

# Određivanje stvarne gustoće prašaka uz pomoć laboratorijskog posuđa

---

Zekić, Ema

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:817680>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-25**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Ema Zekić

Završni rad

Zagreb, rujan 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Ema Zekić

ODREĐIVANJE STVARNE GUSTOĆE PRAŠKA UZ POMOĆ LABORATORIJSKOG POSUĐA

Determination of true powder density by use of laboratory glassware

Završni rad

Mentor rada: prof. dr. sc. Jelena Macan

Neposredni voditelj: Andreja Žužić, mag. ing. cheming.

Članovi ispitnog povjerenstva:

prof. dr. sc. Jelena Macan

izv. prof. dr. sc. Davor Dolar

prof. dr. sc. Jasna Prlić Kardum

Zagreb, rujan 2023.

## SAŽETAK

Cilj ovog rada bio je odrediti gustoću praška sastavljenog od staklenih kuglica modificiranom metodom piknometra. Budući da tekućinski piknometar ima jako usko grlo, nepraktičan je za rad s praškastim uzorcima te je u ovom radu gustoća staklenih kuglica određena korištenjem staklene bočice sa čepom i menzure od 10 mL kao improviziranih piknometara. Kao otapalo korišteni su destilirana voda i etanol, a gustoća staklenih kuglica određena je kao aritmetička sredina tri uzastopna mjerenja. Rezultati dobiveni korištenjem staklene bočice i vode kao otapala te korištenjem menzure i oba otapala odgovaraju teorijskoj vrijednosti gustoće od  $2,5 \text{ g/cm}^3$ . Pritom je najniža standardna devijacija od 0,1823 dobivena korištenjem menzure i vode kao otapala što je i očekivano budući da je menzura graduirano laboratorijsko posuđe za razliku od staklene bočice na kojoj je oznaka proizvoljno urezana dijamantnim nožićem. Na temelju dobivenih rezultata proizlazi da je predstavljena metoda određivanja gustoće staklenih kuglica pomoću improviziranog piknometra pouzdana i dobra alternativa klasičnom piknometru.

KLJUČNE RIJEČI: gustoća, improvizirani piknometar, prašak, staklene kuglice

## **Determination of true powder density by use of laboratory glassware**

### **ABSTRACT**

The purpose of this work was to determine the density of powder consisting of glass beads using a modified pycnometer method. Since the liquid pycnometer has a very narrow neck, it is impractical for working with powder samples. Therefore in this work the density of glass beads was determined using a glass vial with a stopper and a 10 mL graduated cylinder as improvised pycnometers. Distilled water and ethanol were used as solvents, and the density of glass beads was determined as the arithmetic mean of three consecutive measurements. The results obtained using the glass vial and water as solvent and using the graduated cylinder and both solvents correspond to the theoretical density value of  $2,5 \text{ g/cm}^3$ . At the same time, the lowest standard deviation of 0,1823 was obtained using the graduated cylinder and water as solvent, which is expected since the cylinder is a graduated laboratory vessel, unlike the glass vial on which a mark is arbitrarily engraved with a diamond knife. Based on the obtained results, the presented method of determining the density of glass balls using an improvised pycnometer is a reliable and good alternative to the classic pycnometer.

**KEYWORDS:** density, improvised pycnometer, powder, glass beads

## Sadržaj

1.UVOD .....	1
2.TEORIJSKI UVOD .....	2
2.1 Prašci i njihova svojstva .....	2
2.1.1 Veličina pojedine čestice .....	2
2.1.2 Raspodjela veličine i srednja veličina sustava čestica .....	3
2.1.3 Oblik čestice.....	5
2.1.4 Površinska struktura i čvrstoća.....	5
2.2 Gustoća.....	6
2.3 Metode određivanja gustoće .....	7
2.3.1 Arhimedova metoda .....	7
2.3.2 Određivanje gustoće pomoću piknometra.....	8
2.3.3 Aerometar i hidrometar.....	10
3. EKSPERIMENTALNI DIO .....	12
3.1 Materijali i metode .....	12
3.2 Postupak određivanja gustoće metodom piknometra .....	13
3.3 Izračun gustoće na temelju prikupljenih podataka .....	14
4. REZULTATI I RASPRAVA.....	15
4.1 Rezultati određivanja gustoće staklenih kuglica .....	15
4.2 Ispitivanje utjecaja varijacija mase i temperature na gustoću .....	17
4.2.1 Ispitivanje varijacije mase i temperature kod improviziranog piknometra (staklene bočice s oznakom) gdje je otapalo voda .....	17
4.2.2 Ispitivanje varijacije mase i temperature pomoću menzure gdje je otapalo voda .....	20
4.2.3 Ispitivanje varijacije mase i temperature kod improviziranog piknometra (staklene bočice s oznakom) gdje je otapalo etanol .....	24
4.2.4 Ispitivanje varijacije mase i temperature pomoću menzure gdje je otapalo etanol .....	27
5. ZAKLJUČAK.....	30
6.LITERATURA .....	31

## 1.UVOD

Prašci su čvrsti materijali sastavljeni od čestica čija veličina može varirati od nekoliko nanometara pa sve do nekoliko milimetara. Prašci svoju primjenu nalaze u mnogim granama industrije te je karakterizacija njihovih svojstava važna za odabir i optimiranje proizvodnih procesa, skladištenje, pakiranje i transport proizvoda.

Jedno od bitnijih svojstava praška je njegova gustoća. Gustoća se općenito definira kao količnik mase i volumena, no njeno određivanje je mnogo složeniji postupak. Naime, masa uzorka se relativno lako određuje vaganjem, ali znatno je složenije određivanje volumena uzorka budući da realni uzorci sadrže pore, šupljine i pukotine. Za određivanje gustoće najčešće se koriste Arhimedova metoda, piknometarska metoda i mjerenje gustoće pomoću hidrometra.

Cilj ovog rada bio je odrediti gustoću praškastog uzorka – staklenih kuglica metodom piknometra. Budući da tekućinski piknometar nije prikladan za rad s praškastim uzorcima zbog vrlo uskog grla i mogućnosti zapinjanja praškastog uzorka u njemu, istražena je pouzdanost ove metode uz primjenu improviziranog piknometra. U tu svrhu korišteni su staklena bočica sa čepom na koju je oznaka proizvoljno urezana dijamantnim nožićem i graduirana menzura od 10 mL. Kao otapala pomoću kojih je određen volumen improviziranog piknometra odabrani su destilirana voda i etanol zbog njihove niske cijene, dostupnosti i netoksičnosti.

## 2. TEORIJSKI UVOD

### 2.1 Prašci i njihova svojstva

Prašci su čvrsti materijali sastavljeni od čestica veličine od nanometara do milimetara. Prašci su važne sirovine u mnogim granama industrije, ali su također često i konačni proizvodi te se trenutno na tržištu može pronaći mnogo hrane koja je u obliku praškaste forme [1]. Stoga se može reći da se skoro svaka tvornica u svijetu bavi određivanjem nekih od svojstva prašaka. Svaki prašak ima jedinstvene karakteristike koje će na kraju utvrditi njegovu kvalitetu, a one mogu biti biološke, kemijske ili anorganske [2]. Smatra se da je prašak disperzni dvofazni sustav koji se sastoji od disperzne faze krutih čestica te kontinuirane faze plina (zraka). Prašci se sastoje od tri vrste čestica: 1. primarnih prašaka (kristalne ili organske strukture međusobno povezane molekularnim vezama), 2. agregata (primarne čestice čvrsto povezane na dodirnim mjestima atomskim ili molekularnim vezama) i 3. aglomerata (primarne čestice čvrsto povezane van der Waalsovima silama) [3].

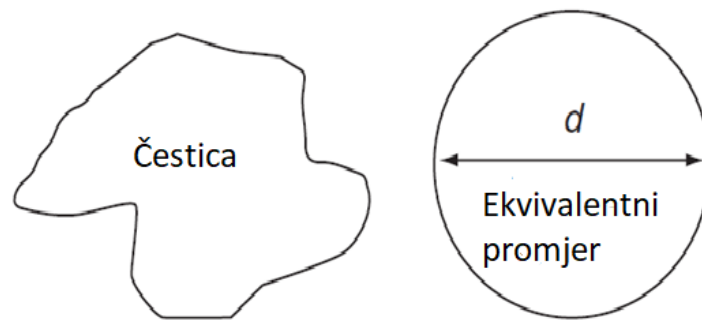
Najvažnija svojstva prašaka su [4]:

- 1) veličina pojedinih čestica
- 2) raspodjela veličine i srednja veličina sustava čestica
- 3) oblik čestica
- 4) površinska struktura i čvrstoća
- 5) gustoća

#### 2.1.1 Veličina pojedine čestice

Pojam veličine čestica praha uključuje njihov oblik i raspodjelu veličine čestica. Smatra se glavnom karakteristikom jer utječe na ostala svojstva praha kao što su gustoća, topljivost i dr. [2]. Način određivanja karakteristične veličine čestica za početak bilo kakve analize ili mjerenja često stvara problem. U praksi čestice koje tvore prah rijetko imaju sferni oblik te karakteristična veličina čestica ovisi o mjernoj tehnici kojom se određuje [5]. U definiranju veličine čestice nepravilnog oblika koristi se ekvivalentni promjer (slika 1.) koji predstavlja promjer sfere koja ima ista svojstva kao promatrana čestica nepravilnog oblika [6].



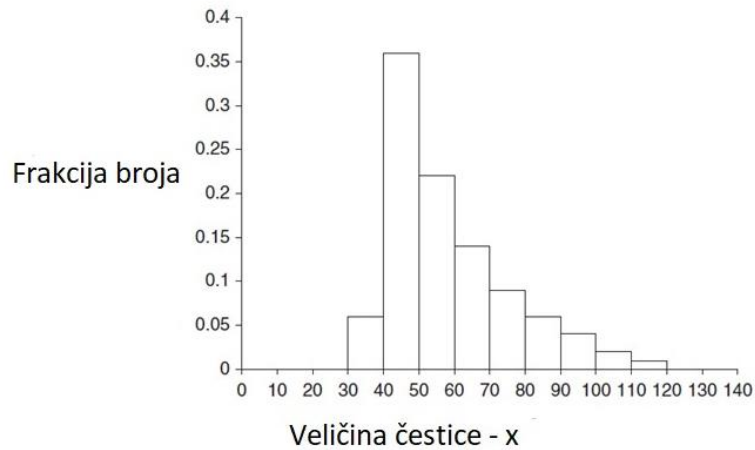


**Slika 1.** Grafički prikaz koncepta ekvivalentnog promjera [6]

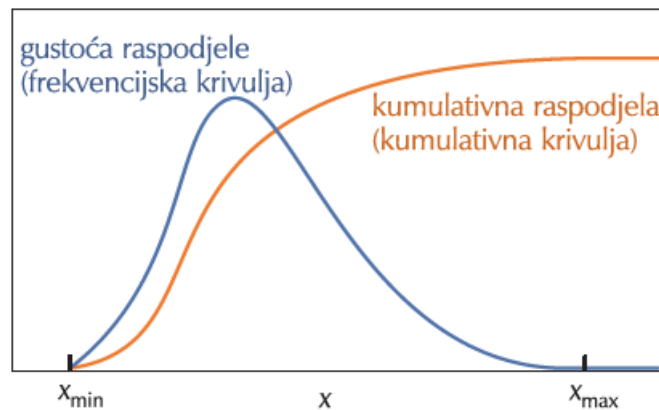
#### 2.1.2 Raspodjela veličine i srednja veličina sustava čestica

Sustav čestica karakteriziraju: ukupni broj čestica, te njihov promjer, površina i volumen, odnosno masa ako je gustoća svih čestica jednaka [4]. Odrediti raspodjelu veličine čestica znači detektirati udio svake pojedine veličine, definirane određenom oznakom (mjerom) finoće, u ukupnoj populaciji odnosno odrediti udio (maseni, volumni ili brojčani) čestica određene veličine u promatranom kolektivu [7].

Ove raspodjele mogu se grafički prikazati kao histogrami (slika 2.) gdje su brojčane, masene ili volumne frakcije prikazane u ovisnosti o diskretnom povećanju veličina čestica. Iz histograma se može izvesti kumulativni dijagram, a raspodjela veličine čestica se često prikazuje frekvencijskim dijagramom koji predstavlja gustoću raspodjele tj. raspodjela čestica veličinskog razreda podijeljenu širinom razreda (slika 3.) [6].



