) emulzije (Slika 3). Postoje i višestruke emulzije u kojima se unutar dispergirane kapljice nalazi dio kontinuirane faze.[2]

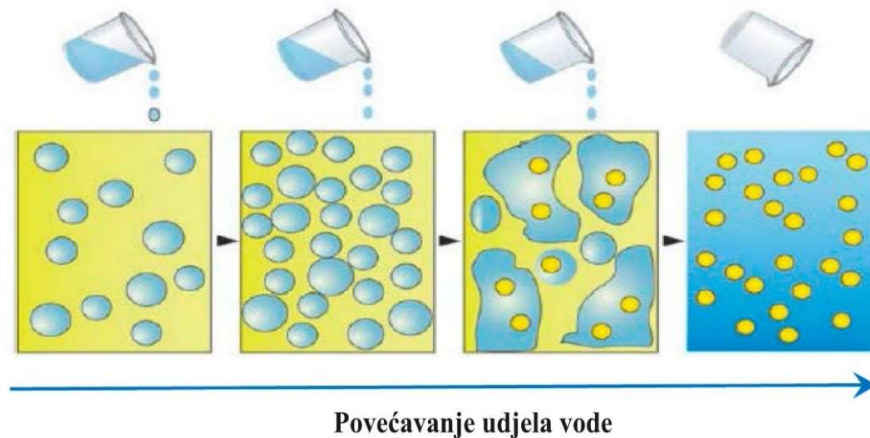


Slika 7. a) Kontinuirana faza voda, dispergirana ulje -V/U

b) Kontinuirana faza ulje, dispergirana voda -U/V

Ova dva tipa emulzija mogu biti formirana u istom sastavu istih komponenti, biti iste raspodjele veličina kapljica, ali se ipak mogu razlikovati po svojim svojstvima kao što su topljivost tvari, međufazne privlačne sile (koje određuju reološka svojstva i stabilnost) i gubitak tvari ishlapljanjem. To najviše ovisi o svojstvima kontinuirane faze te metodi pripreme. [10] Emulzija ulje/voda dobiva se uz turbulentno miješanje čime se dobiju vrlo sitne kapljice, dok se emulzija voda/ulje dobiva se uz polagano dodavanje vode i sporo miješanje.

Emulzije se mogu dobiti već spomenutom inverzijom faza, kada volumni udio komponente koju dodajemo prijeđe 70%. (Slika 8.)[11] Destabilizacija emulzije tipa ulje/voda se odvijaju flokulacijom, koalescencijom i vrhnjenjem, dok u voda/ulje sedimentacijom. [10]



Slika 8. Priprava emulzije inverzijom faza

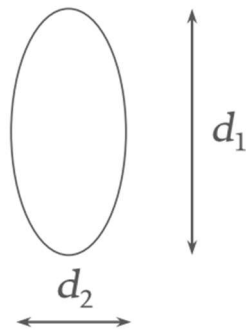
2.3. Određivanje veličine kapi

Prilikom provođenja ekstrakcije prijenos tvari i topline odvija se preko međufazne površine stoga je potrebno osigurati što bolje uvjete kako bi se ostvario željeni prijenos. Prijenos je efikasniji što je veća međufazna površina. Kako bi se istražilo u kojim procesnim uvjetima se stvara veća međufazna površina potrebno je odrediti veličinu i raspodjelu veličina nastalih kapi.

2.3.1. Ekvivalentni promjer

Kapljice najčešće nisu savršeno sferičnog oblika pa se njihove dimenzije ne mogu opisati jednom veličinom. Kako bi se pojednostavnilo računanje, širina i dužina kapljice svode se na jednu veličinu koju nazivamo ekvivalentni promjer (Slika 9.). [13]

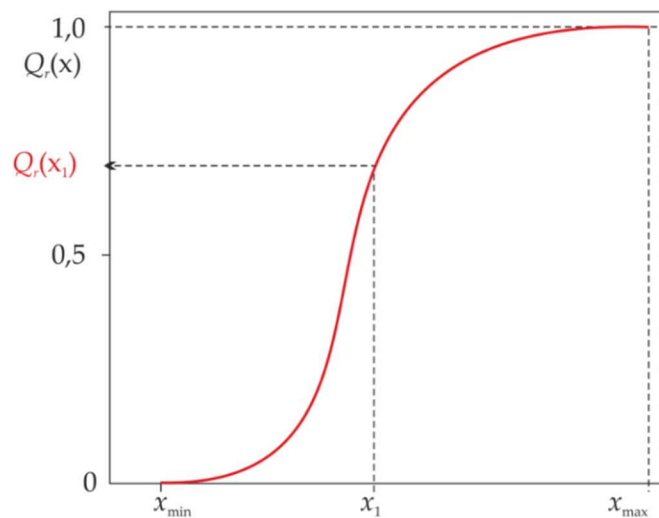
$$d_{ekv} = (d_1^2 \cdot d_2)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$



Slika 9. Određivanje ekvivalentnog promjera na asimetričnoj kapi [13]

2.3.2. Defniranje raspodjele veličina kapi

Kumulativna funkcija raspodjele ima integralni oblik $Q_r(x_i)$ (Slika 10.), a prikazuje udio čestica manjih od veličine x_i u ovisnosti o veličini x_i . [1]



Slika 10. Kumulativna funkcija [1]

Raspodjela može biti izražena brojem ($r=0$), duljinom ($r=1$), površinom ($r=2$), masom ili volumenom ($r=3$) stoga se, radi razlikovanja, funkcija označava indeksom „ r “.

Brojčana kumulativna raspodjela računa se na slijedeći način:

$$Q_0(x_i) = \sum_{i=1}^n \frac{n(x_i)}{n_{uk}} \quad (2)$$

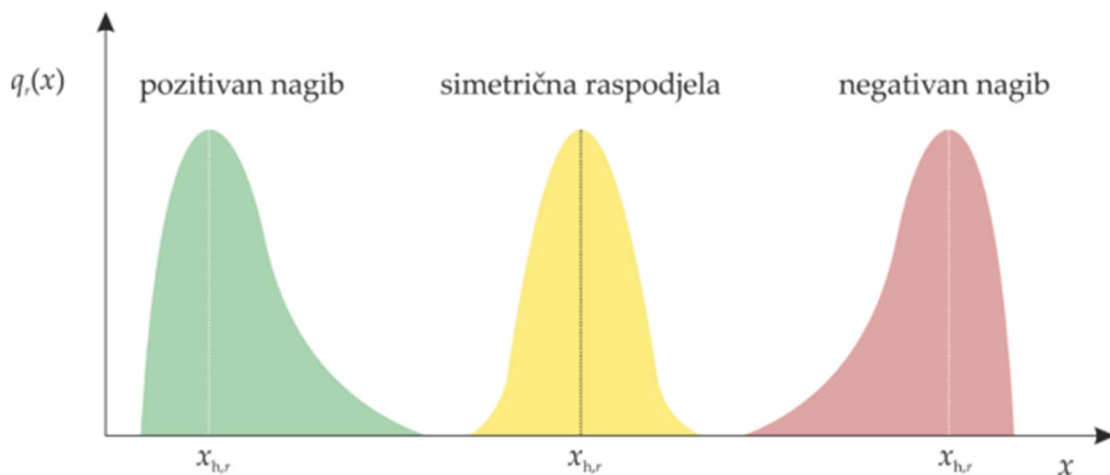
Drugi način prikazivanja raspodjele je funkcijom gustoće raspodjele (FGR) (Slika 11.). Funkcija gustoće raspodjele je funkcija diferencijalnog oblika $q_r(x)$ mjerne jedinice μm^{-1} . Računa se prema:

$$q_r(x) = \frac{dQ_r(x)}{dx} \quad (3)$$

Ona izražava udio kapi unutar intervala od x do $x+dx$, a prikazuje se u ovisnosti o srednjoj vrijednosti intervala koja se računa po formuli:

$$\bar{x}_l = \frac{x_i + x_{i-1}}{2} \quad (4)$$

Krivulja funkcije gustoće raspodjele (FGR) može biti simetrične raspodjele, a može imati nagib usmjeren u pozitivnom ili negativnom smjeru x osi koji nam opisuje promjenu funkcije gustoće u odnosu na x vrijednosti. Funkcija gustoće raspodjele može biti monomodalna, bimodalna ili multimodalna. Postojanje više maksimuma ukazuje na to da se u uzorku nalazi veći udio kapi u različitim razredima veličina. [1]



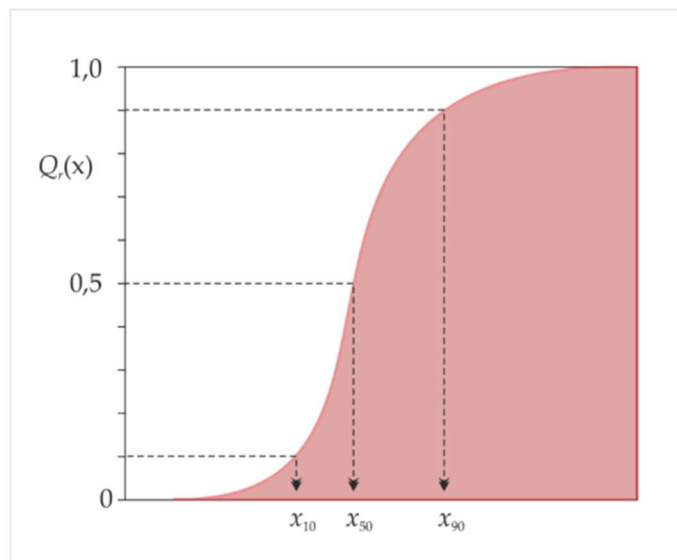
Slika 11. Funkcija gustoće raspodjele [1]

Integriranjem FGR dobivamo kumulativnu:

$$Q_r(x_i) = \int_{x_{min}}^{x_i} q_r(x_i) dx \quad (5)$$

2.3.3. Statističke veličine

Statističke veličine koriste se kako bi se jasnije interpretirala raspodjela. Njima pripadaju mod, medijan, srednji promjeri i specifična površina. U razumijevanju raspodjele podataka nam koriste i karakteristični parametri raspodjele: kvantili. Kvantili su točke koje povezuju veličinu kapi sa određenim kumulativnim udjelom, odnosno pokazuju koji udio kapi je manji od neke odabrane veličine (npr $x_{10}=20$ mm znači da je 10% čestica manje od 20 mm, može se koristiti i zapis: $Q_r(20\text{mm})=0,1$). Medijan je kvantil x_{50} . On dijeli populaciju na dva jednaka dijela odnosno govori da je 50% kapi manje od veličine x . Mod nam pokazuje koja veličina je najučestalija u uzorku, a odgovara maksimumu krivulje funkcije gustoće raspodjele. [1]



Slika 12. Kvantili [1]

Pomoću kvantila se može odrediti širina raspodjele. Ona nam daje podatak o tome koliko su podaci raspršeni, odnosno rašireni od središnje vrijednosti. Može biti u rasponu od uske do široke (Tablica 2.), a monodisperznom je nazivamo ako je 90% kapi odstupa od medijana do 5% a računa se prema:

$$S = \frac{x_{90}}{x_{10}} = \frac{x_{90}-x_{10}}{x_{50}} \quad (6)$$

Tablica 2. Širina raspodjele [1]

Monodisperzna	<1,02 (idealno 1)
Jako uska	1,02-1,05
Uska	1,05-1,5
Srednje široka	1,5-4
Široka	4-10
Jako široka	>10

2.3.3.1. Srednji promjeri

Srednji promjeri se također koriste kako bi jasnije izrazili raspodjelu veličina čestica, ali za razliku od ostalih načina prikazivanja raspodjele srednji promjeri uzimaju u obzir i udio čestica zajedno sa njihovom veličinom. Postoje aritmetički, kvadratni, kubični, geometrijski, harmonijski, volumni i površinski.

Opća definicija srednjih promjera je:

$$\bar{x}_r = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \Delta Q_r(x_i) \quad (7)$$

Za opis srednje veličine kapi u ovome radu će se koristiti površinski ili Sauterov srednji promjer. Sauterov srednji promjer se koristi u procesima poput ekstrakcije, kada je važna specifična međufazna površina. Što je u uzorku prisutniji broj manjih kapi to će vrijednost Sauterovog srednjeg promjera biti manja.

$$x_{3,2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^3 \cdot \Delta Q_r(x_i)}{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \Delta Q_r(x_i)} \quad (8)$$

2.3.3.2. Analitičke funkcije

Uz statističke veličine, za opis raspodjele veličina čestica/kapi koriste se i analitičke funkcije raspodjele. Najčešće se koriste RRSB i LN funkcije raspodjele. Obje funkcije su dvoparametarske i koriste parametar položaja i parametar raspršenosti. Kod RRSB (Rosin-

Rammler-Sperling-Bennett) n je parametar disperzije, a x_{63} parametar položaja. Što je n veći uža je raspodjela.

RRSB funkcija dana je sljedećim izrazom:

$$Q_r(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{x_{63}} \right)^n \right] \quad (9)$$

Kod LN funkcije (logaritam normalna) σ_g je parametar disperzije, a za parametar položaja se uzima medijan $x_{50,r}$. Što je veći iznos σ_g to znači da je raspodjela šira.

Parametar položaja računa se pomoću kvantila:

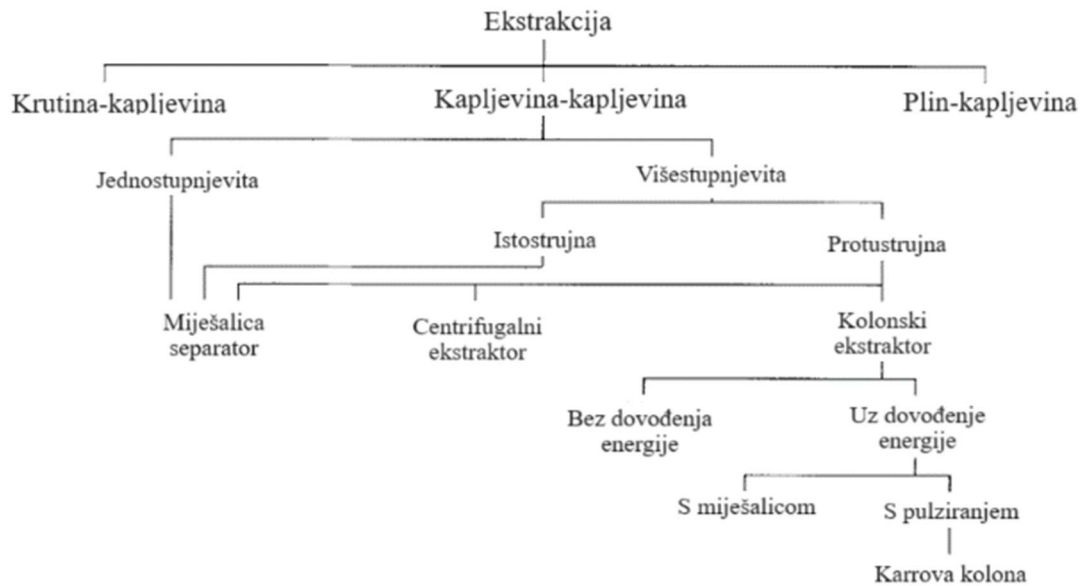
$$\sigma_g = \frac{x_{84}}{x_{50}} = \frac{x_{50}}{x_{16}} = \frac{1}{2} \frac{x_{84}}{x_{16}} \quad (10)$$

LN funkcija dana je sljedećim izrazom:

$$q_r(x) = \frac{1}{\ln \sigma \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[- \frac{(\ln x - \ln x_{50,r})^2}{2 \ln \sigma_g^2} \right] \quad (11)$$

