

# Primjena teorije sedimentacije u tretiranju otpadnih voda

---

Logar, Mirta

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

*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:149:500769>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-19**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Mirta Logar

# ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Mirta Logar

PRIMJENA TEORIJE SEDIMENTACIJE U TRETIRANJU  
OTPADNIH VODA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: Izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić  
Članovi ispitnog povjerenstva: Izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić  
Prof. dr. sc. Gordana Matijašić  
Dr. sc. Iva Movre Šapić

Zagreb, rujan 2020.

*Zahvaljujem svom mentoru, izv. prof. dr. sc. Vladimiru Dananiću, na prenesenom znanju i pomoći u izradi ovog rada.*

*Također zahvaljujem prof. dr. sc. Gordani Matijašić na njenim savjetima i omogućavanju izrade eksperimentalnog dijela rada na Zavodu za mehaničko i toplinsko procesno inženjerstvo.*

## SAŽETAK

Cilj ovog rada je primijeniti teoriju sedimentacije na tretiranje otpadnih voda. Na početku rada upoznajemo se s osnovnim procesom obrade otpadnih voda te detaljnije s dijelom procesa koji se odnosi na gravitacijsku sedimentaciju. Dan je opis sedimentacijskih bazena koji se koriste u tu svrhu. U nastavku su objašnjeni režimi taloženja i zakoni kojima se opisuje gibanje čestica u pojedinom režimu. Teorijski dio povezan je s dizajnom sedimentacijskog bazena. Opisuje se važnost sedimentacijskog testa za dimenzioniranje sedimentacijskih bazena. Sedimentacijski test je i eksperimentalno proveden pomoću suspenzije koja se sastoji od kalcijevog karbonata u prahu i vode. Iz rezultata dobivenih testom, jasno se vidi kako se s povećanjem koncentracije suspenzije smanjuje brzina taloženja.

Ključne riječi: otpadna voda, sedimentacija, sedimentacijski bazeni, sedimentacijski test

## SUMMARY

The aim of this paper is to apply the sedimentation theory in wastewater treatment. At the beginning of the work we are introduced to the basic process of wastewater treatment and in more detail with gravitational sedimentation. A description of the sedimentation basins used for these purposes is given. Types of settling and the laws describing the motion of particles in a particular type are explained next. The connection of the theoretical part to the design of the sedimentation basin is given. The importance of the sedimentation test for sizing sedimentation basins is described. The sedimentation test was also performed experimentally using a suspension consisting of powdered calcium carbonate and water. From the results obtained by the test, we can clearly see that the deposition rate decreases with increasing suspension concentration.

Key words: wastewater, sedimentation, sedimentation basins, sedimentation test

## SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	OPĆI DIO.....	1
	2.1 Izvori onečišćenja.....	1
	2.2 Obrada otpadnih voda .....	2
	2.3 Stupnjevi obrade.....	3
	2.4 Gravitacijska sedimentacija .....	5
	2.5 Sedimentacijski bazeni.....	5
3.	TEORIJA SEDIMENTACIJE.....	8
	3.1 Režimi taloženja .....	9
	3.2 Diskretna sedimentacija.....	10
	3.3 Zonska sedimentacija.....	13
4.	VEZA TEORIJE I DIZAJNA.....	14
	4.1 Idealni sedimentacijski bazen .....	14
	4.2 Realni sedimentacijski bazen .....	17
	4.3 Kontrola rada taložnika.....	17
5.	DIMENZIONIRANJE TALOŽNIKA .....	18
	5.1 Diskretna (partikulativna) sedimentacija.....	18
	5.2 Zonska sedimentacija.....	18
	5.3 Šaržni sedimentacijski test.....	19
6	EKSPERIMENTALNI DIO .....	22
7	REZULTATI .....	23
8	RASPRAVA .....	31
9	ZAKLJUČAK .....	33
10	POPIS SIMBOLA.....	34
11	LITERATURA .....	36

# 1. UVOD

Voda se svakodnevno koristi u industriji i domaćinstvu za prijenos otpadnih tvari i tako nastaje otpadna voda. Otpadne vode sadrže različite organske i anorganske spojeve, a neki od njih mogu biti štetni i opasni. Kako bismo zaštitili okoliš i zdravlje ljudi, otpadne se vode podvrgavaju fizikalno-kemijskim i biološkim procesima obrade prije ispuštanja u prijemnik.

Otpadne vode produkt su svakodnevne ljudske aktivnosti, a nastaju u industrijskoj proizvodnji, kućanstvima, bolnicama, institutima i brojnim uslužnim djelatnostima. Oborine koje ispiru brojne nečistoće s površina prometnica (kao što su motorno ulje i pijesak) također pridonose stvaranju otpadnih voda. Neki od nepovoljnih utjecaja ispuštanja nepročišćenih otpadnih voda u prijemnike su: opasnost za ljudsko zdravlje, štetne posljedice na vodenim biljnim i životinjskim vrstama, smanjene mogućnosti iskorištavanja vode prijemnika, širenje neugodnih mirisa, narušavanje estetike krajolika.

U današnje vrijeme, uništavanje i onečišćivanje okoliša dovelo je do rastuće svijesti o potrebi za efektivnijim tretmanom otpadne vode. U postrojenjima za tretiranje otpadnih voda, kao i u mnogim ostalim industrijskim procesima, sedimentacijski bazeni koriste se za odvajanje suspendiranih čvrstih čestica od vode. Gravitacijska sedimentacija uobičajen je i često primjenjivan proces obrade vode za odvajanje čvrstih čestica iz vode i otpadne vode.

## 2. OPĆI DIO

### 2.1 Izvori onečišćenja

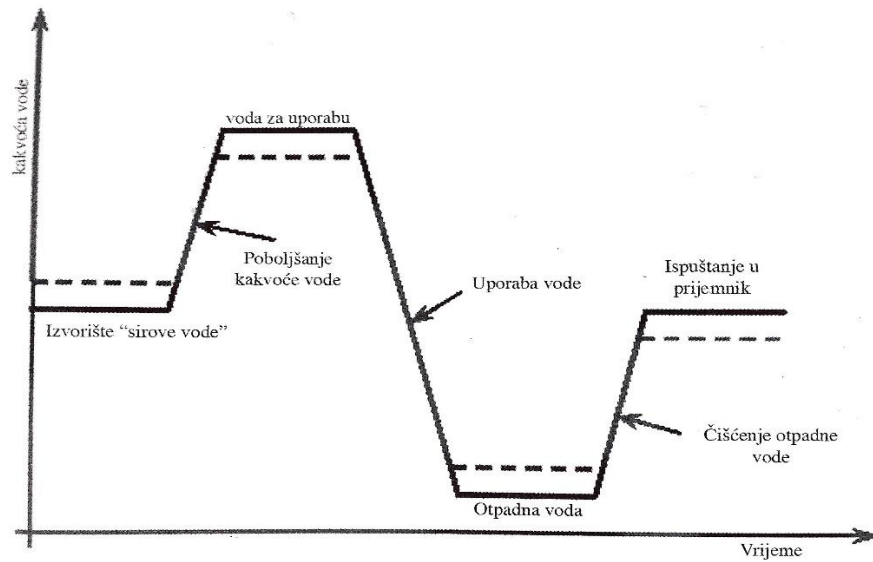
Prema Tušar (2009) „onečišćenje vode je svaka fizikalna, kemijska ili biološka promjena kakvoće vode koja štetno djeluje na žive organizme ili vodu čini neupotrebljivom za određenu namjenu.“<sup>(1)</sup> Izvori onečišćenja u vodama su: netopive tvari (suspencije, taloživa tvar, koloidno raspršena i plivajuća tvar), topive tvari (soli, željezo, sumpor), organske tvari (ugljikohidrati, bjelančevine i masti), toplinsko onečišćenje (fizikalno onečišćenje toplinom), otrovne tvari (teške kovine, Hg, Cu, Pb, Cd, Zn itd.), radioaktivne tvari (koje nastaju kemijskim i biokemijskim procesima) te mikroorganizmi.



## 2.2 Obrada otpadnih voda

Onečišćene otpadne vode prije ispuštanja u okoliš moraju zadovoljiti propisane uvjete kakvoće. Sve otpadne vode skupljaju se kanalizacijskom mrežom. Tušar (2009) kaže kako je „kanalizacija znanstveno-tehničko područje koje se odnosi na predlaganje, projektiranje, izgradnju i uporabu kanalske mreže, na pročišćavanje otpadne vode i na ispuste u prirodni okoliš.“ <sup>(1)</sup>

Otpadne vode obrađuju se u skladu sa zahtjevima i zakonskim propisima. Ispituju se fizikalne, kemijske i biološke značajke neobrađenih i obrađenih otpadnih voda na izlazu iz proizvodnog procesa ili iz kanalizacijskog sustava. Uzimaju se uzorci otpadne vode, oni se analiziraju, a rezultati analize daju nam informacije važne za izbor procesa obrade i projektiranje uređaja za obradu otpadnih voda.



Slika 1. Promjena kakvoće vode uporabom <sup>(1)</sup>

Kako ljudi koriste vodu za razne namjene dolazi do neravnoteže u prirodi, koja se može ispraviti tako da se upotrijebljena voda vrati u hidološki ciklus, po mogućnosti iste kakvoće kakvu je imala pri uzimanju. U komunalne (gradske) otpadne vode spadaju sanitarne, industrijske, oborinske i procjedne vode. <sup>(1)</sup> Sanitarne otpadne vode podrazumijevaju otpadne vode koje služe za vodoopskrbu stanovništva, odnosno za zadovoljavanje životnih funkcija i sanitarnih potreba. Industrijski tehnološki procesi međusobno su veoma različiti što rezultira otpadnim vodama bitno različitog sastava. Razlikujemo biološki razgradive vode koje su kompatibilne s gradskim otpadnim vodama i mogu se odvoditi zajedničkom kanalizacijom te biološki nerazgradive vode koje su inkompatibilne s gradskom otpadnom vodom i prije miješanja s njom moraju se podvrgnuti postupku prethodnog pročišćavanja. Oborinske vode na svom putu ispiru atmosferu i otapaju ili prema površini zemlje prenose sve sastojke koji se na određenom području ispuštaju

u atmosferu; primjer su kisele kiše. Kako dotječu u kanalizaciju, i one se ubrajaju u otpadne vode. Zadnje su procjedne vode. To su zapravo čiste podzemne vode kod kojih dolazi do procjeđivanja, na primjer kod objekata na padini brda ili kod dubokih podruma i tako se i ta voda mora prikupiti posebnim kanalizacijskim sustavom i uključiti u zajednički odvodni sustav.

### 2.3 Stupnjevi obrade

Najznačajniji fizikalni pokazatelj kvalitete vode je sadržaj čvrstih tvari u otpadnoj vodi. Čvrste tvari čine plutajuće tvari, taložive tvari, koloidne tvari i otopljene tvari. Ostali fizikalni pokazatelji su: miris, boja, mutnoća i temperatura. Sadržaj čvrstih tvari utječe na estetiku, bistrinu i boju vode. <sup>(2)</sup>

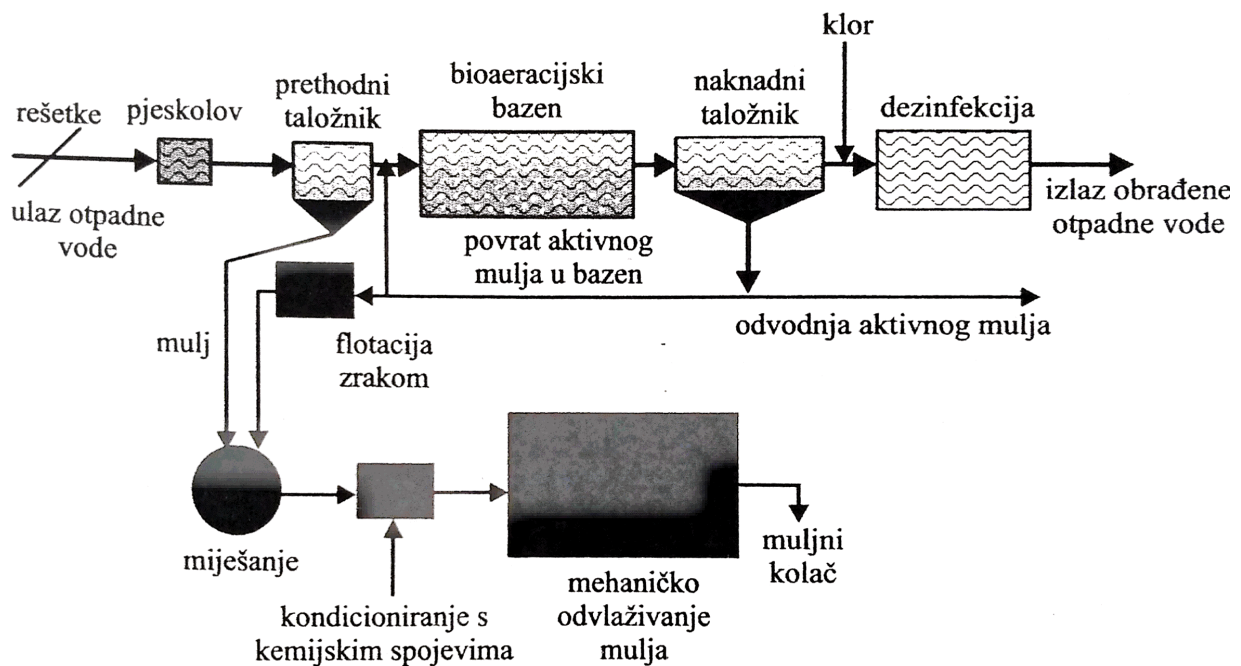
Fizikalnim, fizikalno-kemijskim i biološkim procesima uklanjaju se iz otpadnih voda suspendirane i koloidne čestice biorazgradivih organskih tvari, postojeće organske tvari i otopljene anorganske tvari. Proces se provodi u nekoliko stupnjeva, gdje se u svakom stupnju uklanja samo određena vrsta onečišćujućih tvari.

