



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije

Zavod za mehaničko i toplinsko procesno inženjerstvo

Procesi prijenosa i separacija

IV. PREDAVANJE

Transport Phenomena and Separation Processes

Ak. god. 2019./2020.

Zagreb, 19. ožujka 2020.

Sastavnice

*I., II. & III. predavanja
te pripadajućih seminara*

*Opći zakon očuvanja; Stacionarni i nestacionarni procesi; Gustoća toka
količine gibanja, tvari i energije; Mehanizmi prijenosa; Viskoznost;
Reologija (reološka karakterizacija fluida)*

*Zakoni očuvanja pri gibanju fluida/u hidrodinamskim sustavima
(mase, količine gibanja i energije)*

*Fenomen prijenosa količine gibanja pri gibanju fluida (u hidrodinamskim
sustavima)*

Protjecanje

Optjecanje

Strujanje kroz sloj čestica/poroznu sredinu (strukturu)

*Sastavnice
IV., V. & VI. predavanja
te pripadajućih seminara*

Karakterizacija grubodisperznih sustava

Mehanički makroprocesi

Sedimentacija

Filtracija

Miješanje u jednofaznim sustavima te sustavima čvrsto–kapljevito

Mehanički proces

Sadržan fenomen *prijenosa količine gibanja*.
Svojstvene su *pretvorbe (fizičke)* i *separacije tvari* uslijed *mehaničkog djelovanja* u *grubodisperznim sustavima*.
Pokretačka sila procesa: *razlika gustoća*, lokalnih smičnih naprezanja, te razlika tlaka (“*pressure driven processes*”).

Toplinski proces

Sadržan fenomen *prijenosa topline te izmjene tvari*.
Procesi su to vođeni molekularnim silama tijekom kojih dolazi do izmjene topline te tvari između dvije ili više faza promatranog sustava.
Pokretačka sila procesa: *temperaturni i koncentracijski gradijent*.
Toplinski separacijski procesi: isparavanje, kristalizacija, destilacija, sušenje.
Ravnotežni separacijski procesi: ekstrakcija, apsorpcija.

*“The key is
driving force of the operation.”*

Mehanički makroproces

Svaki proces kojim se ostvaruje promjena(e) u grubodisperznim sustavima (dakle na makrorazini promatranog sustava).

Mehaničkim makroprocesom mijenja se *stanje izmiješanosti* (proces i mehaničke separacije/odvajanja i procesi kontaktiranja) i *stanje disperznosti/granulometrijsko stanje* (proces i usitnjavanja i procesi aglomeriranja) promatranog grubodisperznog sustava.

Procesi separacije u sustavima čvrsto-čvrsto (S/S partikulskim sustavima) - klasifikacija

Mehanički makroprocesi

Procesi kojima se mijenja stanje izmiješanosti

Procesi kojima se mijenja stanje disperznosti

Procesi meh. separacije

Procesi kontaktiranja

Procesi usitnjavanja

Procesi aglomeriranja

Procesi separacije u sustavima čvrsto-kapljevito

Procesi separacije u sustavima čvrsto-plinovito

Fluidizacija

Mehaničko miješanje

Drobljenje

Mljevenje

Granuliranje

Aglomeriranje tlačenjem

(S/L partikulskim sustavima)

Otprašivanje

Cikloni

Elektrofiltri

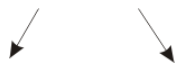
Filtracija

Flitri za plinove

Sedimentacija

Flotacija

Odavanje sitom



Partikulski sustav – svaki sustav koji se sastoji od *čestica/jedinki* (diskretnih sastavnica tvari)

Jedinke mogu biti čvrste, kapljevite ili plinovite te zastupljene u bilo kojoj od ovih triju faza.

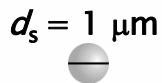
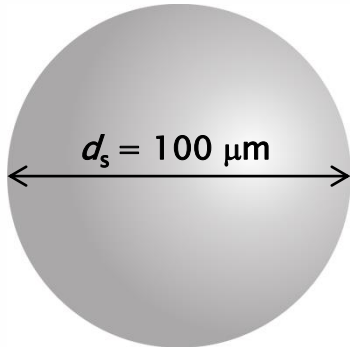
Partikulski sustav – disperzni sustav u kojem *disperzna faza* može varirati od čvrstih jedinki, kapljica do mjehurića i u kojem je ona raspodijeljena (bolje ili lošije) u *S/L/G disperznom sredstvu*

Tablica 1. Primjeri partikulskih sustava.

PRAŠKASTI SUSTAVI (PRAŠCI)	Šećer, brašno, škrob, pijesak, pigmenti, prah tonera
KAPLJEVITE MJEŠAVINE: EMULZIJE (L/L) & SUSPENZIJE (S/L)	Mlijeko, maslac, krv, boja
MJEŠAVINE ČVRSTOGA (S/S)	Stijene, sedimenti, farmaceutici
AEROSOLI (L/G+S/G)	Magla, sprejevi, inhalatori
PLINOVITI MJEHURIĆI U MEDIJU	Kreme (G/L) i pjene (G/S)
AGLOMERATI – OKRUPNJENE MATRICE	Granule, pelete, itd.

Samo u *kemijskoj industriji* 60 % svih proizvoda čine *partikulski sustavi*, a dodatnih 20 % koristi *praške* kao potrebne sastojke.*

Zašto partikulski sustavi? Zašto prašci?



$$S_V = \frac{S}{V} = \frac{d_s^2 \pi}{\frac{d_s^3 \pi}{6}} = \frac{6}{d_s}$$

Za veću jedinku ($d_s = 100 \mu\text{m}$): $S_V = 6 \times 10^4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$

Za manju jedinku ($d_s = 1 \mu\text{m}$): $S_V = 6 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$

Zbog njihove enormne specifične površine!!!

*Procjena preuzeta iz

A.D. Salman, M.J. Hounslow, J.P.K. Seville, Handbook of powder technology (Vol. 11), Granulation, Elsevier, 2007.

Prema veličini disperzne faze razlikujemo:

i. Grubodisperzne sustave

– čestice disperzne faze veće od 100 nm,

ii. Koloidno disperzne sustave

– čestice disperzne faze veličine 1–100 nm,

iii. Molekulsko disperzne sustave

– čestice disperzne faze manje od 1 nm.

U okviru *mehaničkog procesnog inženjerstva* (i ovog kolegija) razmatraju se pretvorbe (fizičke) i separacije tvari uslijed mehaničkog djelovanja u grubodisperznim sustavima.


makroproces

Karakterizacija grubodisperznih sustava podrazumijeva:

- i. Karakterizaciju sadržane *kontinuirane faze* odnosno definiranje relevantnih svojstava promatranog fluida (gustoće, viskoznosti, reološkog ponašanja),
- ii. Karakterizaciju *disperznog sustava* (sustava u cijelosti) odnosno definiranje pripadajućeg stanja izmiješanosti,
- iii. Karakterizaciju *disperzne faze* odnosno definiranje pripadajućeg stanja disperznosti (granulometrijskog stanja).