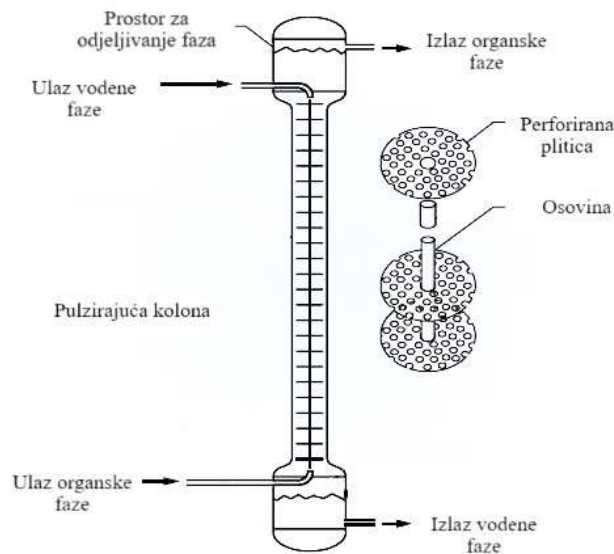
2.4. Karrova kolona

Ekstrakcija je tehnološki proces odvajanja komponenti iz homogene otopine dodavanjem selektivnog otapala koje je nemješljivo s otopinom. Otopljena tvar difundira iz otopine u otapalo do postizanja ravnoteže (šaržni procesi) ili stacionarnog (kontinuirani procesi) stanja. Kako bi se ekstrakcija provela što učinkovitije, potrebno je osigurati dobar kontakt dviju faza, odnosno razviti dovoljno veliku međufaznu površinu koja će omogućiti prijenos tvari. Uz to je potrebno osigurati i prostor za separaciju faza i njihovo odvođenje iz sustava. Danas postoje ekstrakcijski uređaji različitih izvedbi.[13] 1959. godine je Andrew Karr konstruirao Karrovu kolonu koja se koristi za ekstrakciju sustava kapljevina-kapljevina (Slika 13.). [15]



Slika 13. Podjela ekstrakcijskih uređaja [13]

Karrova kolona pripada protustrujnim kolonskim ekstraktorima što znači da se faze uvode na različitim mjestima, te da kapljevine struje u različitim smjerovima. Lakša faza se uvodi na dnu kolone, a teža na vrhu kolone. Faza koja je kontinuirana se uvodi prva i ispunjava cijelu kolonu dok se disperzna faza uvodi kroz neki oblik raspršivača ili se za raspršivanje koriste perforirane plitice (Slika 14.).[13]



Slika 14. Građa Karrove kolone

Perforiranjem plitica postiže se bolja disperzija kapljica. U većini slučajeva je 58% prostora plitice perforirano, a može biti i različite geometrije. Radi postizanja boljih hidrodinamičkih uvjeta, osovina na kojoj su pričvršćene plitice spaja se na uređaj koji kontrolira pulzaciju, odnosno podizanje i spuštanje plitica u kolonu. Karrova kolona u usporedbi s drugim pulzacijskim kolonama može ostvariti velike protoke i pogodna je za sustave sklone stvaranju emulzija. [14] Koristi se u farmaceutskoj industriji .[15]

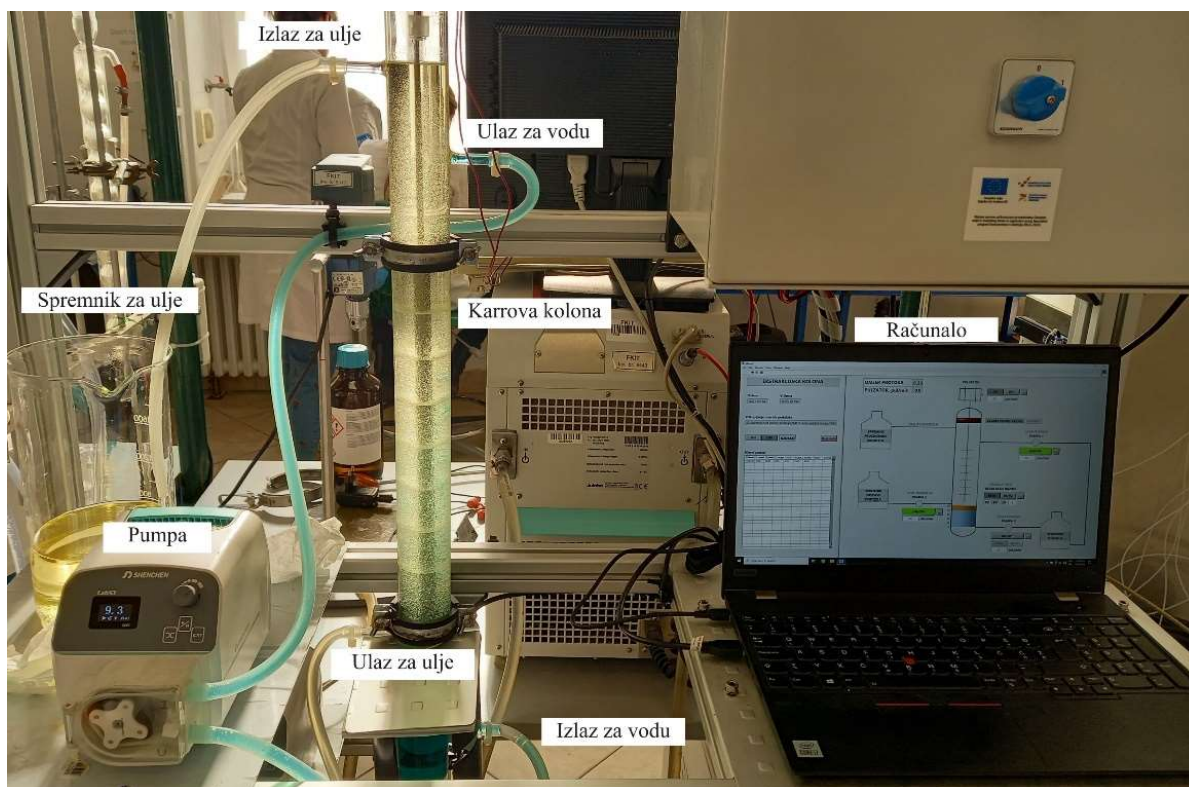
3. EKPERIMENTALNI DIO

3.1. Svrha eksperimenta

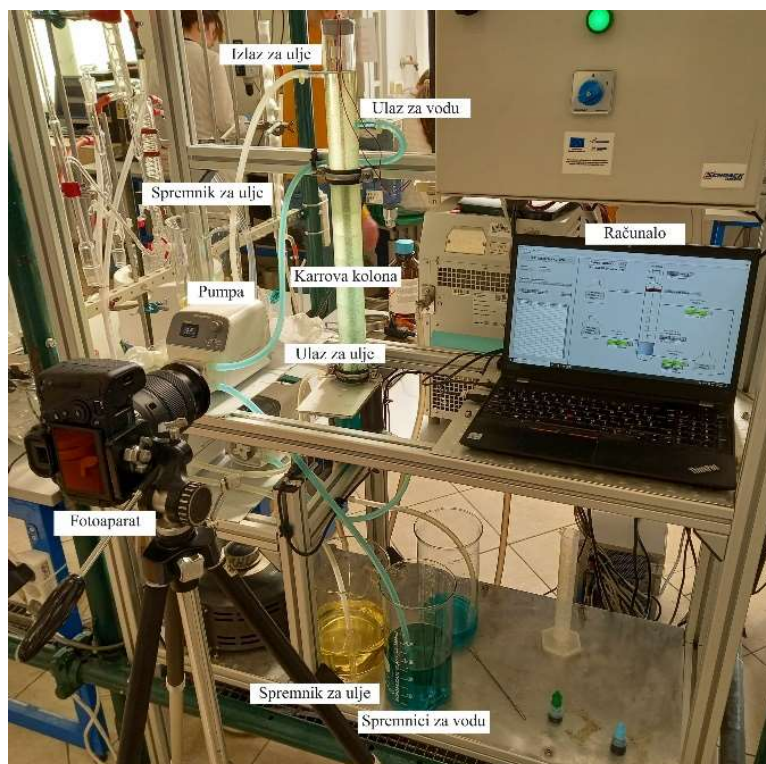
Cilj rada je istražiti utjecaj geometrije plitica (raspodjele i veličine rupica) i brzine pulzacije plitica na raspodjelu veličina nastalih kapi. Eksperimentalno dobivene raspodjele veličina kapi aproksimirane su RRSB i LN funkcijama raspodjele.

3.2. Materijali i metode

Aparatura se sastoji od četiri velika spremnika, Karrove kolone s pulzirajućim pliticama, pumpe, računala i fotoaparata (Slika 15. i Slika 16.). Korišteno je čisto suncokretovo ulje i voda koja je obojena plavom bojom za hranu kako bi se na fotografijama jasnije vidjele nastale kapljice.

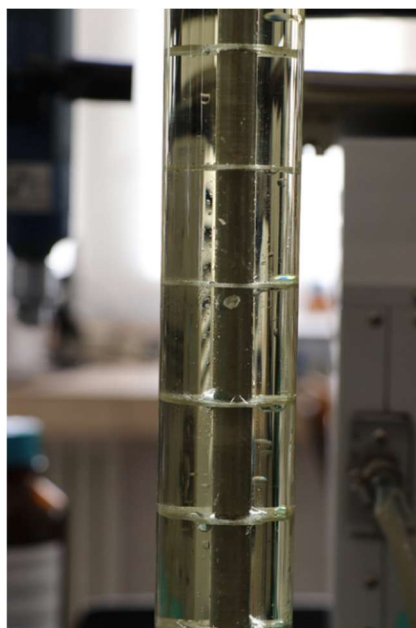


Slika 15. Aparatura



Slika 16. Aparatura s fotoaparatom

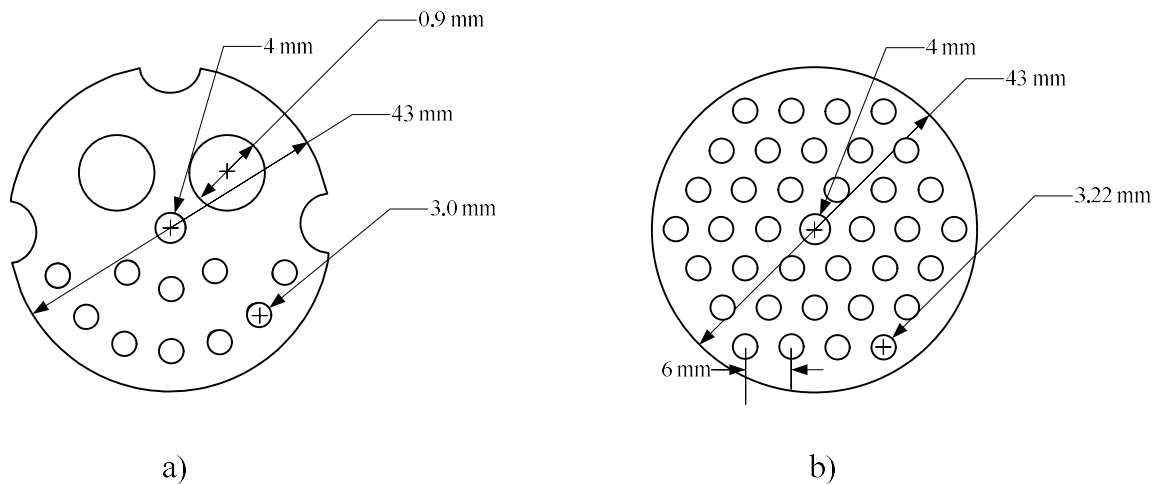
U Karrovu kolonu se prvo postavljaju plitice, a zatim se ona spaja na pumpe koje služe za kontinuirano uvođenje lakše faze (ulje) na dnu, te teže faze (obojevu vodu) na vrhu kolone. Ulje je kontinuirana faza i ispunjava cijelu kolonu. (Slika 17.)



Slika 17. Prikaz kolone ispunjene uljem

Voda koja ulazi na vrhu kolone pod utjecajem gravitacije pada na dno kolone gdje se odvodi u spremnik, a putem se raspršuje na pliticama u kapljice. Ulje je manje gustoće od vode pa se odjeljuje pri vrhu kolone i na tom mjestu odvodi u spremnik.

Tijekom pokusa korištene su dvije različite vrste plitica (Slika 18.).



Slika 18. Geometrijske karakteristike plitica korištenih u radu: a) plitica 1; b) plitica 2

Brzina pulzacija plitica te protoci objiju faza podešavani su putem računala (LabVIEW), a za bilježenje eksperimentalnih rezultata korišten je fotoaparati. Nakon prikupljanja rezultata provodila se analiza slike u programu Motic Images Plus 3.0.

3.3. Eksperimentalni podaci:

Tablica 3. Uvjeti provedbe eksperimenta

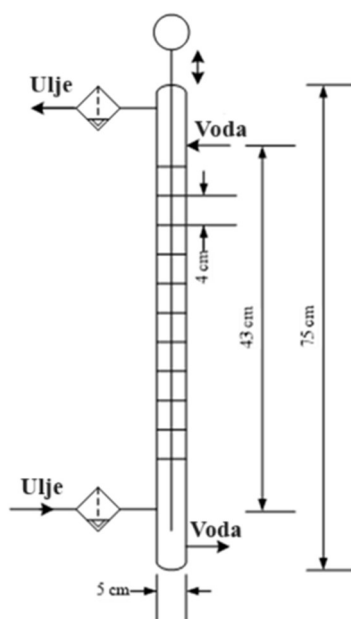
Volumen ulja	30 ml/min protok ulja
Protok vode	10 ml/min
Razmak među pliticama	4 cm
Temperatura zraka u labosu	25°C
Tlak	1018,6 hPa

Pokus je započet s pliticom 1 (Slika 18. a)) i najmanjom brzinom pulzacija. Eksperiment se provodi do postizanja stacionarnog stanja kad se snimaju fotografije koje se kasnije analiziraju. Nakon toga, prelazi se na sljedeću brzinu pulzacija (za pliticu s različitim veličinama rupica i jednake veličine rupica koristili smo jednake brzine pulzacija) (Tablica 4.).

Tablica 4. Prikaz promjene brzine pulzacija po eksperimentu

Eksperiment	Pulzacija/minuti
1	10
2	15
3	20
4	25
5	30

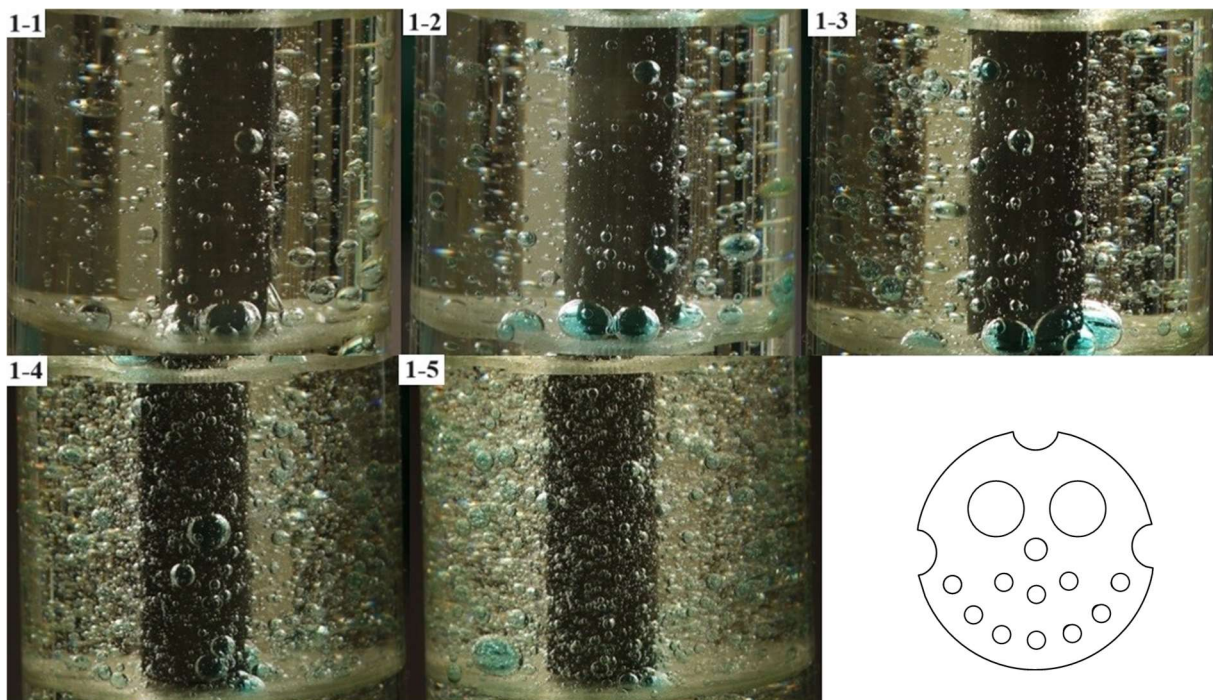
Za korekciju dimenzija mjehurića mjerenim pod povećanjem u programu potrebno nam je poznavanje stvarnih dimenzija Karrove kolone (Slika 18.)