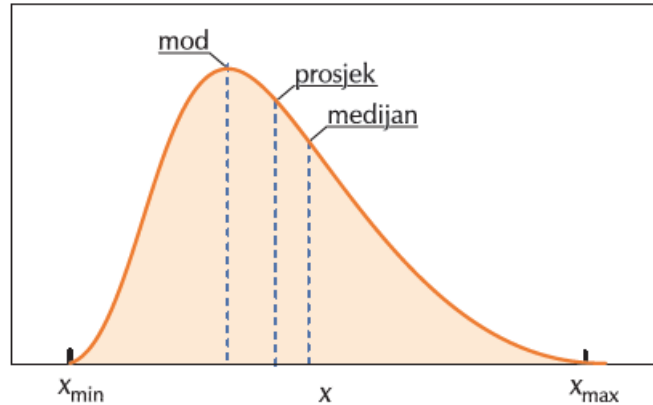
**Slika 2.** Prikaz distribucije veličine čestica frakcije broja predstavljena kao histogram [6]



**Slika 3.** Prikaz kumulativne krivulje i frekvencijske krivulje (gustoće raspodjele) [8]

Karakteristične točke [8] koje se koriste pri opisivanju funkcije raspodjele su (slika 4.):

- a) prosjek – definira se kao srednja vrijednost promjera čestice
- b) mod – govori nam o promjeru klase čestica s najvećom frekvencijom
- c) medijan – vrijednost dimenzije koja definira kako 50 % čestica ima manji promjer od medijana, a 50 % veći



**Slika 4.** Prikaz karakterističnih točaka pri funkciji raspodjele veličina čestica [8]

### 2.1.3 Oblik čestice

Realne čestice nisu idealnog sfernog oblika, a njihov oblik utječe na proizvodni proces te na konačna svojstva proizvedenog praha. Bilo je mnogo pokušaja kako bi se razvio sveobuhvatan princip definiranja oblika čestica, no niti jedan nije bio posve uspješan [9]. Jedan od najjednostavnijih je onaj kojeg je postavio Wadell [10] koji definira sferičnost,  $\Psi$ , kao:

$$\Psi = \frac{\text{površina kugle koja ima isti volumen kao čestica}}{\text{površina čestice}} \quad (1)$$

Heywood [11] je 1938. utvrdio kako se ukupni oblik čestice sastoji od dva parametra. Prvi dio se odnosi na oblik (kockasti, sferoidni itd.) čestice, a drugi na relativne proporcije pomoću kojih se jedan oblik razlikuje od drugog istog oblika. Heywoodova definicija oblika čestice [11] obuhvaća definiranje površinskih i volumnih koeficijenata oblika koji se izračunavaju iz ekvivalentnih promjera čestica određenih mikroskopskom analizom.

### 2.1.4 Površinska struktura i čvrstoća

Važan utjecaj na svojstva čestica ima njihova površina. Osim vanjske površine, može postojati i unutarnja površina koja se sastoji od pukotina i pora čija je veličina znatno veća nego kod vanjske površine. Čestica može imati i druga svojstva kao što su kristalna struktura, veličina kristalnog zrna i tvrdoća, ali ona nisu specifična svojstva čestica, već strukturalna svojstva prašaka [4]. Kao opće pravilo, tvrdoća se definira pomoću Mohsove skale, koja je podijeljena u deset stupnjeva tvrdoće. Prema njoj, ako se materijal nalazi između vrijednosti 1 i 3 smatra se mekanim, ako se nalazi između vrijednosti 3 i 5 smatra se srednje tvrdim. Materijal se smatra tvrdim ako poprima vrijednosti između 5 i 10 [5].

## 2.2 Gustoća

Gustoća ( $\rho$ ) je fizikalna veličina karakteristična za svaku tvar i računa se kao količnik mase i volumena te tvari i izražava se u  $\text{kg/m}^3$  ili češće u  $\text{g/cm}^3$ . Međutim, određivanje gustoće neke tvari složeniji je proces: iako je određivanje mase predmeta jednostavno, određivanje volumena često izaziva problem. Da bi se pravilno razumjela definicija volumena, potrebno je proučiti leksikon tehnologije čestica. Dva izvora za ove definicije su Britanski institut za standarde (engl. *British Standards Institute*, BSI) i Američko društvo za testiranje i materijale (engl. *American Society for Testing and Materials*, ASTM). Ondje se definira kako je volumen materijala zbroj nekoliko strogo definiranih elementarnih volumena [12]. Zbog navedenih poteškoća određivanja volumena razlikuju se tri tipa gustoće [4]:

- 1.) prava gustoća
- 2.) prividna gustoća
- 3.) efektivna gustoća

### Prava gustoća

Prava ili stvarna gustoća definirana je kao omjer mase i stvarnog volumena uzorka pri čemu je od ukupnog volumena potrebno oduzeti doprinos volumena koji čine pore ili unutarnje šupljine. Gustoća se u laboratoriju najčešće određuje piknometrom, vrstom staklenog laboratorijskog posuđa čiji naziv potječe od grčke riječi *pyknos* što znači „gust“ [13].

### Prividna gustoća

Prividna gustoća praha definira se kao omjer mase i volumena kojeg ta masa zauzima. Pritom se kao vrijednost volumena uzima vanjski volumen i zanemaruje se doprinos volumena pora. Stoga vrijednost prividne gustoće jako ovisi o veličini i obliku čestica budući da u obzir uzima samo vanjski promatrani volumen. Prividna gustoća najčešće opada smanjenjem veličine čestica, povećanjem nepravilnosti oblika čestice te povećanjem površinske hrapavosti. S druge strane, prividna gustoća raste s povećanjem raspodjele veličine čestica jer su u tom slučaju prostori između većih čestica ispunjeni manjim česticama [14].

### Efektivna gustoća

Efektivna gustoća čestice naziva se još i aerodinamičkom gustoćom i definira se kao odnos mase praha podijeljene s njegovim volumenom u koji su uključene otvorene i zatvorene pore. Pritom se volumen praha definira kao aerodinamička ovojnica uz koju struji plin. Poznavanje

efektivne gustoće važno je u procesima fluidizacije, taloženja te u procesima gdje se prašci koriste u obliku gusto pakiranih slojeva (npr. u katalizi) [5].

### 2.3 Metode određivanja gustoće

Postupak određivanja gustoće nekog materijala uključuje određivanje njegove mase i volumena. Masa se određuje vaganjem što se vrlo precizno može provesti na analitičkoj vagi [15]. Volumen materijala se najčešće određuje indirektno. Za određivanje gustoće realnih uzoraka koriste se razne metode, a one najzastupljenije će biti pobliže objašnjenje u nastavku rada.

#### 2.3.1 Arhimedova metoda

Jedna od najpoznatijih metoda je određivanje gustoće prema Arhimedu i temelji se na činjenici da je tijelo uronjeno u tekućinu lakše za težinu istisnute tekućine. Određivanje gustoće prema Arhimedu se provodi tako da se uzorak najprije važe na zraku ( $m_z$ ), a zatim uronjen u kapljevinu, najčešće vodu ( $m_v$ ). Postupak se provodi na analitičkoj vagi korištenjem postava prikazanog na slici 5 [16]. Prilikom određivanja gustoće Arhimedovom metodom važno je odrediti temperaturu kapljevine koja se koristi budući da temperatura direktno utječe na njenu gustoću. Gustoća uzorka određuje se prema sljedećem izrazu [17] :

$$\rho_{uz} = \frac{m_z(\rho_v - \rho_z)}{m_z - m_v} + \rho_z, \quad (2)$$

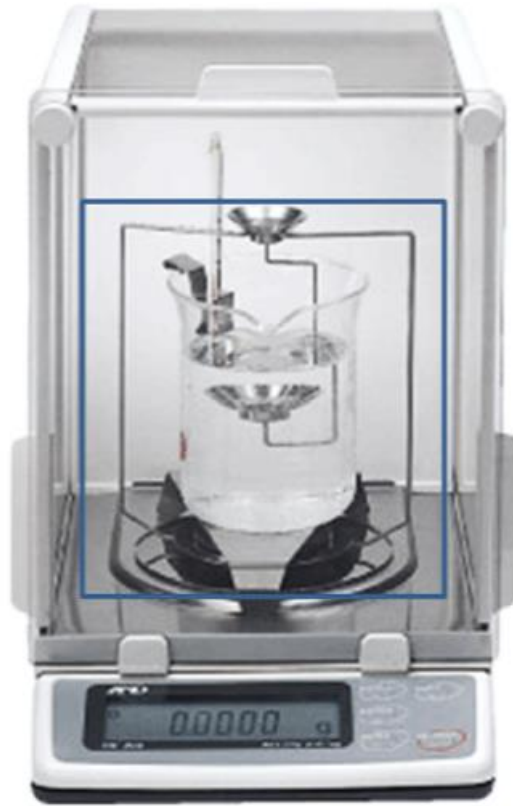
pri čemu je  $\rho_v$  gustoća kapljevine koja se određuje iz tablica ovisnosti gustoće kapljevine o temperaturi, a  $\rho_z$  je gustoća zraka koja iznosi  $0,0012 \text{ g/cm}^3$ .

Arhimedova metoda svoju je primjenu našla za određivanje gustoće čestica koje imaju nepravilan oblik poput stijena i šljunka. Prednost ove metode nad metodom određivanja gustoće pomoću piknometra je ta da se skuplja mnogo podataka kako bi se izračunala gustoća čestica, nasipna gustoća te poroznost [15].

Osim za određivanje gustoće čvrstih uzoraka, Arhimedovom metodom se može određivati i gustoća kapljevinu uranjanjem staklene kuglice poznatog volumena u ispitivanu kapljevinu pri čemu se gustoća kapljevine računa kao [18]:

$$\rho = \frac{\Delta m}{V} + \rho_z, \quad (3)$$

pri čemu je  $\Delta m$  razlika očitavanja mase kuglice prije i nakon uranjanja,  $V$  volumen staklene kuglice, a  $\rho_z$  je gustoća zraka koja iznosi  $0,0012 \text{ g/cm}^3$ .



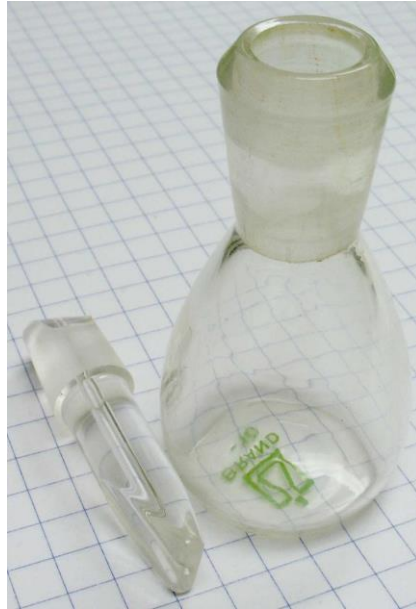
**Slika 5.** Prikaz postava za određivanje gustoće Arhimedovom metodom [16]

### 2.3.2 Određivanje gustoće pomoću piknometra

Za određivanje gustoće pomoću piknometra potrebno je da su piknometar, destilirana voda i ispitivana kapljevina na istoj temperaturi te da se za vrijeme mjerenja temperatura ne mijenja značajno. Prvi korak pri provođenju ove metode je vaganje suhog piknometara sa staklenim čepom, ( $m_1$ ) na analitičkoj vagi s preciznošću  $0,0001\text{g}$ . Nakon toga se piknometar puni kapljevnom čija se gustoća želi odrediti pri čemu je potrebno paziti da ne zaostanu mjehurići zraka te se napunjeni piknometar ponovno važe ( $m_2$ ). Nakon vaganja piknometar je potrebno isprati destiliranom vodom. Nakon ispiranja, pikometar se napuni destiliranom vodom i izvaže ( $m_3$ ). Iz razlike  $m_2$  i  $m_1$  izračuna se masa kapljevine, a iz razlike  $m_3$  i  $m_1$  masa vode [13]. Gustoća ispitivane kapljevine se može lako izračunati koristeći sljedeći izraz:

$$\rho(\text{tekućina}) = \frac{m_2 - m_1}{m_3 - m_1} \cdot \rho(\text{voda}) \quad (4)$$

Metoda određivanja gustoće pomoću piknometra može se primijeniti i za određivanje gustoće praška. Također primjenu nalazi kada se određuje gustoća mješavina polimera ili sirovina za njihovu proizvodnju [18].