Definiranje stanja izmiješanosti u grubodisperznim sustavima

- i. Sastav grubodisperznog sustava iskazan
volumnim udjelom disperzne faze,*

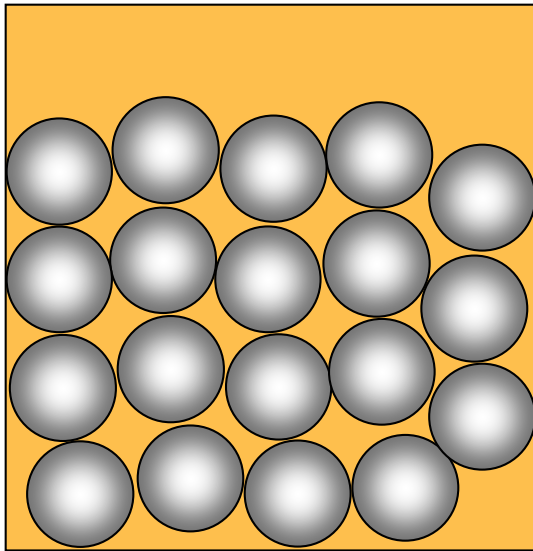
$$\varphi_d = \frac{V_d}{V_k + V_d}$$

**ZA SUSTAVE S RELATIVNO
SLOBODNOM DISPERZONOM
FAZOM**

ii. Sastav grubodisperznog sustava iskazan poroznošću,

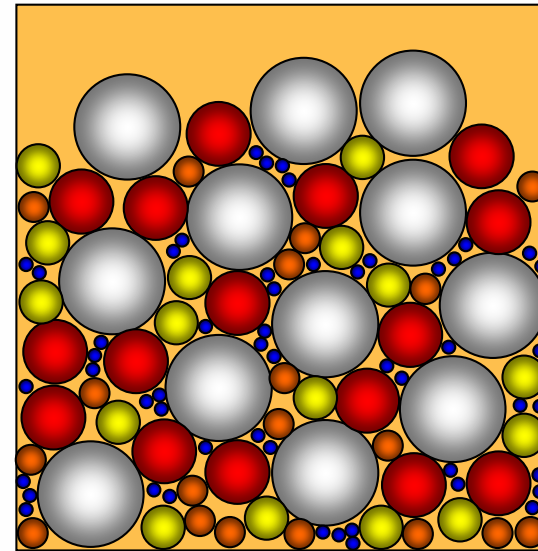
$$\varepsilon = \frac{V_k}{V_k + V_d}$$

**ZA SUSTAVE U KOJIMA JE
OGRAIČENO KRETANJE
ČESTICA PORADI POVEĆANJA
VOLUMNOG UDJELA
DISPERZNE FAZE
PAKOVANJA!!!**



RJEĐE PAKOVANJE

ε_1



GUŠĆE PAKOVANJE

ε_2

>

iii. Homogenost mješavine.

$$H = \frac{\sigma_{\min.}}{S}$$

Standardna devijacija
potpuno slučajno
izmiješanog uzorka

Standardna devijacija
uzorka nakon nekog
vremena miješanja

$$s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\varphi_i - \varphi)^2$$

Udio uzorka u pojedinim
segmentima procesnog prostora

Sadržaj mješavine

U slučaju nepoznavanja sadržaja mješavine:

$$\varphi_{\text{sr.}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varphi_i$$

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\varphi_i - \varphi_{\text{sr.}})^2$$

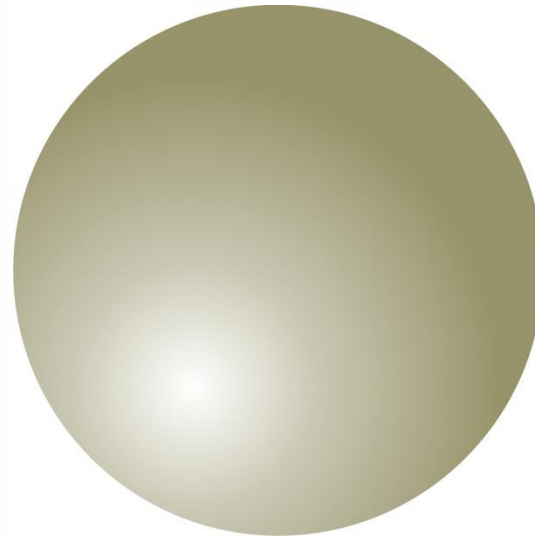
Karakterizacija *disperzne faze*

podrazumijeva definiranje pripadajućeg stanja disperznosti (granulometrijskog stanja) odnosno detekciju/determiniranje primarnih svojstava sadržanih čestica.

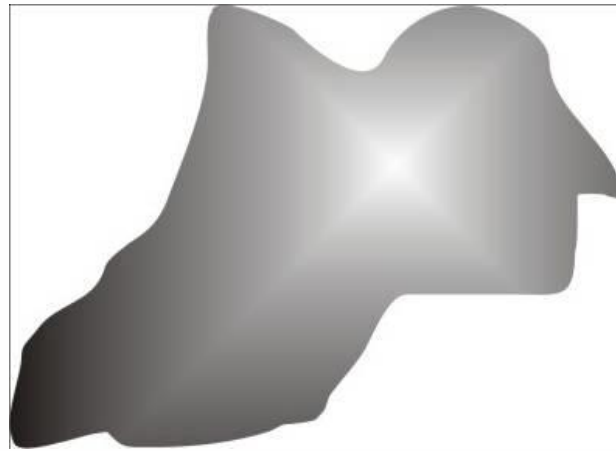
Primarna svojstva disperzne faze:

- veličina čestica (*particle size*),
- oblik čestica (*particle shape*) kao morfološko svojstvo,
- raspodjela veličina čestica – RVČ (*particle size distribution – PSD*).

U slučaju prisutnosti *sferične* čestice/jedinke pripadajuća veličina jest dostatno iskazana samo jednim parametrom, jednom geometrijskom karakteristikom, njezinim *promjerom*.



Za kvantitativno iskazivanje veličine jedinice/čestice *drugih oblika* (koji odstupaju od oblika kugle) potrebno je više parametara.



U iskazivanju veličine takovih čestica koriste se različiti deskriptori. Oni mogu biti direktno povezani s vizualnim odnosno mikroskopskim mjerenjem (*Martinov & Feretov* promjer – statistički promjeri) ili se temelje na konceptu ekvivalentne sfere.

Konceptom ekvivalentnih sfera se veličina čestice nepravilnog oblika iskazuje ekvivalentnim promjerom odnosno promjerom sfere (kugle) koja ima ista svojstva ili isto ponašanje kao promatrana čestica nepravilnog oblika.

Tablica 2. Ekvivalentni promjeri.