Slika 18. Dimenzije Karrove kolone

4. REZULTATI I RASPRAVA

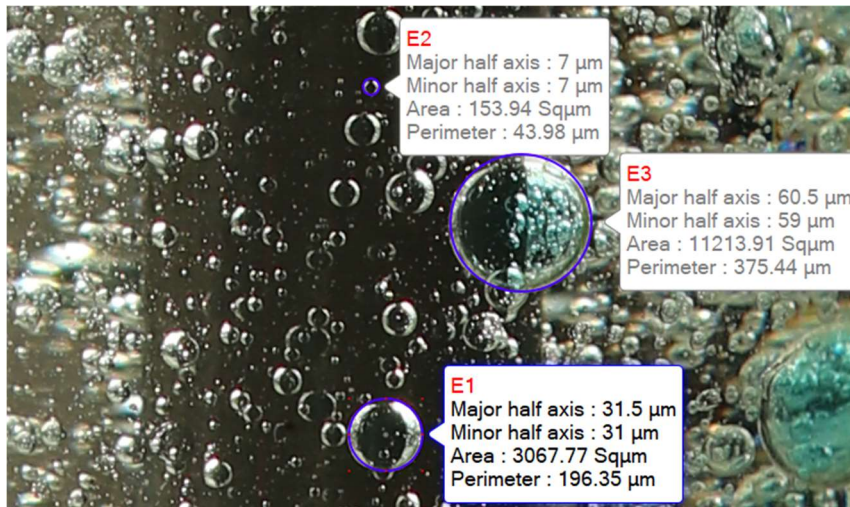
Utjecaj intenziteta miješanja i geometrije plitica na veličinu i raspodjelu veličina kapi istražen je u Karrovoj koloni s pulzacijskim pliticama. Protoci kontinuirane i disperzne faze odabrani su tako da je pri svim brzinama pulzacije plitica ulje bilo kontinuirana faza, odnosno da ne dolazi do inverzije faza. Fotografije dijela kolone na kojima je procijenjena veličina i raspodjela veličina kapi prikazane su na slikama 20 i 21. Na oznaci u kutu slike prvi broj označava vrstu plitice, drugi broj označava pulzaciju redom kao u Tablici 4. (npr. 1-4 znači plitica 1, brzina pulzacije 4 tj. 25 pulzacija/min).



Slika 19. Utjecaj intenziteta miješanja na veličinu kapi – plitica 1

Može se uočiti da porastom brzine pulzacije plitica (od 1 do 5) raste broj kapljica u koloni. S obzirom da se volumni udio disperzne faze ne mijenja, veći broj kapi posljedica je formiranja kapi manjeg promjera. Naime, pri većem intenzitetu miješanja više se energije dovodi u sustav što za posljedicu ima razbijanje većih kapi u manje. U eksperimentu sa Pliticom 2 nastalo je više kapljica manjih dimenzija u odnosu na one dobivene sa Pliticom 1 koja ima i otvore većih dimenzija. Nastale kapi uglavnom su asimetrične. Budući da kapi nisu simetrične potrebno ih je sve svesti na istu veličinu. Iz izmjerene duljine i širine kapi izračunat je ekvivalentni promjer,

d_{ekv} , korištenjem jednadžbe 1. Stvarne dimenzije kapi dobivene su korekcijom uz poznato povećanje fotografije te razmak između plitica.



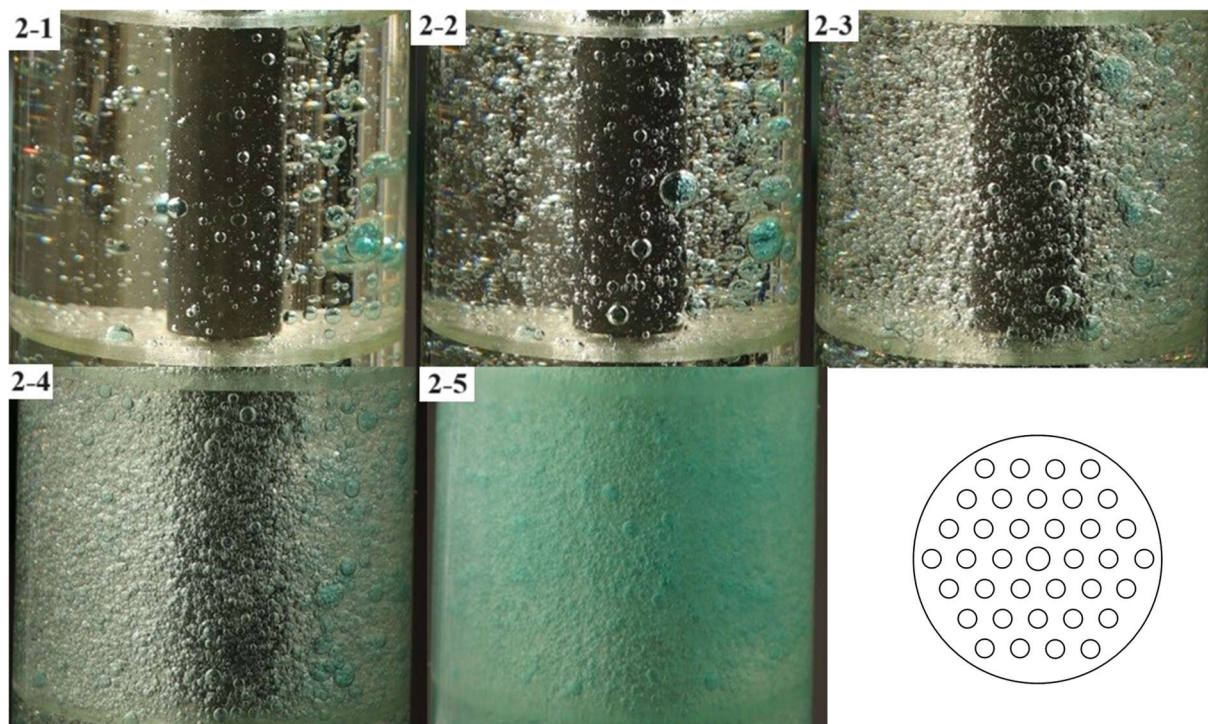
Slika 20. Analiza fotografija u programu Motic Images Plus 3.0

Analiza slika provedena je u spomenutom programu Motic Images Plus 3.0. čime je određen ukupan broj kapi te izmjerena njihova projicirana površina, duljina i širina. (Slika 20.) Obradene su sve slike izuzev 2-5 (Slika 21.). Zbog velikog boja kapljica i njihovih malih dimenzija nije bilo moguće provesti analizu slike zbog smanjene vidljivosti pod povećanjem.

U tablici 5. prikazan je ukupan broj kapi, te najmanji i najveći ekvivalentni promjer kapi za sve provedene eksperimente. Utjecaj brzine pulzacija na broj nastalih kapi značajniji je za pliticu 2, koja ima sve otvore jednakih dimenzija. Tek pri najvećoj brzini pulzacija plitica uočava se značajniji utjecaj na minimalni i maksimalni ekvivalentni promjer kapi, kada su formirane kapi najmanjih veličina. Kako se na fotografijama vidi samo dio formiranih kapi, nije moguće znati stvarni broj kapi i njihove veličine. Pouzdanim se mogu smatrati podaci u eksperimentima pri manjim intenzitetima miješanja kada je formiran manji broj kapi jer se kapi mogu lakše uočiti i izmjeriti. S porastom broja kapi odstupanja od stvarnog broja kapi također rastu.

Tablica 5. Broj kapi te minimalni i maksimalni promjer kapi

	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4
Broj kapi, -	909	2257	2600	3651	4545	2095	3154	7023	8604
$x_{ekv, min} \cdot 10^2, [\text{mm}]$	2,71	2,43	2,45	2,42	2,33	2,46	3,61	2,23	0,84
$x_{ekv, max}, [\text{mm}]$	3,43	2,46	4,76	2,64	1,44	2,47	2,74	2,38	1,78

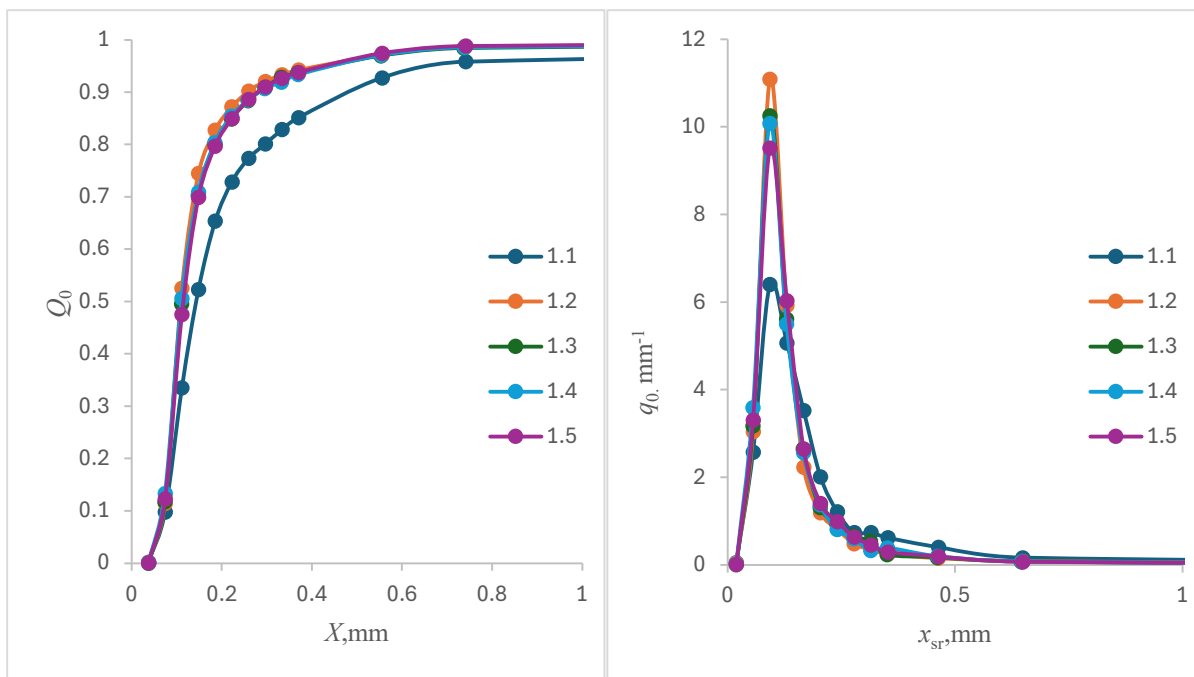


Slika 21. Utjecaj intenziteta miješanja na veličinu kapi – plitica 2

Nakon definiranja veličinskih intervala te brojanja kapi unutar pojedinog intervala, izračunate su kumulativna funkcija raspodjele i funkcija gustoće raspodjele.

Utjecaj intenziteta miješanja na raspodjelu veličina formiranih kapi prikazan je grafički na slikama 22. i 23. Dobivene ovisnosti su karakterističnog oblika, pri čemu su funkcije gustoće raspodjele monomodalne s pozitivnim nagibom.

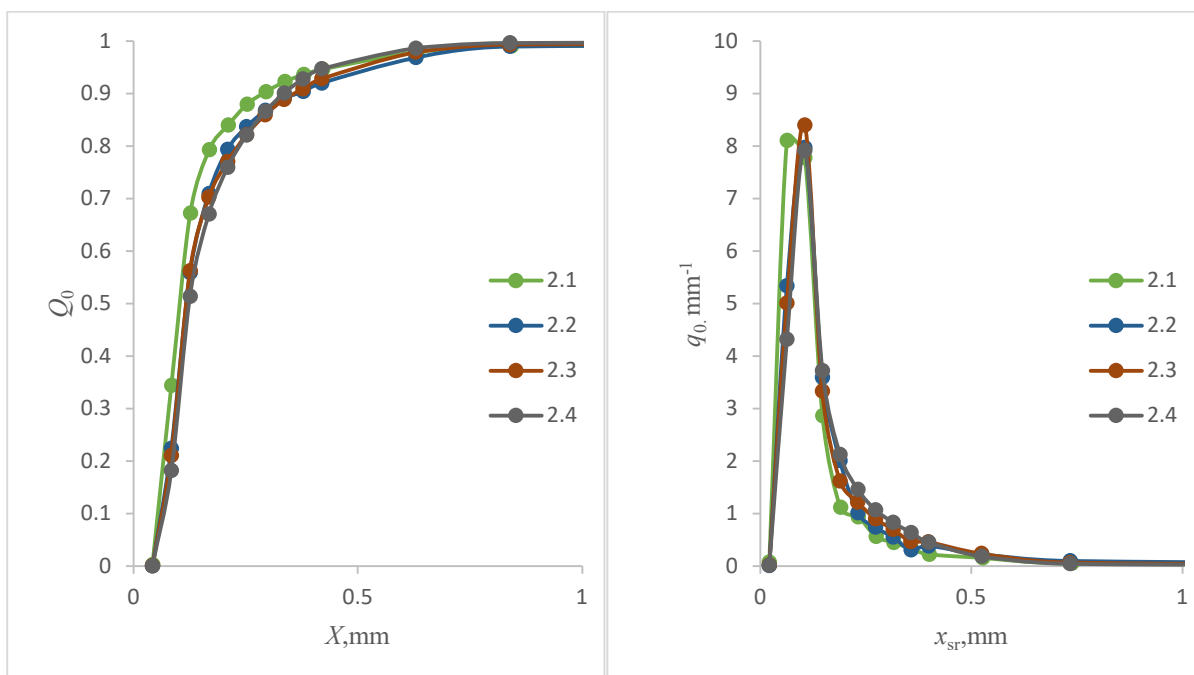
Porastom intenziteta miješanja očekuje se formiranje kapi manje veličine. Pri najmanjem intenzitetu miješanja, korištenjem plitica koje imaju otvore različitih veličina (plitica 1), kumulativna funkcija raspodjele pomaknuta je u područje većih veličinskih frakcija dok je udio najučestalije veličine kapi najmanji. Porastom intenziteta miješanja od 15 do 30 pul/min uočava se da dolazi do preklapanja funkcija raspodjele, pri čemu udio najučestalije veličine kapi opada. Slični rezultati dobiveni su i korištenjem plitice s otvorima iste veličine, pri čemu se udio najučestalije veličine kapi gotovo i ne mijenja s povećanjem intenziteta miješanja.



a)

b)

Slika 22. Utjecaj intenziteta miješanja na raspodjelu veličina kapi – plitica 1: a) kumulativna funkcija raspodjele; b) funkcija gustoće raspodjele

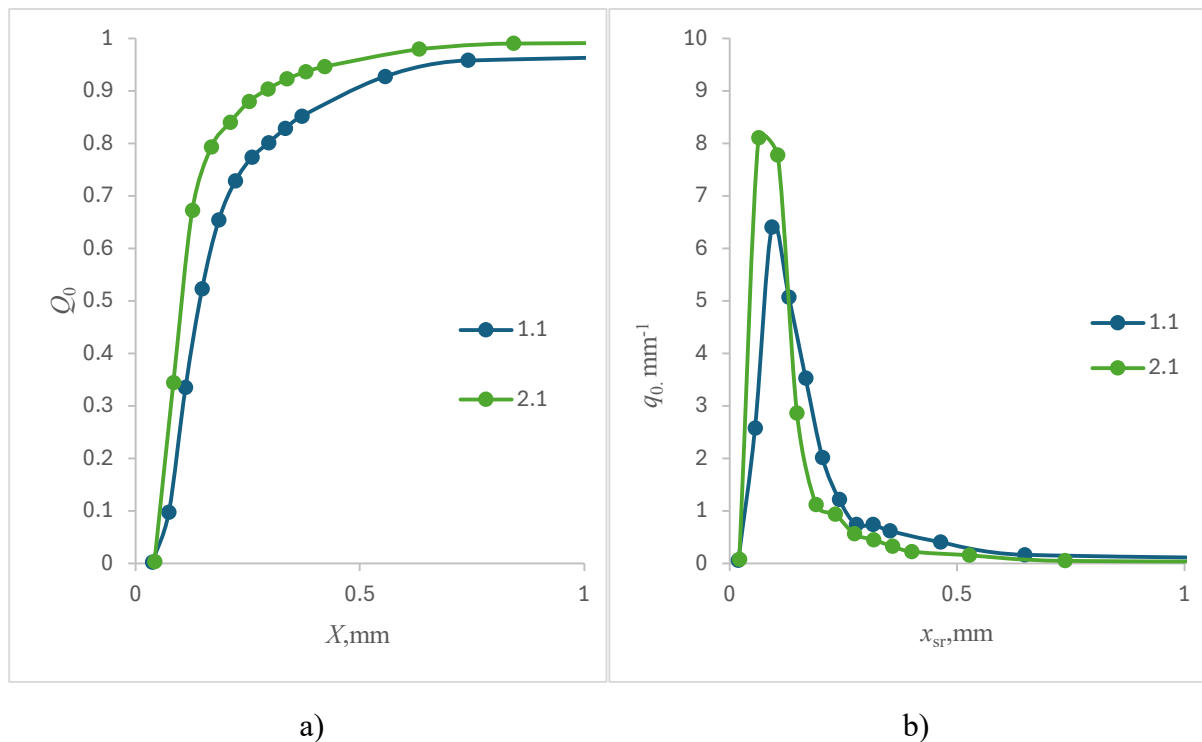


a)