**Slika 6.** Prikaz praznog piknometra [19]



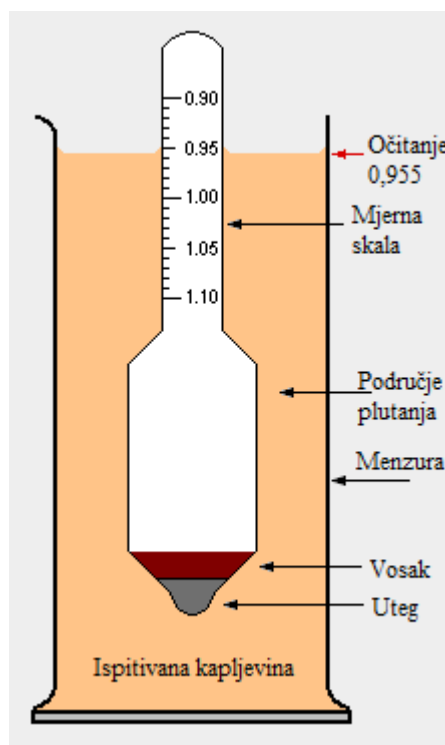
**Slika 7.** Prikaz piknometra napunjenog kapljevinom čija se gustoća određuje [19]

Piknometar osim kapljevitim uzorkom, može biti ispunjen i plinovitim uzorkom čija se gustoća želi odrediti. Promjena volumena se pritom mjeri neizravno prema odnosu tlak/volumen plina pri kontroliranim uvjetima. Piknometrija pomoću plina zahtijeva upotrebu inertnih, suhих

plinova visoke čistoće kao što su argon, neon, suhi dušik, suhi zrak ili helij. Najčešće se upotrebljava helij jer se ponaša kao idealni plin [14].

### 2.3.3 Aerometar i hidrometar

Hidrometar ili aerometar je instrument koji određuje gustoću tekućine uranjanjem u nju [20]. Hidrometar je jeftiniji instrument izrađen od puhanog stakla a sastoji se od cjevčice sa skalom i trbušastog dna opterećenog olovnim ili čeličnim utegom. Njegov rad temelji se na Arhimedovu zakonu, a postupak određivanja gustoće provodi se tako da se hidrometar uroni do dna u ispitivanu kapljevina, pričekava se da ispliva i da se stabilizira, a gustoća se očitava na skali kao mjesto gdje se razina tekućine poravnava s oznakom na mjernoj skali [21].



**Slika 8.** Shematski prikaz određivanja gustoće kapljevine hidrometrom [22]





**Slika 9.** Prikaz aerometra [23]

Budući da se hidrometri koriste u različitim granama industrije postoji više mjernih skala. Primjerice, u proizvodnji raznih pića (vina i sokova) potrebno je odrediti sadržaj šećera te se u tom slučaju koristi Brixov hidrometar. U kemijskoj industriji i farmakologiji se koristi Bauméova skala, dok naftna industrija ima svoju API (engl. *American Petroleum Institute*) skalu kojom se mjeri koliko je neka naftna kapljevina lakša ili teža od vode. Kao i kod određivanja gustoće Arhimedovom metodom i piknometrom, i u ovom je slučaju važna kontrola temperature pri kojoj se mjerenje provodi. Stoga se određivanje gustoće hidrometrom često provodi pri kalibracijskoj temperaturi hidrometra između 16 i 20 °C ili se pak uvodi korekcijski faktor ako ispitivanu kapljevinu nije prikladno hladiti na potrebnu temperaturu [21]. Za razliku od uobičajenog hidrometra koji se uranja u tekućinu u kojoj se testira, aerometar se uranja u čistu vodu, a uzorak se pohranjuje u odvojivi pretinac na dnu instrumenta. Takav dizajn omogućuje mjerenje uzoraka koje sadrže čestice koje se talože, budući da masa tekućine unutar pretinca ostaje ista. Nakon što aerometar postigne ravnotežu u vodi, gustoća uzorka može se očitati s oznake na razini vode [23].

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

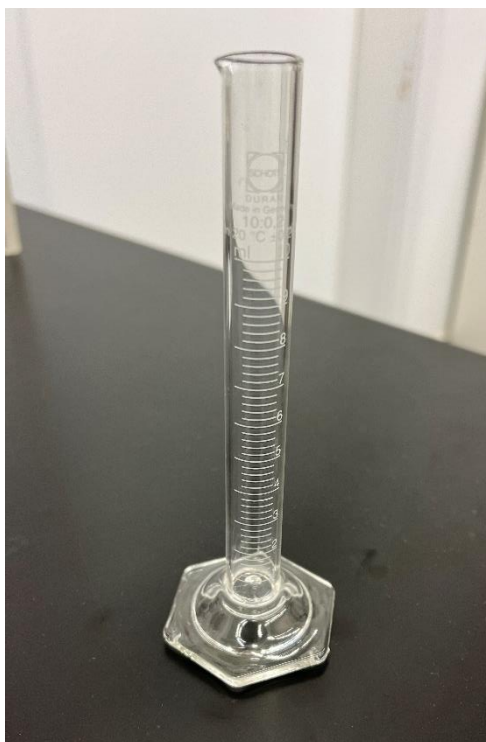
#### 3.1 Materijali i metode

Materijali korišteni pri izradi eksperimenta bili su staklene kuglice (Swingcolor), etanol ( $C_2H_5OH$ ; p.a.; 96 %; KEFO;  $M=46,07 \text{ g mol}^{-1}$ ) i destilirana voda.

Određivanje gustoće staklenih kuglica provedeno je metodom piknometra pri čemu su korišteni improvizirani piknometar (staklena bočica sa čepom) s urezanim oznakom (slike 9. i 10.) i menzura od 10 mL (slika 11.).



**Slika 10.** Prikaz korištenog improviziranog piknometra s urezanim oznakom



**Slika 11.** Prikaz menzure od 10 mL korištene pri izvedbi eksperimenta

### 3.2 Postupak određivanja gustoće metodom piknometra

Postupak određivanja gustoće staklenih kuglica (SK) proveden je na isti način koristeći staklenu bočicu s urezanom oznakom i menzuru od 10 mL kao piknometar. Na početku rada potrebno je izvagati suhi i prazan improvizirani piknometar ( $m_0$ ) na analitičkoj vagi preciznosti 0,1 mg. Nakon vaganja praznog piknometra, odvagano je 0,5 g staklenih kuglica koje su iz lađice za vaganje prebačene u piknometar nakon čega je piknometar s uzorkom ( $m_1$ ) ponovo vagan kako bi se odredila točna masa uzorka. Idući korak bio je punjenje piknometra s uzorkom destiliranom vodom do oznake, polako kako bi se uzorak stigao natopiti vodom. Poslije tog koraka bilo je potrebno detaljno ukloniti vodu s vanjske stijenke posude te kapljice iznad oznake. Ponovno slijedi vaganje ( $m_2$ ) te nakon njega slijedi ispiranje piknometra. Nakon ispiranja, piknometar se ostavlja sušiti. Kada se potpuno osušio ponovno se napuni destiliranom vodom do oznake i izvaže ( $m_3$ ). Mjerenje je provedeno 3 puta za svaki improvizirani piknometar, a nakon završetka mjerenja s vodom, isti opisani postupak ponovljen je i za sljedeće otapalo – 96 %-tni etanol. Prilikom provođenja eksperimenta praćena je temperatura otapala (vode i etanola) pomoću digitalnog termometra preciznosti 0,1 °C.

### 3.3 Izračun gustoće na temelju prikupljenih podataka

Tijekom provedbe eksperimenta bilježe se sljedeći podaci:

- Masa praznog piknometra:  $m_0$ , g
- Masa piknometra sa SK:  $m_1$ , g
- Masa piknometra s vodom ili etanolom i SK:  $m_2$ , g
- Masa piknometra napunjenog samo vodom ili etanolom:  $m_3$ , g

Volumen piknometra računa se prema sljedećem izrazu:

$$V(\text{piknometar}) = \frac{m(\text{voda ili etanol})}{\rho(\text{voda ili etanol})} = \frac{m_3 - m_0}{\rho(\text{voda ili etanol})} \quad (5)$$

Masa staklenih kuglica ubačenih u piknometar računa se kao razlika mase piknometra s uzorkom i praznog piknometra:

$$m(\text{SK}) = m_1 - m_0 \quad (6)$$

Volumen vode ili etanola računa se kao omjer razlike masa piknometra napunjenog uzorkom i vodom ili etanolom i mase piknometra napunjenog samo uzorkom i gustoće vode ili etanola određene preko tablica P1. i P2. danih u prilogu rada:

$$V(\text{voda ili etanol}) = \frac{m_2 - m_1}{\rho(\text{voda ili etanol})} \quad (7)$$

Konačno, volumen staklenih kuglica se računa kao razlika volumena piknometra i volumena vode ili etanola:

$$V(\text{SK}) = V(\text{piknometar}) - V(\text{voda ili etanol}) \quad (8)$$

Gustoća mase staklenih kuglica računa se prema izrazu (9):

$$\rho(\text{SK}) = \frac{m(\text{SK})}{V(\text{SK})} = \frac{m_1 - m_0}{\frac{(m_3 - m_0) - (m_2 - m_1)}{\rho(\text{voda ili etanol})}} = \rho(\text{voda ili etanol}) \frac{m_1 - m_0}{m_3 - m_2 + m_1 - m_0} \quad (9)$$

## 4. REZULTATI I RASPRAVA

### 4.1 Rezultati određivanja gustoće staklenih kuglica

Eksperimentalni podaci prikupljeni pri određivanju gustoće staklenih kuglica dani su u Tablicama P3. – P6. u prilogu rada, dok su konačni rezultati određivanja gustoće i njihove standardne devijacije prikazane u Tablicama 1. – 4.

**Tablica 1.** Prikaz masa staklenih kuglica i određenih gustoća pomoću staklene bočice s oznakom kao piknometra i vode kao otapala

Redni broj mjerenja	$m$ (SK) / g	$\rho$ (SK) / g cm <sup>-3</sup>
1.	0,4989	2,6219
2.	0,5097	2,0074
3.	0,4991	2,1177
	$\bar{\rho}$ / g cm <sup>-3</sup>	2,2490
	Standardna devijacija	0,3276

**Tablica 2.** Prikaz masa staklenih kuglica i određenih gustoća pomoću menzure od 10 mL kao piknometra i vode kao otapala

Redni broj mjerenja	$m$ (SK) / g	$\rho$ (SK) / g cm <sup>-3</sup>
1.	0,5038	2,7700
2.	0,4947	2,4117
3.	0,4907	2,5332
	$\bar{\rho}$ / g cm <sup>-3</sup>	2,5716
	Standardna devijacija	0,1823

Temeljem rezultata dobivenih u Tablicama 1. i 2. srednja gustoća staklenih kuglica u mjerenju sa staklenom bočicom i vodom iznosi 2,2490 g cm<sup>-3</sup>, dok mjerena pomoću menzure i vode iznosi 2,5716 g cm<sup>-3</sup>. Referenca [24] daje podatak teorijske gustoće kuglica koja iznosi 2,5 g cm<sup>-3</sup>. Standardna devijacija dobivena kod staklene bočice iznosi 0,3276, dok kod menzure iznosi 0,1823. Možemo zaključiti kako je mjerenje pomoću menzure bliže teorijskoj vrijednosti

gustoće staklenih kuglica. Standardna devijacija određena kod menzure je niža što se i očekivalo jer menzura spada u graduirano laboratorijsko posuđe.