EKVIVALENTNI PROMJER	EKVIVALENTNO SVOJSTVO
Volumni promjer, x_V	Volumen kugle
Površinski promjer, x_S	Površina/oplošje kugle
Stokesov promjer, x_{St}	Brzina nesmetanog sedimentiranja
Promjer projicirane površine, x_A	Projicirana površina čestice
Promjer prosijavanja (<i>sieve diameter</i>)	Duljina otvora očice sita
Ekvivalentni laserski promjer raspršenja	Intenzitet raspršenog zračenja

Volumni promjer jest promjer one kugle (sfere) koja ima isti volumen kao i promatrana čestica nepravilnog oblika.

$$V = \frac{x_V^3 \cdot \pi}{6}$$

Površinski promjer jest promjer one kugle (sfere) koja ima istu površinu (oplošje) kao i promatrana čestica nepravilnog oblika.

$$S = x_S^2 \cdot \pi$$

Stokesov promjer jest promjer one kugle koja ima istu brzinu nesmetanog sedimentiranja kao i promatrana čestica nepravilnog oblika.

$$v_s = \frac{g(\rho_{\check{c}} - \rho)x_{St}^2}{18\mu}$$

Promjer projicirane površine jest promjer one kugle koja ima istu projiciranu površinu kao i promatrana čestica nepravilnog oblika.

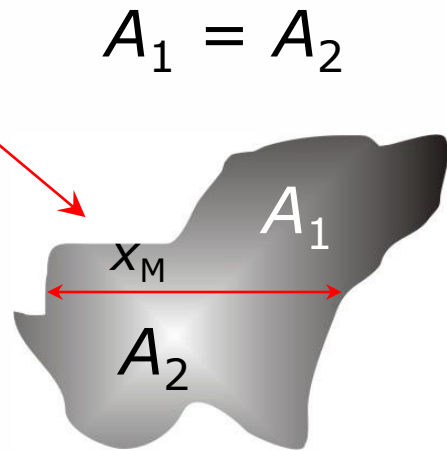
$$A = \frac{x_A^2 \cdot \pi}{4}$$

Ukoliko se pri određivanju veličina čestica koristimo mjernom tehnikom mikroskopiranja te naknadnom analizom mikroskopske slike, kvantitativno iskazivanje pripadajućih veličina se uobičajeno ostvaruje primjenom statističkih promjera.

Iskazivanje veličine čestice statističkim promjerom podrazumijeva mjerenje/određivanje linearne dimenzije (geometrijske karakteristike) promatranog sustava paralelne s utvrđenim smjerom mjerenja.

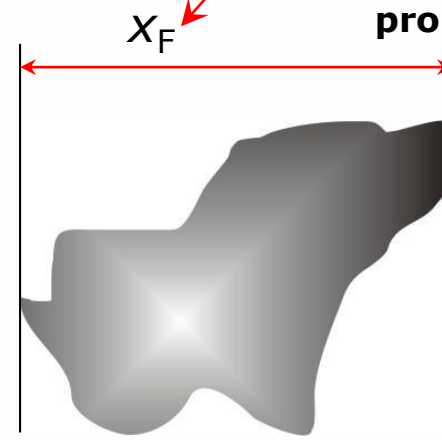
Martinov promjer

Duljina linije (paralelne sa smjerom mjerenja) koja raspolovljuje sliku čestice



Feretov promjer

Udaljenost paralelnih tangenti (okomitih na smjer mjerenja) povučениh na suprotnim stranama promatrane čestice



smjer mjerenja →

Pri kvantitativnom iskazivanju oblika čestica koristimo se faktorom oblika.

Koriste se:

i. *Wadellov* faktor sferičnosti,

$$\psi_{\text{Wa}} = \left(\frac{x_V}{x_S} \right)^2$$

ii. Dinamički faktor oblika.

$$K_{\psi} = \left(\frac{x_V}{x_{\text{St}}} \right)^2$$

**ZA SLUČAJ LAMINARNOG
OPSTRUJAVANJA**



**JEDINKE/ČESTICE U
PARTIKULSKOM SUSTAVU
NISU JEDNAKIH VELIČINA!
NE POSTOJE DVIJE JEDINKE
ISTIH VELIČINA!**

Odrediti raspodjelu veličina čestica (RVČ) znači
detektirati/determinirati udio pojedine veličine definirane
određenom oznakom (mjerom) finoće u ukupnoj populaciji
odnosno odrediti udio (maseni, volumni, brojčani) čestica određene
veličine u promatranom kolektivu.

Kada govorimo o RVČ valja istaknuti bitnost slijeda:

- i. Mjerenje RVČ,
- ii. Prikazivanje/iskazivanje RVČ,
- iii. Aproksimiranje dobivenih rezultata mjerenja primjenom analitičkih funkcija raspodjele.

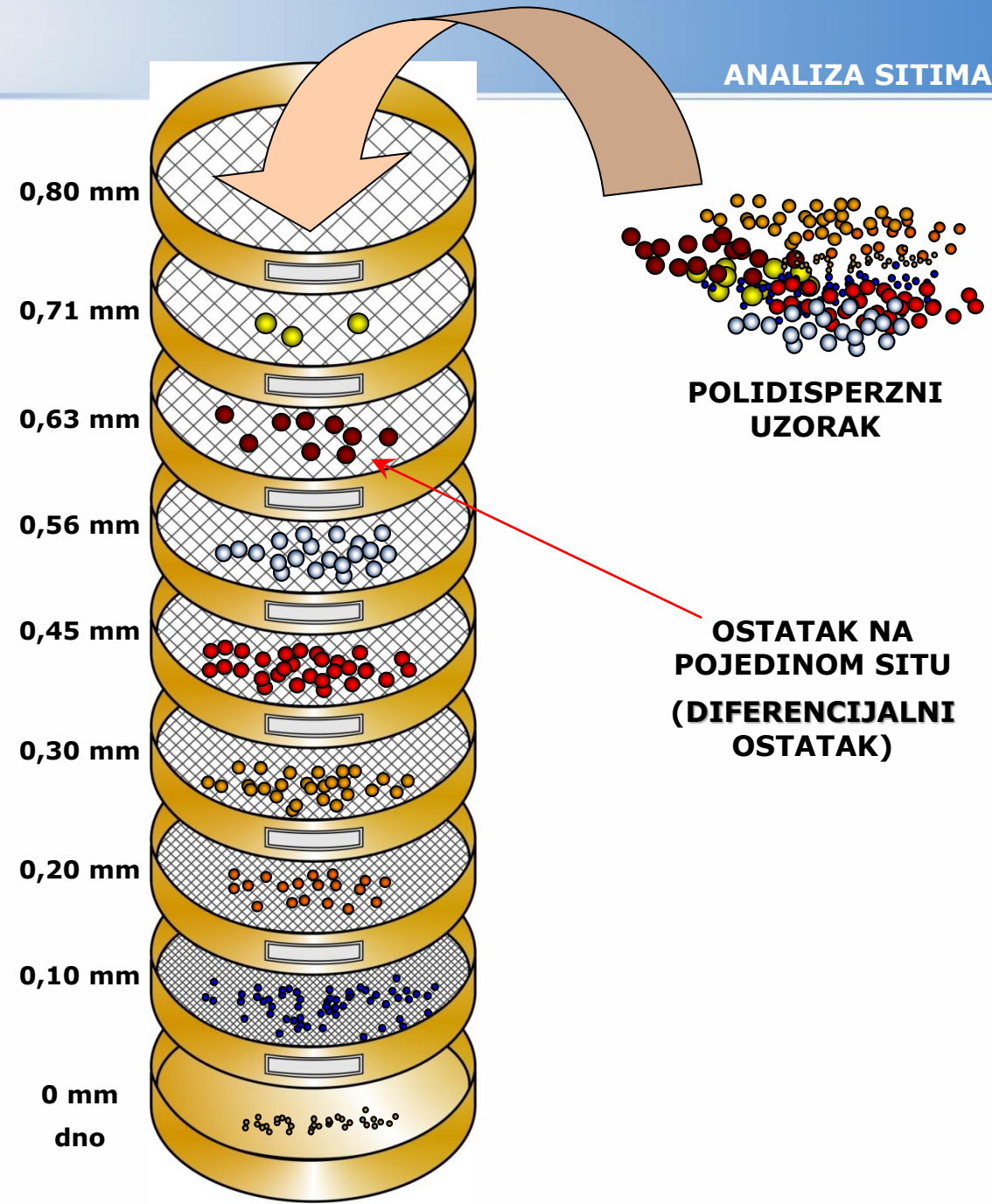
Tablica 2. Metode mjerenja RVČa.