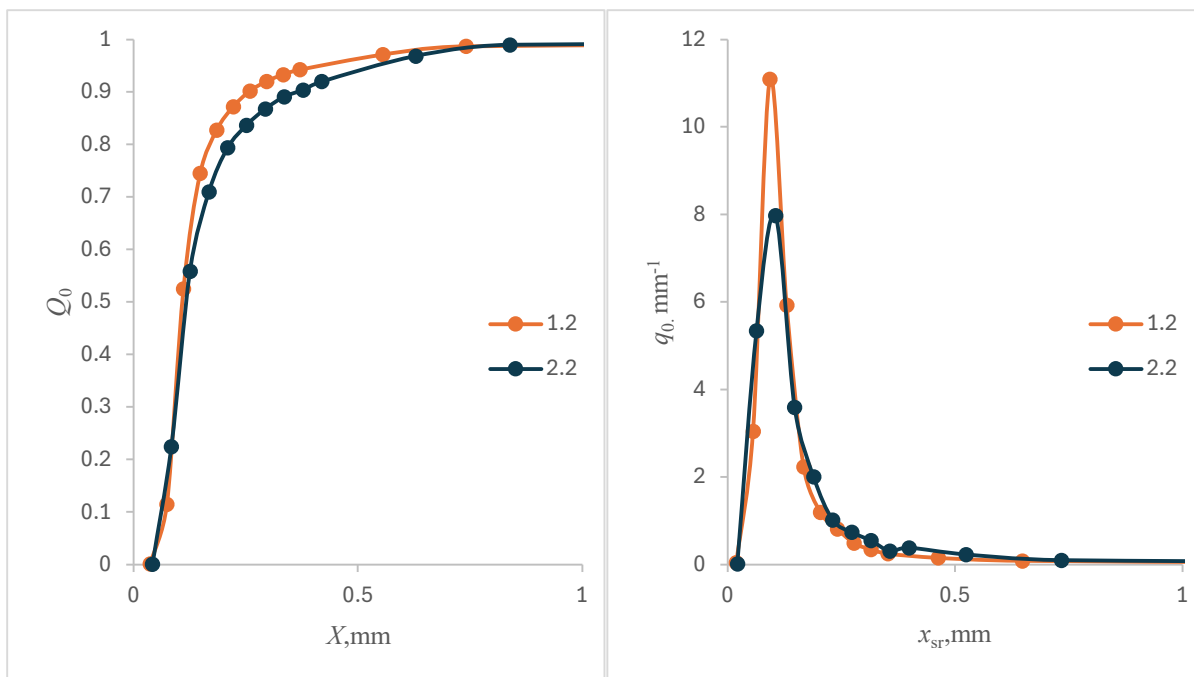
b)

Slika 23. Utjecaj intenziteta miješanja na raspodjelu veličina kapi – plitica 2: a) kumulativna funkcija raspodjele; b) funkcija gustoće raspodjele

Na slikama 24. do 27. prikazan je utjecaj geometrije plitica na raspodjelu veličina kapi. Pri najmanjem intenzitetu miješanja kumulativna funkcija raspodjele kapi formiranih korištenjem plitice 1 pomaknuta je prema većim veličinskim frakcijama u odnosu na pliticu 2, što je i očekivano jer plitica 2 ima veći broj otvora manjeg promjera. U skladu s time je udio najučestalije veličine kapi veći za pliticu 2. Pri većim brzinama pulzacija plitica dobiveni su obrnuti rezultati – kumulativna funkcija pomaknuta je prema manjim veličinskim frakcijama a udio najučestalije veličine kapi je veći. Mogući razlog, jedan od najvećih nedostataka kolone s pulzirajućim pliticama, je pojava povratnog toka, pri čemu plitica povlači kapi na gornji koncentracijski stupanj. Pri tome se mijenja i raspodjela veličina kapi. Može doći do koalescencije ali i razbijanja kapi na manje veličine. Kapi će lakše proći kroz otvor većeg promjera pa je povratni tok vjerojatniji za pliticu 1. Osim toga, pri većoj brzini pulzacija veća je i vjerojatnost za pojavu povratnog toka.



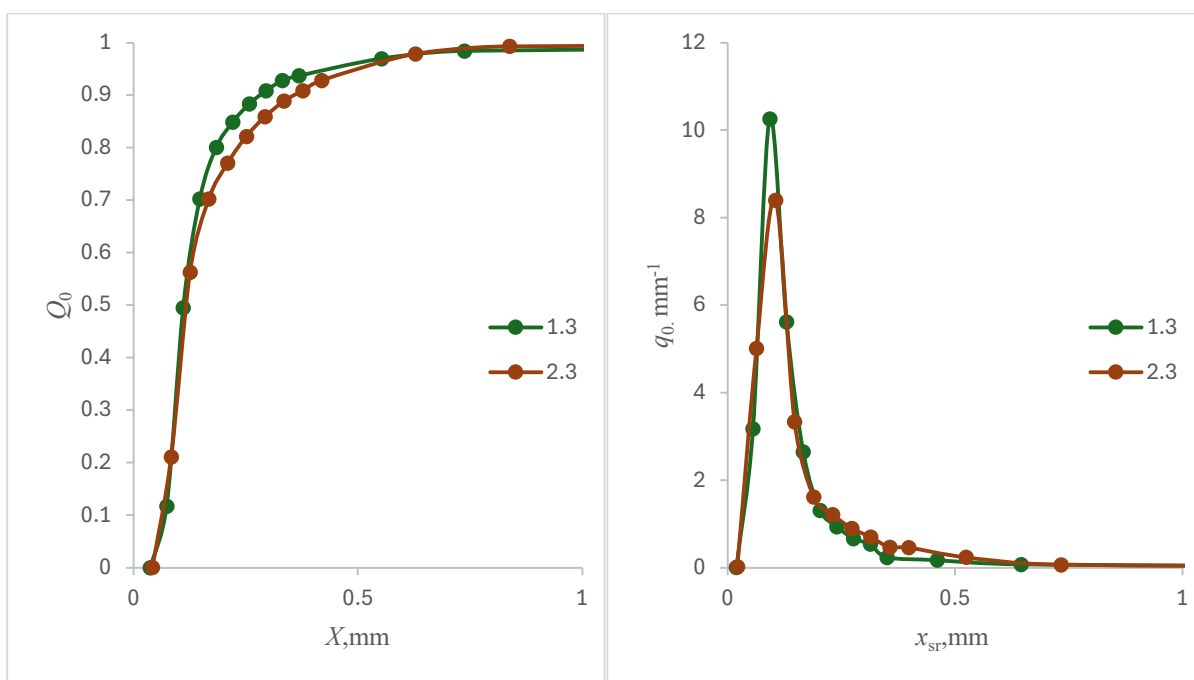
Slika 24. Utjecaj geometrije plitica na raspodjelu veličina kapi (10 pulzacija/min): a) kumulativna funkcija raspodjele; b) funkcija gustoće raspodjele



a)

b)

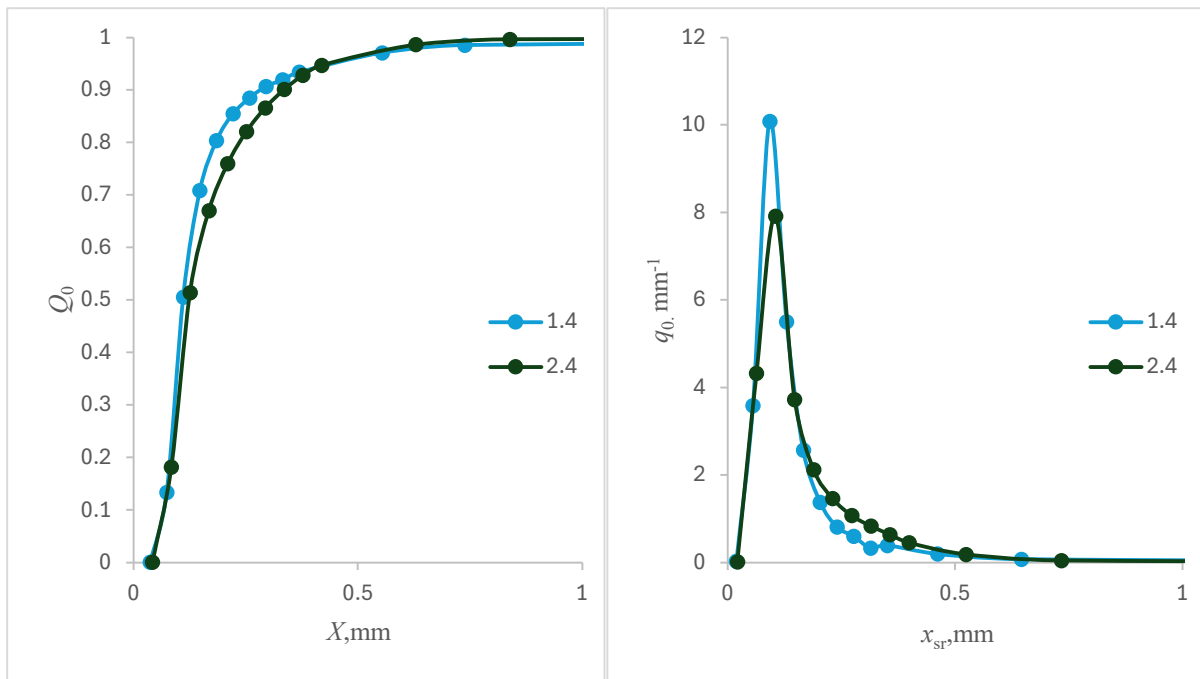
Slika 25. Utjecaj geometrije plitica na raspodjelu veličina kapi (15 pulzacija/min): a) kumulativna funkcija raspodjele; b) funkcija gustoće raspodjele



a)

b)

Slika 26. Utjecaj geometrije plitica na raspodjelu veličina kapi (20 pulzacija/min): a) kumulativna funkcija raspodjele; b) funkcija gustoće raspodjele



a)

b)

Slika 27. Utjecaj geometrije plitica na raspodjelu veličina kapi (25 pulzacija/min): a) kumulativna funkcija raspodjele; b) funkcija gustoće raspodjele

Na temelju eksperimentalno određenih raspodjela veličina kapi određene su statističke veličine. Vrijednosti prikazane u Tablici 6. očitane su i izračunate na temelju svih izmjerenih podataka, odnosno podaci nisu grupirani u razrede kao što je to učinjeno za grafičke prikaze kumulativne funkcije i funkcije gustoće raspodjele. Kumulativne funkcije raspodjele, za oba načina prikaza u potpunosti se preklapaju. Međutim, uočeno je da se vrijednosti očitanih i izračunatih podataka razlikuju, pa su uzeti kompletni setovi podataka. S obzirom na fotografije dijela kolone pri različitim brzinama pulzacije (slike 19 i 21) bilo je očekivano smanjenje statističkih veličina i srednjeg Sauterovog promjera s porastom brzine pulzacije. Za pliticu 1, s različitim veličinama perforacija, vrijednost medijana pri najmanjem intenzitetu miješanja je najveći. Daljnji porast intenziteta miješanja ne utječe značajno na njegovu vrijednost. Za pliticu 2 uočeno je da je medijan najveći pri najvećoj brzini pulzacija. Uzrok tome može biti što paralelno raste i broj većih kapi te se medijan znatno ne mijenja. Razlog što ne opada broj većih kapi je posljedica toga što se kapi ne razbiju na pliticama u manje kapljice već prođu neoštećeno kroz rupice na pliticama ili se provuku kroz prostor između stjenke kolone i plitice. Površinska napetost vode je jako velika i raste što je kap manjih dimenzija stoga je potrebna veća sila, odnosno veća

brzina pulzacija da se one razbiju. Također putem može doći i do koalescencije kapljica te već spomenutog povratnog toka.

Tablica 6. Statističke veličine i parametri

	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4
Medijan, x_{50} [mm]	0,143	0,108	0,111	0,109	0,114	0,098	0,116	0,115	0,124
Mod, $x_{h,r}$ [mm]	0,105	0,117	0,104	0,117	0,097	0,119	0,109	0,109	0,118
Širina raspodjele, S	6,547	3,554	3,967	4,069	3,962	4,428	5,154	4,929	4,542
Sauterov promjer, $x_{3,2}$ [mm]	1,305	1,161	1,368	0,687	0,639	0,684	0,994	0,797	0,661
Specifična površina, a [m ² /m ³]	1149	1292	1097	2182	2346	2194	1510	1883	2269

Vrijednosti najučestalije veličine kapljica nalaze se u intervalu od 0.097 do 0.118 mm. Širina raspodjele govori kolika je raspršenost podataka, te se iz Tablice 2. vidi da većina vrijednosti odgovara širokoj raspodjeli, izuzev eksperimenata 1-2, 1-3 i 1-5 koji odgovaraju srednje širokoj. Sauterov promjer je mjera srednje veličine kapi i njegova vrijednost je to manja što je veći broj manjih kapi. Dobiveni rezultati upućuju na to da je najveći broj manjih kapi formiran pri 30 pul/min za pliticu 1 te 25 pul/min za pliticu 2. Vrijednosti su mu manje za pliticu 2, što je i očekivano.

Specifična površina izračunata je za poznati volumni udio disperzne faze ($\varphi_V = 0,25$) korištenjem jednadžbe:

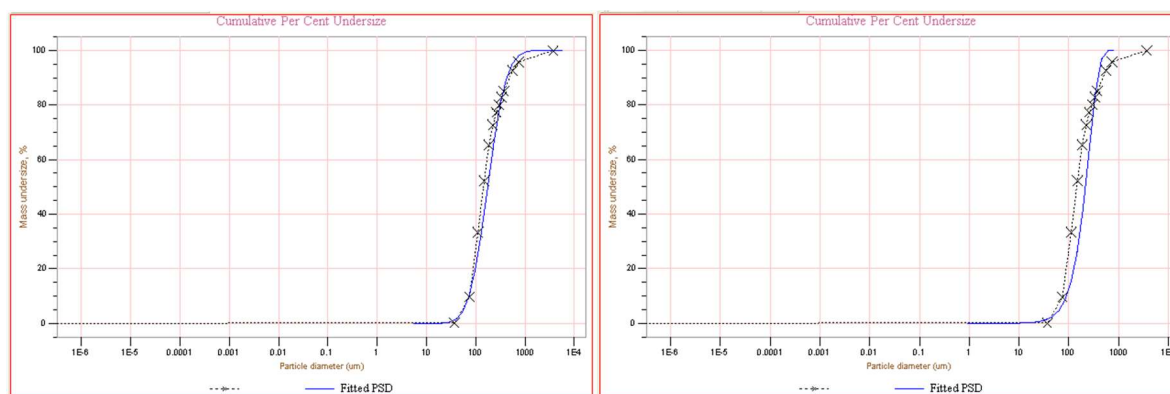
$$a = \frac{6 \cdot \varphi_V}{x_{3,2}} \quad (12)$$

Najveća specifična međufazna površina ostvarena je pri najvećoj brzini pulzacija za obje plitice.

Raspodjele veličina kapi aproksimirane su pomoću LN i RRSB funkcija raspodjele. U nastavku su tablično prikazani parametri položaja i parametri raspodjele, te statističke veličine i kvantili. Za usporedbu su prikazane i eksperimentalne vrijednosti. Grafovi LN i RRSB raspodjele nalaze se u prilogu. Raspodjelu veličina kapi bolje opisuje LN funkcija, što se vidi na slici 28. Usporede li se vrijednosti procijenjenih parametara položaja za obje funkcije s eksperimentalnim podacima vidi se da vrijednosti odstupaju u velikoj mjeri (za pliticu 1: RRSB: 26,39 do 74,07 %; LN: 21,76 do 32,04 %; za pliticu 2: RRSB: 59,74 do 86,87 %; LN: 29,42 do 38,00 %).