Tablica 1. Veličine čestica koje se uklanjaju u pojedinom stupnju obrade otpadne vode <sup>(2)</sup>

Veličina čestica	Stupanj obrade	Primjer
10 cm 1 cm	prethodni	kamenje, šljunak
1 mm 100 μm 10 μm 1 μm	prvi (primarni)	pahuljice (flokule), suspendirane tvari, suprakoloidne tvari, koloidne tvari
0,1 μm 10 nm	drugi (sekundarni)	subkoloidne tvari, otopljenje tvari
1 nm	treći (tercijarni)	otopljene tvari
1 nm	napredni	postojeće otopljene organske i biorazgradive tvari

Ovisno o sastavu otpadne vode, od procesne opreme koriste se rešetke, pjeskolovi i mastolovi, taložnici, flotatori, centrifuge, adsorpcijske kolone, bioeracijski bazeni i anaerobni digestori. <sup>(2)</sup>

Prethodni stupanj obrade služi za zaštitu sljedećih procesa. Koriste se rešetke, pjeskolov i mastolov kako bi se iz otpadne vode uklonile krupne čvrste otpadne tvari kao što su drvo, kamenje, papir i šljunak. Svrha primarnog stupnja je priprema za drugi stupanj ili za ispuštanje u neosjetljiv prijemnik. Odvija se proces taloženja u primarnom taložniku ili taloženje uz flokulante, a iz otpadne vode izdvajaju se suspendirane tvari, teški metali, fosfor i biorazgradive organske tvari. Nakon sekundarnog stupnja obrade otpadna voda spremna je za ispuštanje u većinu prijemnika. Proces koji se odvijaju u ovom stupnju su: koagulacija i flokulacija, anaerobna obrada, aerobno aktivnim muljem te biološka filtracija. Uklanjaju se organske tvari te dušik i fosfor. U tercijarom stupnju otpadna voda priprema se za ispuštanje u osjetljiv prijemnik filtracijom i dezinfekcijom. Uklanjaju se suspendirane tvari i patogeni mikroorganizmi. Napredni stupanj obrade koristi se kad postoji zahtjev za visokom kakvoćom izlaznog toka. Odvijaju se procesi ionske izmjene, membranske filtracije, adsorpcije te fotooksidacija. Onečišćenja koja se uklanjaju su dušik, metali, anorganske tvari i postojani organski spojevi.



Slika 2. Shematski prikaz tijeka klasične obrade otpadne vode <sup>(2)</sup>

Slika 2. prikazuje klasični sustav obrade na kojem možemo vidjeti kako sirova otpadne voda prvo prolazi kroz rešetke različitih veličina kako bi se uklonile krupne čvrste otpadne tvari. Zatim se uklanjaju pijesak i masti, a nakon toga otpadna voda dolazi u prethodni taložnik gdje se talože suspendirane tvari. Izbistreni tok ulazi u aerirani bioreaktor gdje aktivni mulj razgrađuje otopljene organske tvari. Izlazni tok iz aeriranog bioreaktora odvodi se u sekundarni taložnik gdje se aktivni mulj taloži na dno, a obrađeni izlazni tok otpadne vode se dezinficira i ispušta u prijemnik. Dio aktivnog mulja iz sekundarnog taložnika vraća se u aerirani bioreaktor, a ostatak se obrađuje fizikalno-kemijskim postupcima zajedno s muljem izdvojenim u primarnom taložniku. <sup>(2)</sup>

## 2.4 Gravitacijska sedimentacija

Gravitacijska separacija krutina iz kapljevine, koja rezultira izbistrenim pretokom i ugušćenim čvrstim odtokom, već se dugo koristi za tretman industrijske otpadne vode. Proučavanje ponašanja čvrstih čestica tokom sedimentacije u vodi daje vrlo važne eksperimentalne podatke potrebne za dobar dizajn i za učinkovito upravljanje otpadnim vodama.

Gravitacijska sedimentacija je proces uklanjanja čvrstih čestica iz otpadne vode gravitacijskim taloženjem, a temelji se na gravitacijskoj sili zbog razlike u gustoći čestica i fluida. Operacija se sastoji od uklanjanja sedimenta, mutnoće i plutajućih materijala iz sirove otpadne vode, a izvodi se pomoću sedimentacijskih bazena. Proces sedimentacije čvrstih čestica iz vode koristi se u prvom i drugom stupnju odrade otpadne vode. U praksi se uglavnom primjenjuje za odvajanje čestica brzine taloženja veće od  $10^{-5}$  m/s jer taloženje sitnih čestica vrlo drugo traje. <sup>(1)</sup>

## 2.5 Sedimentacijski bazeni

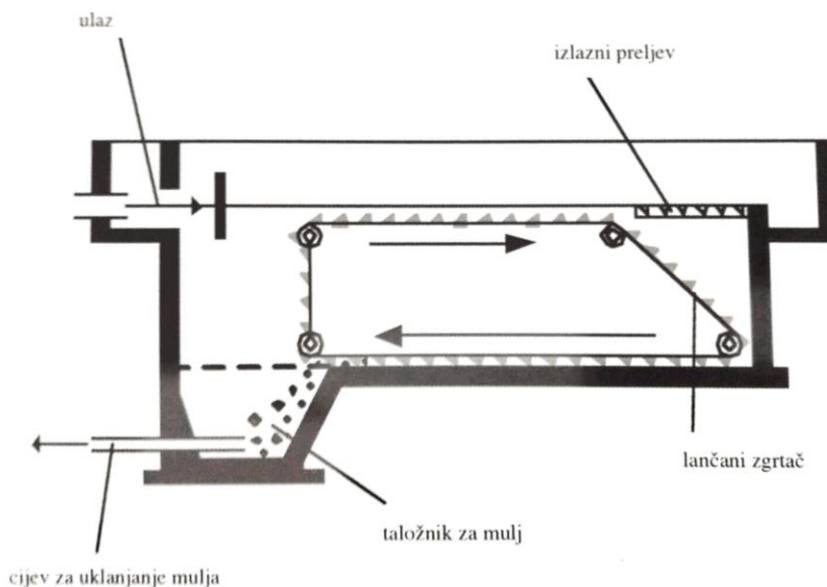
Sedimentacijski bazen, koji se može zvati i bistrick ili taložnik, je veliki bazen u koji voda dotiče polako kako bi se dalo česticama vremena da sedimentiraju. U postrojenjima za obradu vode i otpadne vode, oni su tako veliki da se nalaze vani i obično imaju otvorenu površinu. Dužine ovih separatora prosječno su 30-100 m, maksimalne dubine 3 do 4 m. <sup>(3)</sup>

Dvije su moguće funkcije sedimentacijskog bazena, a to su bistrjenje i ugušćivanje, zato da može odvojiti sve krutine iz suspenzije i da može koncentrirati te krutine. Koriste se primarni taložnici, koje su jedinice za obradu prije biološkog reaktora i sekundarni taložnici, koji služe za bistrjenje prije ispuštanja u prijemnik.

Pomoću prethodnih ili primarnih taložnika moguće je ukloniti od 50 do 70 posto suspendiranih tvari. <sup>(1)</sup> Istaloženi primarni mulj treba ukloniti ili crpkama prebaciti na daljnju obradu ili odlaganje. Ako nam nisu poznati podaci analize otpadnih voda koje je potrebno pročititi, za gradske otpadne vode možemo planirati vrijeme zadržavanja otpadnih voda u prethodnom taložniku od 1,0 do 2,0 sata. Kad bismo povećali vrijeme zadržavanja povećao bi se i obujam taložnika, ali ne bi se postigli bolji učinci pročišćavanja.

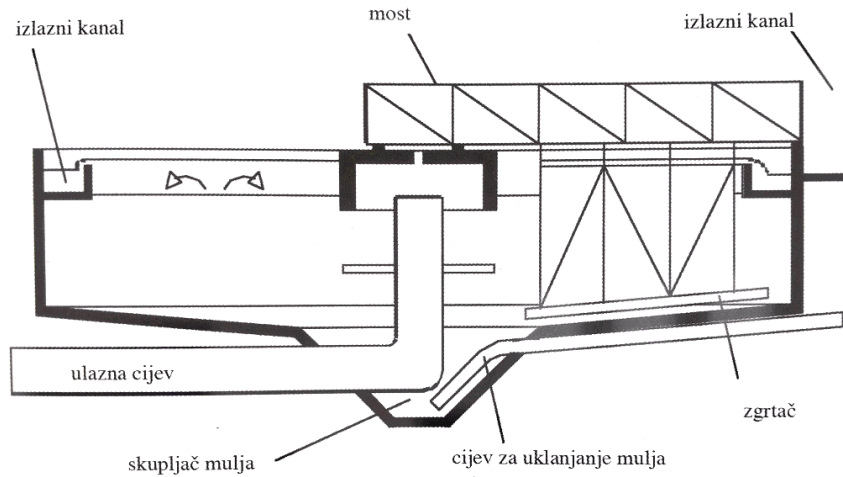
Prema obliku, primarni taložnici dijele se na: pravokutne (uzdužne), kružne (radijalne), ljevkaste (vertikalne) i dvokatne taložnike. <sup>(1)</sup>

- 1) Pravokutni taložnik – karakterizira ih horizontalan smjer protoka vode. Na jednom kraju bazena ulazi otpadna voda, dok na drugom kraju izlazi čista voda. Zgrtač mulja (mehanizam za skupljanje mulja u bazenima) vuče zgrtalicu mulja po dnu bazena, protustrujno dotoku vode, u jamu za skupljanje mulja koja se nalazi ispod uređaja za raspodjelu vode na ulazu u bazen. Prednosti pravokutnog taložnika su manja potrebna površina i povoljniji uvjeti natkrivanja objekta.



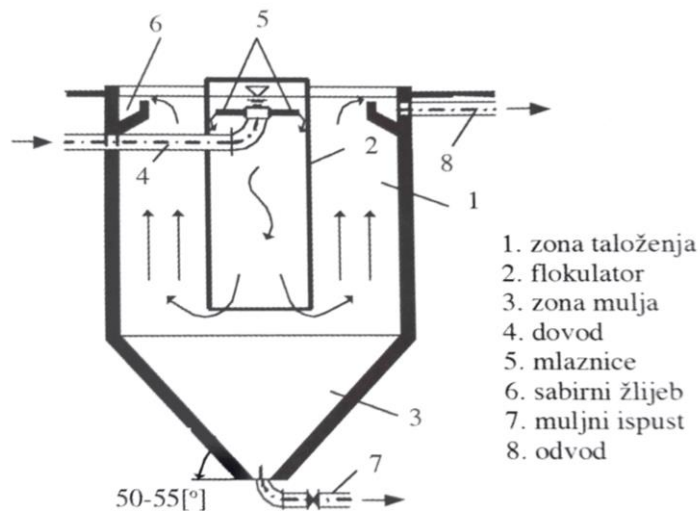
Slika 3. Shema pravokutnog taložnika s lančanim zgrtačem <sup>(1)</sup>

- 2) Kružni taložnik – otpadna voda dovodi se u sredinu kružnog taložnika preko raspodjelnog tornja ispod kojeg je prostor za mulj. Voda struji iz središta prema obodu, a mulj se zgrće zgrtalicom ovješenoj o most. Prednost kružnih taložnika je kontinuitet zgrtanja mulja; zgrtalica se ne vadi iz vode što je ekonomski povoljnije rješenje.