METODA	Mjerna tehnika	Mjerno područje (μm)	Oznaka finoće
Prosijavanje	Žičana sita Mikrosita	37-4000 <40	Otvor očice sita
Pretraživanje slike	Optički mikroskop Elektronski mikroskop	1-500 0,01-100	Duljina Statistički promjer
Sedimentacijske metode	Andreasenova pipeta Sedimentacijska vaga Sedigraf Centrifuge	2-60 0,05-5	Stokesov promjer
Pretraživanje u struji fluida	Osjetljivo električno polje (Coulter princip) Raspršenje svjetla Laserska difrakcija	1-100 0,3-10 0,5-3500	Volumni promjer Projicirani promjer Ekv. laserski promjer

Mjerenje veličine čestice odnosno RVČ *različitim metodama* (*različitim sadržanim principima*) dovodi do *različitih rezultata mjerenja* za isti kolektiv jedinki. Razlog je to različitosti sadržanih mjera finoća.

Mjera finoće jest svojstvo primjenom kojeg kvantitativno iskazujemo veličinu čestica, karakteristično za primijenjenu mjernu tehniku.

ANALIZA SITIMA



Pri kvantitativnom prikazivanju/iskazivanju RVČ koristimo se:

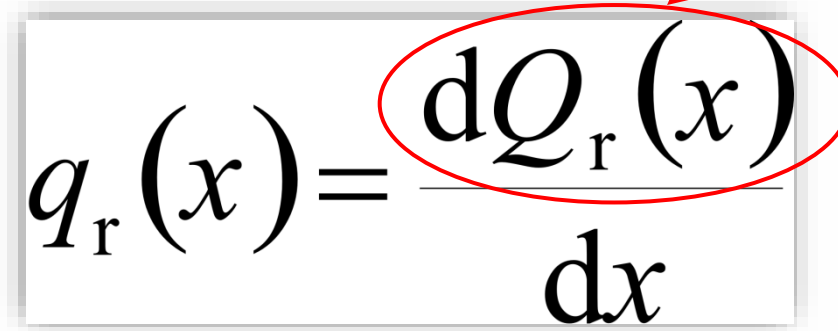
- i. Funkcijama raspodjele,
- ii. Karakterističnim promjerima populacije jedinki.

i. Kumulativna funkcija raspodjele, $Q_r(x)$

&

ii. Funkcija gustoće raspodjele, $q_r(x)$

**Diferencijalna
funkcija raspodjele**


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

Indeks r upućuje na tip raspodjele:

$r = 0$ broj

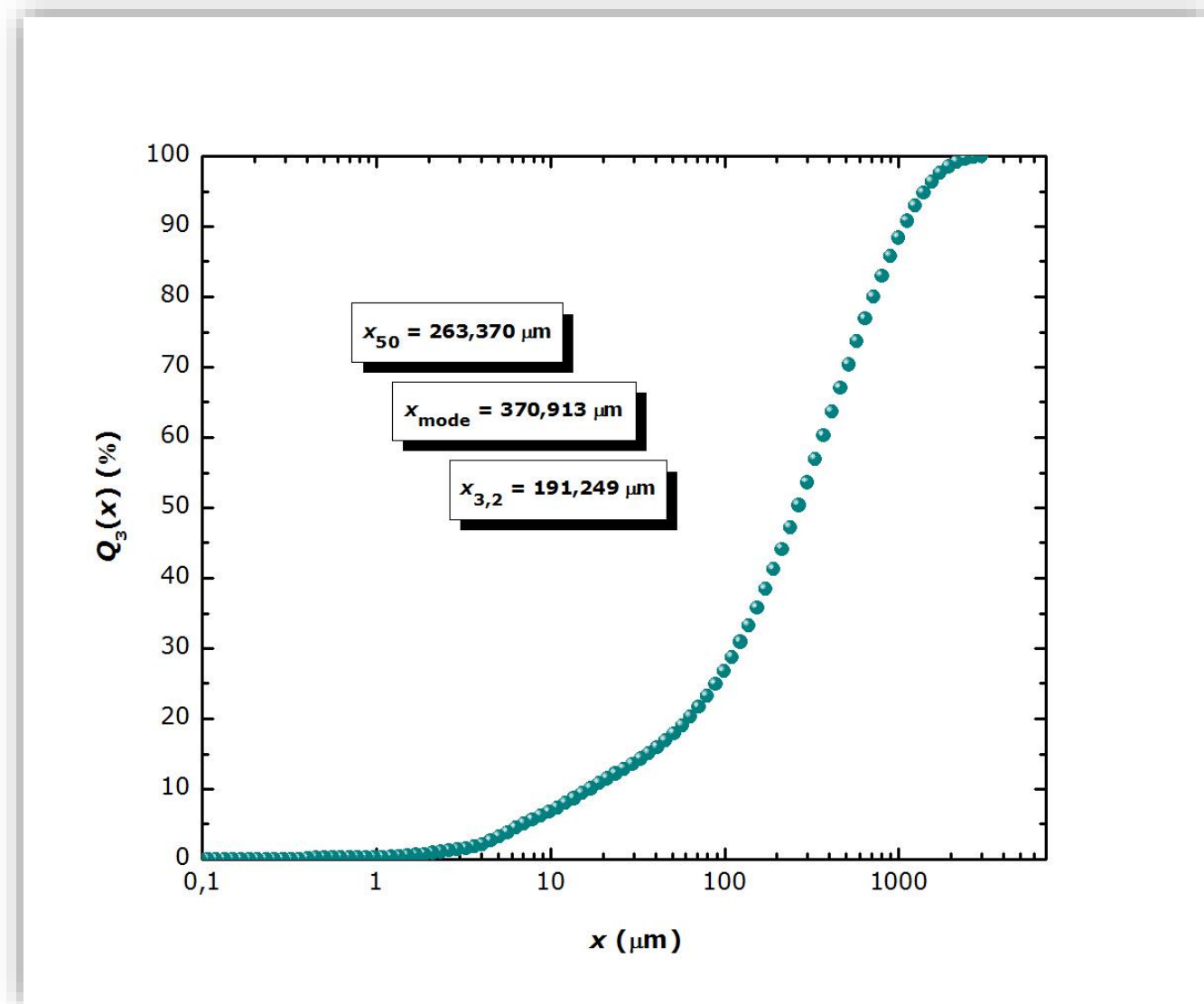
$r = 1$ duljina

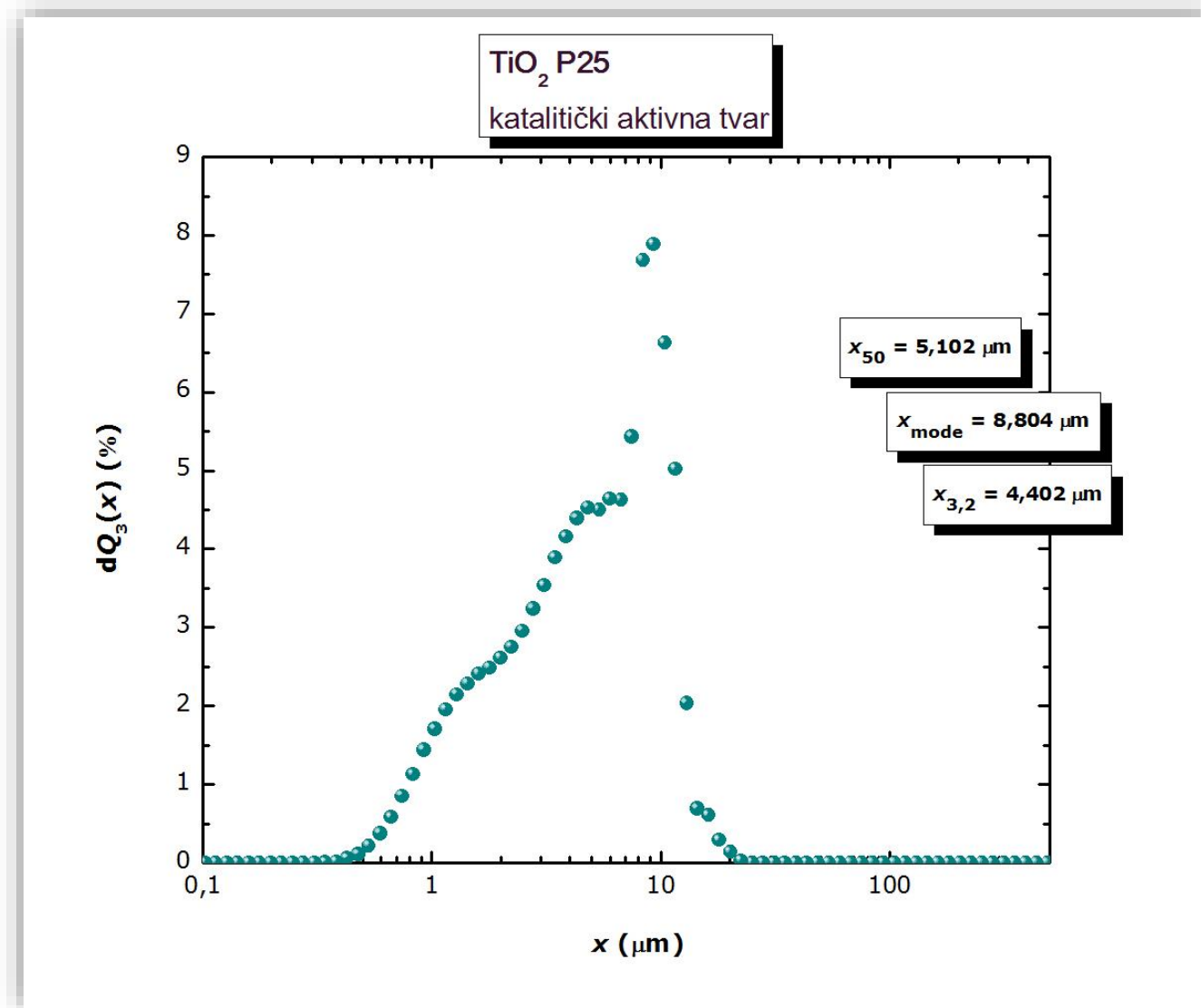
$r = 2$ površina

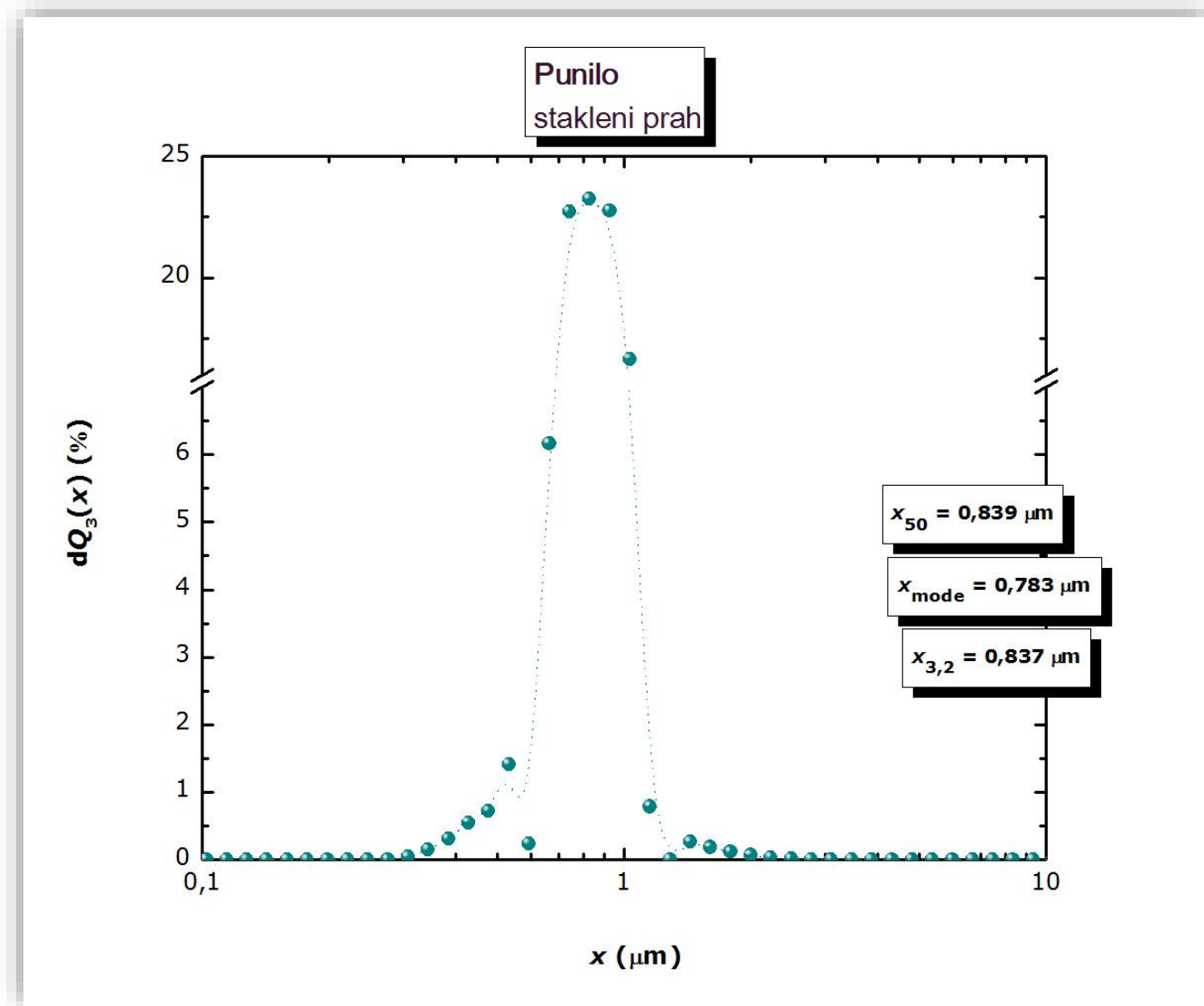
$r = 3$ masa ili volumen