Tablica 7. Parametri analitičkih funkcija - Plitica 1

		pulzacija/min				
Plitica 1		10	15	20	25	30
RRSB	n	2,15	2,27	2,59	2,34	2,61
	$x_{63}, \mu\text{m}$	225,28	214,17	227,49	220,38	227,85
	$x_{63, \text{exp}}, \mu\text{m}$	178,24	123,04	130,79	129,29	133,86
	R^2	0,901	0,875	0,852	0,866	0,856
LN	σ_g	1,97	1,83	1,78	1,83	1,76
	$x_{50}, \mu\text{m}$	174,45	135,86	146,12	141,07	146,64
	$x_{50, \text{exp}}, \mu\text{m}$	143,27	107,74	110,66	109,02	113,79
	R^2	0,975	0,958	0,953	0,959	0,959



a)

b)

Slika 28. Aproximacija eksperimentalnih podataka analitičkim funkcijama raspodjele (plitica 1; 10 pul/min): a) LN; b) RRSB

Tablica 8. Parametri analitičkih funkcija - Plitica 2

		pulzacija/min			
Plitica 2		10	15	20	25
RRSB	n	1,90	2,39	2,29	2,45
	$x_{63}, \mu\text{m}$	219,52	251,84	246,48	248,08
	$x_{63, \text{exp}}, \mu\text{m}$	117,47	141,17	141,48	155,30
	R^2	0,838	0,838	0,859	0,872
LN	σ_g	1,97	1,84	1,83	1,75
	$x_{50}, \mu\text{m}$	132,33	160,04	157,80	160,21
	$x_{50, \text{exp}}, \mu\text{m}$	98,37	115,97	114,53	123,79
	R^2	0,944	0,950	0,965	0,977

Usporedimo li vrijednosti procijenjenih statističkih veličina i kvantila s eksperimentalnim vrijednostima (tablica 8 i 9) može se zaključiti da obje funkcije najbolje procjenjuju x_{95} , (15 pul/min za pliticu 1 te 25 pul/min za pliticu 2), dok su najlošiji rezultati dobiveni pri najmanjoj brzini pulzacija. Osim toga, LN funkcija relativno dobro procjenjuje najučestaliju veličinu kapi.

Tablica 9. Statističke veličine i kvantili- Plitica 1

		pulzacija/min				
Plitica 1		10	15	20	25	30
LN	$x_{3,0}$, μm	362,20	243,60	247,00	252,10	244,20
	Mod, μm	113,40	92,86	95,57	96,46	104,60
	$x_{3,2}$, μm	138,60	113,10	123,60	117,50	124,80
	x_{50} , μm	174,40	135,90	147,00	141,10	146,60
	x_5 , μm	56,00	49,16	55,53	51,17	56,60
	x_{95} , μm	545,80	377,30	386,60	391,00	382,30
RRSB	$x_{3,0}$, μm	279,60	230,60	236,20	234,90	236,50
	Mod, μm	172,80	148,40	173,40	154,90	200,80
	$x_{3,2}$, μm	155,00	135,40	156,70	142,80	157,50
	x_{50} , μm	215,30	182,20	197,50	188,50	198,00
	x_5 , μm	64,13	57,74	72,21	62,10	72,87
	x_{95} , μm	425,3	347,6	347,60	351,90	347,20
exp	x_5 , μm	56,00	49,16	55,53	51,17	56,60
	x_{95} , μm	545,80	377,30	386,60	391,00	382,30
	Mod, μm	104,59	117,17	104,04	116,78	97,11

Tablica 10. Statističke veličine i kvantili- Plitica 2

		pulzacija/min			
Plitica 2		10	15	20	25
LN	$x_{3,0}$, μm	275,70	289,80	282,40	263,60
	Mod, μm	86,02	109,30	107,90	114,40
	$x_{3,2}$, μm	105,00	132,70	131,40	136,90
	x_{50} , μm	132,30	160,00	157,80	160,20
	x_5 , μm	42,38	57,47	57,18	62,68
	x_{95} , μm	414,80	447,10	437,80	410,90
RRSB	$x_{3,0}$, μm	252,10	267,10	264,40	261,30
	Mod, μm	140,00	178,20	171,60	216,30
	$x_{3,2}$, μm	118,90	165,10	157,20	165,40
	x_{50} , μm	181,10	216,00	210,10	213,60
	x_5 , μm	46,09	72,55	67,50	73,82
	x_{95} , μm	390,7	398,8	397,70	388,20
exp	x_5 , μm	58,83	62,68	64,39	65,85
	x_{95} , μm	438,91	516,06	485,89	427,27
	Mod, μm	118,92	109,90	109,77	118,37

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu ispitan je utjecaj intenziteta miješanja i geometrije rupica na pliticama na raspodjelu veličina kapi formiranih raspršivanjem vode u ulju pri stalnom volumnom protoku obiju faza u kontinuiranoj Karrovoj koloni s pulzirajućim pliticama. Eksperimentalno dobivene raspodjele veličina kapi aproksimirane su LN i RRSB funkcijama raspodjele, te su procijenjene statističke veličine i parametri analitičkih funkcija.

Grafovi funkcije raspodjele pokazuju očekivane rezultate pri manjim brzinama pulzacija, dok pri većim brzinama odstupaju, isto vrijedi i za medijan. Mod je veličine od 0,097 do 0,118 mm, a širina raspodjele odgovara širokoj i srednje širokoj. Povećavanjem brzine pulzacije ekvivalentni promjeri i vrijednosti srednjeg Sauterovog promjera se smanjuju, dok specifična međufazna površina raste. LN funkcija bolje opisuje raspodjelu veličina kapi i procjenjuje mod od RRSB funkcije, dok vrijednosti parametara položaja pokazuju velika odstupanja za obje funkcije.

Porast intenziteta miješanja i korištenje plitice iste geometrije rupica rezultirao je nastankom većeg broja kapljica manjih dimenzija, stoga je za ostvarivanje boljih uvjeta pri provođenju ekstrakcije u Karrovoj koloni povoljnije odabrati pliticu jednake raspodjele i veličine rupica uz veći intenzitet miješanja pazeći da ne dođe do stvaranja emulzije ili inverzije faza.

6. POPIS KRATICA I SIMBOLA

x_i - veličina čestica

d_{ekv} - ekvivalentni promjer, mm

d_1 - visina (veća duljina kapi), mm

d_2 - širina (manja duljina kapi), mm

$Q_r(x_i)$ - Opći zapis kumulativne funkcije, %

$Q_0(x_i)$ - Brojčana kumulativna funkcija, %

$n(x_i)$ - broj čestica određene veličine

n_{uk} - ukupan broj čestica u uzorku

$q_r(x_i)$ – funkcija gustoće raspodjele, mm^{-1}

$dQ_r(x)$ - udio čestica veličine i

X_{sr} - srednji promjer, mm

S - širina raspodjele

A - specifična površina izračunata je za poznati

φ_V - volumni udio disperzne faze

x_{10} – kvantil mm

$x_{3,2}$ - Sauterov ili površinski promjer, mm

$x_{3,0x}$ – kubični srednji promjer, mm

$x_{50,r}$ - medijan, parametar položaja (LN), mm

σ_g - parametar disperzije (LN)

n - parametar disperzije (RRSB)

x_{63} - parametar položaja (RRSB), mm

Kratice:

FGR - Funkcija gustoće raspodjele

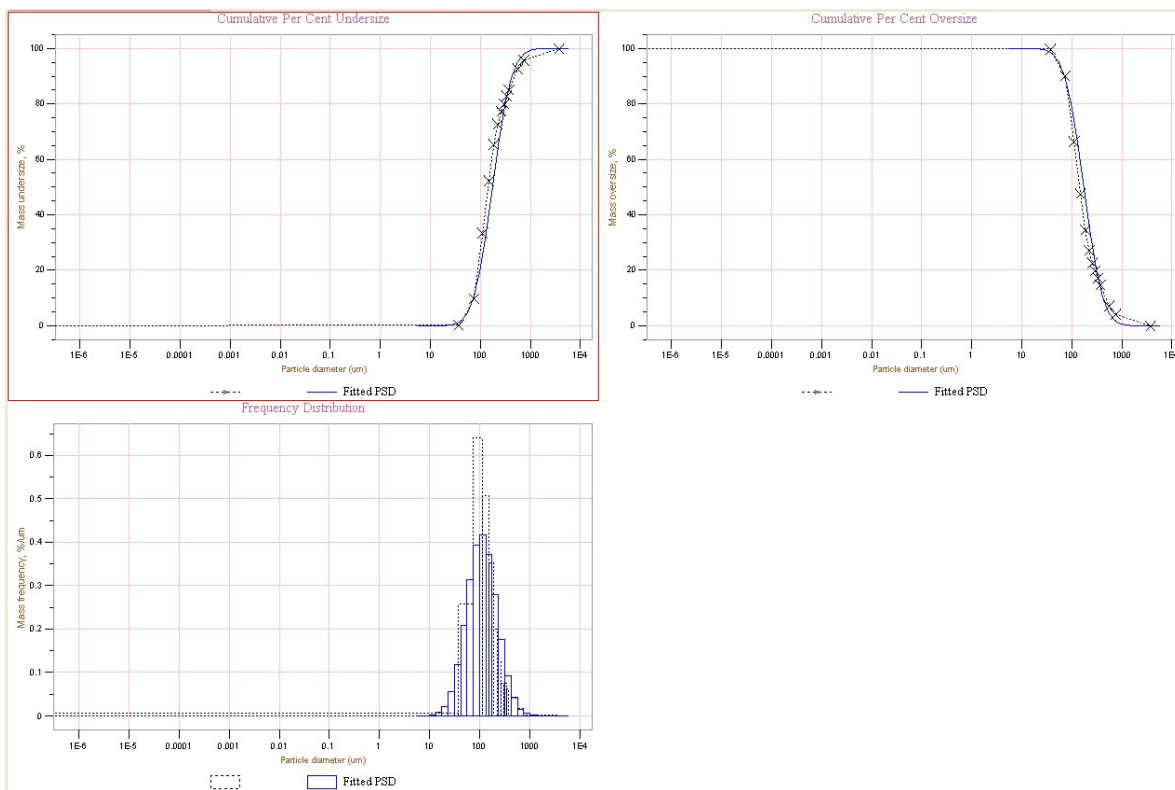
RRSB – Rosin-Rammler-Sperling-Bennett

7. LITERATURA

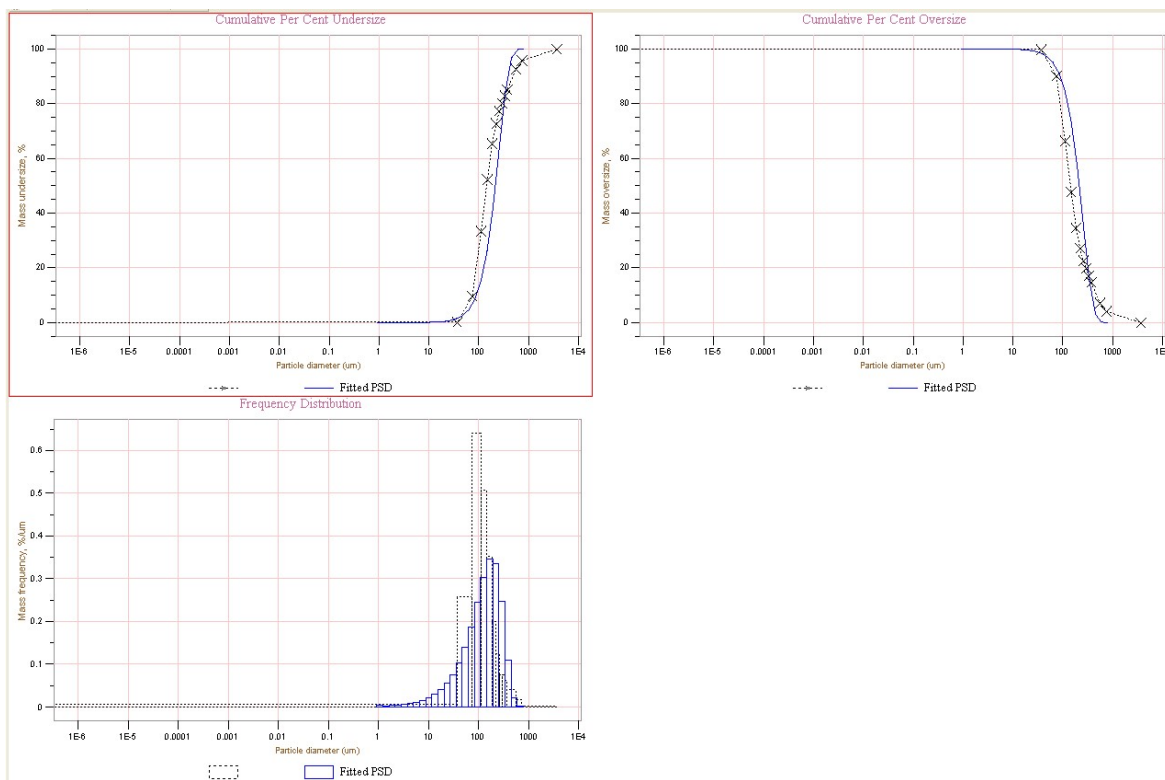
1. Matijašić G.; Uvod u mehaničko procesno inženjerstvo. Sveučilišni udžbenik Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilišta u Zagrebu (FKIT), Zagreb, 2022.
2. Akbari S. & A.H.Nour International Journal of Innovative Research and Scientific Studies, 1, 2018, Pages: 11-17
3. Filipović, I., Lipanović, S: Opća i anorganska kemija. Školska knjiga, Zagreb, 1995.
4. Tyndallov efekt. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013 – 2024. Pristupljeno 21.3.2024.
5. Emulzija. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. – 2024. Pristupljeno 21.3.2024. <<https://www.enciklopedija.hr/clanak/emulzija>>
6. Emulgatori. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. – 2024. Pristupljeno 21.3.2024. <https://www.enciklopedija.hr/clanak/emulgatori>
7. amfifilnost. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013 – 2024. Pristupljeno 25.3.2024. <https://www.enciklopedija.hr/clanak/amfifilnost>
8. Brownovo gibanje. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. – 2024. Pristupljeno 8.5.2024. <https://www.enciklopedija.hr/clanak/brownovo-gibanje>
9. Norde W., Colloids and Interfaces in Life Sciences, Wageningen and University of Groningen Groningen, The Netherlands
10. Walstra P; Physical Chemistry of food; New York; Marcel Decker; 2003
11. Laurier L. Schramm Emulsions, Foams, and Suspensions Fundamentals and Applications 2005 Copyright 2005 Weinheim ISBN:3-527-30743-5
12. Franck A., Interfacial Rheometry and the stability of Foams and emulsions, TA Instruments Germany, 2005
13. Sander A, Toplinsko procesno inženjerstvo, nastavni materijali, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, 2024.
14. Seader, J. D., Henley, E. J. Separation process principles , 2nd Edition . New York, (2006).
15. Zhang, J.; Li, W.; Mumford, K.A.; Fei, W.; Stevens, G.W.; Wang, Y. Mass Transfer Study and Combined Model for a Karr Column

8. PRILOG:

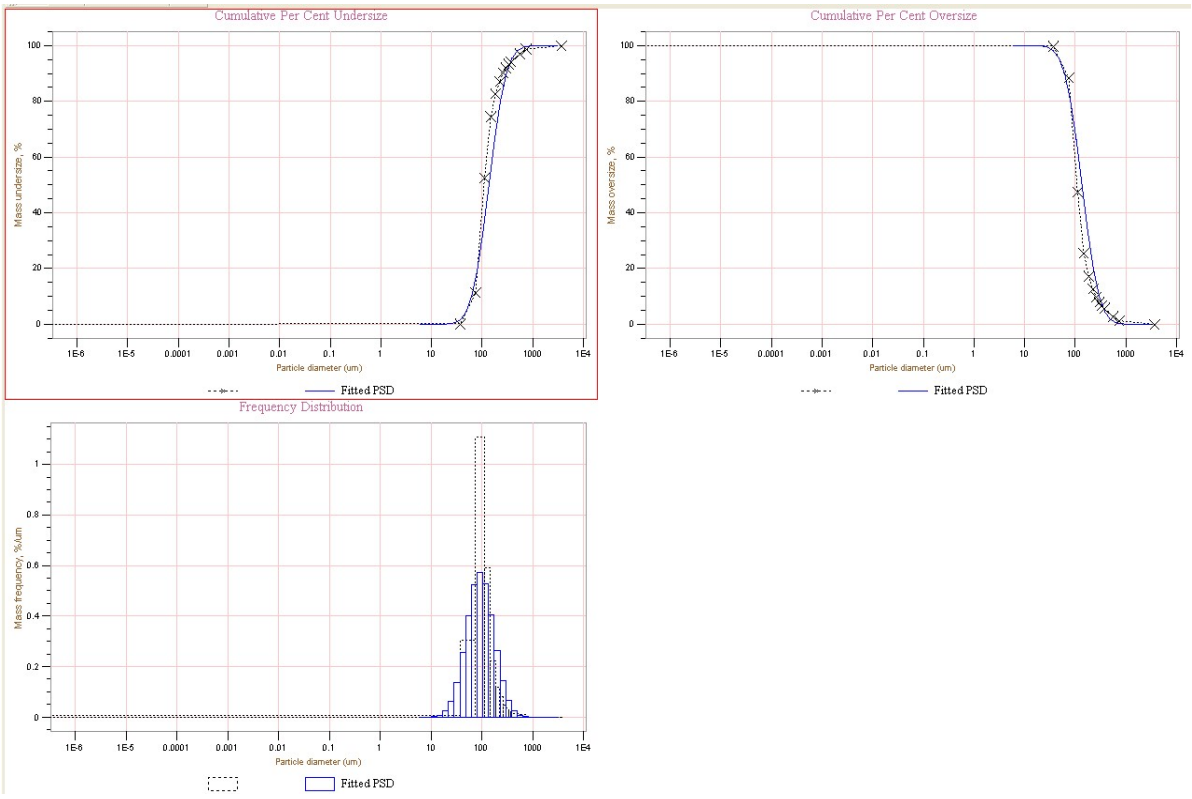
- 1) Grafovi LN i RRSB funkcija:



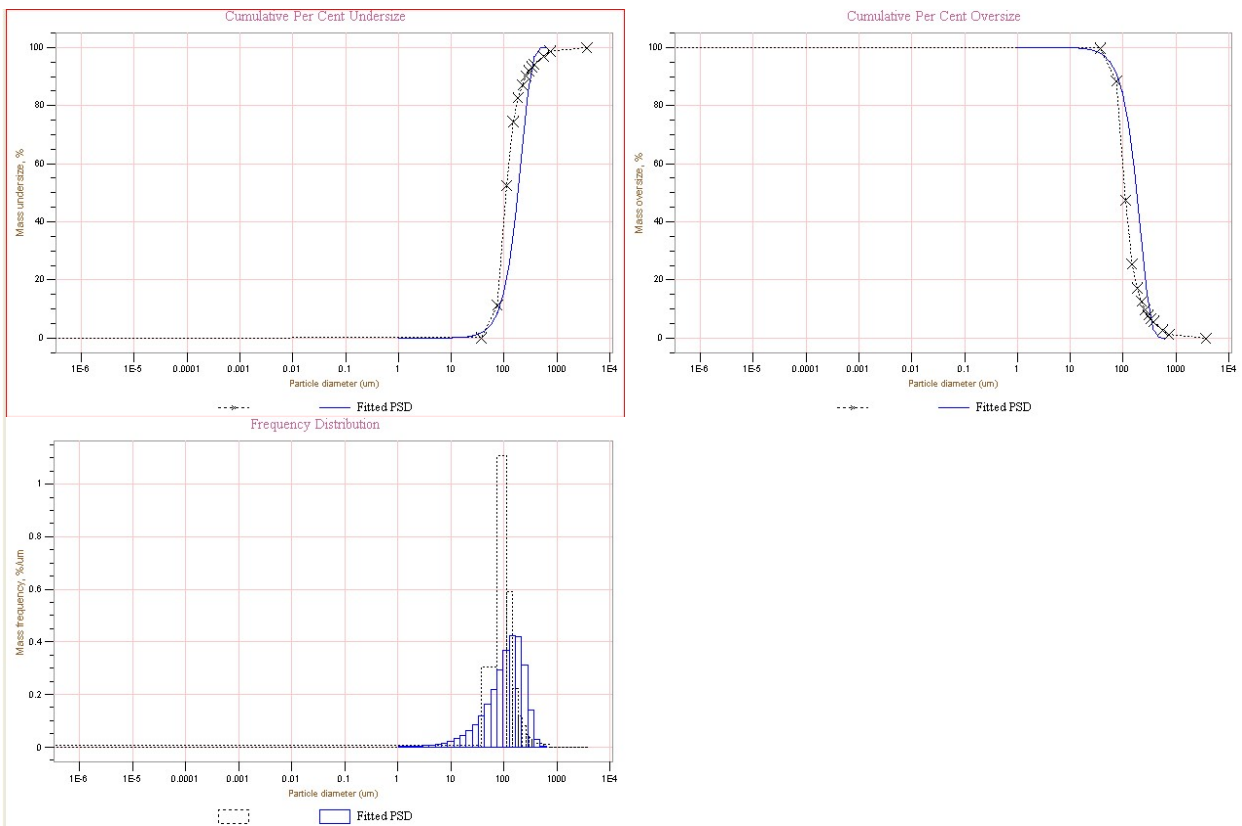
Slika 22. LN funkcija uzorak 1-1



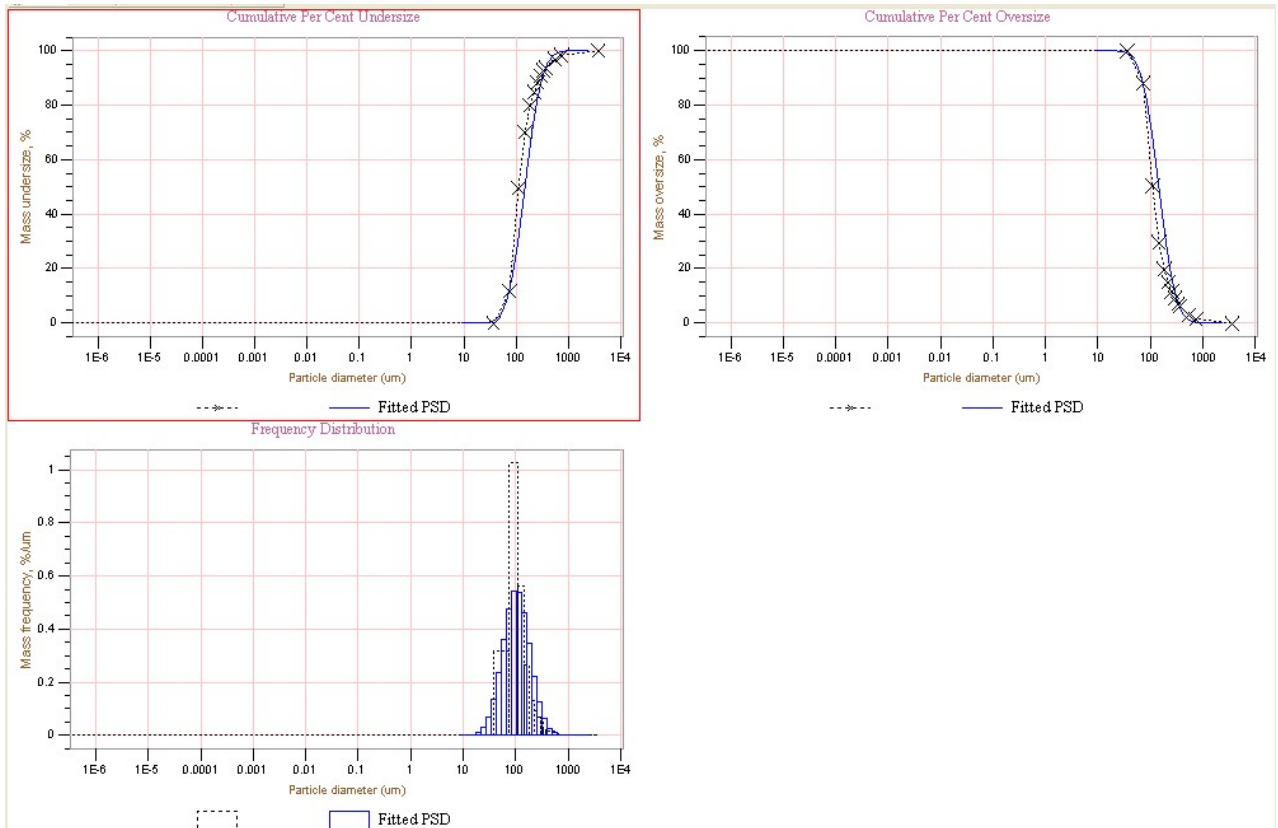
Slika 23. RRSB funkcija uzorak 1-1



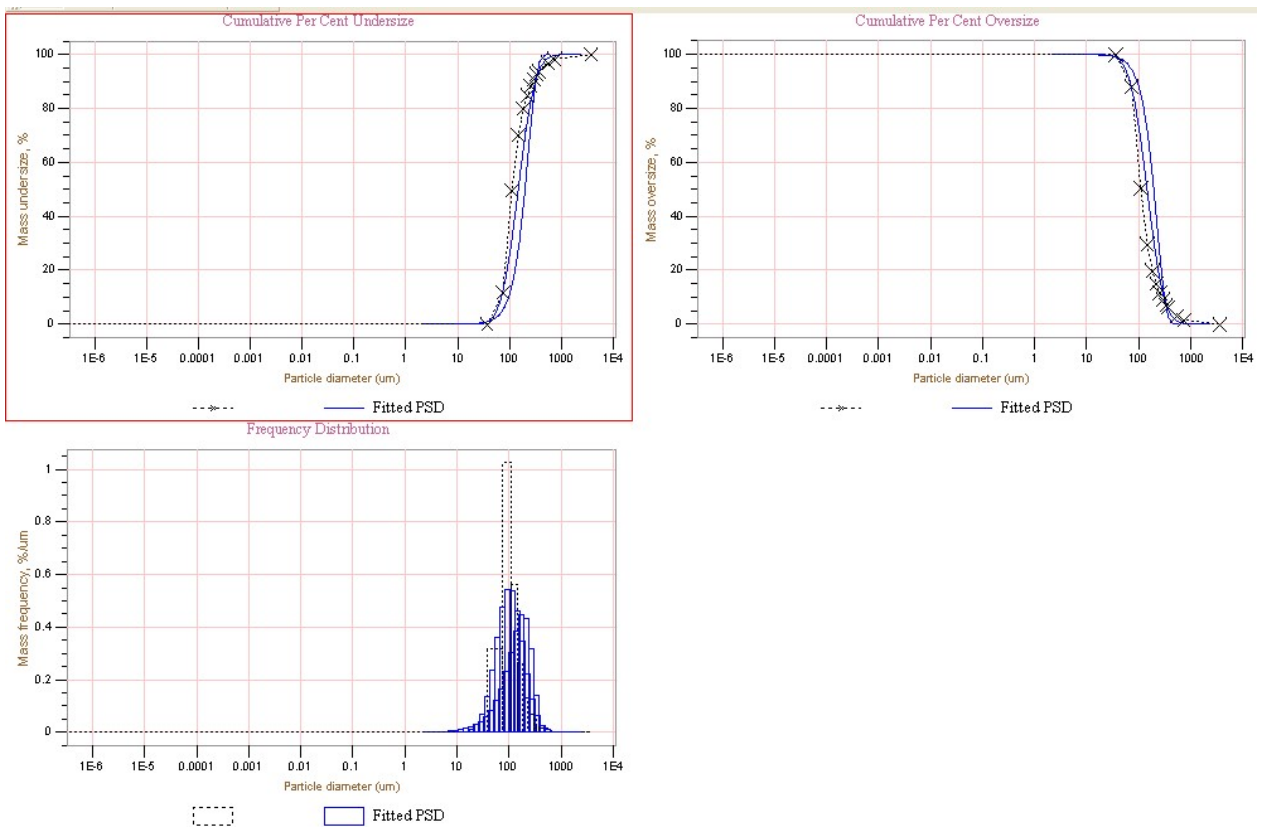
Slika 24. LN funkcija uzorak 1-2



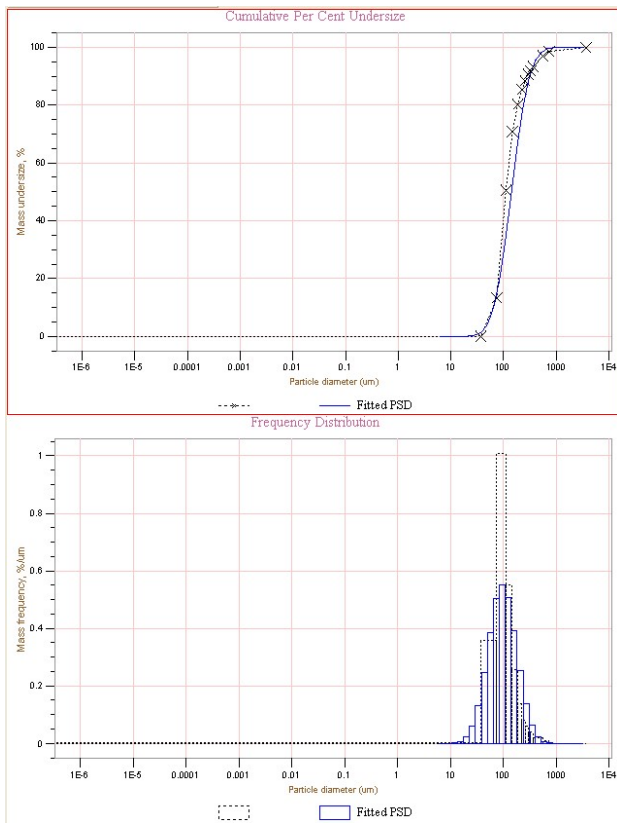
Slika 25. RRSB funkcija uzorak 1-2



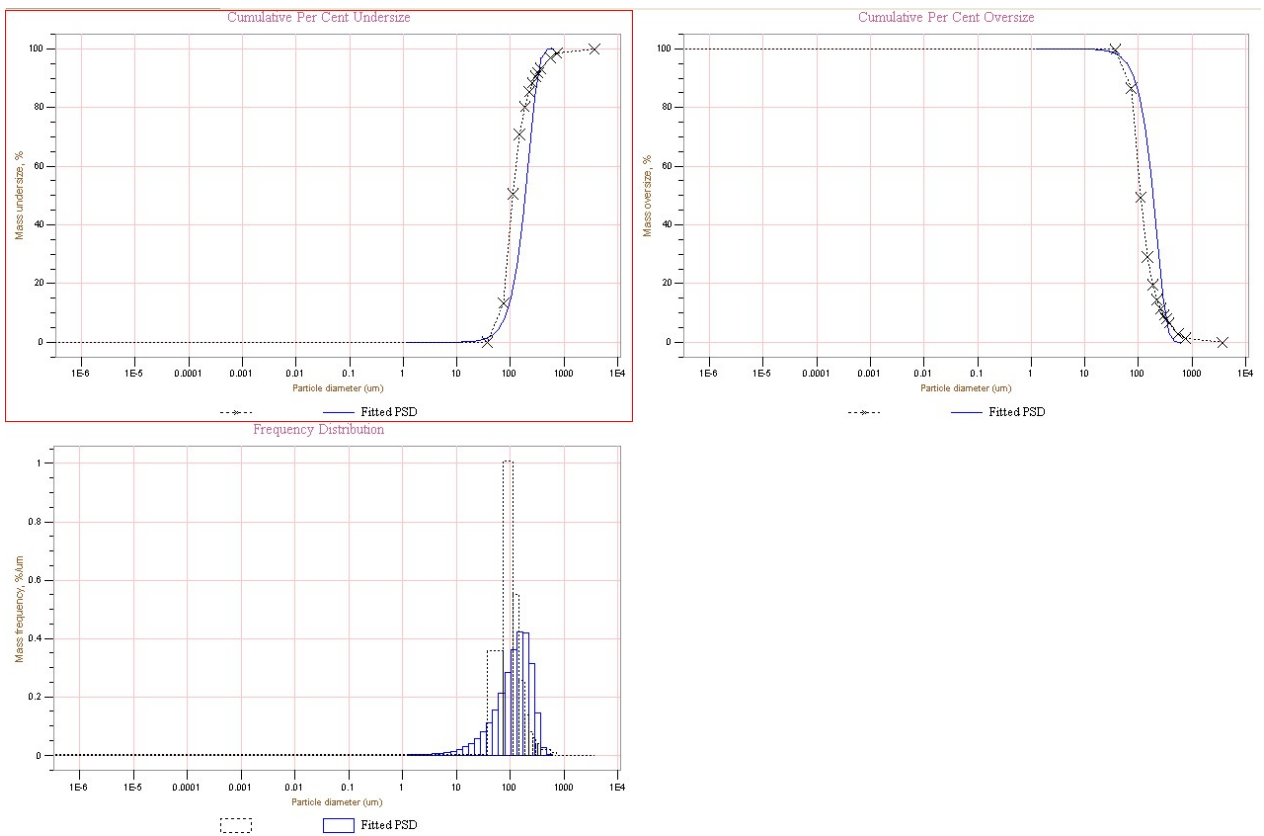
Slika 26. LN funkcija uzorak 1-3



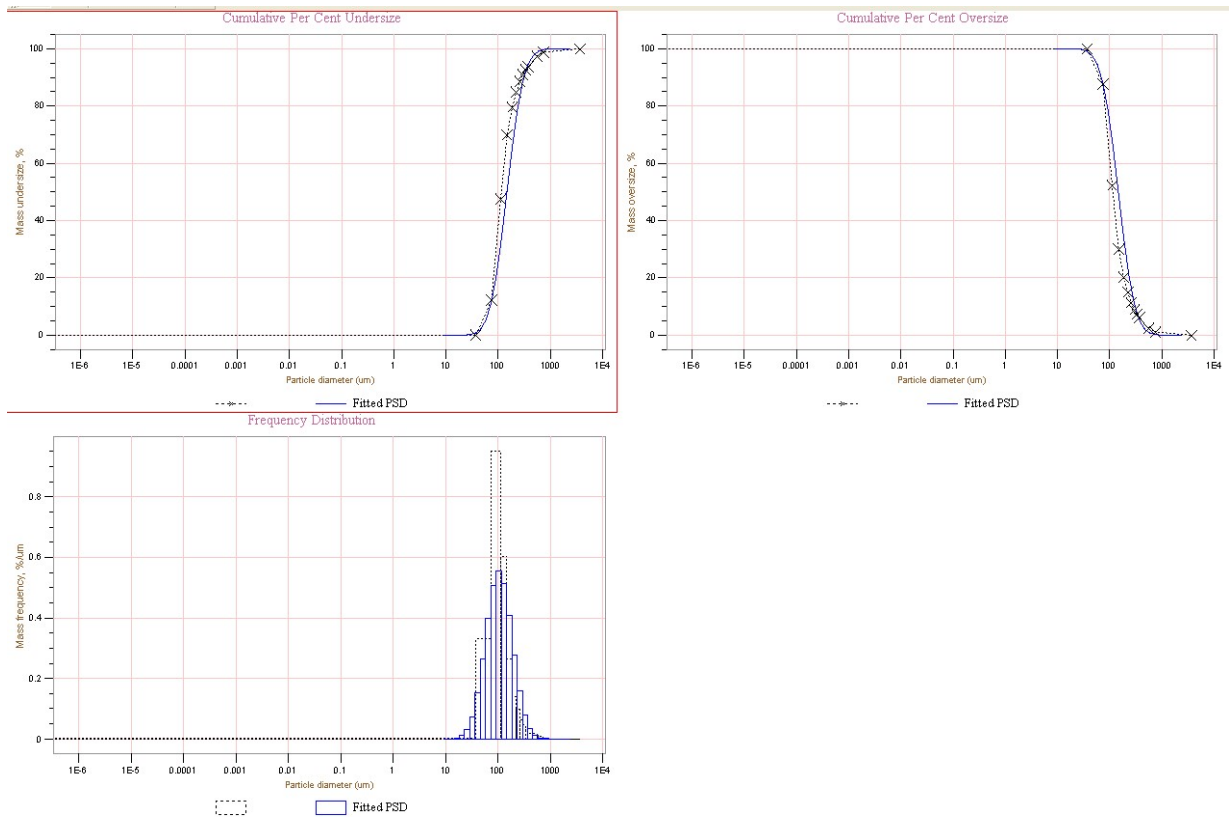