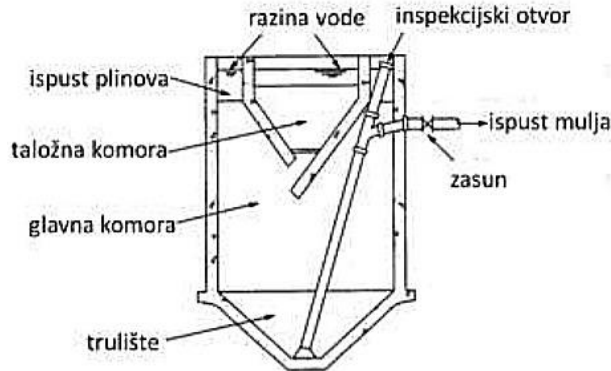
Slika 4. Shema kružnog taložnika <sup>(1)</sup>

- 3) Taložnik s vertikalnim tokom vode – Otpadna voda dotječe u cilindar u sredini gornjeg dijela taložnika. Čista voda prelijeva se preko ruba, a čestice talože prema dnu. Donji dio izveden je konusno tako da mulj sam kliže po ukošenim zidovima stranica u prostor za skupljanje mulja. Prednosti takvog taložnika su što se mulj skuplja bez dodatne opreme (zgrtača), a nedostatak je velika dubina taložnika.



Slika 5. Taložnik s vertikalnim tokom vode <sup>(1)</sup>

- 4) Dvokatni taložnik – sastoji se od duboke komore okruglog ili četvrtastog presjeka. U gornjem dijelu nalazi se taložnik s uskim otvorom u sredini kroz koji propada istaloženi mulj u donji dio gdje je komora trulišta. Mulj se dva puta godišnje vadi i odvozi na odlaganje. <sup>(4)</sup>



Slika 6. Dvokatni taložnik <sup>(5)</sup>

Sekundarni taložnik služi za odvajanje suspendiranih tvari iz vode koja dotječe iz biološkog reaktora. Istaložene tvari pretežno su bakterije (aktivni mulj), od kojih se većina vraća u biološki reaktor, a višak se odvodi na obradu mulja kao organski mulj. Neki od problema koji se javljaju kod razdvajanja mulja od vode su mali broj flokula (zbog čega je taloženje otežano), isplivavanje mulja, napuhivanje mulja te pjenjenje mulja. Sljedeći uvjeti potrebni su za taloženje mulja na zadovoljavajući način: dovoljno velika brzina, znatno ugušćen mulj (zauzima mali obujam), mulj se treba zadržavati na dnu (bez isplivavanja).

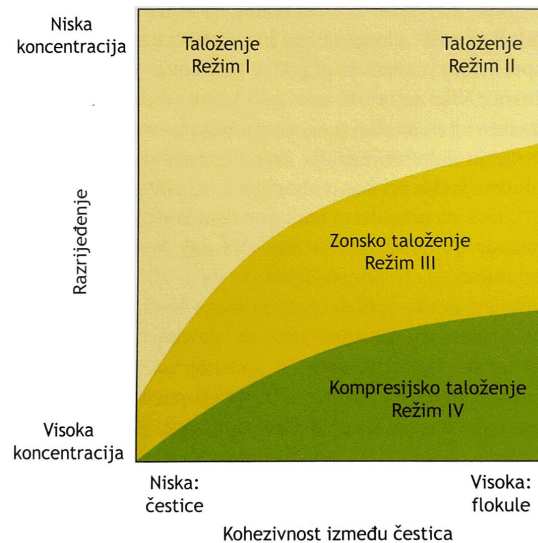
### 3. TEORIJA SEDIMENTACIJE

Kao i mnogi drugi prirodni fenomeni koje se koriste za obradu voda, sedimentacija se koristila za bistrenje i pročišćavanje vode mnogo prije nego su se počeli istraživati kompleksni zakoni koji opisuju vladanje sedimentacije.

Teorija sedimentacije zapravo je teorija o efektu gravitacije na čestice suspendirane u kapljevini manje gustoće od njih samih. Pod utjecajem gravitacije, bilo koja čestica veće gustoće od vode istaložit će u vodi ubrzavajućom brzinom sve dok otpor kapljevine ne postane jednak efektivnoj težini čestice. Stoga će brzina taloženja biti u suštini konstantna i ovisit će o veličini, obliku i gustoći čestice te o gustoći i viskoznosti vode. Većina teorijskih i praktičnih izračuna brzine taloženja u sedimentacijskom bazenu pretpostavlja sferičan oblik čestice. Brzine taloženja čestica drugih oblika mogu se analizirati u odnosu na sferu. <sup>(6)</sup>

### 3.1 Režimi taloženja

Taloženje suspenzije ovisi o njoj koncentraciji i sklonosti flokulaciji, a može se razvrstati u četiri režima: diskretno taloženje bez flokulacije, diskretno taloženje s flokulacijom, zonsko ili ometano taloženje i kompresijsko taloženje.



Slika 7. Režimi taloženja <sup>(7)</sup>

Pri niskim koncentracijama među česticama nema fizičkog kontakta. Čestice su u potpunosti raspršene, a koncentracija je premala da bi jedna čestica djelovala na taloženje druge čestice. Krajnja brzina kojom taloži pojedina čestica karakteristična je za svaku česticu i ona ovisi o svojstvima pojedine čestice kao što su oblik, veličina, poroznost i gustoća. <sup>(5)</sup> Razrijeđene suspenzije koje ne pokazuju sklonost flokulaciji talože diskretnim režimom bez flokulacije. Neke suspenzije pokazuju sklonost flokulaciji čak i pri niskim koncentracijama. Taj režim naziva se diskretno taloženje s flokulacijom. Formirane flokule također talože vlastitom karakterističnom krajnjom brzinom. Stoga vidimo da se kod diskretnog taloženja bez flokulacije i s flokulacijom javlja ista dinamika taloženja. Razlika je u tome što se kod diskretnog taloženja s flokulacijom istovremeno s procesom taloženja javlja dodatni proces flokulacije kojim se mijenjaju pojedinačna svojstva čestica, kao i njihova krajnja brzina taloženja. Brzina taložećih čestica obično se povećava kako čestice agregiraju.

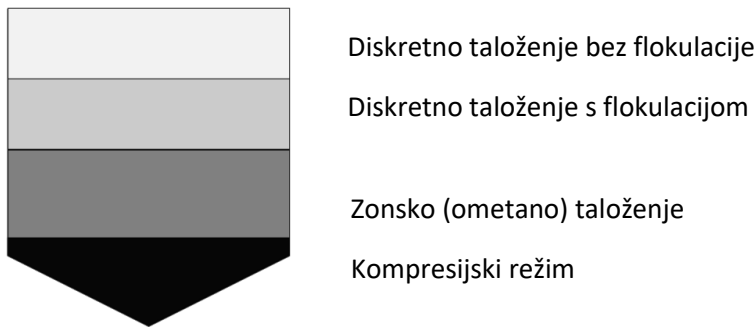
Diskretno taloženje prelazi u ometano taloženje ako koncentracija krutina u spremniku premašuje graničnu koncentraciju pri kojoj čestice više ne talože neovisno jedna od druge. Ova granična koncentracija ovisi o stanju flokulacije mulja. Iznad te granice na svaku česticu utječu ostale čestice, a sile među česticama su dovoljno jake da povuku svaku česticu istom brzinom, neovisno o njoj veličini i gustoći (brzina sedimentiranja određena je lokalnom koncentracijom



u suspenziji). Dakle, čestice talože skupno kao zona, po čemu je ovaj režim dobio i naziv zonsko taloženje. Između izbistrene kapljevine i čestica koje talože formira se jasna dodirna površina.

Kada se koncentracija krutine poveća iznad kritične koncentracije taloženje prelazi u kompresijski režim. Točna koncentracija kod koje će doći do promjene režima opet ovisi o stanju flokulacije čestica. Kod većih koncentracija dolaze u fizički kontakt jedna s drugom i dolazi do sabijanja zbog težine gornjih čestica. Proces se odvija puno sporije nego u zonskom režimu.

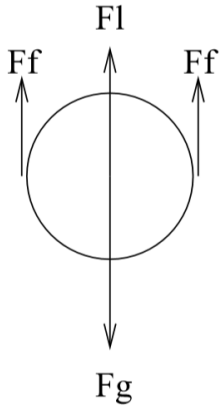
Aktivni mulj pokazuje prirodnu sklonost flokulaciji. Tako se u sekundarnom taložniku istovremeno javljaju različiti režimi taloženja na različitim mjestima u spremniku. U gornjim dijelovima taložnika gdje su koncentracije niže, javlja se diskretno taloženje, koncentracije ulaznog mulja obično odgovaraju zonskom režimu, a na dnu taložnika mulj se ugušćuje kompresijskim režimom. <sup>(8)</sup>



Slika 8. Fenomen taloženja u bistriku <sup>(8)</sup>

### 3.2 Diskretna sedimentacija

Taloženje diskretnih, neflokuliranih čestica može se analizirati klasičnim zakonima sedimentacije koje su dali Newton i Stokes. <sup>(8)</sup> Prema Stokesovom zakonu, čestica u suspenziji želi istaložiti pod utjecajem gravitacije, do čega dolazi zbog njezine vlastite težine. Zbog ubrzanja sile teže, njezina brzina taloženja raste. Dvije su sile suprotne navedenoj. Prva je sila uzgona do koje dolazi zbog razlike tlakova na tijelo u kapljevinu. Druga je sila otpora koja djeluje u suprotnom smjeru od kretanja tijela. Te dvije sile djeluju na česticu suprotno smjeru njenog kretanja i tako usporavaju česticu dok ona ne postigne stanje ravnoteže. Zbog postizanja ravnoteže brzina čestice postaje konstantna. Dakle, čestica sad pada konstantnom brzinom koja se naziva konačna brzina. Izraz za konačnu brzinu možemo dobiti iz jednadžbe ravnoteže za česticu koja taloži.



Slika 9. Sile na diskretnu česticu:  $F_g$  je gravitacijska sila,  $F_l$  je sila uzgona, a  $F_f$  je sila trenja između čestice i kapljevine <sup>(8)</sup>

Newtonov drugi zakon daje:

$$m \frac{dv}{dt} = F_g - F_l - F_f \quad (1)$$

Gdje je  $v$  brzina čestice, a  $m$  masa čestice.

Gravitacijska sila dana je:

$$F_g = mg = \rho_c V_c g \quad (2)$$

Gdje je  $\rho_c$  gustoća,  $V_c$  volumen čestice, a  $g$  ubrzanje sile teže.

Sila uzgona  $F_l$  dana je s:

$$F_l = \rho_f V_c g \quad (3)$$

Gdje je  $\rho_f$  gustoća fluida.

Sila trenja  $F_f$  ovisi o brzini čestice, gustoći fluida, projiciranoj površini čestice i faktoru otpora. Koristi se sljedeći empirijski izraz:

$$F_f = \frac{C_D A_c \rho_f v^2}{2} \quad (4)$$

Gdje je  $C_D$  faktor otpora, a  $A_c$  je projicirana površina čestice.