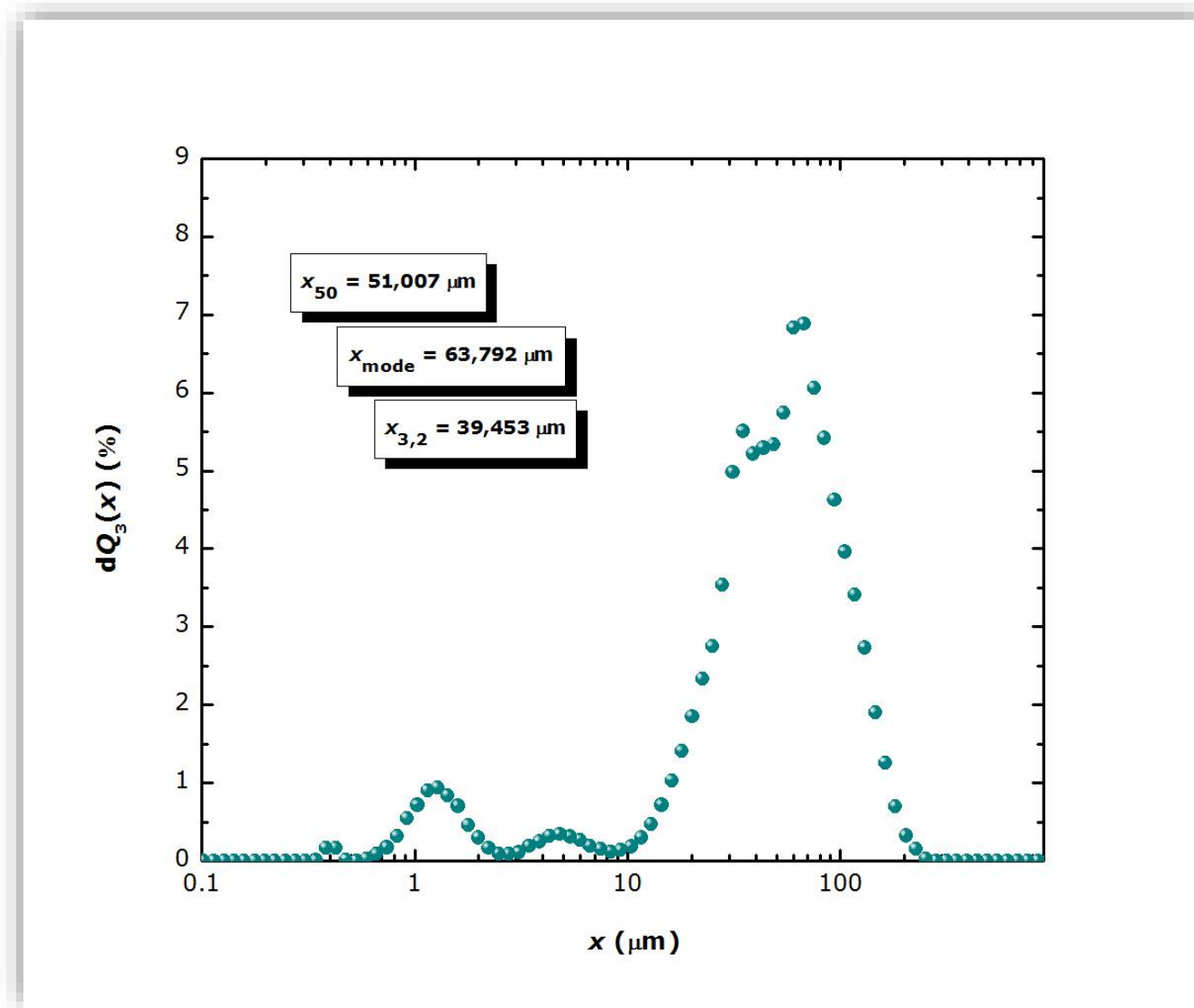
$Q_r(x)$ – kumulativni udio čestica *manjih* od određene veličine x

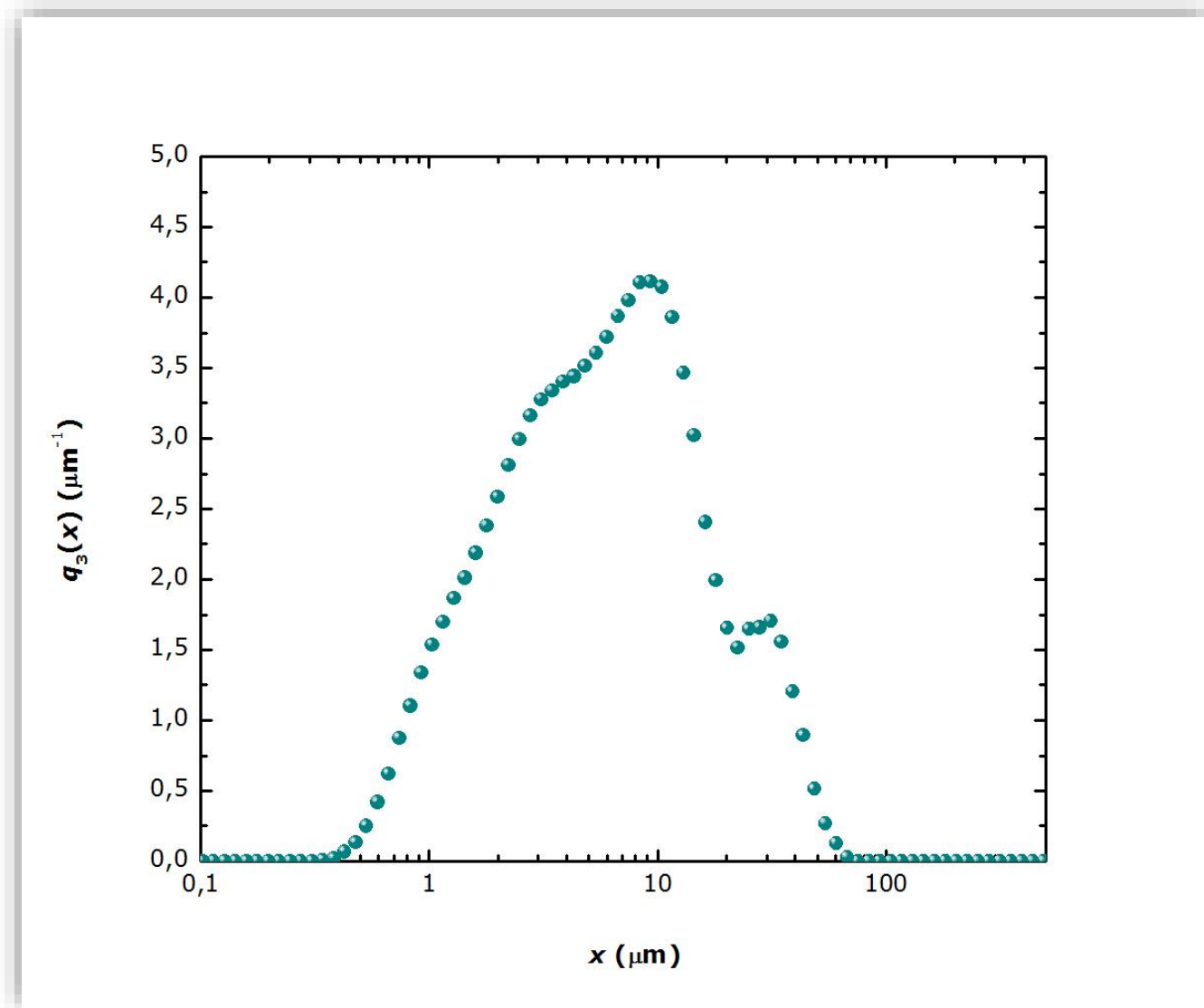
$dQ_r(x)$ – udio čestica u promatranom veličinskom razredu (intervalu)