Slika 27. RRSB funkcija uzorak 1-3



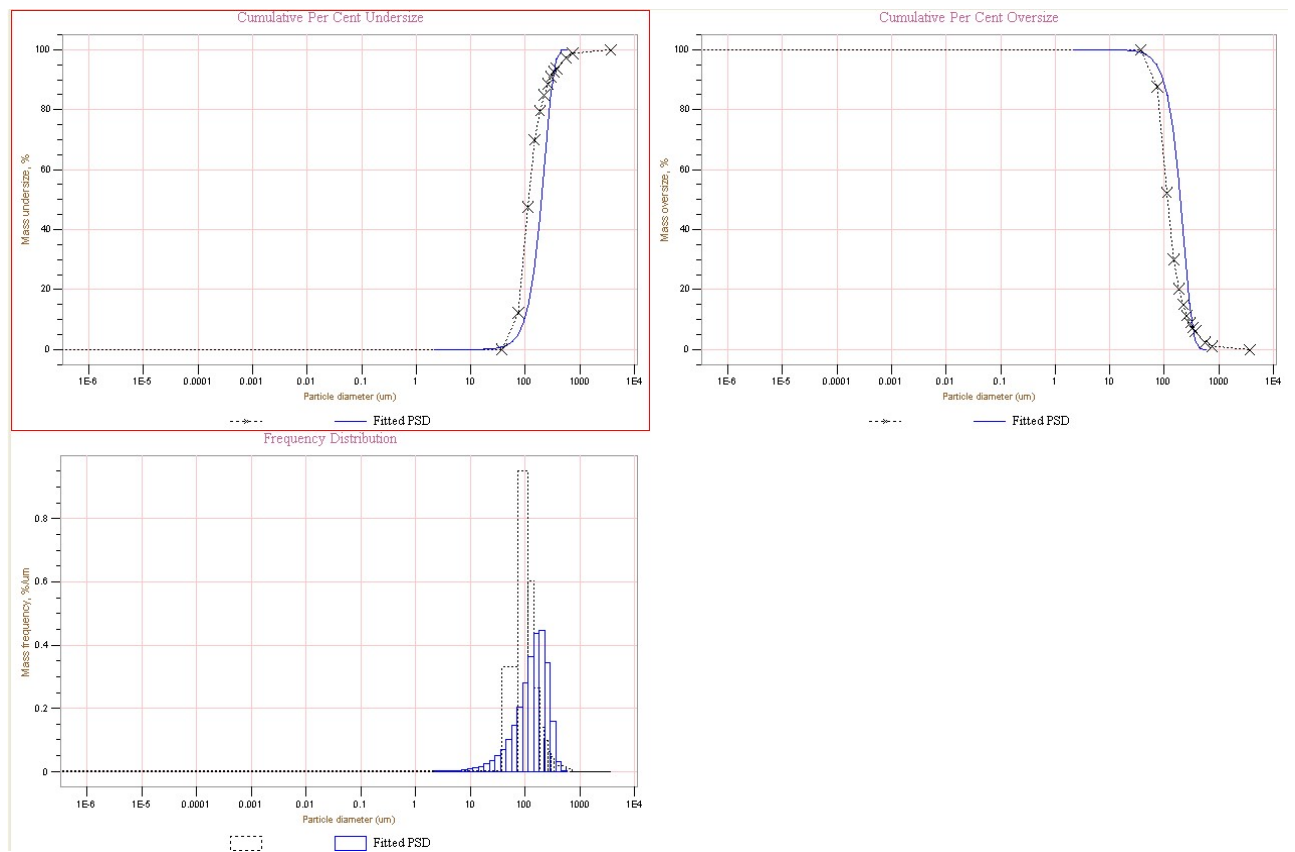
Slika 28. LN funkcija uzorak 1-4



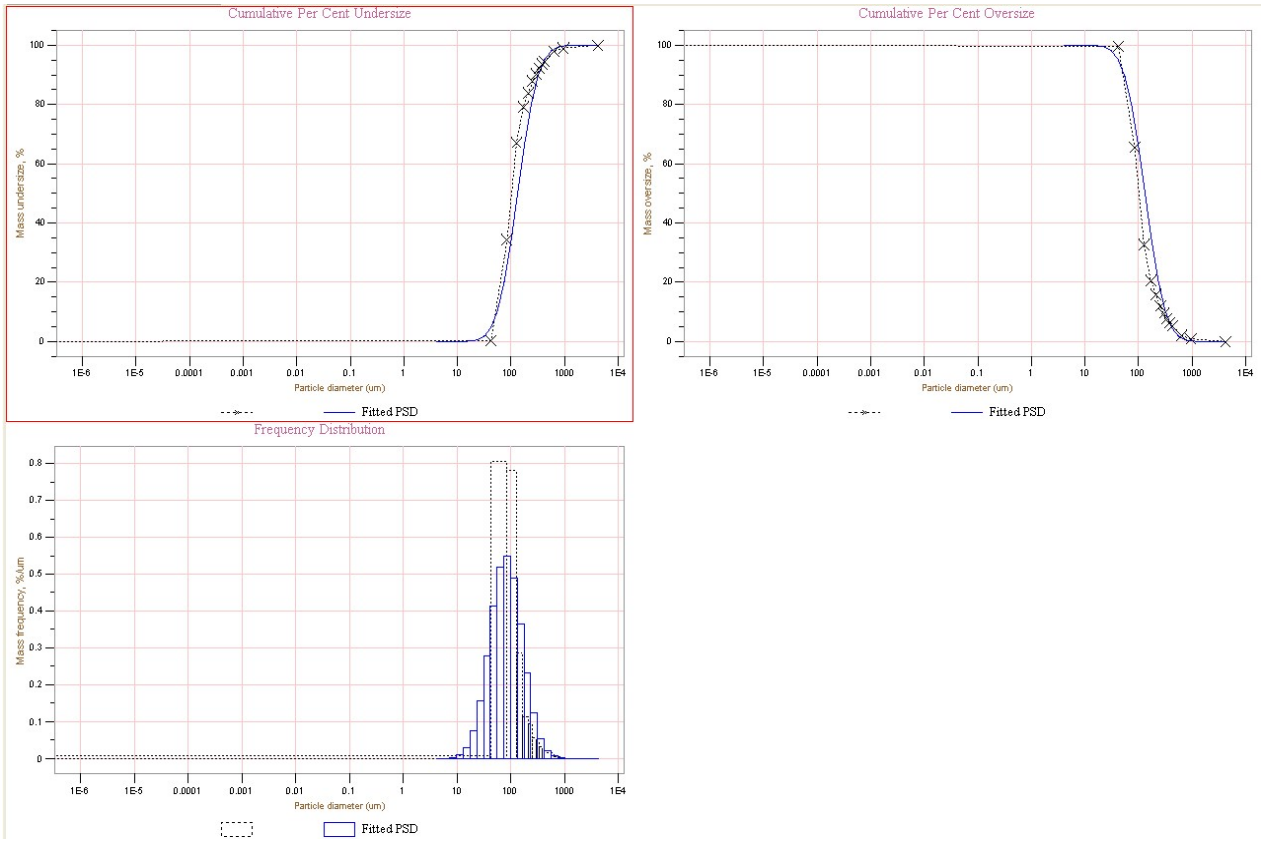
Slika 29. RRSB funkcija uzorak 1-4



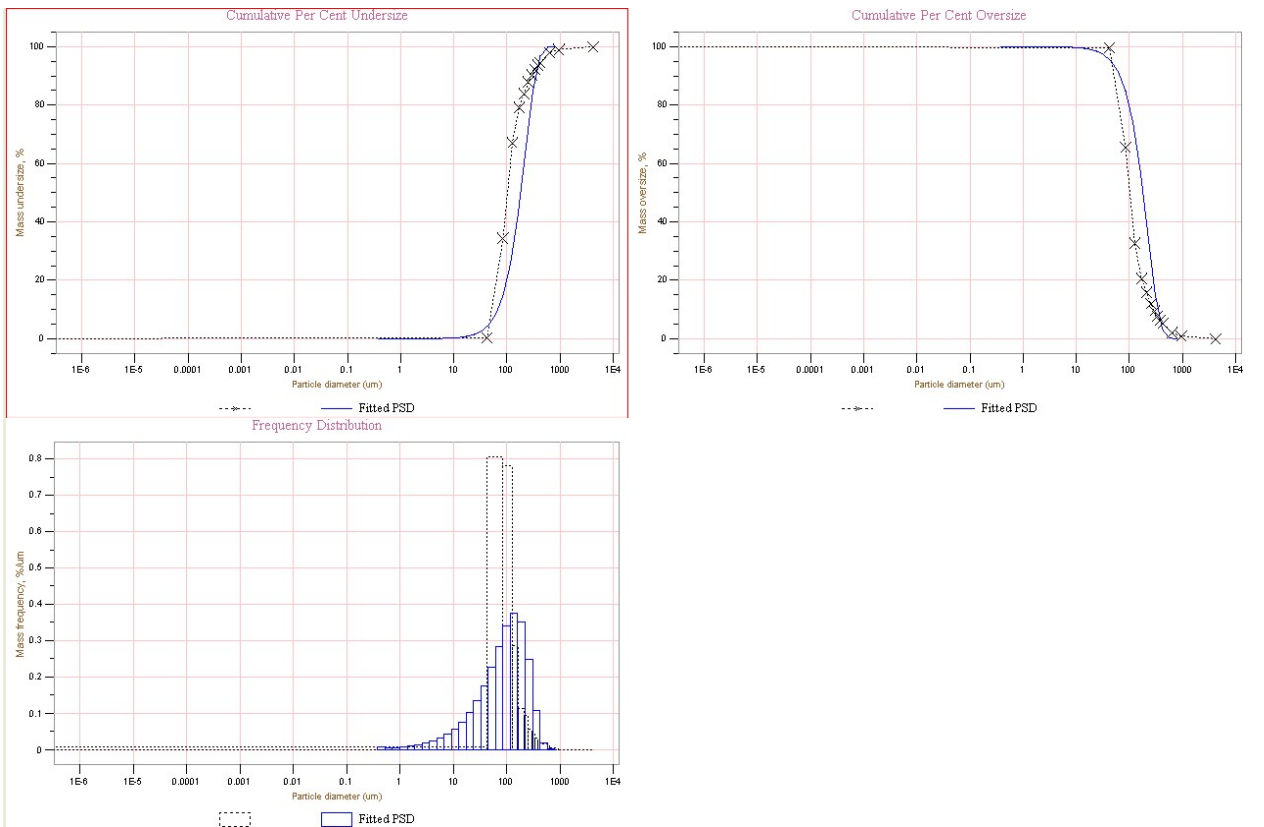
Slika 30. LN funkcija uzorak 1-5



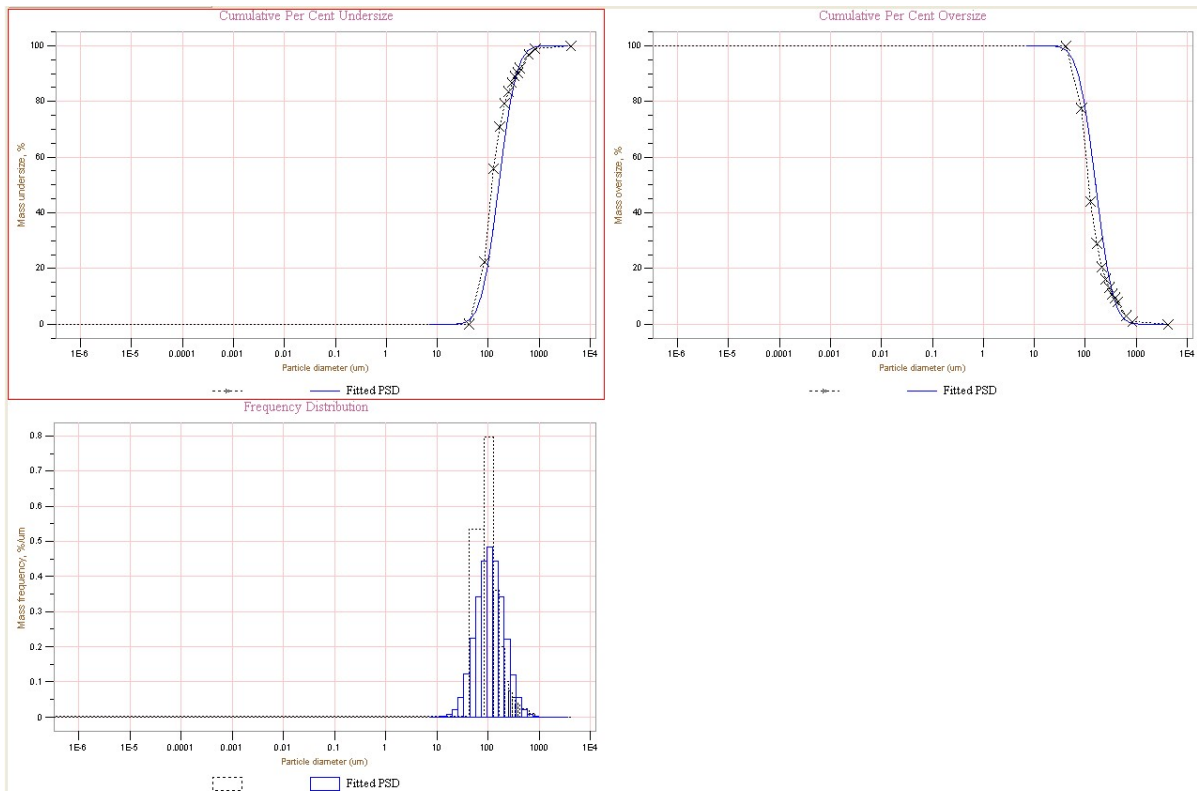
Slika 31. RRSB funkcija uzorak 1-5



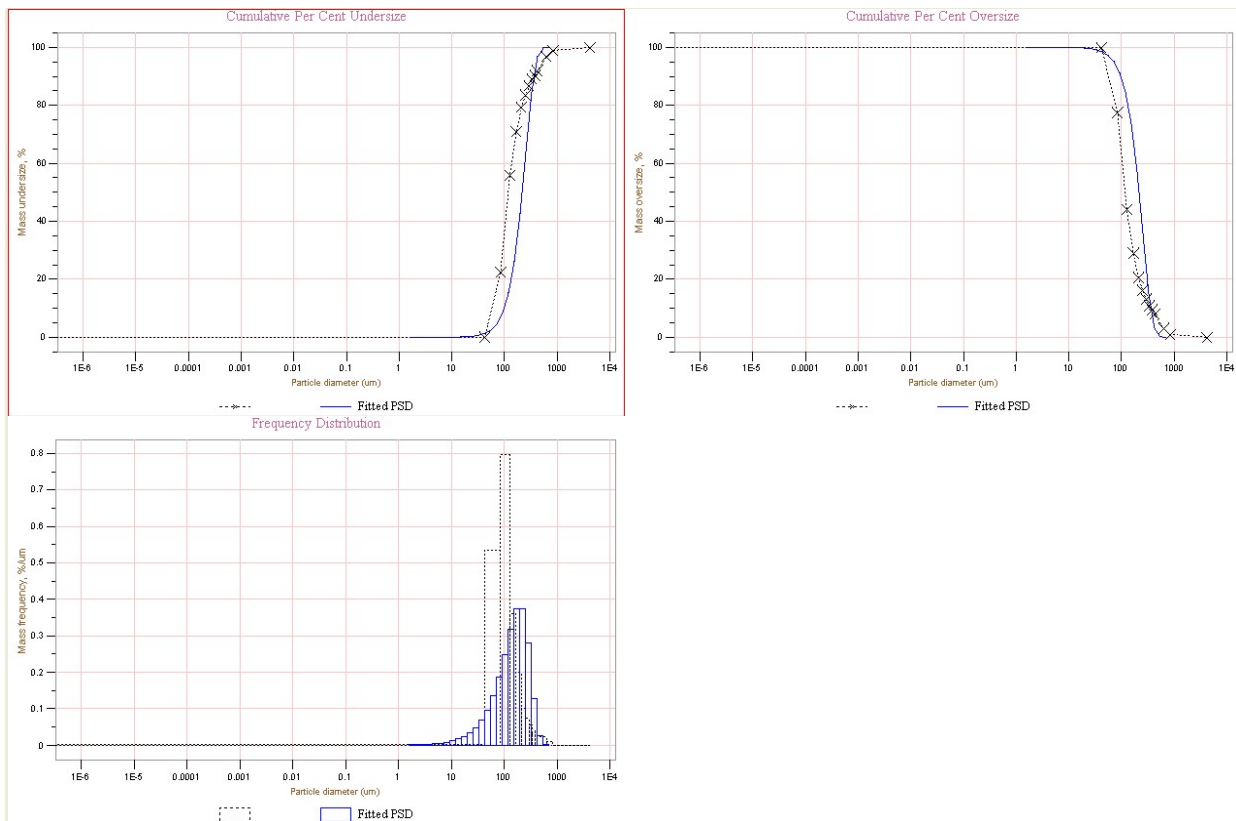
Slika 32. LN funkcija uzorak 2-1