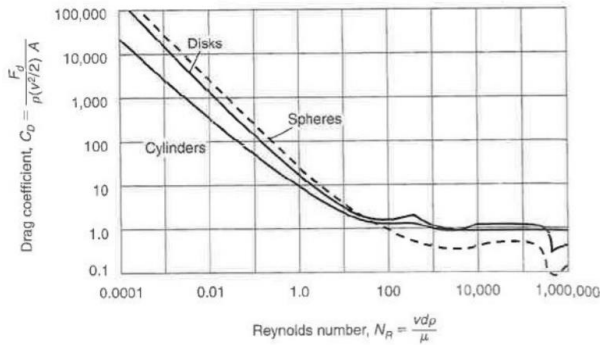
Kad umetnemo (2), (3) i (4) u (1) dobijemo:

$$m \frac{dv}{dt} = g(\rho_c - \rho_f) V_c - \frac{C_D A_c \rho_f v^2}{2} \quad (5)$$

U stacionarnom stanju ( $\frac{dv}{dt} = 0$ ) imamo:

$$v = \sqrt{\frac{2g(\rho_c - \rho_f) V_c}{C_D A_c \rho_f}} \quad (6)$$

Faktor otpora  $C_D$  poprima različite vrijednosti ovisno o tome nalazi li se čestica u laminarnom ili turbulentnom režimu. Faktor otpora funkcija je Reynoldsovog broja. Na Slici 9. vidimo postojanje tri različitih regija, ovisno o vrijednosti Reynoldsovog broja: laminarno ( $Re < 1$ ), prijelazno ( $1 < Re < 2000$ ) i turbulentno područje ( $Re > 2000$ ). <sup>(9)</sup>



Slika 10. Faktor otpora u funkciji Reynoldsovog broja <sup>(9)</sup>

Reynoldsov broj  $Re$  za čestice definiran je:

$$Re = \frac{v_{\xi} d_{\xi} \rho_f}{\mu} \quad (7)$$

Gdje je  $d_{\xi}$  promjer čestice,  $\mu$  dinamička viskoznost.

Za laminarni režim vrijedi:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (8)$$

Pretpostavljajući da je čestica sferična, možemo izračunati njezin volumen prema  $V_{\xi} = \frac{d^3 \pi}{6}$  i projiciranu površinu prema  $A_{\xi} = \frac{d^2 \pi}{4}$ . Ako ovo ubacimo u (6), dobivamo:

$$v = \sqrt{\frac{4g(\rho_{\xi} - \rho_f)d}{3C_D \rho_f}} \quad (9)$$

Umetanjem izraza za faktor otpora i izraz za Reynoldsov broj u jednadžbu (9) dobivamo Stokesov zakon za brzinu padanja čestica u laminarnom području pod djelovanjem gravitacijskog polja <sup>(8)</sup>:

$$v = \frac{g(\rho_{\xi} - \rho_f)d^2}{18\mu} \quad [m/s] \quad (10)$$

Ograničenja Stokesovog zakona <sup>(10)</sup>:

- 1) Pretpostavka da su sve krute čestice sferične
- 2) Specifična gravitacija je za različite oblike čestica različita, a mi koristimo njezinu prosječnu vrijednost
- 3) Primjenjiv je dok čestica taloži u kapljevine koja se proteže u beskonačnost, dok smo mi limitirani stjenkama posude u kojoj provodimo eksperiment. Stjenke mogu utjecati na čestice koje talože
- 4) Pretpostavka da nema međusobne interakcije čestica, dok se u stvarnosti čestice mogu sudarati i tako mijenjati svoj smjer i brzinu
- 5) Sedimentacijska analiza ne može se provoditi za čestice veće od 0,2 mm jer bi one mogle izazvati turbulentne uvjete, za koje Stokesov zakon nije primjenjiv
- 6) Sedimentacijska analiza nije primjenjiva ni za čestice manje od 0,2 mikrona jer bi tako male čestice mogle potaknuti Brownovo gibanje, a te čestice ne talože po Stokesovom zakonu

### 3.3 Zonska sedimentacija

Postoji nekoliko pokušaja predviđanja brzine sedimentacije koncentrirane suspenzije. 1926, Robinson <sup>(11)</sup> je predložio modifikaciju Stokesovog zakona - na mjesto kapljevine stavio je svojstva suspenzije:

$$v_c = \frac{K'' d^2 (\rho_s - \rho_c) g}{\mu_c} \quad (11)$$

Gdje je  $v_c$  brzina sedimentacije čestice u suspenziji,  $\rho_c$  gustoća suspenzije,  $\mu_c$  viskoznost suspenzije, a  $K''$  konstanta. U ovoj jednadžbi,  $K''$  bi trebala biti ista za svaku vrstu čestica, neovisno o veličini čestice, ako je oblik većih i manjih čestica sličan.

Steinour <sup>(12)</sup> je 1944., proučavajući sedimentaciju sitnih jednoličnih čestica, imao sličan pristup. Koristeći viskoznost kapljevine, gustoću suspenzije i funkciju praznina u suspenziji, dobio je sljedeći izraz:

$$v_c = \frac{d^2 (\rho_s - \rho_c) g}{18\mu} f(e) \quad (12)$$

Gdje je  $e$  prazan prostor u suspenziji.

## 4. VEZA TEORIJE I DIZAJNA

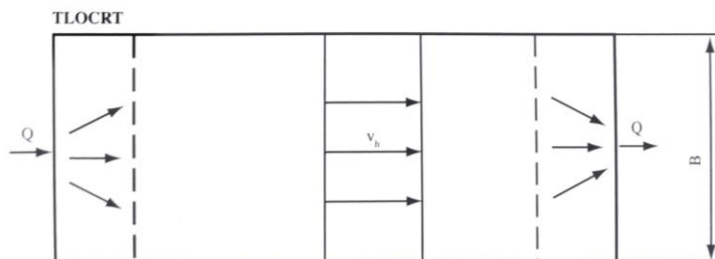
Najbolji zakoni sedimentacije prilično dobro odgovaraju eksperimentalnim podacima za diskretne sfere koje talože kroz mirujuću vodu u bazenu dovoljnog poprečnog presjeka da je utjecaj stjenki zanemariv i kad je koncentracija suspendiranih čestica dovoljno niska da čestice jedna drugu ne ometaju u taloženju. Međudjelovanje čestica ovisi o koncentraciji čestica. Fair i Geyer<sup>(13)</sup> pronašli su da kod obrade otpadnih voda, međusobni utjecaj čestica ne bi trebao biti ozbiljan, osim možda pri dnu bazena. Zaključujemo da većina čestica taloži u rasponu brzina koje možemo opisati Stokesovim zakonom.<sup>(6)</sup>

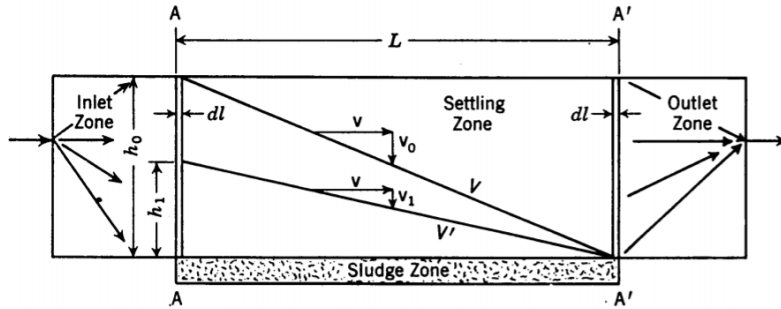
Brojni faktori mijenjaju brzinu taloženja čestica u realnim sedimentacijskim bazenima. Specifična gravitacija i oblik čestica, koagulacija i aglomeracija čestica, koncentracija čestica i kretanje vode kroz sedimentacijski bazen su među najznačajnijima. Nepravilno oblikovane čestice talože sporije od sferičnih čestica istog volumena i materijala. Zrna pijeska talože prilično brzo u realnom sedimentacijskom bazenu, ali ona predstavljaju relativno mali postotak prisutnih čvrstih tvari.

Modifikacije Stokesova zakona da se može primijeniti na flokulirane i agregirane čestice pokušali su dati Fair i Geyer<sup>(13)</sup>, ali priroda flokuliranih suspendiranih krutina toliko je kompleksna da je razlika teorije i eksperimentalnih podataka jako velika. Efekt horizontalnog gibanja vode u kontinuiranim sedimentacijskim bazenima, kakvi se često koriste kod obrade vode i komunalija, uzrokuje veliko odstupanje realnih brzina taloženja od teoretskih.

### 4.1 Idealni sedimentacijski bazen

Brzina taloženja čestice može se koristiti za dizajn sedimentacijskih bazena. Ključna je ideja da se pronađe donja granica brzine taloženja potrebna da čestica istaloži prije nego dođe do kraja bazena. Razmatra se idealni sedimentacijski bazen prikazan na slici.

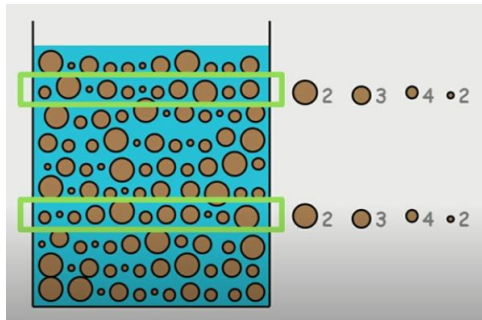




Slika 11. Idealni sedimentacijski bazen <sup>(1)</sup>, <sup>(6)</sup>

Slika 11. prikazuje što bi idealni dovod, odvod i sedimentacijski bazen trebali postići. Podijelit ćemo sedimentacijski bazen na četiri zone:

**Zona dotoka:** Pretpostavlja se da se jedinica vode, koja ulazi u idealni sedimentacijski bazen lijevo, jednoliko proširi po vertikalnoj ravnini  $A - A'$ , pri čemu su suspendirane čestice istih veličina jednako raspoređene na svim točkama po vertikalnom presjeku bazena i koncentracija čestica raznih veličina jednaka je na svim dubinama. To znači da je broj čestica iste veličine na svakom sloju dubine jednak te je suspenzija homogena. Zona u kojoj se to događa zove se zona dotoka.

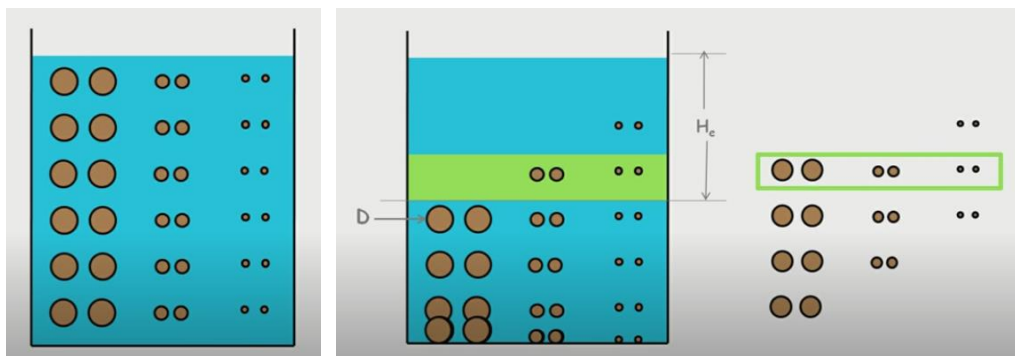


Slika 12. Prikaz homogene suspenzije <sup>(10)</sup>

**Zona taloženja:** Čestice se kreću od dotoka do pretoka jednolikom brzinom i pravocrtno stižu u poziciju  $A' - A'$ . Putanja čestica određena je sumom vektora dviju komponenti brzina, linearne brzine čestica ( $v$ ), koja je posljedica protoka fluida kroz bazen, i brzine taloženja čestica ( $v_1$ ). Zona u kojoj se to događa zove se zona taloženja.