**Tablica 3.** Prikaz masa staklenih kuglica i određenih gustoća pomoću staklene bočice s oznakom kao piknometra i etanola kao otapala

Redni broj mjerenja	$m$ (SK) / g	$\rho$ (SK) / g cm <sup>-3</sup>
1.	0,5129	1,2247
2.	0,5046	1,3258
3.	0,5108	1,6635
	$\bar{\rho}$ / g cm <sup>-3</sup>	1,4047
	Standardna devijacija	0,2298

**Tablica 4.** Prikaz masa staklenih kuglica i određenih gustoća pomoću menzure od 10 mL kao piknometra i etanola kao otapala

Redni broj mjerenja	$m$ (SK) / g	$\rho$ (SK) / g cm <sup>-3</sup>
1.	0,5009	2,8436
2.	0,5081	2,2971
3.	0,4962	2,4793
	$\bar{\rho}$ / g cm <sup>-3</sup>	2,5400
	Standardna devijacija	0,2782

Temeljem rezultata dobivenih u Tablicama 3. i 4. srednja gustoća u mjerenju sa staklenom bočicom iznosi 1,4047 g cm<sup>-3</sup>, dok mjerena pomoću menzure iznosi 2,5400 g cm<sup>-3</sup>. Usporedbom sa teorijskom vrijednošću [24] od 2,5 g cm<sup>-3</sup>, proizlazi da je gustoća točnije određena uz menzuru i etanol. Kod određivanja gustoće staklenih kuglica pomoću staklene bočice sa čepom i etanola, dobivena je znatno niža vrijednost gustoće od 1,4047 g cm<sup>-3</sup> u usporedbi s ostalim

dobivenim rezultatima (tablice 1., 2. i 4.). Razlog tome je što je izračunati volumen uzorka dvostruko veći, što je pak posljedica nešto precijenjenog volumena piknometra, tj. bočice. Možda se ova pogreška javlja kod korištenja etanola a ne i vode jer je gustoća etanola oko 20 % manja od gustoće vode, pa manje pogreške u određivanju mase otapala daju veća odstupanja u izračunatom volumenu. U ovom slučaju je standardna devijacija kod mjerenja pomoću bočice 0,2298, dok je kod menzure 0,2782. Iako je standardna devijacija za staklenu bočicu nešto niža, određena gustoća je skoro dvostruko manja od teorijske vrijednosti te određivanje gustoće staklenih kuglica pomoću staklene bočice i etanola nije pouzdano.

## 4.2 Ispitivanje utjecaja varijacija mase i temperature na gustoću

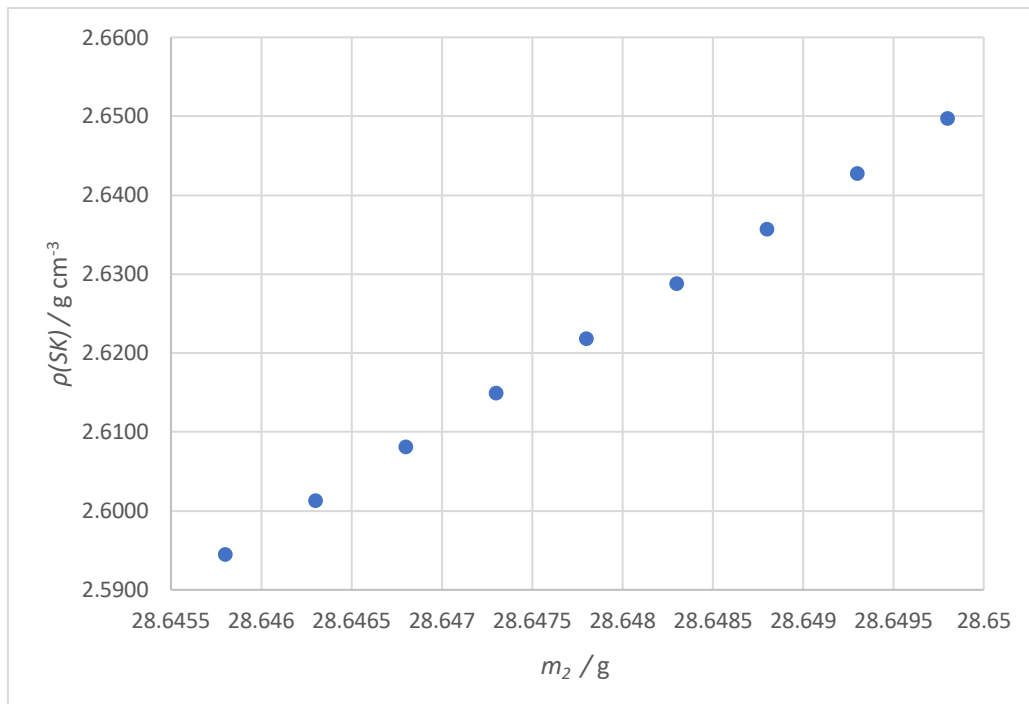
Kako bi se ispitaio utjecaj vrlo malih promjena masa  $m_2$  i  $m_3$  te temperature na rezultate mjerenja, napravljene su varijacije u koracima od  $\pm 0,5$  mg i  $\pm 0,2$  °C u odnosu na eksperimentalne vrijednosti.

### 4.2.1 Ispitivanje varijacije mase i temperature kod improviziranog piknometra (staklene bočice s oznakom) gdje je otapalo voda

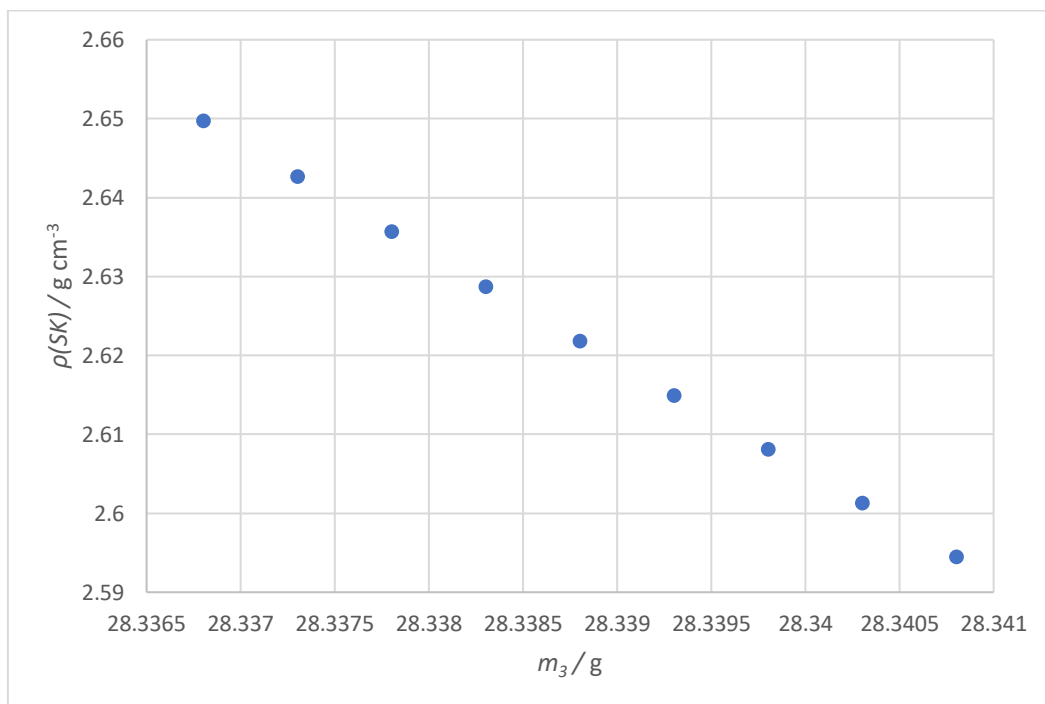
S malim promjenama podataka  $m_2$  i  $m_3$  dobiveni su rezultati prikazani u tablici 5. i na slikama 12. i 13.

**Tablica 5.** Prikaz utjecaja promjene  $m_2$  i  $m_3$  na izračunatu gustoću staklenih kuglica

$m_2 / \text{g}$	$\rho \text{ (SK)} / \text{g cm}^{-3}$	$m_3 / \text{g}$	$\rho \text{ (SK)} / \text{g cm}^{-3}$
28,6458	2,5945	28,3368	2,6497
28,6463	2,6013	28,3373	2,6427
28,6468	2,6081	28,3378	2,6357
28,6473	2,6150	28,3383	2,6287
28,6478	2,6219	28,3388	2,6218
28,6483	2,6288	28,3393	2,6149
28,6488	2,6357	28,3398	2,6081
28,6493	2,6427	28,3403	2,6013
28,6498	2,6498	28,3408	2,5945



**Slika 12.** Ovisnost promjene gustoće staklenih kuglica o masi  $m_2$  mjerene pomoću staklene bočice s oznakom



**Slika 13.** Ovisnost promjene gustoće staklenih kuglica o masi  $m_3$  mjerene pomoću staklene bočice s oznakom

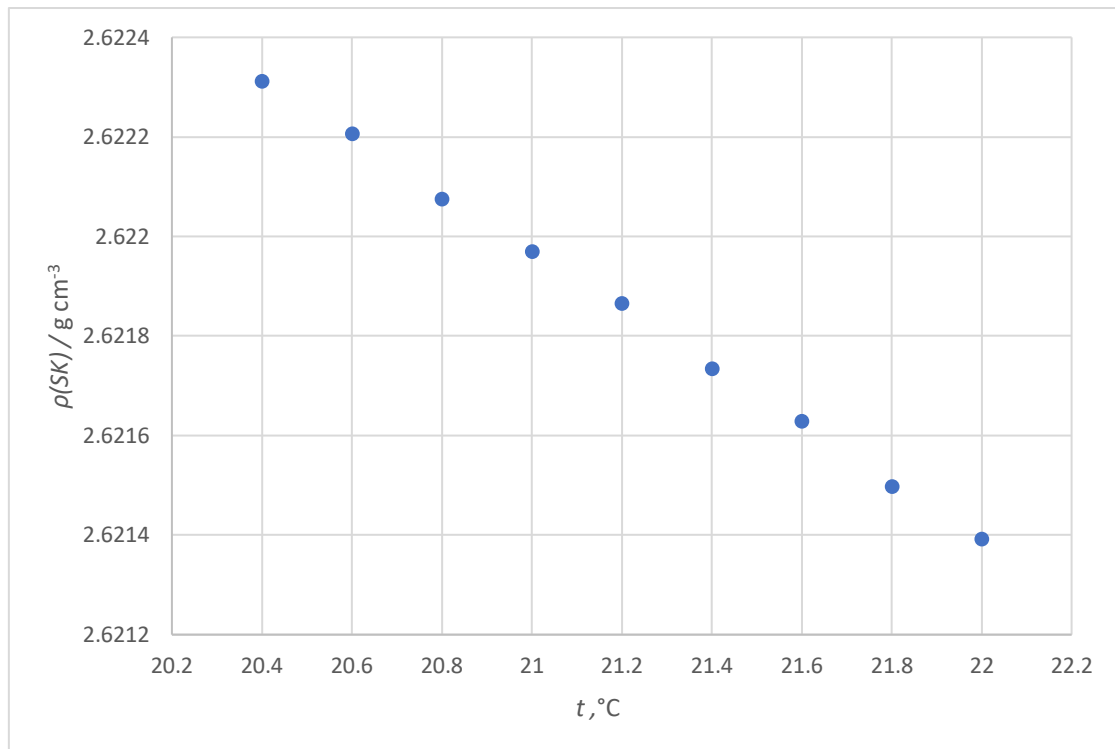


Temeljem dobivenih brojčanih rezultata (tablica 5.) i grafičkih prikaza (slike 12. i 13.) izvedenih iz određivanja gustoće staklenih kuglica pomoću staklene bočice s oznakom i vode, proizlazi da gustoća staklenih kuglica linearno raste kako se povećava masa  $m_2$  koja se odnosi na masu piknometra napunjenog s SK i vodom. S druge strane, gustoća staklenih kuglica linearno pada povećanjem mase  $m_3$  (masa piknometra napunjenog samo vodom) budući da povećanje te mase direktno utječe na povećanje ukupnog volumena piknometra i smanjenje volumena staklenih kuglica prema izrazu (8) što za posljedicu ima smanjenje gustoće staklenih kuglica prema izrazu (9). Ukupna promjena mase  $m_2$  odnosno  $m_3$  za samo 4 mg rezultira promjenom gustoće za  $0,055 \text{ g cm}^{-3}$ , što pokazuje na veliku važnost preciznog vaganja.

Pri istraživanju kako promjena temperature vode utječe na gustoću staklenih kuglica korištena je ovisnost gustoće vode o temperaturi dana u tablici P1. priloga ovog rada.