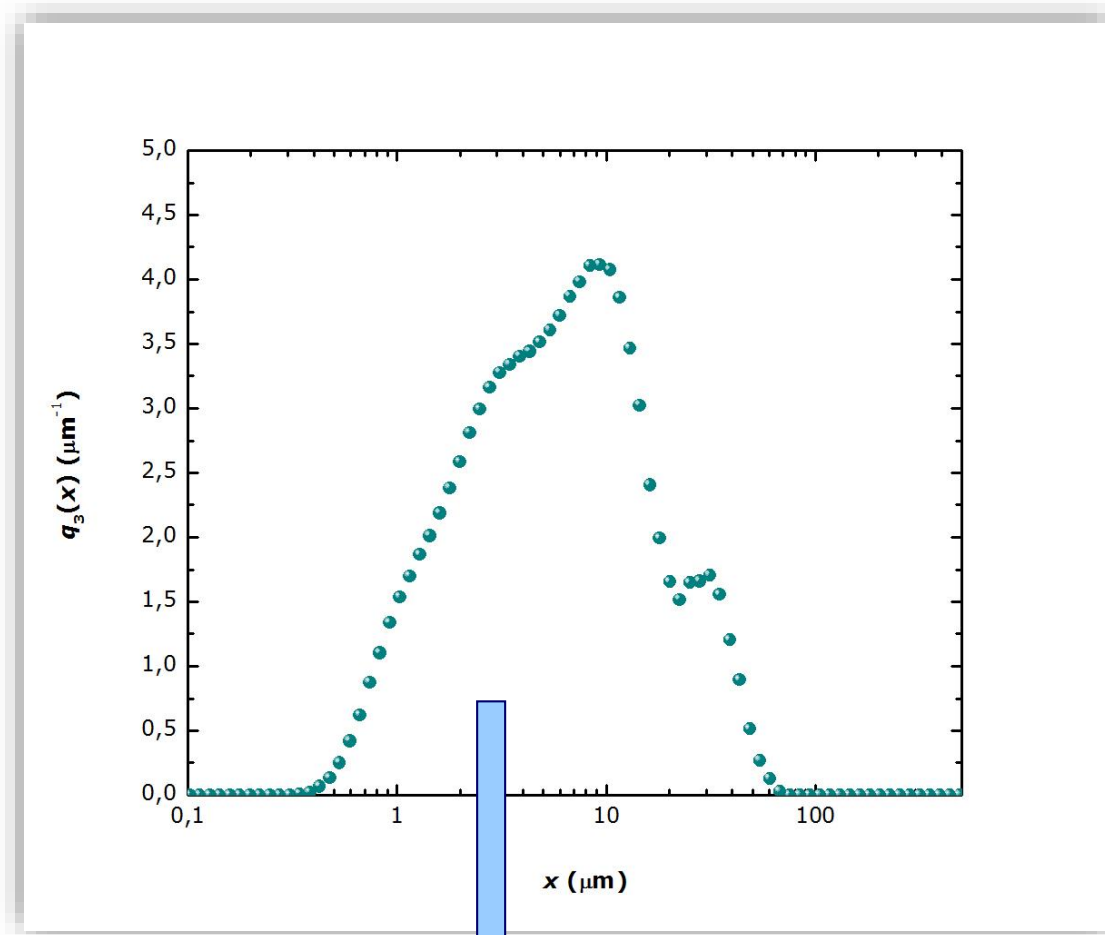








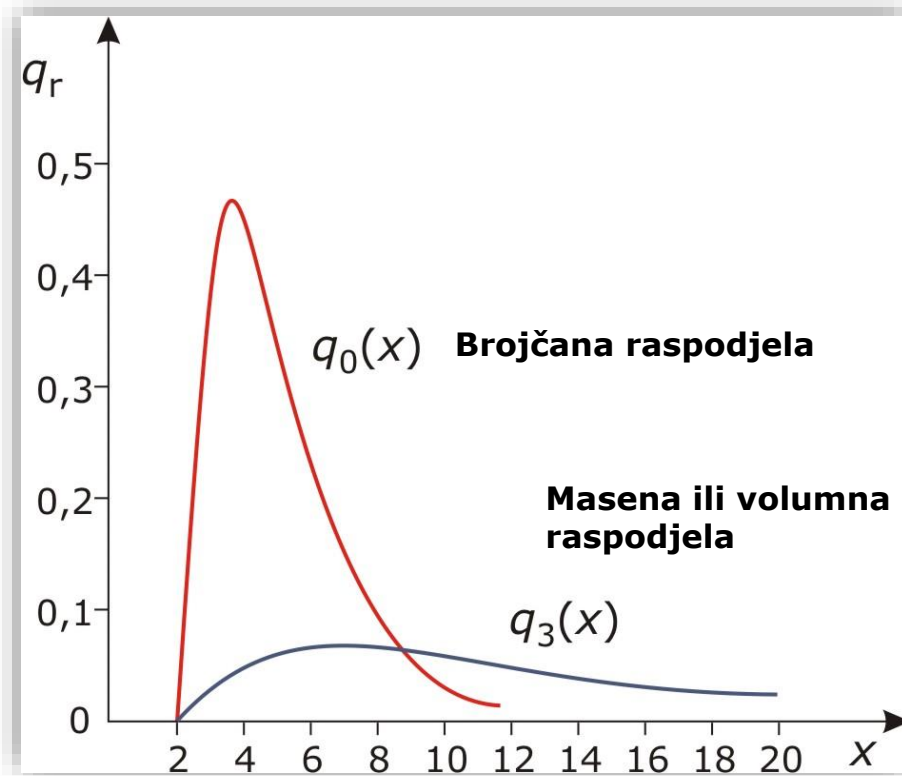




$$Q_r(x) = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} q_r(x) dx = 1$$

$$\sum_{i=1}^n (dQ_r(x))_i = 1$$

Različiti *tipovi raspodjela* rezultiraju različitim *iskazom* pripadajućih *funkcija gustoće raspodjele*.