Uvrštavanjem  $v = He/t$  u Stokesov zakon (10) dobivamo izraz pomoću kojeg možemo izračunati vrijeme potrebno da čestica promjera  $d$  istaloži na dubinu  $He$  <sup>(10)</sup>:

$$v = \frac{g(\rho_c - \rho_f)d^2}{18\mu} \rightarrow \frac{He}{t} = \frac{g(\rho_c - \rho_f)d^2}{18\mu} \quad (13)$$



Slika 13. Raspodjela čestica na početku sedimentacije i nakon nekog vremena <sup>(10)</sup>

Iz Stokesovog zakona vidimo da će čestice većeg promjera imati veću brzinu te će one istaložiti brže nego čestice manjeg promjera. Na početku sedimentacije količina čestica na bilo kojoj dubini suspenzije je ista. Kako vrijeme prolazi čestice počinju taložiti i količina čestica na različitim dubinama postaje drugačija. Budući da iz jednadžbe (13) znamo da će u vremenu  $t$  čestice promjera  $d$  istaložiti na dubinu  $H_e$ , što znači da će iznad dubine  $H_e$  ostati samo čestice promjera manjeg od  $d$ . <sup>(10)</sup>

**Zona pretoka:** U zoni pretoka, dijelovi vode ponovno se sastavljaju iz svih dijelova ravnine  $A' - A'$ , noseći sa sobom sve čestice koje nisu odvojene u zoni taloženja. <sup>(6)</sup>

**Zona mulja:** nalazi se na dnu bazena i trajno iz suspenzije uklanja sve čestice koje dopiju na dno.

Uz pretpostavku da sve čestice talože diskretno i da se one čestice koje dotaknu dno odvoje, put apsolutne brzine ( $v$ ) predstavlja maksimalnu visinu na kojoj se mogu pronaći čestice najmanjeg promjera  $d_0$  koje će se sa sto postotnom sigurnošću odvojiti. Dakle, čestice promjera  $d_0$  koja uđe u bazen na površini vode (na visini  $h_0$ ) putovat će apsolutnim putem  $V$  i odvojiti će se točno kad voda koja se giba brzinom  $v$  uđe u zonu pretoka. Sve ostale čestice istog promjera i gustoće slijedit će paralelne putove i biti odvojene bliže dotoku bazena. Brzina taloženja čestica  $v_0$  bit će određena promjerom i gustoćom čestice i slijedit će odgovarajući zakon sedimentacije. <sup>(6)</sup>

Čestice promjera  $d_1$  (manje od  $d_0$ , ali iste gustoće) slijedit će put paralelan s  $V'$ . Posljedično, one će biti odnesene u zonu pretoka ako je njihova početna točka iznad  $h_1$  u ravnini  $A - A$ , ili će se odvojiti ako uđu u bazen na nižoj visini.

Kao što smo već spomenuli, vrijeme potrebno da čestica promjera  $d_0$  istaloži s visine  $h_0$  brzinom  $v_0$  je:  $t = \frac{h_0}{v_0}$  ili  $v_0 = \frac{h_0}{t}$ .  $t$  je također jednak volumenu bazena podijeljenom s protokom dotoka  $Q$ , a volumen je jednak umnošku površine  $A$  i visine  $h_0$ :  $t = \frac{Ah_0}{Q}$ , iz čega slijedi:

$$v_0 = \frac{h_0}{Ah_0} \cdot Q = \frac{Q}{A} \quad (14)$$

Gdje je omjer  $\frac{Q}{A} \left( \frac{m^3}{m^2 \cdot d} \right)$  površinsko opterećenje taložnika i jedan je od ključnih parametara u procesu i dizajnu sedimentacijskog bazena. <sup>(1)</sup> Primjećujemo da kod idealnog taložnika prikazanog u pravokutnom taložniku brzina taloženja ne ovisi ni o dubini taložnika ni o vremenu zadržavanja. Stoga, primjenjujući prethodnu relaciju na realni sedimentacijski bazen dobivamo samo grubu aproksimaciju. Postoje različite empirijske relacije za kompenzaciju neidealnih situacija. Carlsson (1996) na temelju iskustva kaže kako bi dubina bazena trebala biti veća od 2-3 m. <sup>(8)</sup> Objašnjena teorija idealnog taloženja može se primijeniti i na kružni i vertikalni taložnik. <sup>(1)</sup>

## 4.2 Realni sedimentacijski bazen

Zakoni sedimentacije diskretnih čestica sferičnog ili gotovo sferičnog oblika dobro su uspostavljeni kao rezultat teorijskih i eksperimentalnih istraživanja. Modificirani su da opisuju flokulirane čestice do zadovoljavajućeg stupnja. Do neke razine točnosti moguća je njihova primjena na pojednostavljeni idealni sedimentacijski bazen, ali realni bazeni ne odgovaraju u potpunosti idealnim bazenima. Zbog toga je proračune potrebno prilagoditi tako da odgovaraju za realne sustave te je potrebno pratiti rad taložnika.

## 4.3 Kontrola rada taložnika

Za provjeru učinkovitosti pročišćavanja otpadnih voda potrebno je kontrolirati rad taložnika, odnosno treba pratiti sljedeće pokazatelje:

- 1) Vrijeme protjecanja -  $t = \frac{V}{Q}$  [h] gdje je  $V$  obujam taložnika do visine punjenja vodom izražen u [ $m^3$ ], a  $Q$  količina vode koja dolazi tijekom jednog sata izražena u [ $m^3/h$ ]. Kod primarnih taložnika najbolji učinci postižu se pri vremenu zadržavanja od 1,5 do 2,0 h, a u slučaju naknadnih taložnika 2,0 do 3,0 sata <sup>(1)</sup>
- 2) Brzina taloženja – što je veća razlika u masi između čestica i vode, to se čestice brže kreću, a time i brže talože. Na brzinu taloženja djeluju i neki drugi čimbenici kao što su strujanja uvjetovana konstrukcijom taložnika, razlika temperature vode u pojedinim slojevima taložnika, razlika u koncentraciji tvari otopljenih u vodi te odnos dubine i duljine taložnika
- 3) Poremećaji zbog strujanja – strujanje vode u taložniku uvjetovano je dolaskom vode koja je hladnija ili toplija od vode u taložniku te većim sadržajem soli otopljenih u vodi koja dolazi pa je voda specifički teža. Dolazi do turbulencija na ulazu i izlazu iz taložnika. Zbog poremećaja je potrebno izračunate vrijednosti protoka otpadne vode smanjiti za 25-35% <sup>(2)</sup>



## 5. DIMENZIONIRANJE TALOŽNIKA

### 5.1 Diskretna (partikulativna) sedimentacija

Za modeliranje procesa diskretne sedimentacije primjenjuje se model za optjecanje u laminarnom režimu. <sup>(14)</sup>

Brzina smetanog sedimentiranja čestica nepravilnog oblika je:

$$v_{ss} = \frac{\dot{V}_1}{A} = K_\psi K_\varphi \frac{d^2(\rho_c - \rho_c)g}{18\mu} \quad (15)$$

Gdje je  $\dot{V}_1$  volumni protok bistre tekućine, A površina sedimentiranja,  $K_\psi$  dinamički faktor oblika, a  $K_\varphi$  faktor smetanog sedimentiranja.

Preoblikovanjem jednadžbe (15) možemo dobiti izraz za površinu sedimentiranja:

$$A = \frac{\dot{V}_1}{v_{ss}} = \frac{18 \mu \dot{V}_1}{K_\psi K_\varphi d^2(\rho_c - \rho_c) g} \quad (16)$$

Budući da se stvarni uvjeti razlikuju od idealnih zbog turbulencija i nejednoliko raspodijeljenog toka, izračunata površina more se uvećati za 50%.

### 5.2 Zonska sedimentacija

Modeliranje procesa zonske sedimentacije temelji se na Carman-Kozenyjevoj zakonitosti, koja se odnosi na strujanje kroz porozni sloj. Brzinu sedimentiranja izjednačimo s površinskom brzinom kapljevine:  $v_{ss} = |-v_A|$ , koja se definira izrazom:

$$v_A = \frac{1}{150} \frac{x_{ST}^2}{\mu} \frac{\varepsilon^2}{(1-\varepsilon)^2} \frac{\Delta p}{\Delta l} \quad (17)$$

Gdje je  $\varepsilon$  poroznost,  $x_{ST}$  Sauterov promjer,  $\Delta p$  pad tlaka i  $\Delta l$  visina sloja. <sup>(14)</sup>

Međutim, zbog poteškoća s definiranjem unutrašnje geometrijske strukture čestica koje talože u zonskom režimu, brzina sedimentiranja određuje se uvijek eksperimentalno. Sedimentacijskim testom za poznatu koncentraciju suspenzije dobivamo brzinu taloženja čestica. Pomoću ta dva parametra i sljedećih relacija možemo izračunati potrebnu površinu taložnika.

Pri kontinuiranoj stacionarnoj sedimentaciji, gibanje čvrstih čestica u svakoj se točki sedimentacijske zone sastoji od dvije komponente, relativne brzine čvrstih čestica u odnosu na fluid  $v_s$  i brzine otjecanja guste suspenzije  $v_{tr}$ .  $v_{tr} = \dot{V}_2/A$ , gdje je  $\dot{V}_2$  volumni protok ugušćenog mulja. <sup>(14)</sup>

Fluks čvrstih čestica (maseni protok čvrstih čestica po jedinici površine presjeka posude ili gustoća masenog toka) definira se kao:

$$S = \frac{\dot{M}_0}{A} = c_s(v_s + v_{tr}) \quad (18)$$

Gdje je  $c_s$  masena koncentracija čvrstih čestica.

U razini otvora za odvođenje guste suspenzije možemo uzeti da je:  $v_s = 0$ , iz čega će slijediti:

$$S = c_{s,2} \frac{\dot{V}_2}{A} \quad (19)$$

Gdje je  $c_{s,2}$  masena koncentracija guste suspenzije u odtoku.

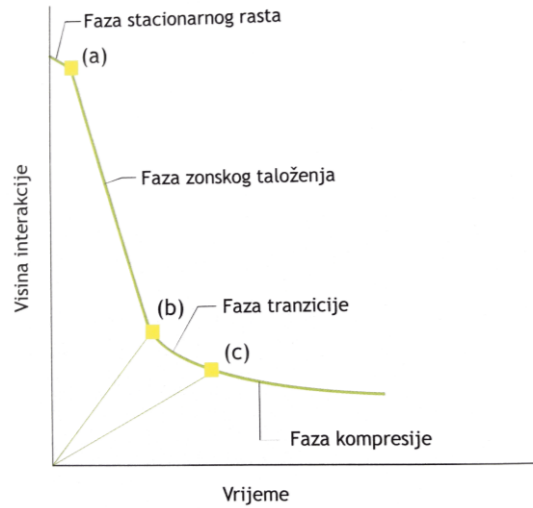
Uvrstimo ovaj izraz u prethodni:

$$\frac{A}{\dot{M}_0} = \frac{1}{v_s} \left( \frac{1}{c_s} - \frac{1}{c_{s,2}} \right) \quad (20)$$

### 5.3 Šaržni sedimentacijski test

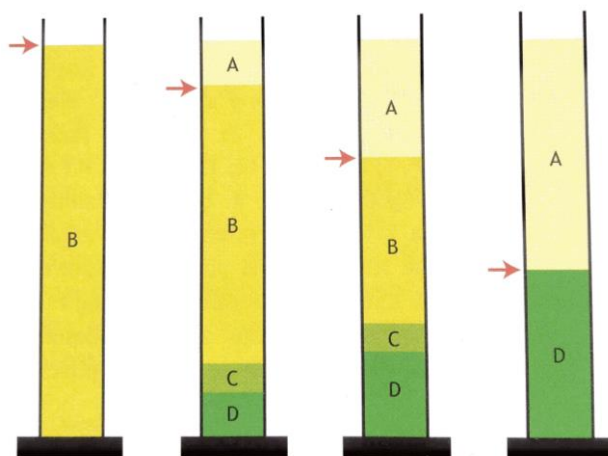
Eksperimentalno istraživanje procesa sedimentacije u stacionarnim kolonama različitih vodenih suspenzija čvrstih čestica ima kao glavni rezultat mogućnost dobivanja sedimentacijskih krivulja koje, osim što nam daju kompletnu sliku o tome kako se voda bistri u tom procesu, dozvoljavaju nam da kroz razno procesiranje dobijemo važne karakteristične parametre.

Na sedimentacijskoj krivulji mogu se opaziti četiri različite faze. Svaka faza označava promjenu u taloženju na dodirnoj površini suspenzija-kapljevina. Stoga sedimentacijska krivulja pruža informacije jedino o ponašanju na dodirnoj površini mulj-voda. Taloženje na dubinama u čitavoj koloni može se u svakom trenutku razlikovati od taloženja na dodirnoj površini, što ovisi o lokalnim koncentracijama.