**Tablica 6.** Prikaz utjecaja malih promjena temperature vode na gustoću staklenih kuglica određenu pomoću staklene bočice s oznakom

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho \text{ (SK)} / \text{ g cm}^{-3}$
20,4	2,6223
20,6	2,6222
20,8	2,6220
21,0	2,6219
21,2	2,6218
21,4	2,6217
21,6	2,6216
21,8	2,6215
22,0	2,6214



**Slika 14.** Ovisnost promjene gustoće staklenih kuglica o temperaturi vode za mjerenja provedena pomoću staklene bočice s oznakom

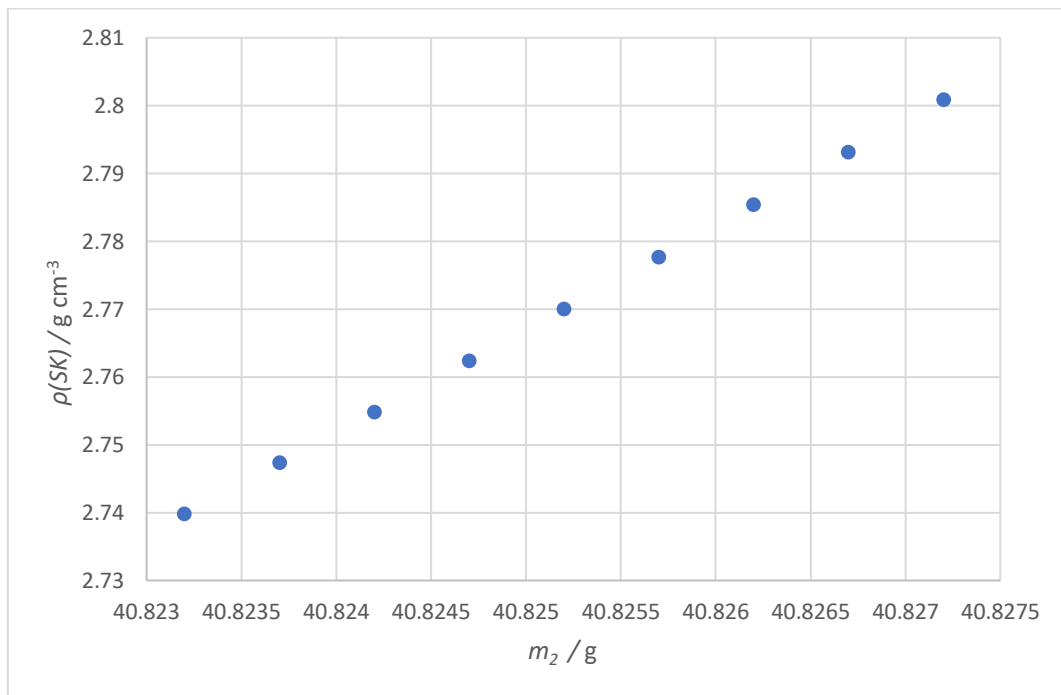
Na temelju brojčanih rezultata danih u tablici 6. i grafičkih rezultata prikazanih na slici 14., vidljivo je da se gustoća staklenih kuglica linearno smanjuje povećanjem temperature vode. Razlog tome je taj što povećanje temperature za posljedicu ima smanjenje gustoće vode koja utječe na povećanje volumena piknometra prema izrazu (5). Povećanje volumena piknometra pak utječe na smanjenje volumena SK prema izrazu (8) i rezultira smanjenjem gustoće staklenih kuglica prema izrazu (9). Promjena temperature za 1,6 °C izaziva promjenu gustoće za manje od 0,001 g cm<sup>-3</sup>, što pokazuje da kontrola temperature nije toliko ključna kod određivanja gustoće ovom metodom.

#### 4.2.2 Ispitivanje varijacije mase i temperature pomoću menzure gdje je otapalo voda

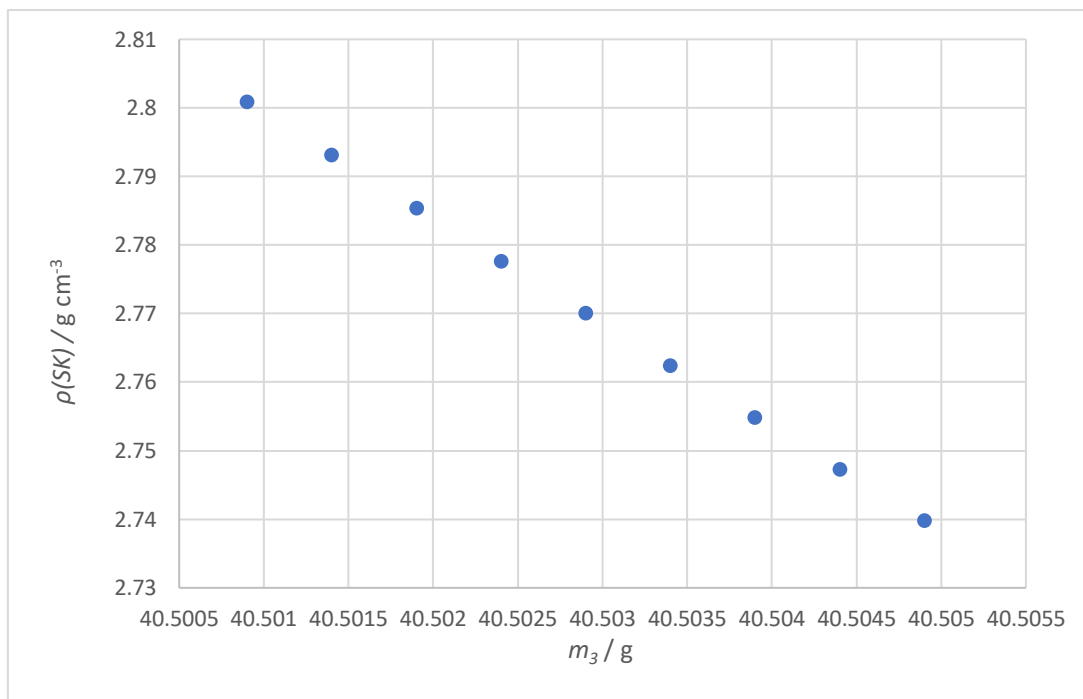
S malim promjenama podataka  $m_2$  i  $m_3$  dobiveni su rezultati prikazani u tablici 7. i na slikama 15. i 16.

**Tablica 7.** Prikaz utjecaja promjene  $m_2$  i  $m_3$  na izračunatu gustoću staklenih kuglica

$m_2 / \text{g}$	$\rho (\text{SK}) / \text{g cm}^{-3}$	$m_3 / \text{g}$	$\rho (\text{SK}) / \text{g cm}^{-3}$
40,8232	2,7399	40,5009	2,8009
40,8237	2,7473	40,5014	2,7931
40,8242	2,7549	40,5019	2,7854
40,8247	2,7624	40,5024	2,7777
40,8252	2,7700	40,5029	2,7700
40,8257	2,7777	40,5034	2,7624
40,8262	2,7853	40,5039	2,7549
40,8267	2,7931	40,5044	2,7473
40,8272	2,8009	40,5049	2,7399



**Slika 15.** Ovisnost promjene gustoće staklenih kuglica o masi  $m_2$  mjerene pomoću menzure

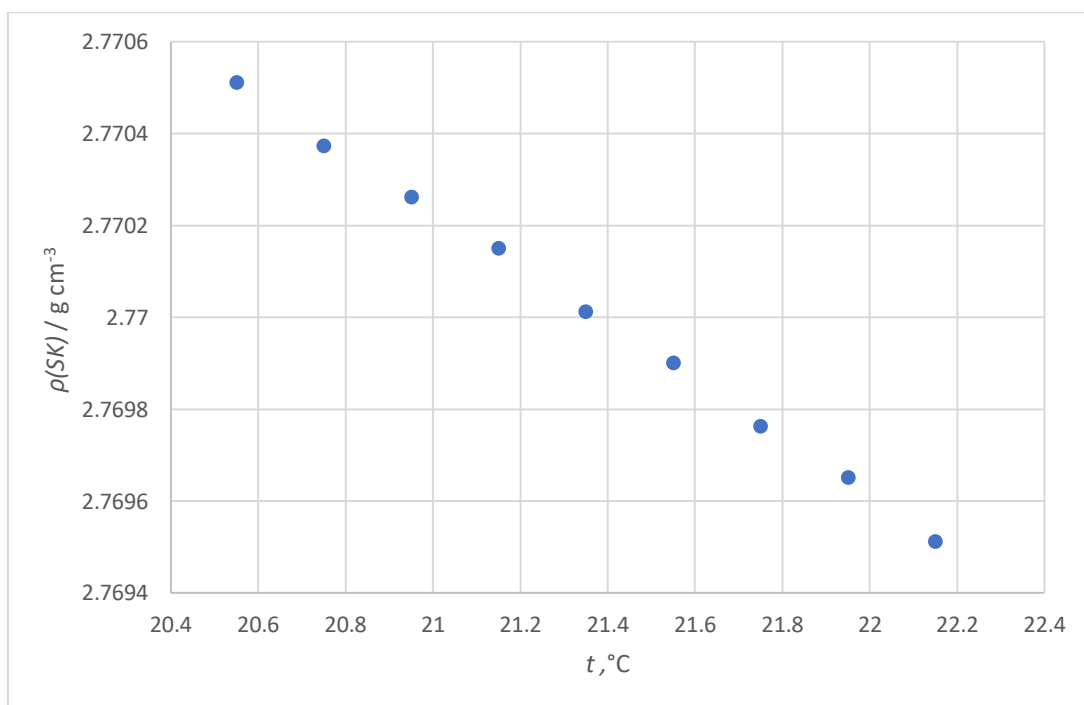


**Slika 16.** Ovisnost promjene gustoće staklenih kuglica o masi  $m_3$  mjerene pomoću menzure

Očekivano, nema razlike u ponašanju u usporedbi s mjerenjima napravljenima u staklenoj bočici. Gustoća staklenih kuglica linearno raste kako se povećava masa  $m_2$  koja se odnosi na masu menzure napunjenog s SK i vodom. Kod mase  $m_3$  (masa menzure napunjenog samo vodom) gustoća staklenih kuglica linearno pada. Promjena mase  $m_2$  odnosno  $m_3$  za 4 mg rezultira promjenom gustoće za  $0,060 \text{ g cm}^{-3}$ , što je izraženije nego što je bilo kod staklene bočice, moguće zbog razlike u ukupnom mjernom volumenu, tj. omjeru mase uzorka i otapala.

**Tablica 8.** Prikaz utjecaja malih promjena temperature vode na gustoću staklenih kuglica određenu pomoću menzure

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho \text{ (SK)} / \text{g cm}^{-3}$
20,55	2,7705
20,75	2,7704
20,95	2,7703
21,15	2,7702
21,35	2,7700
21,55	2,7699
21,75	2,7698
21,95	2,7697
22,15	2,7695



**Slika 17.** Ovisnost promjene gustoće staklenih kuglica o temperaturi vode mjerene pomoću menzure

Na temelju brojeanih rezultata danih u tablici 8. i grafičkih rezultata prikazanih na slici 17., vidljivo je da se gustoća staklenih kuglica linearno smanjuje povećanjem temperature vode.

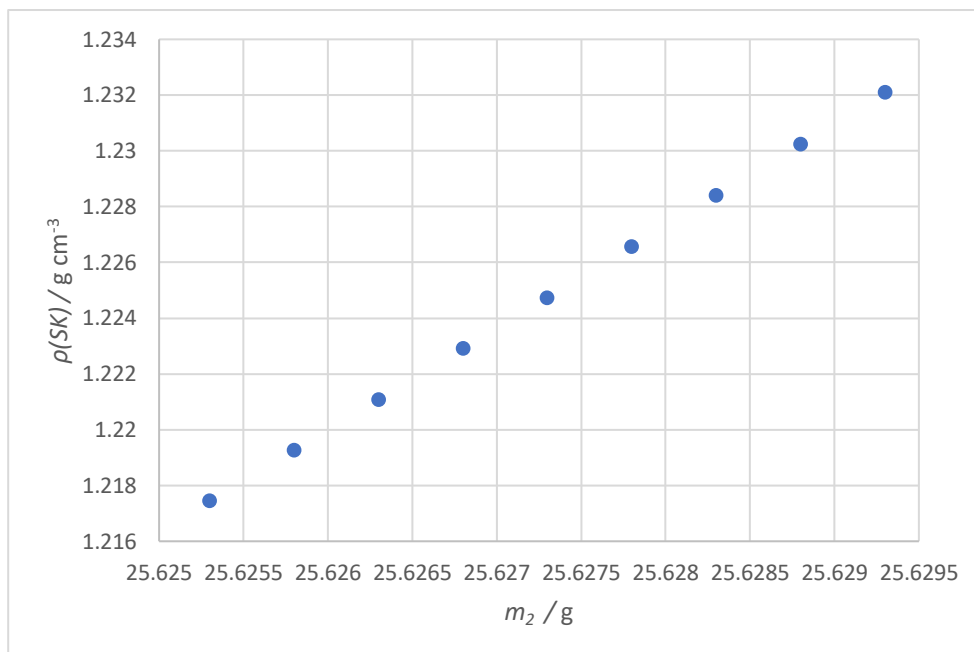
Povećanje temperature ne utječe znatno na vrijednost gustoće, ponovno manje od  $0,001 \text{ g cm}^{-3}$ .