Karakteristika brojčanih raspodjela veličina jest iznimna zastupljenost jedinki u veličinskim razredima malih veličina te neznatna zastupljenost jedinki u području većih veličina.

Ukupna populacija jedinki odnosno doprinos svih veličina (veliĉinskih razreda) u ukupnoj raspodjeli moŹe se kvantitativno iskazati samo jednom karakteristiĉnom veliĉinom:

- i. Medijan raspodjele (*median*), x_{50}
 - veliĉina koja razdvaja populaciju ĉestica na dva jednaka dijela (50 % ĉestica jest manje od te veliĉine i posljediĉno je 50 % veće)
- ii. Najuĉestalija veliĉina u promatranom kolektivu (*mode*), x_{mode}
- iii. Srednji promjer ukupne populacije ĉestica (*mean*), x_{mean}
 - maseni, $x_{\text{sr. } m}$
 - aritmetiĉki, $x_{1,0}$
 - Sauterov srednji promjer, $x_{3,2}$
 - De Brouckere srednji promjer, $x_{4,3}$

Aproksimiranje dobivenih rezultata mjerenja ostvaruje se primjenom analitičkih funkcija raspodjele:

- i. Logaritam normalna (LN) dvo-parametarska funkcija raspodjele,

$$q_r(x) = \frac{1}{\sigma_{\lg} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log x - \log x_{50}}{\sigma_{\lg}} \right)^2 \right]$$

Parametar raspršenosti

Parametar položaja

- ii. Rosin Rammler Sperling Bennetova (RRSB) dvo-parametarska funkcija raspodjele.

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

Parametar raspršenosti

Parametar položaja

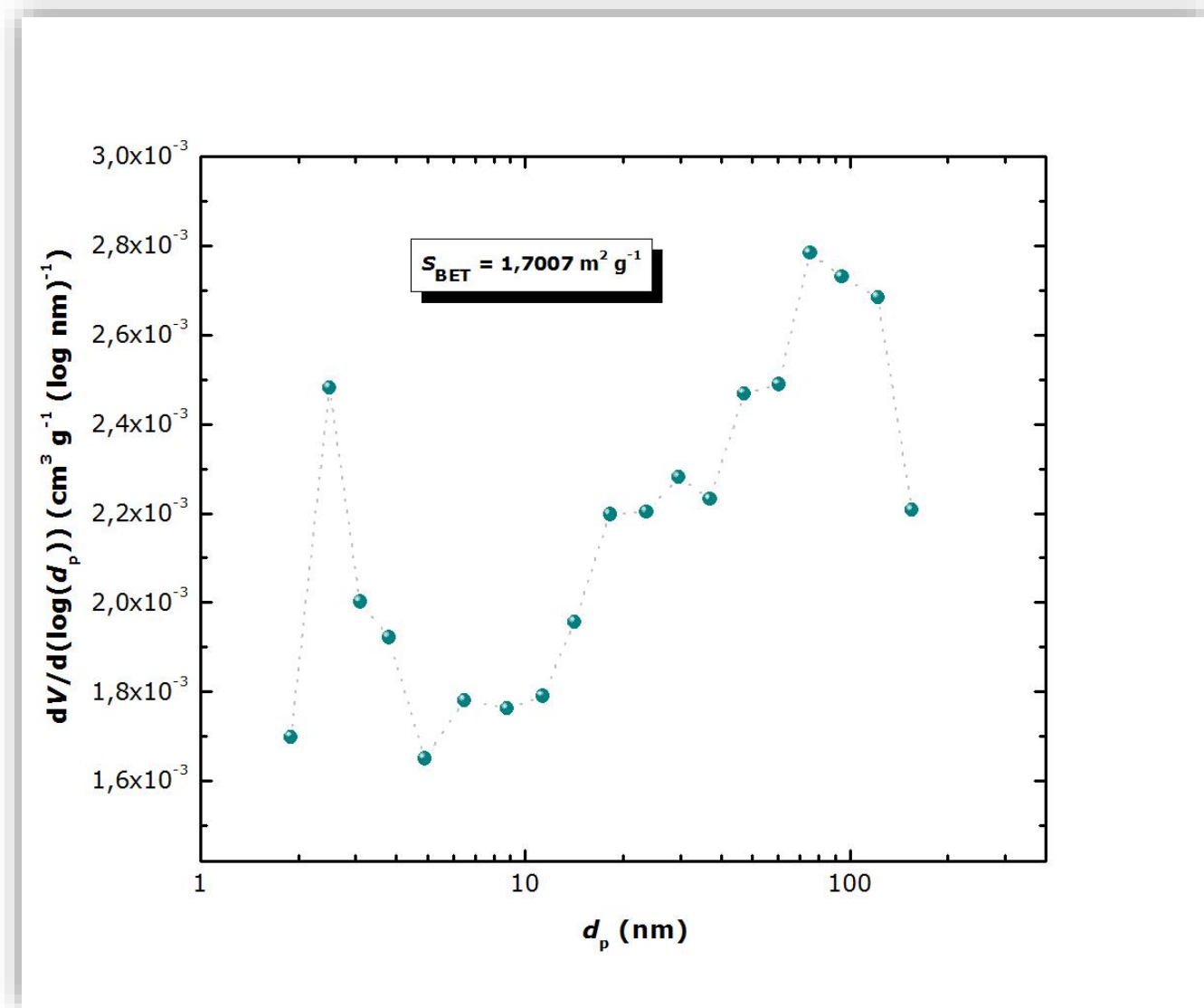
Primjenjivost pojedinih analitičkih funkcija (LN & RRSB) u aproksimiranju dobivenih raspodjela/aproksimiranju numeričkog seta podataka (eksperimentalno detektiranih) danas se testira primjenom:

- i. Standardiziranih predložaka (mreža),
- ii. Programskih paketa (*Process Tools*).

$$S_v = \frac{S}{V} = \frac{d_s^2 \pi}{\frac{d_s^3 \pi}{6}} = \frac{6}{d_s}$$

$$S_m = \frac{6}{\rho_d \cdot \psi_{Wa}} \sum_{i=1}^n \frac{(dQ_r(x))_i}{\bar{x}_i}$$

$$S_m = \frac{6}{\rho_d \cdot \psi_{Wa}} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{q_3(x) dx}{x}$$



Razine razmatranja

Grubodisperzni sustav (*bulk solid*)

ϵ_{sloja} – poroznost sloja (*voidage*) – međučestični prostor

Čestica (*particle*)

$\epsilon_{\text{čestice}}$ – poroznost same čestice (*porosity*) – unutarčestični prostor

Čvrsta faza u čestici (*solid in particle matrix*)

- i. Gustoća promatranog grubodisperznog sustava/volumna gustoća (*bulk density*),
 - u vezi s ukupnim volumenom koji zauzima dani partikulski sustav uključujući sve međuprostore (međučestični & unutarčestični prostor)
- ii. Prividna gustoća čestica (*particle apparent density*),
 - ugrađen doprinos volumena unutarčestičnog prostora i same čvrste faze u čestici
- iii. Stvarna gustoća čvrstoga (*true skeletal density*).
 - ugrađen jest doprinos samo volumena čvrste faze u čestici