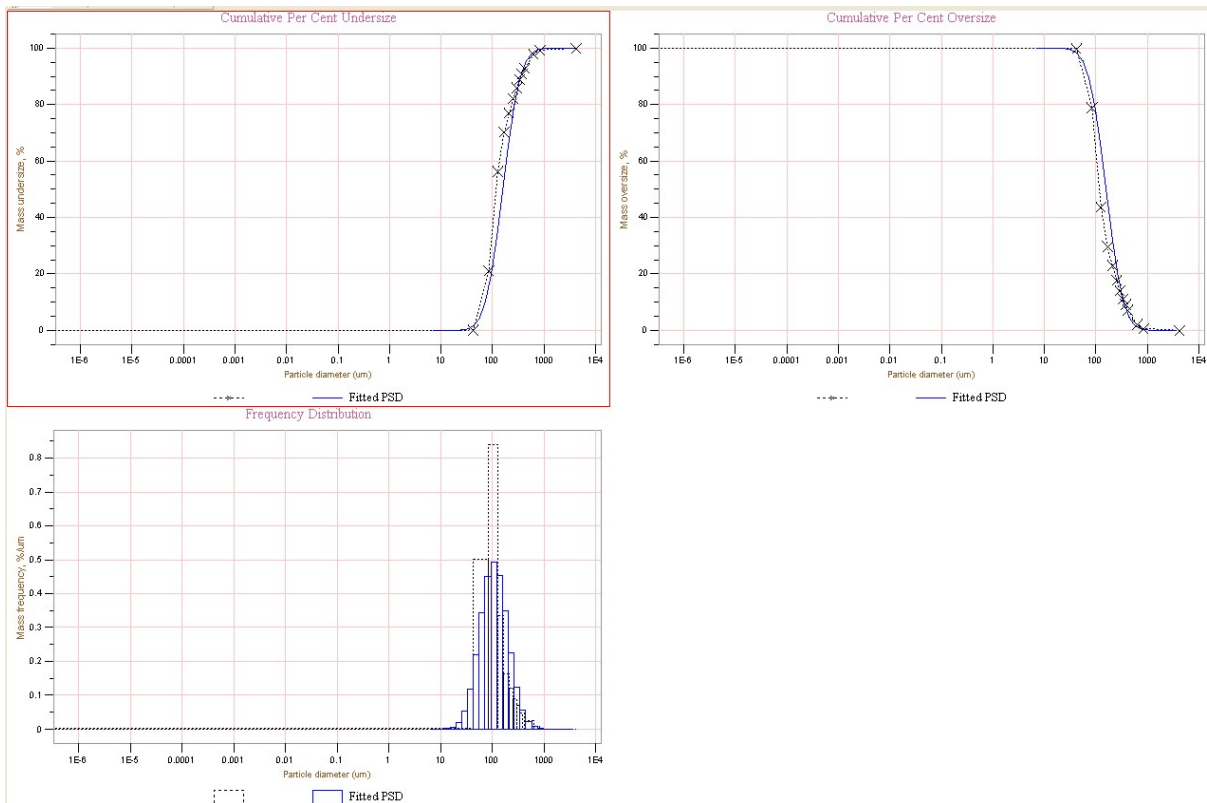
Slika 33. RRSB funkcija uzorak 2-1



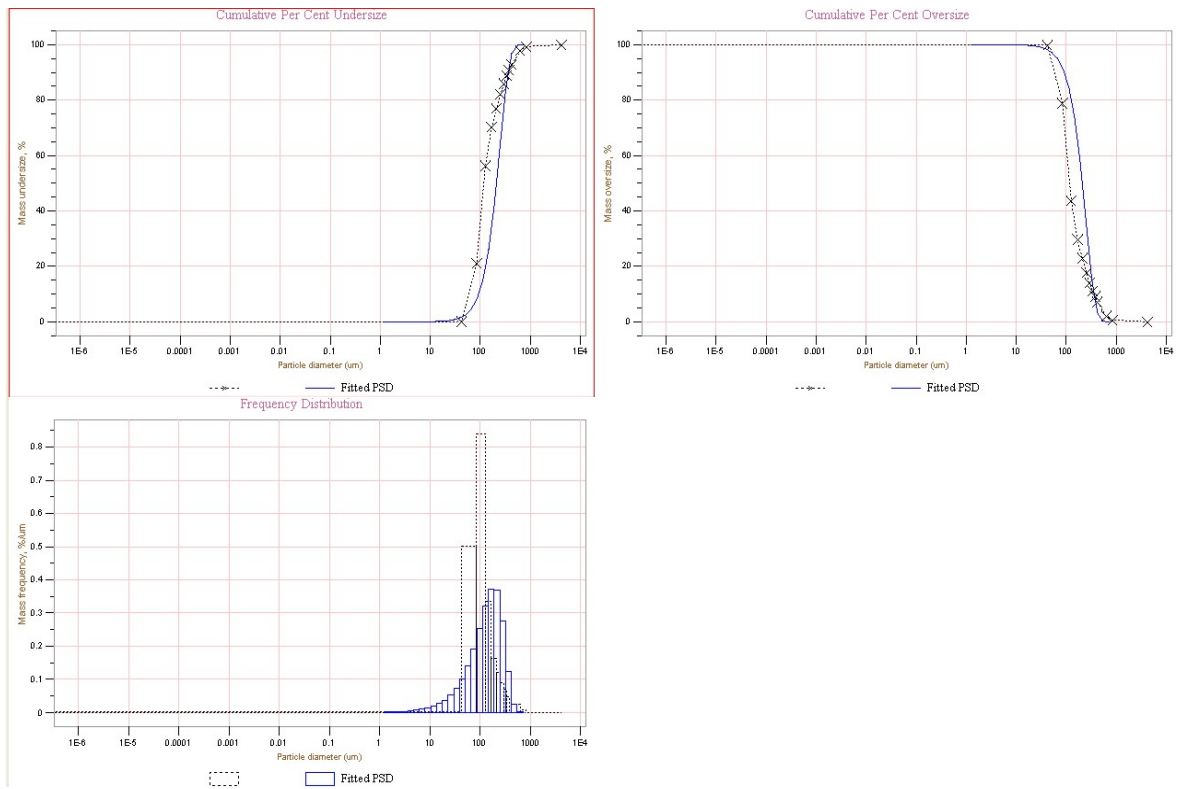
Slika 34. LN funkcija uzorak 2-2



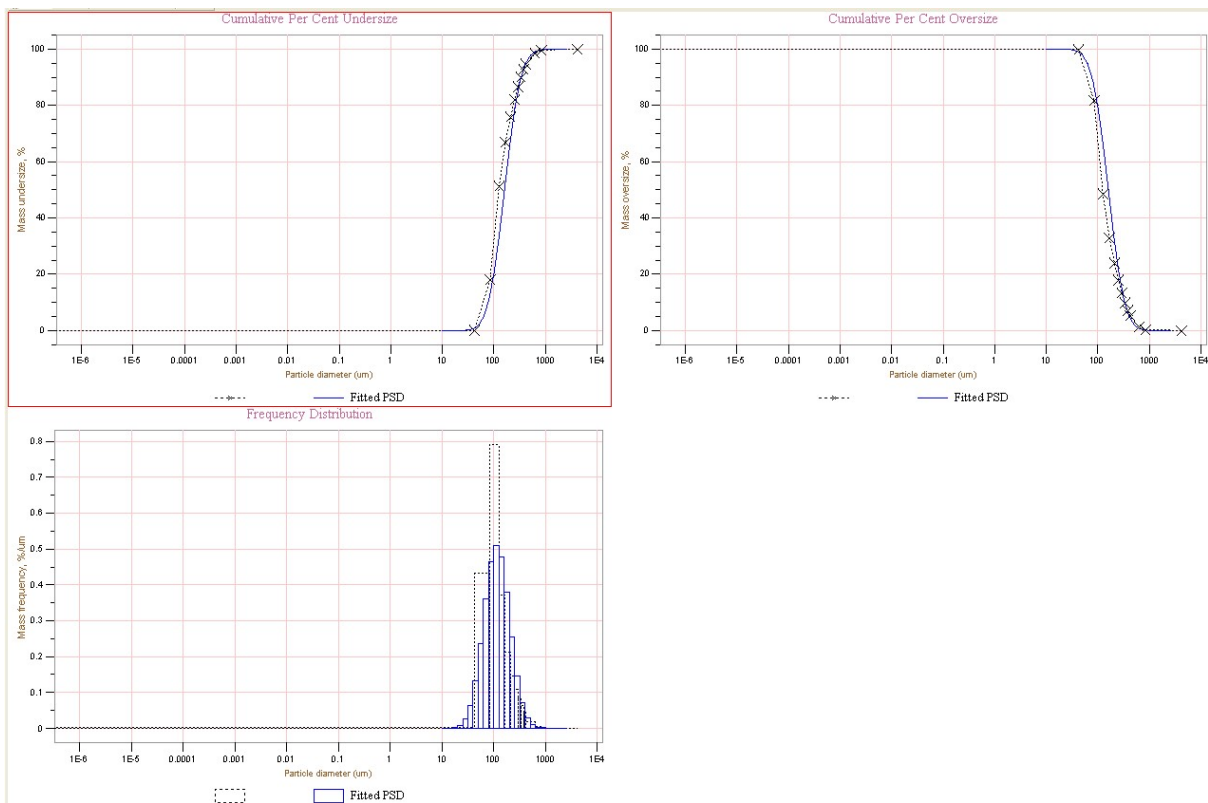
Slika 35. RRSB funkcija uzorak 2-2



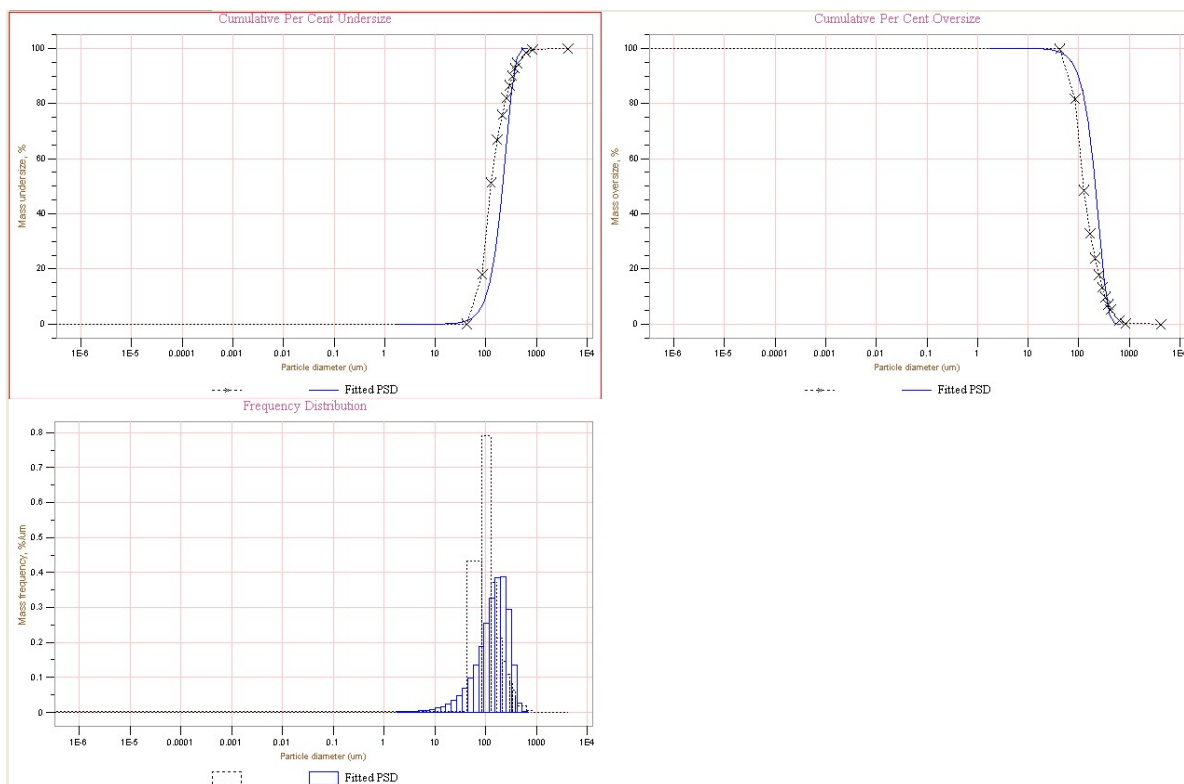
Slika 36. LN funkcija uzorak 2-3



Slika 37. RRSB funkcija uzorak 2-3



Slika 38. LN funkcija uzorak 2-4



Slika 39. RRSB funkcija uzorak 2-4