4.2.3 Ispitivanje varijacije mase i temperature kod improviziranog piknometra (staklene bočice s oznakom) gdje je otapalo etanol

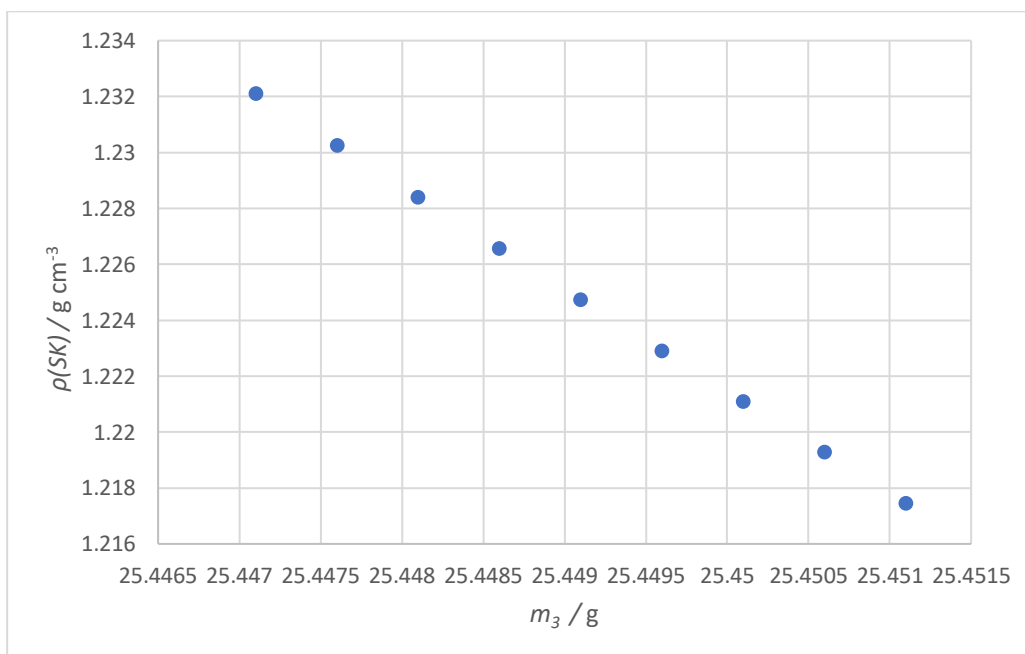
S malim promjenama podataka  $m_2$  i  $m_3$  dobiveni su rezultati prikazani u tablici 9. i na slikama 18. i 19.

**Tablica 9.** Prikaz utjecaja promjene  $m_2$  i  $m_3$  na izračunatu gustoću staklenih kuglica

$m_2 / \text{g}$	$\rho \text{ (SK)} / \text{g cm}^{-3}$	$m_3 / \text{g}$	$\rho \text{ (SK)} / \text{g cm}^{-3}$
25,6253	1,2175	25,4471	1,2321
25,6258	1,2193	25,4476	1,2303
25,6263	1,2211	25,4481	1,2284
25,6268	1,2229	25,4486	1,2266
25,6273	1,2247	25,4491	1,2247
25,6278	1,2266	25,4496	1,2229
25,6283	1,2284	25,4501	1,2211
25,6288	1,2303	25,4506	1,2193
25,6293	1,2321	25,4511	1,2175



**Slika 18.** Ovisnost promjene gustoće staklenih kuglica o masi  $m_2$  mjerene pomoću staklene bočice s oznakom



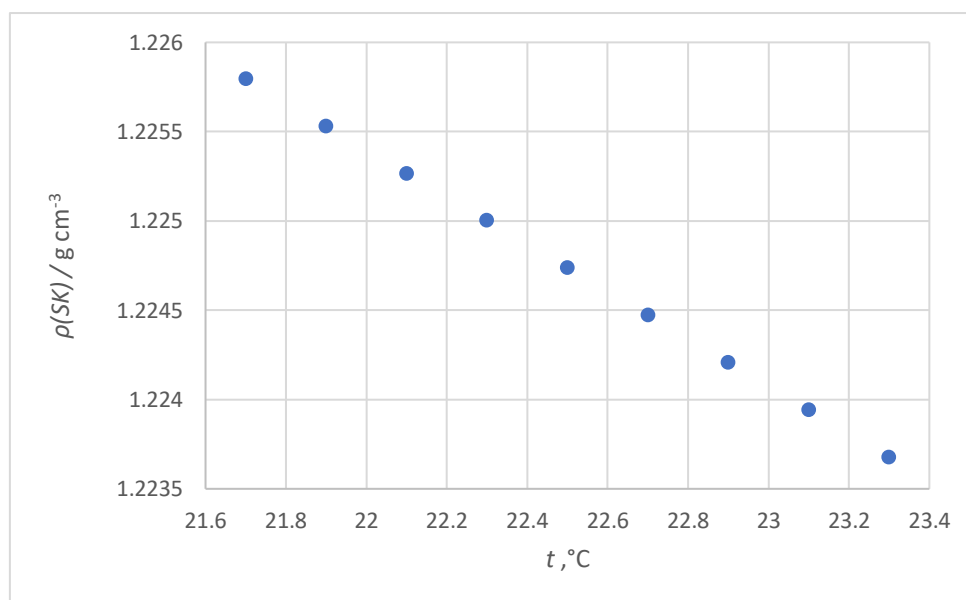
**Slika 19.** Ovisnost promjene gustoće staklenih kuglica o masi  $m_3$  mjerene pomoću staklene bočice s oznakom

I kod etanola javlja se jednaka tendencija promjene gustoće s odvagama  $m_2$  i  $m_3$ . Ukupna promjena mase  $m_2$  odnosno  $m_3$  za 4 mg rezultira promjenom gustoće za samo  $0,015 \text{ g cm}^{-3}$ , no vrijednosti gustoća nisu reprezentativne pa nema smisla uspoređivati s drugim rezultatima.

Pri istraživanju kako promjena temperature etanola utječe na gustoću staklenih kuglica korištena je ovisnost gustoće etanola o temperaturi dana u tablici P2. priloga ovog rada.

**Tablica 10.** Prikaz utjecaja malih promjena temperature etanola na gustoću staklenih kuglica određenu pomoću staklene bočice s oznakom

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho \text{ (SK)} / \text{g cm}^{-3}$
21,7	1,2258
21,9	1,2255
22,1	1,2253
22,3	1,2250
22,5	1,2247
22,7	1,2245
22,9	1,2242
23,1	1,2239
23,3	1,2237



**Slika 20.** Ovisnost promjene gustoće staklenih kuglica o temperaturi etanola mjerene pomoću staklene bočice s oznakom

Na temelju brojčanih rezultata danih u tablici 10. i grafičkih rezultata prikazanih na slici 20., vidljivo je da se gustoća staklenih kuglica linearno smanjuje povećanjem temperature etanola.



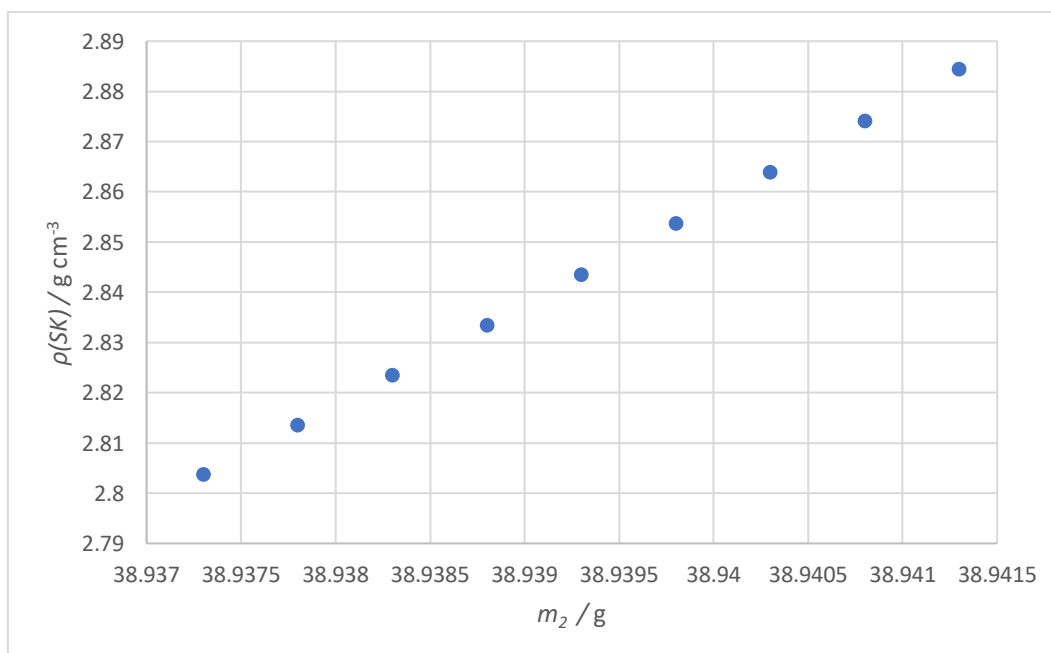
U ovom slučaju promjena temperature primjetnije utječe na gustoću, koja se mijenja za  $0,002 \text{ g cm}^{-3}$  kod promjene od  $1,6 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### 4.2.4 Ispitivanje varijacije mase i temperature pomoću menzure gdje je otapalo etanol

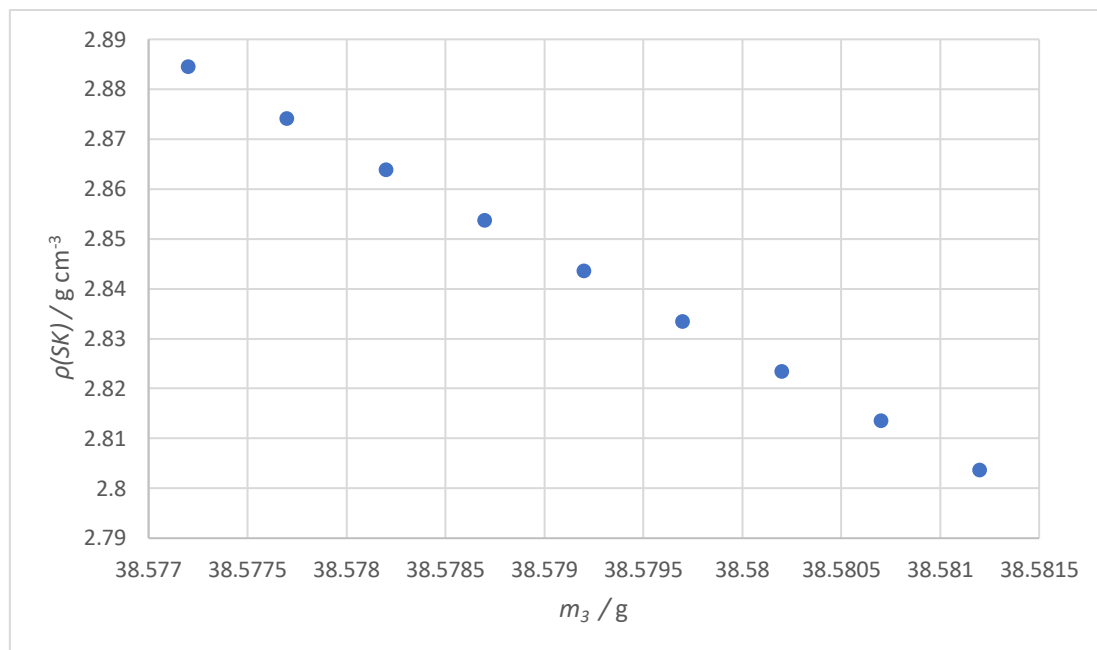
S malim promjenama podataka  $m_2$  i  $m_3$  dobiveni su rezultati prikazani u Tablici 11. i na slikama 21. i 22.