Slika 14. Kretanje visine muljnog sloja kroz vrijeme, s naznakom četiri faze <sup>(7)</sup>

U regiji ometanog (zonskog) taloženja koncentracija je ujednačena i jednaka početnoj koncentraciji čvrstih čestica. Nagib linearnog dijela krivulje odgovara brzini ometanog taloženja. Pomoću brzina sedimentacije (izračunatih iz područja konstantne brzine) iz više sedimentacijskih testova s različitim početnim koncentracijama, možemo na temelju Coe-Clevengerove metode izračunati površinu taložnika. Coe i Clevenger pretpostavljaju da se podaci dobiveni šaržnim sedimentacijskim testom mogu primijeniti i na kontinuirane procese. Mehanizam sedimentacije prati se u cilindričnim posudama promjera većeg od 50 mm kako bi se eliminirao utjecaj stijenki. <sup>(14)</sup>



Slika 15. Kronološki proces sedimentacijskog testa <sup>(7)</sup>

Na Slici 15. možemo vidjeti raspodjelu regija taloženja po dubini kolone u različitim trenucima tijekom šaržnog sedimentacijskog testa.

Nedugo nakon početka eksperimenta, na različitim dubinama u koloni formiraju se četiri regije. Na vrhu kolone formira se regija A koja se sastoji od izbistrene vode. Ispod regije A formira se regija B u kojoj se odvija zonsko taloženje. Nadalje, regiju C karakterizira prijelazno taloženje, a na dnu kolone nalazimo regiju D u kojoj vlada kompresijski režim. Na Slici 15. strelicom je označena dodirna površina mulj-voda čija se visina prati kroz vrijeme. Dakle, faze koje se bilježe na sedimentacijskoj krivulji javljaju se kako dodirna površina suspenzija-kapljevina prolazi kroz različite regije taloženja. Od početka testa do točke (a) dodirna površina suspenzija-kapljevina u fazi je stacionarnog rasta. Zatim se od točke (a) do točke (b) dodirna površina nalazi u regiji ometanog taloženja. Na krivulji možemo primijetiti linearni pad. Kad sloj mulja dosegne prijelazni sloj započinje faza tranzicije (na slici između točki (b) i (c)). Prijelazni sloj je sloj konstantne debljine koji formiraju čestice koje dolaze iz sloja ometanog taloženja i kompresijskog sloja. Pritom se sloj ometanog taloženja smanjuje, dok se kompresijski sloj povećava. Gradijent koncentracije povećava se s dubinom, a sukladno tome smanjuje se brzina taloženja. Po tome se faza tranzicije razlikuje od faze zonskog taloženja, premda su tijekom ove dvije faze karakteristike taloženja iste. Kad muljni sloj dostigne kompresijski sloj ulazimo u fazu kompresije koja započinje u točki (c). Trenutak u kojem započinje kompresijska faza zove se točka kompresije, a samu točku teško je odrediti. U ovoj fazi čestice se zbijaju, čime se stvara sve veći gradijent koncentracije, a brzina taloženja dodatno pada. <sup>(7)</sup>

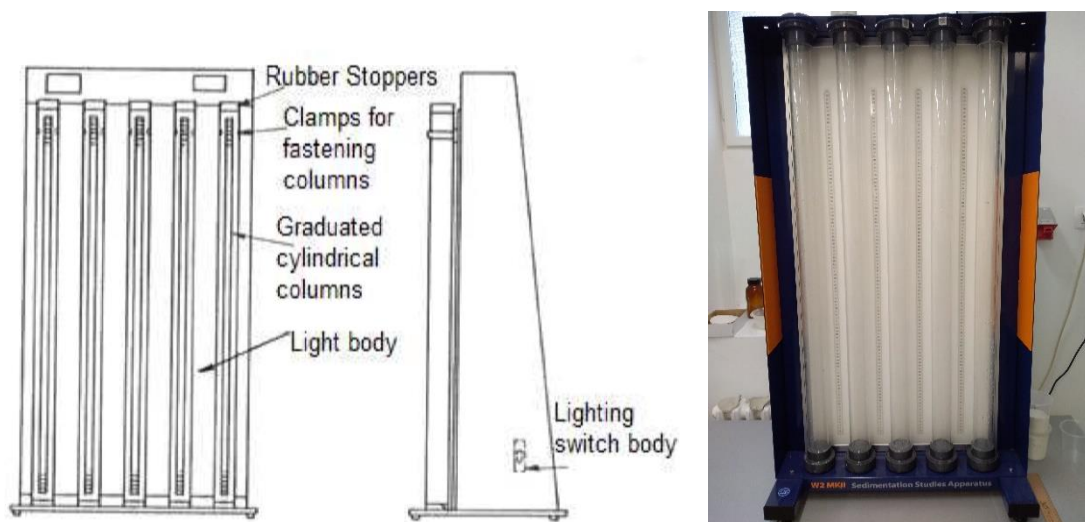
Nedostatak metode mjerenja sedimentacijske krivulje je što pruža jedino informacije o dodirnoj površini suspenzija-kapljevina. Ne dobivaju se informacije o taloženju unutar muljnog sloja ili o stvarnom rastu muljnog sloja. Također, ova metoda ne omogućuje izračun brzine taloženja u kompresijskoj fazi. Postoje naprednije mjerne tehnike kojima je cilj pružiti detaljnije informacije o taloženju mulja kroz vrijeme i po dubini, ali te tehnike ne mogu se provoditi rutinski jer zahtijevaju specijaliziranu opremu. <sup>(7)</sup>

## 6 EKSPERIMENTALNI DIO

Istraživanje čvrstih čestica radi se na stacionarnim sustavima (stacionarne kolone), kao i na dinamičkim sustavima. Za stacionarne kolone, ako se u staklenu cijev uvede određena količina razrijeđene suspenzije koja se sastoji od vode i čvrstih čestica i ostavi ju se na miru, može se nakon određenog vremena primijetiti pojava posebnih područja kao što su: bistra tekuća zona na vrhu cijevi, zona s vodom u kojoj su čvrste čestice u procesu sedimentacije nalazi se na sredini cijevi i zona s koncentriranim muljem nataloženim na dnu kolone.

Za mjerenje sedimentacijske krivulje kolona se puni uzorkom mulja i pokreće se digitalni sat kako bi se pratilo trajanje eksperimenta. Pušta se da mulj istaloži, a mjeri se pozicija dodirne površine suspenzija-kapljevina u nekoliko vremenskih intervala. Rezultat je sedimentacijska krivulja, pomoću koje dobivamo važne karakteristične parametre. <sup>(7)</sup>

Eksperimentalno istraživanje sedimentacijskog procesa provedeno je na laboratorijskom stalku koji je opremljen s 5 staklenih kolona unutrašnjeg promjera 51 mm i visine 1300mm (sa skalom).



Slika 16. Oprema za proučavanje sedimentacije <sup>(3)</sup> Na slici desno nalazi se aparatura W2 MKII Sedimentation Studies Apparatus na kojoj je proveden eksperiment

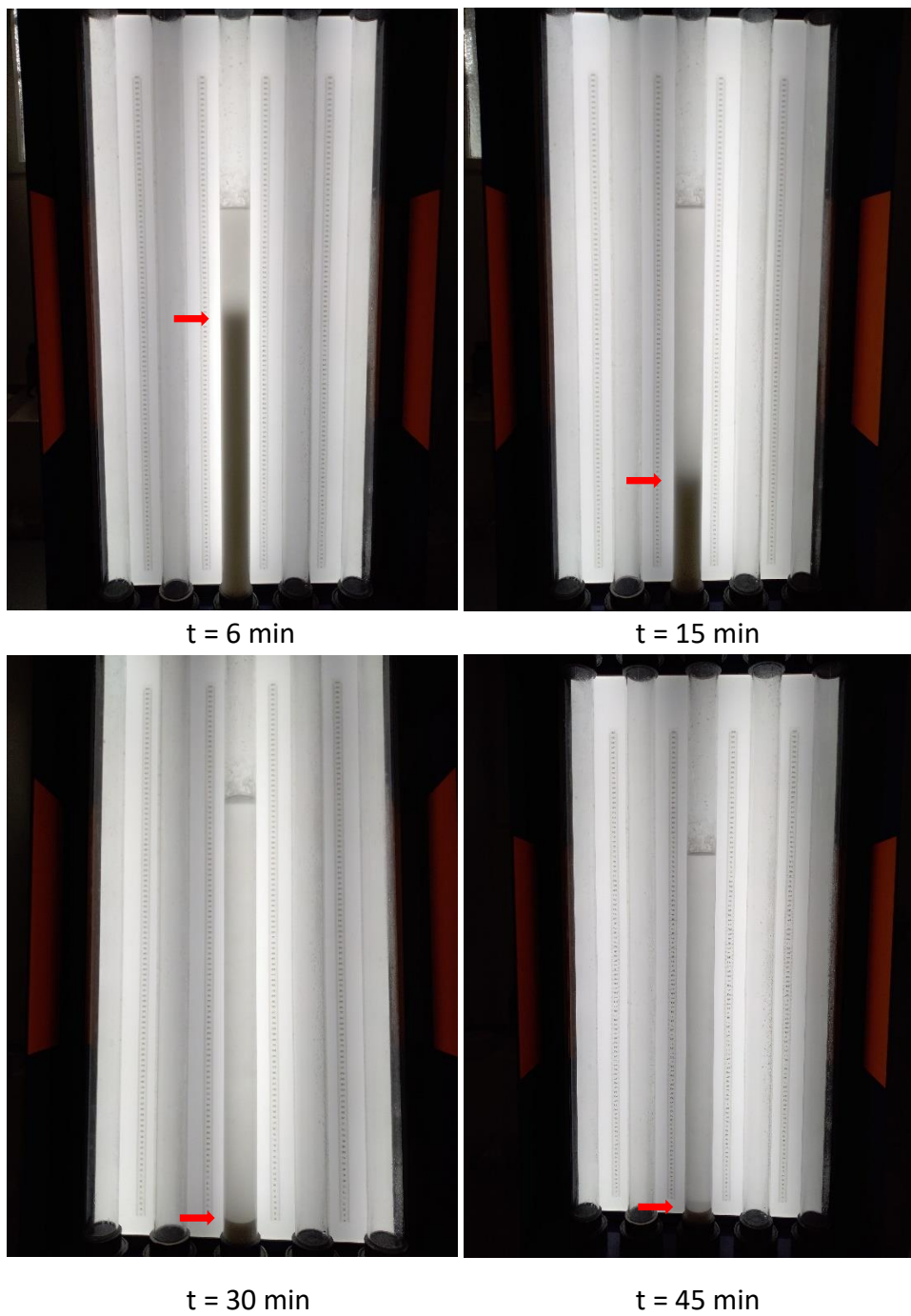
Korištene su suspenzije koje se sastoje od vode i kalcijevog karbonata u prahu. Pripremljene su suspenzije koncentracija 20, 40, 60, 80 i 100  $kg/m^3$ , što odgovara masenim postocima od 2, 4, 6, 8 i 10%. Suspenzije su prenesene u kolone do početne visine od 750 mm. Sadržaj kolone jednoliko se izmiješao i pratila se promjena položaja linije bistra voda-suspenzija u jednolikim intervalima 0,05 h (3 min), 60, odnosno 75 minuta.

## 7 REZULTATI

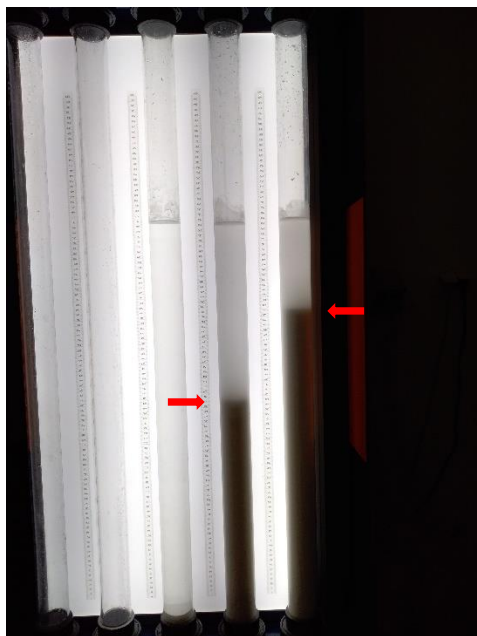
Rezultati dobiveni u procesu sedimentacije u stacionarnoj koloni pokazani su u Tablici 2.