**Tablica 11.** Prikaz utjecaja promjene  $m_2$  i  $m_3$  na izračunatu gustoću staklenih kuglica

$m_2 / \text{g}$	$\rho \text{ (SK)} / \text{g cm}^{-3}$	$m_3 / \text{g}$	$\rho \text{ (SK)} / \text{g cm}^{-3}$
38,9373	2,8037	38,5772	2,8845
38,9378	2,8136	38,5777	2,8742
38,9383	2,8235	38,5782	2,8639
38,9388	2,8335	38,5787	2,8537
38,9393	2,8436	38,5792	2,8436
38,9398	2,8537	38,5797	2,8335
38,9403	2,8639	38,5802	2,8235
38,9408	2,8742	38,5807	2,8136
38,9413	2,8845	38,5812	2,8037



**Slika 21.** Ovisnost promjene gustoće staklenih kuglica o masi  $m_2$  mjerene pomoću menzure

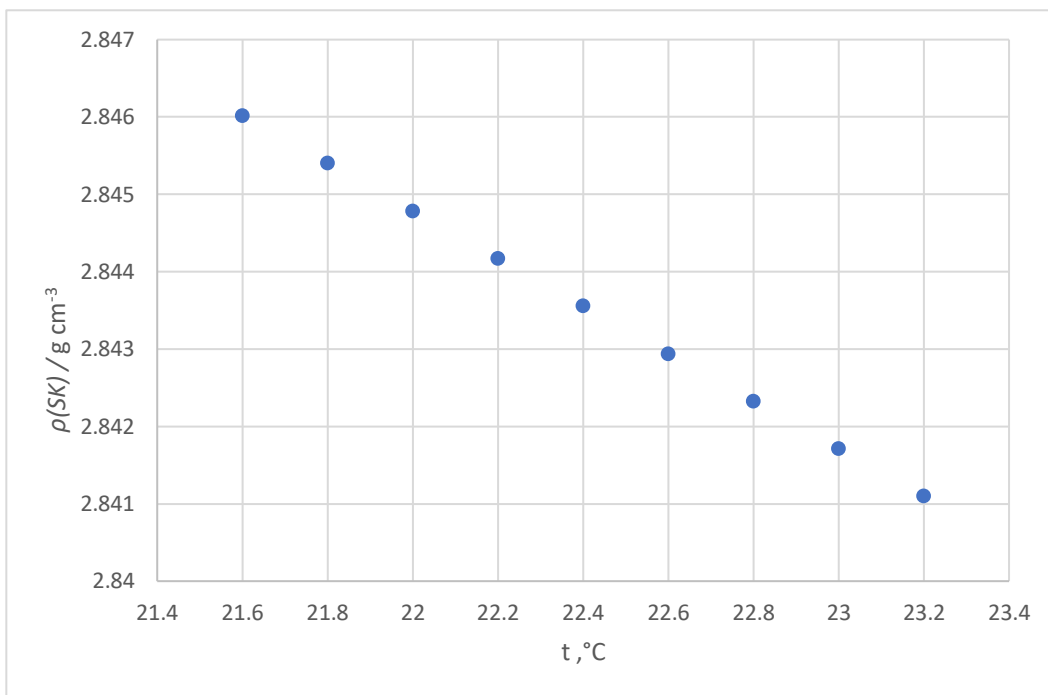


**Slika 22.** Ovisnost promjene gustoće staklenih kuglica o masi  $m_3$  mjerene pomoću menzure

Tendencija je jednaka kao u prethodnim primjerima. Ukupna promjena mase  $m_2$  odnosno  $m_3$  za samo 4 mg rezultira promjenom gustoće za čak  $0,080 \text{ g cm}^{-3}$ , izraženije nego kod korištenja vode, zbog manje gustoće etanola.

**Tablica 12.** Prikaz utjecaja malih promjena temperature etanola na gustoću staklenih kuglica određenu pomoću menzure

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho (\text{SK}) / \text{g cm}^{-3}$
21,6	2,8460
21,8	2,8454
22,0	2,8448
22,2	2,8442
22,4	2,8436
22,6	2,8429
22,8	2,8423
23,0	2,8417
23,2	2,8411



**Slika 23.** Ovisnost promjene gustoće staklenih kuglica o temperaturi etanola mjerene pomoću menzure

Na temelju brojčanih rezultata danih u tablici 12. i grafičkih rezultata prikazanih na slici 23., vidljivo je da se gustoća staklenih kuglica linearno smanjuje povećanjem temperature etanola. Promjena gustoće je znatnija, skoro  $0,005\ g\ cm^{-3}$  za porast temperature od  $1,6\ ^\circ C$ , zbog manje gustoće otapala. No i dalje je varijacija u izračunatoj vrijednosti gustoće uslijed promjena temperature zanemariva prema varijaciji uslijed pogrešaka u vaganju.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu istražena je primjenjivost piknometarske metode na određivanje gustoće praškastog uzorka – staklenih kuglica. Kao improvizirani piknometar u radu su korištene staklene bočice s urezanim oznakom i čepom te menzura od 10 mL. Kao otapala za određivanje volumena piknometara korišteni su voda i etanol. Pouzdane vrijednosti bliske teorijskoj vrijednosti gustoće od  $2,5 \text{ g cm}^{-3}$  dobivaju se primjenom staklene bočice i menzure uz vodu kao otapalo te uz primjenu menzure i etanola kao otapala. Gustoća staklenih kuglica određena pomoću staklene bočice i etanola skoro je dvostruko niže od teorijske vrijednosti čemu je mogući uzrok manja gustoća etanola u usporedbi s gustoćom vode.

U radu je stoga ispitivano i kako male varijacije masa i temperatura otapala utječu na konačnu gustoću staklenih kuglica. U svim slučajevima je dobiven isti trend, tj. dobiveni rezultati pokazuju kako gustoća staklenih kuglica linearno raste porastom mase  $m_2$ , dok porastom mase  $m_3$  i temperature linearno pada. Pri tom je utjecaj promjene temperature zanemariv u usporedbi s utjecajem promjene mase (npr. uslijed pogrešnog vaganja), a utjecaj varijacije mase najizraženiji je kod menzure i etanola, zbog manje gustoće otapala.

Obzirom na sve prikazane rezultate, može se zaključiti kako je voda pogodnije otapalo od etanola pri određivanju gustoće praškastih uzoraka metodom piknometra. Također, točniji rezultati se dobivaju menzurom, što je i očekivano, budući da je menzura graduirano laboratorijsko posuđe, baš kao i tekućinski piknometar.

U nedostatku preciznije metode, menzura volumena 10 ml može dobro poslužiti kao improvizirani piknometar za određivanje gustoće prašaka.

## 6.LITERATURA

- [1] B. Bhandari, *Introduction to food powders*, u: B. Bhandari, N. Bansal, M. Zhang, P. Schuck, *Handbook of Food Powders*, Woodhead Publishing, Oxford, 2013, str. 1–25.
- [2] G. De Clercq, *The 7 essential properties of powders you should know*, <https://www.palamaticprocess.com/blog/the-7-essential-properties-of-powders-you-should-know> (pristup 15. travanja 2023.)
- [3] I. Bauman, *Tehnologija prahova*, Nastavni materijali, Sveučilište u Zagrebu, Prehrambeno-biotehnološki fakultet, Zagreb, 2010.
- [4] H. Heywood, *Techniques for the evaluation of powders, Fundamental properties of particles and methods of sizing analysis*, Powder Metallurgy, 7 (1961) 1–28.
- [5] G. V. Barbosa-Cánovas, E. Ortega-Rivas, P. Juliano, H. Yan, *Food powders*, Springer New York, 2005.
- [6] J. Fitzpatrick, *Powder properties in food production systems*, u: B. Bhandari, N. Bansal, M. Zhang, P. Schuck, *Handbook of food powders*, Woodhead Publishing, Oxford, 2013, str. 285-308.
- [7] K. Žižek, *Fenomen prijenosa količine gibanja, Mehanički makroprocesi*, Nastavni materijali, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2018.
- [8] K. Kovač, *Osyježimo znanje, Granulometrijska analiza II, Raspodjele čestica*, Kem. Ind., 65 (2016) 521-522.
- [9] J. P. K. Seville, U. Tuzun, R. Clift, *Processing of particulate solids*, Chapman and Hall, London, 1997, str. 1–52.
- [10] H. Wadel, *Volume, shape and roundness of rock particles*, The Journal of Geology, 40 (1932) 443-451.
- [11] H. Heywood, *Measurement of the fineness of powdered materials*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 140 (1938) 257-347.
- [12] P. A. Webb, *Volume and Density Determinations for Particle Technologists*, Micromeritics Instrument Corp., 2001. [https://www.micromeritics.com/Repository/Files/Volume\\_and\\_Density\\_determinations\\_for\\_Particle\\_Technologists\\_0.pdf](https://www.micromeritics.com/Repository/Files/Volume_and_Density_determinations_for_Particle_Technologists_0.pdf) (pristup 25. svibnja 2023.).

- [13] S. Lowell, J. E. Shields, M. A. Thomas, M. Thommes, *Characterization of Porous Solids and Powders: Surface Area, Pore size and Density*, Springer, Dordrecht, 2004., str. 326–338.
- [14] O. D. Neikov, D. V. Lotsko, V. G. Gopienko, *Powder characterization and testing*, u: O. D. Neikov, S. S. Naboychenko, G. Dowson, *Handbook of non-ferrous metal powders, Technologies and applications*, Elsevier, Oxford, 2009, str. 10-47.
- [15] A. L. Flint, L. E. Flint, *Particle density*, u: J. H. Dane, G. C. Topp, *Methods of soil analysis, Physical methods*, 3<sup>rd</sup> edition, Madison, 2002, str. 229-241.
- [16] <https://www.scientificpartners.com.au/product/ad-165354-density-determination-kit/> (pristup 31. svibnja 2023.)
- [17] I. Raskin, *A method for Measuring Leaf Volume, Density, Thickness and Internal Gas Volume*, HortScience 18 (1983) 698-699.
- [18] S. W. Hughes, *Measuring liquid density using Archimedes' principle*, Physics Education, 41(5) (2006), 445–447.
- [19] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Piknometar> (pristup 31. svibnja 2023.)
- [20] <https://en.wikipedia.org/wiki/Aerometer> (pristup 31. svibnja 2023.)
- [21] Mettler Toledo, *3 ways to measure density*, brošura: [https://www.scientificlabs.co.uk/handlers/libraryFiles.ashx?filename=Manuals\\_D\\_DEN1014\\_C.pdf](https://www.scientificlabs.co.uk/handlers/libraryFiles.ashx?filename=Manuals_D_DEN1014_C.pdf) (pristup 15. lipnja 2023.)
- [22] <https://en.citizendium.org/wiki/Hydrometer> (pristup 31. svibnja 2023.)
- [23] C. Lam, *Evaluation of Density-Measurement Methods for Construction Slurries*, Geotechnical Testing Journal, Vol. 39, (2016), 509-510.
- [24] Sigurnosno-tehnički list, Swingcolor, verzija 7.0.0, 7.6.2001

## 7.PRILOG

Tablica P1. Tablica ovisnosti gustoće vode (u g cm<sup>-3</sup>) o temperaturi u °C

T/°C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
10.	0.99973	0.99972	0.99971	0.99970	0.99969	0.99968	0.99967	0.99966	0.99965	0.99964
11.	0.99963	0.99962	0.99961	0.99960	0.99959	0.99958	0.99957	0.99956	0.99955	0.99954
12.	0.99953	0.99951	0.99950	0.99949	0.99948	0.99947	0.99946	0.99944	0.99943	0.99942
13.	0.99941	0.99939	0.99938	0.99937	0.99935	0.99934	0.99933	0.99931	0.99930	0.99929
14.	0.99927	0.99926	0.99924	0.99923	0.99922	0.99920	0.99919	0.99917	0.99916	0.99914
15.	0.99913	0.99911	0.99910	0.99908	0.99907	0.99905	0.99904	0.99902	0.99900	0.99899
16.	0.99897	0.99896	0.99894	0.99892	0.99891	0.99889	0.99887	0.99885	0.99884	0.99882
17.	0.99880	0.99879	0.99877	0.99875	0.99873	0.99871	0.99870	0.99868	0.99866	0.99864
18.	0.99862	0.99860	0.99859	0.99857	0.99855	0.99853	0.99851	0.99849	0.99847	0.99845
19.	0.99843	0.99841	0.99839	0.99837	0.99835	0.99833	0.99831	0.99829	0.99827	0.99825
20.	0.99823	0.99821	0.99819	0.99817	0.99815	0.99813	0.99811	0.99808	0.99806	0.99804
21.	0.99802	0.99800	0.99798	0.99795	0.99793	0.99791	0.99789	0.99786	0.99784	0.99782
22.	0.99780	0.99777	0.99775	0.99773	0.99771	0.99768	0.99766	0.99764	0.99761	0.99759
23.	0.99756	0.99754	0.99752	0.99749	0.99747	0.99744	0.99742	0.99740	0.99737	0.99735
24.	0.99732	0.99730	0.99727	0.99725	0.99722	0.99720	0.99717	0.99715	0.99712	0.99710
25.	0.99707	0.99704	0.99702	0.99699	0.99697	0.99694	0.99691	0.99689	0.99686	0.99684
26.	0.99681	0.99678	0.99676	0.99673	0.99670	0.99668	0.99665	0.99662	0.99659	0.99657
27.	0.99654	0.99651	0.99648	0.99646	0.99643	0.99640	0.99637	0.99634	0.99632	0.99629
28.	0.99626	0.99623	0.99620	0.99617	0.99614	0.99612	0.99609	0.99606	0.99603	0.99600
29.	0.99597	0.99594	0.99591	0.99588	0.99585	0.99582	0.99579	0.99576	0.99573	0.99570
30.	0.99567	0.99564	0.99561	0.99558	0.99555	0.99552	0.99549	0.99546	0.99543	0.99540