Tablica 2. Eksperimentalni rezultati: visina dodirne površine suspenzija-kapljevina u vremenu

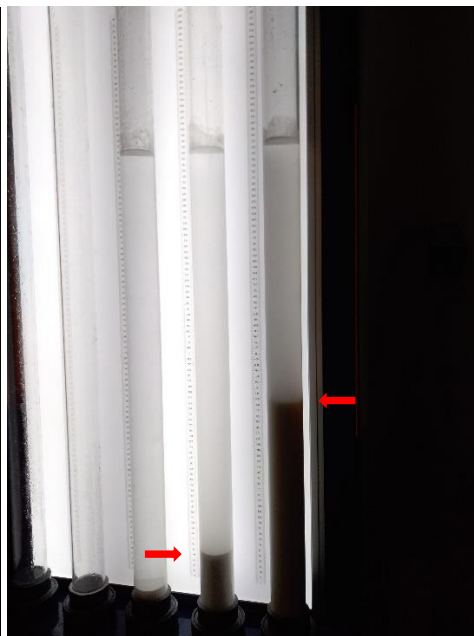
t, min	h1, cm	h2, cm	h3, cm	h4, cm	h5, cm
0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0
3	65,0	68,5	70,1	70,4	71,8
6	54,2	61,9	65,7	67,5	69,7
9	44,1	55,2	61,3	64,3	67,1
12	34,0	49,1	56,5	60,7	64,6
15	22,3	42,3	51,8	57,3	62,1
18	12,0	35,0	47,3	53,7	59,7
21	3,1	29,1	42,8	50,2	57,2
24	3,0	22,0	38,1	46,2	54,4
27	2,7	15,9	32,9	43,3	51,5
30	2,5	9,2	28,0	39,4	49,1
33	2,4	8,5	23,6	35,7	46,2
36	2,2	7,9	18,8	32,1	43,8
39	2,1	7,3	15,4	28,4	41,4
42	2,0	6,6	14,4	25,1	38,4
45	2,0	6,3	13,5	22,4	35,8
48	2,0	6,0	13,0	21,1	33,5
51	2,0	5,8	12,3	19,9	31,1
54	2,0	5,4	11,7	19,1	28,9
57	2,0	5,1	11,0	18,3	27,2
60	2,0	5,0	10,6	17,5	26,0
63				17,0	24,8
66				16,1	23,8
69				15,5	23,1
72				14,9	22,0
75				14,3	21,4



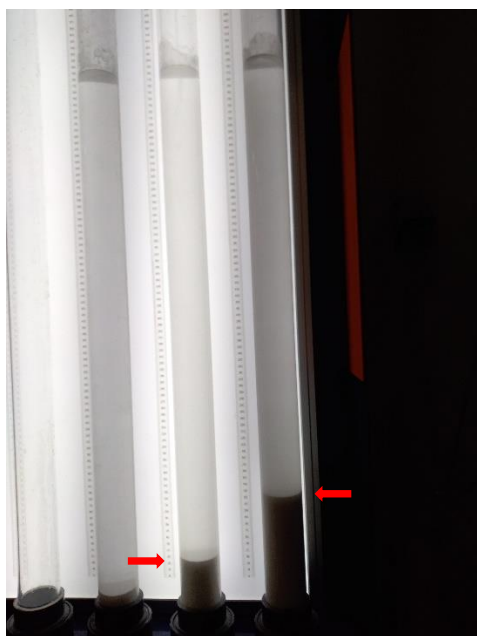
Slika 17. 2%-tna suspenzija u 6, 15, 30 i 45 minuta. Crvenom strelicom označen je položaj dodirne površine suspenzija-kapljevina, u određenom vremenu



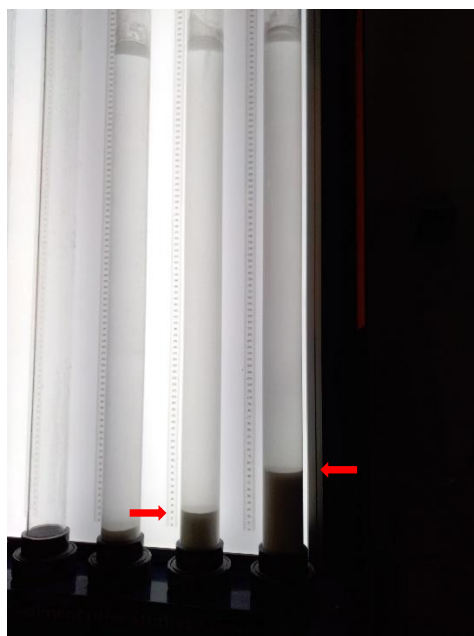
t = 15 min



t = 30 min



t = 45 min



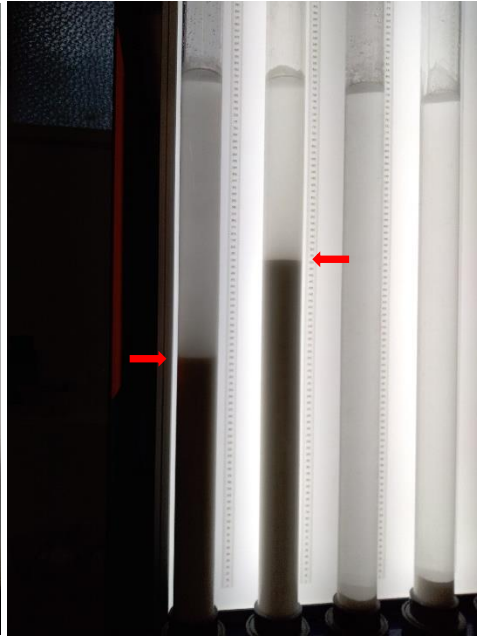
t = 60 min

Slika 18. 4 i 6%-tne suspenzije u 15, 30, 45 i 60 minuta. U lijevoj koloni nalazi se 4%-tna, a u desnoj 6%-tna suspenzija

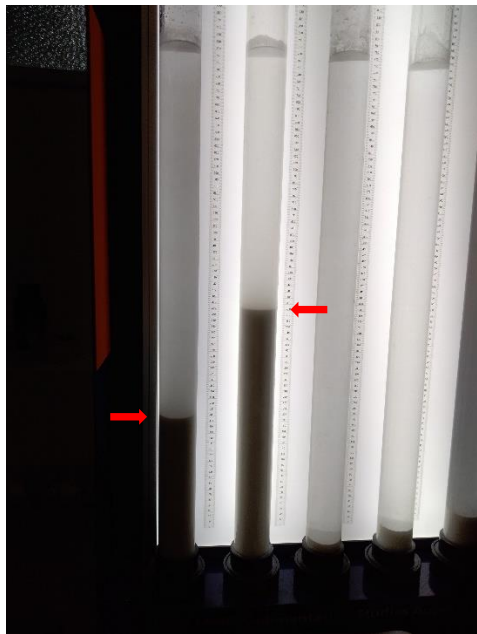




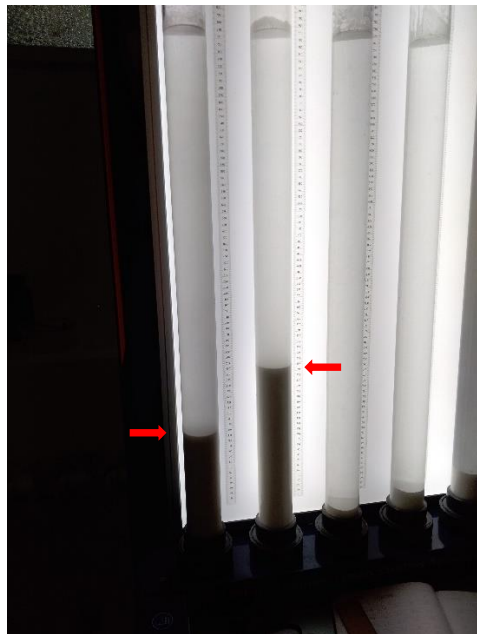
t = 15 min



t = 30 min

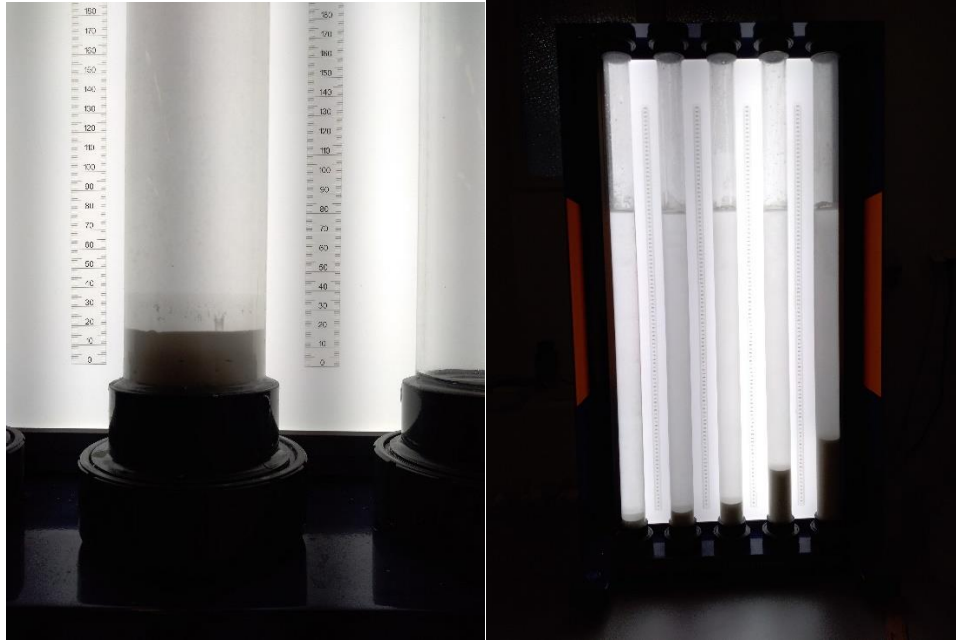


t = 45 min



t = 60 min

Slika 19. 8 i 10%-tne suspenzije u 15, 30, 45 i 60 minuta. U lijevoj koloni nalazi se 8%-tna, a u desnoj 10%-tna suspenzija



Slika 20. Izgled suspenzija u kolonama na kraju eksperimenta. Na slici lijevo prikazan je istaloženi kalcijev karbonat u 2%-tnoj suspenziji. Na slici desno prikazane su sve ispitivane kolone na kraju eksperimenta, pri čemu je najrjeđa suspenzija na lijevom kraju, a najkoncentriranija na desnom

Na temelju zabilježenih vrijednosti nacrtane su sedimentacijske krivulje kao funkcija vremena za visinu dodirne površine voda-suspenzija.

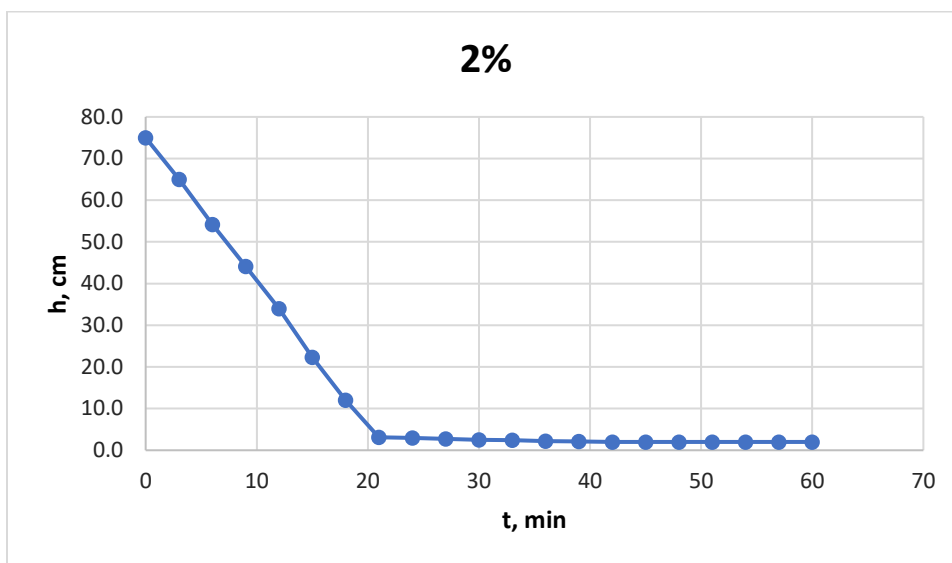
Rezultati testa nakon 60 minuta:

- Suspenzija koncentracije 2% spusti se sa 75 cm do 2,0 cm.
- Suspenzija koncentracije 4% spusti se sa 75 cm do 5,0 cm.
- Suspenzija koncentracije 6% spusti se sa 75 cm do 10,6 cm.
- Suspenzija koncentracije 8% spusti se sa 75 cm do 17,5 cm.
- Suspenzija koncentracije 10% spusti se sa 75 cm do 26,0 cm.