Tablica P2. Tablica ovisnosti gustoće etanola (u g cm<sup>-3</sup>) o masenom udjelu i temperaturi

Per cent alcohol by weight	Temperature t						
	10° C	15° C	20° C	25° C	30° C	35° C	40° C
0	0.99973	0.99913	0.99823	0.99708	0.99568	0.99406	0.99225
1	.99785	.99725	.99636	.99520	.99379	.99217	.99034
2	.99602	.99542	.99453	.99336	.99194	.99031	.98846
3	.99426	.99365	.99275	.99157	.99014	.98849	.98663
4	.99258	.99195	.99103	.98984	.98839	.98672	.98485
5	.99098	.99032	.98938	.98817	.98670	.98501	.98311
6	.98946	.98877	.98780	.98656	.98507	.98335	.98142
7	.98801	.98729	.98627	.98500	.98347	.98172	.97975
8	.98660	.98584	.98478	.98346	.98189	.98009	.97808
9	.98524	.98442	.98331	.98193	.98031	.97846	.97641
10	.98393	.98304	.98187	.98043	.97875	.97685	.97475
11	.98267	.98171	.98047	.97897	.97723	.97527	.97312
12	.98145	.98041	.97910	.97753	.97573	.97371	.97150
13	.98026	.97914	.97775	.97611	.97424	.97216	.96989
14	.97911	.97790	.97643	.97472	.97278	.97063	.96829
15	.97800	.97669	.97514	.97334	.97133	.96911	.96670
16	.97692	.97552	.97387	.97199	.96990	.96760	.96512
17	.97583	.97433	.97259	.97062	.96844	.96607	.96352
18	.97473	.97313	.97129	.96923	.96697	.96452	.96189
19	.97363	.97191	.96997	.96782	.96547	.96294	.96023
20	.97252	.97068	.96864	.96639	.96395	.96134	.95856
21	.97139	.96944	.96729	.96495	.96242	.95973	.95687
22	.97024	.96818	.96592	.96348	.96087	.95809	.95516
23	.96907	.96689	.96453	.96199	.95929	.95643	.95343
24	.96787	.96558	.96312	.96048	.95769	.95470	.95168
25	.96665	.96424	.96168	.95895	.95607	.95306	.94991
26	.96539	.96287	.96020	.95738	.95442	.95133	.94810
27	.96406	.96144	.95867	.95576	.95272	.94955	.94625
28	.96268	.95996	.95710	.95410	.95098	.94774	.94438
29	.96125	.95844	.95548	.95241	.94922	.94590	.94248
30	.95977	.95686	.95382	.95067	.94741	.94403	.94055
31	.95823	.95524	.95212	.94890	.94557	.94214	.93860
32	.95665	.95357	.95038	.94709	.94370	.94021	.93662
33	.95502	.95186	.94860	.94525	.94180	.93825	.93461
34	.95334	.95011	.94679	.94337	.93986	.93626	.93257
35	.95162	.94832	.94494	.94146	.93790	.93425	.93051
36	.94986	.94650	.94306	.93952	.93591	.93221	.92843
37	.94805	.94464	.94114	.93756	.93390	.93016	.92634
38	.94620	.94273	.93919	.93556	.93186	.92808	.92422
39	.94431	.94079	.93720	.93353	.92979	.92597	.92208
40	.94238	.93882	.93518	.93148	.92770	.92385	.91992
41	.94042	.93682	.93314	.92940	.92558	.92170	.91774
42	.93842	.93478	.93107	.92729	.92344	.91952	.91554
43	.93639	.93271	.92897	.92516	.92128	.91733	.91332
44	.93433	.93062	.92685	.92301	.91910	.91513	.91108
45	.93226	.92852	.92472	.92085	.91692	.91291	.90884
46	.93017	.92640	.92257	.91868	.91472	.91069	.90660
47	.92806	.92426	.92041	.91649	.91250	.90845	.90434
48	.92593	.92211	.91823	.91429	.91028	.90621	.90207
49	.92379	.91995	.91604	.91208	.90805	.90396	.89979
50	.92162	.91776	.91384	.90985	.90580	.90168	.89750



TABLE XLIX—Continued

Per cent alcohol by weight	Temperature t						
	10° C	15° C	20° C	25° C	30° C	35° C	40° C
50	0.92162	0.91776	0.91384	0.90985	0.90580	0.90168	0.89750
51	.91943	.91555	.91160	.90760	.90353	.89940	.89519
52	.91723	.91333	.90936	.90534	.90125	.89710	.89288
53	.91502	.91110	.90711	.90307	.89896	.89479	.89056
54	.91279	.90885	.90485	.90079	.89667	.89248	.88823
55	.91055	.90659	.90258	.89850	.89437	.89016	.88589
56	.90831	.90433	.90031	.89621	.89206	.88784	.88356
57	.90607	.90207	.89803	.89392	.88975	.88552	.88122
58	.90381	.89980	.89574	.89162	.88744	.88319	.87888
59	.90154	.89752	.89344	.88931	.88512	.88085	.87650
60	.89927	.89523	.89113	.88699	.88278	.87851	.87417
61	.89696	.89293	.88882	.88466	.88044	.87615	.87180
62	.89468	.89062	.88650	.88233	.87809	.87379	.86943
63	.89237	.88830	.88417	.87998	.87574	.87142	.86705
64	.89006	.88597	.88183	.87763	.87337	.86905	.86466
65	.88774	.88364	.87948	.87527	.87100	.86667	.86227
66	.88541	.88130	.87713	.87291	.86863	.86429	.85987
67	.88308	.87895	.87477	.87054	.86625	.86190	.85747
68	.88074	.87660	.87241	.86817	.86387	.85950	.85507
69	.87839	.87424	.87004	.86579	.86148	.85710	.85266
70	.87602	.87187	.86766	.86340	.85908	.85470	.85025
71	.87365	.86949	.86527	.86100	.85667	.85228	.84783
72	.87127	.86710	.86287	.85859	.85426	.84986	.84540
73	.86888	.86470	.86047	.85618	.85184	.84743	.84297
74	.86648	.86229	.85806	.85376	.84941	.84500	.84053
75	.86408	.85988	.85564	.85134	.84698	.84257	.83809
76	.86168	.85747	.85322	.84891	.84455	.84013	.83564
77	.85927	.85505	.85079	.84647	.84211	.83768	.83319
78	.85685	.85262	.84835	.84403	.83966	.83523	.83074
79	.85442	.85018	.84590	.84158	.83720	.83277	.82827
80	.85197	.84772	.84344	.83911	.83473	.83029	.82578
81	.84950	.84525	.84096	.83664	.83224	.82780	.82329
82	.84702	.84277	.83848	.83415	.82974	.82530	.82079
83	.84453	.84028	.83599	.83164	.82724	.82279	.81828
84	.84203	.83777	.83348	.82913	.82473	.82027	.81576
85	.83951	.83525	.83095	.82660	.82220	.81774	.81322
86	.83697	.83271	.82840	.82405	.81965	.81519	.81067
87	.83441	.83014	.82583	.82148	.81708	.81262	.80811
88	.83181	.82754	.82323	.81888	.81448	.81003	.80552
89	.82919	.82492	.82062	.81626	.81186	.80742	.80291
90	.82654	.82227	.81797	.81362	.80922	.80478	.80028
91	.82386	.81959	.81529	.81094	.80655	.80211	.79761
92	.82114	.81688	.81257	.80823	.80384	.79941	.79491
93	.81839	.81413	.80983	.80549	.80111	.79669	.79220
94	.81561	.81134	.80705	.80272	.79835	.79393	.78947
95	.81278	.80852	.80424	.79991	.79555	.79114	.78670
96	.80991	.80566	.80138	.79706	.79271	.78831	.78388
97	.80698	.80274	.79846	.79415	.78981	.78542	.78100
98	.80399	.79975	.79547	.79117	.78684	.78247	.77806
99	.80094	.79670	.79243	.78814	.78382	.77946	.77507
100	.79784	.79360	.78934	.78506	.78075	.77641	.77203

Tablica P3. Prikaz eksperimentalnih podataka dobivenih kod određivanja gustoće pomoću improviziranog piknometra (staklene bočice s oznakom) i vode

Redni broj mjerjenja	$m_0/g$	$m_1/g$	$m_2/g$	$m_3/g$	$m(SK)/g$
1.	13,3588	13,8577	28,6478	28,3388	0,4989
2.	13,1208	13,6305	27,6676	27,4113	0,5097
3.	13,2861	13,7852	27,9723	27,7084	0,4991
Redni broj mjerjenja	$t_1, ^\circ C$	$t_2, ^\circ C$	$\bar{t}, ^\circ C$	$\bar{\rho}(voda)/g\ cm^{-3}$	
1.	21,1	21,3	21,2	0,99798	
2.	21,2	21,3	21,25	0,99797	
3.	21,3	21,3	21,3	0,99800	

Tablica P4. Prikaz eksperimentalnih podataka dobivenih kod određivanja gustoće pomoću menzure od 10 mL i vode

Redni broj mjerjenja	$m_0/g$	$m_1/g$	$m_2/g$	$m_3/g$	$m(SK)/g$
1.	30,5966	31,1004	40,8252	40,5029	0,5038
2.	30,6686	31,1633	40,813	40,523	0,4947
3.	30,6703	31,161	40,8303	40,5329	0,4907
Redni broj mjerjenja	$t_1, ^\circ C$	$t_2, ^\circ C$	$\bar{t}, ^\circ C$	$\bar{\rho}(voda)/g\ cm^{-3}$	
1.	21,3	21,4	21,35	0,99794	
2.	21,5	21,5	21,5	0,99791	
3.	21,5	21,5	21,5	0,99791	

Tablica P5. Prikaz eksperimentalnih podataka dobivenih kod određivanja gustoće pomoću improviziranog piknometra (staklene bočice s oznakom) i etanola

Redni broj mjerjenja	$m_0/g$	$m_1/g$	$m_2/g$	$m_3/g$	$m(SK)/g$
1.	13,3576	13,8705	25,6273	25,4491	0,5129
2.	13,1157	13,6203	24,8762	24,6758	0,5046
3.	13,2787	13,7895	25,2696	25,0042	0,5108
Redni broj mjerjenja	$t_1, ^\circ C$	$t_2, ^\circ C$	$\bar{t}, ^\circ C$	$\bar{\rho}(\text{etanol})/g\text{ cm}^{-3}$	
1.	22,5	22,5	22,5	0,79922	
2.	22,5	22,4	22,45	0,79926	
3.	22,6	22,5	22,55	0,79918	

Tablica P6. Prikaz eksperimentalnih podataka dobivenih kod određivanja gustoće pomoću menzure od 10 mL i etanola

Redni broj mjerjenja	$m_0/g$	$m_1/g$	$m_2/g$	$m_3/g$	$m(SK)/g$
1.	30,6763	31,1772	38,9393	38,5792	0,5009
2.	30,6515	31,1596	38,9752	38,6439	0,5081
3.	30,6464	31,1426	38,9519	38,6157	0,4962
Redni broj mjerjenja	$t_1, ^\circ C$	$t_2, ^\circ C$	$\bar{t}, ^\circ C$	$\bar{\rho}(\text{etanol})/g\text{ cm}^{-3}$	
1.	22,5	22,3	22,4	0,79931	
2.	22,5	22,3	22,4	0,79931	
3.	22,3	22,2	22,25	0,79944	