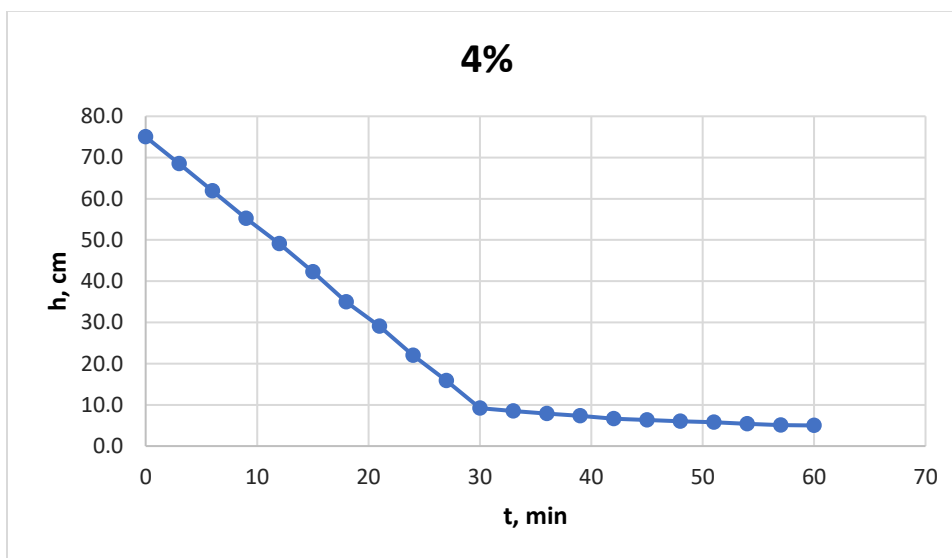
Za dvije najkoncentriranije suspenzije eksperiment se nastavio do 75 minuta s ciljem dobivanja ljepših sedimentacijskih krivulja, a rezultati nakon 75 minuta glase:

- Suspenzija koncentracije 8% spusti se sa 75 cm do 14,3 cm.
- Suspenzija koncentracije 10% spusti se sa 75 cm do 21,4 cm.

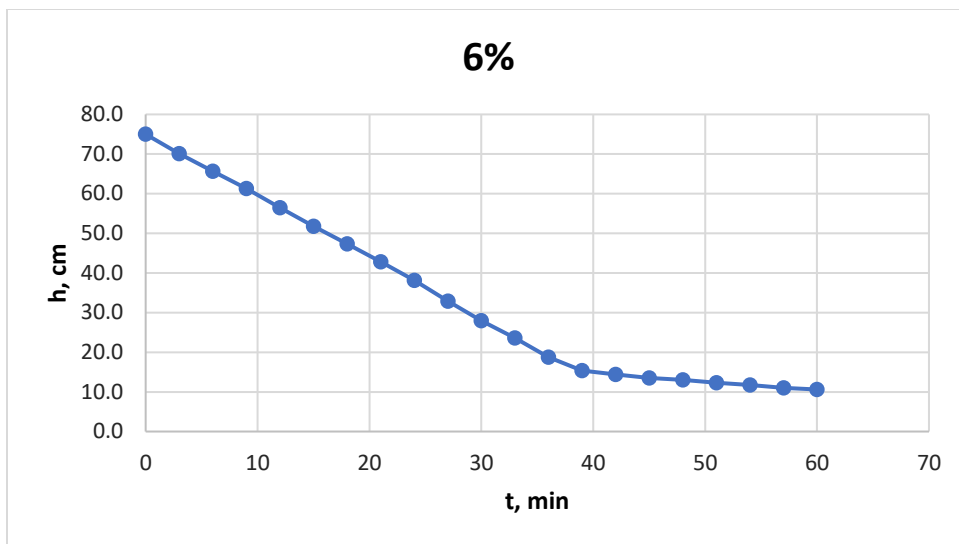
Što je veća koncentracija, proces sedimentacije odvija se sporije.



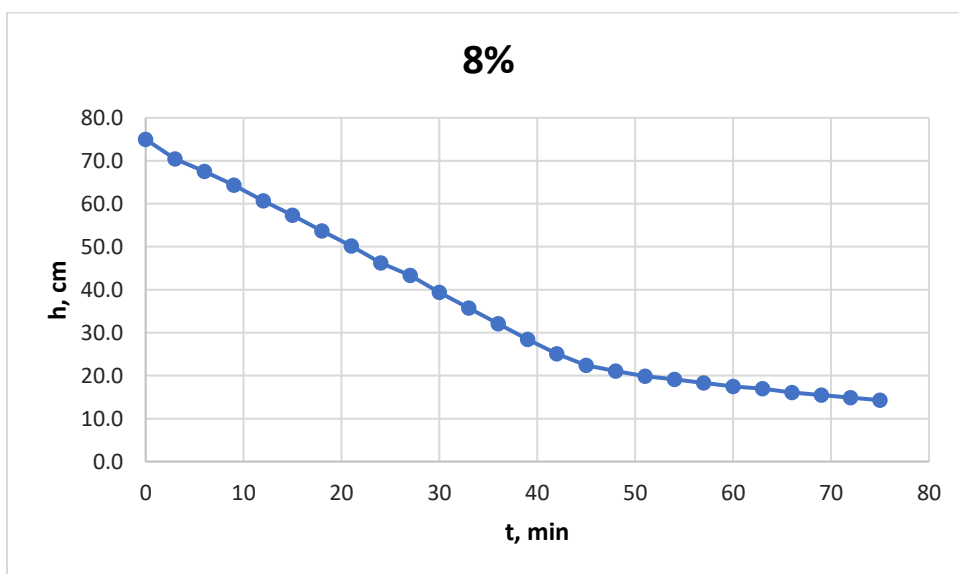
Slika 21. Sedimentacijska krivulja 2%-tne suspenzije



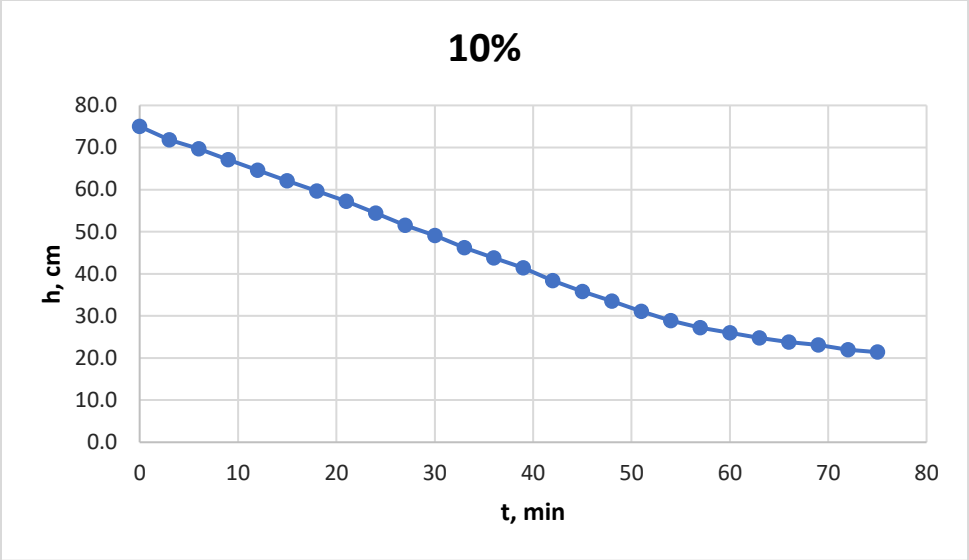
Slika 22. Sedimentacijska krivulja 4%-tne suspenzije



Slika 23. Sedimentacijska krivulja 6%-tne suspenzije



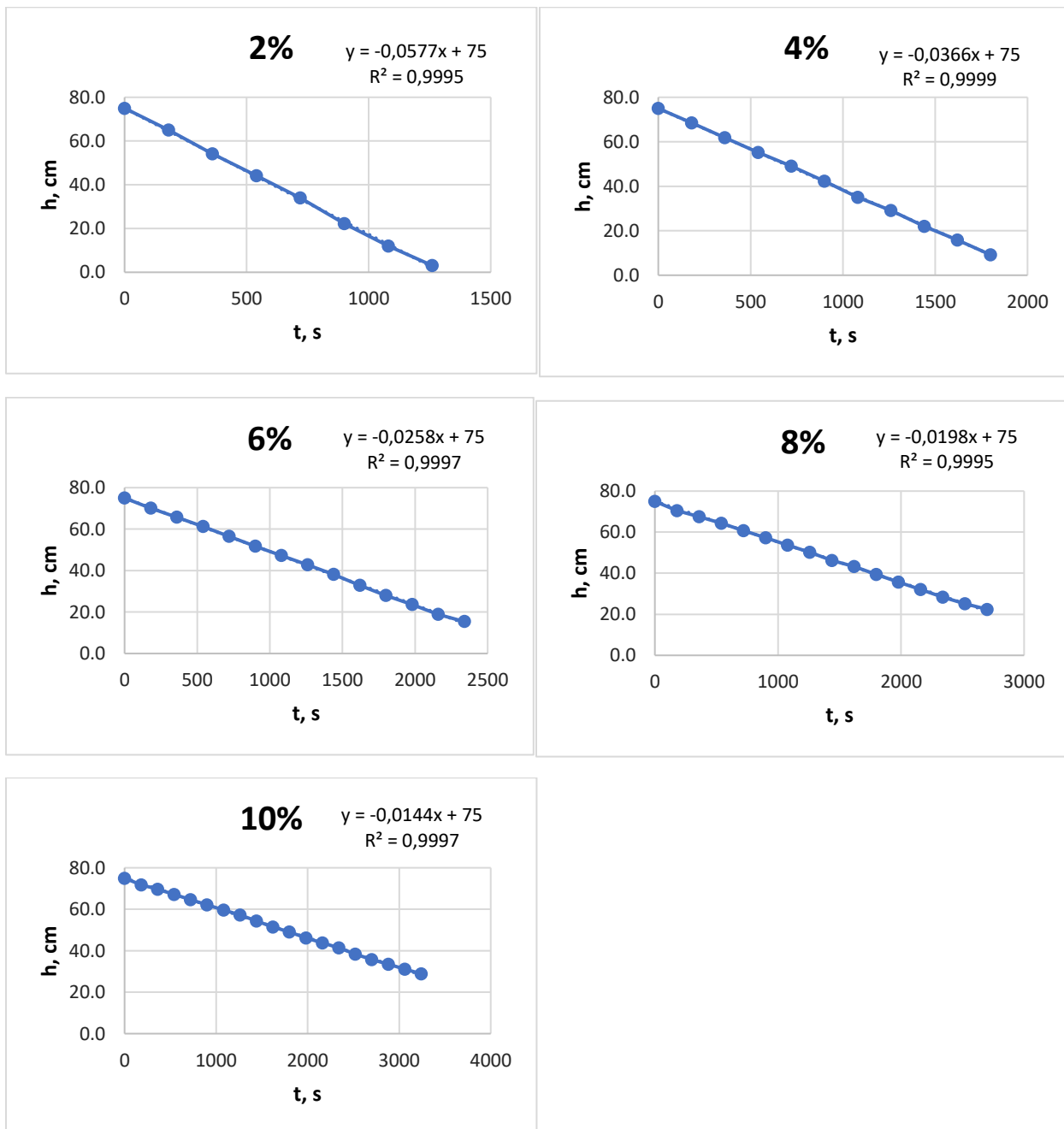
Slika 24. Sedimentacijska krivulja 8%-tne suspenzije



Slika 25. Sedimentacijska krivulja 10%-tne suspenzije

## 8 RASPRAVA

Pomoću nagiba krivulja iz perioda konstantne brzine taloženja čestica izračunata je konačna brzina taloženja čestica:



Slika 26. Konstantna brzina taloženja čestica

Kao što je već rečeno brzina taloženja može se izračunati iz linearnog dijela krivulje pomoću:

$$v = \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

Tablica 3. Brzine taloženja pojedinih suspenzija

Maseni udio, %	Brzina taloženja, m/s
2	0,000577
4	0,000366
6	0,000258
8	0,000198
10	0,000144

Kad bismo dalje kontinuirano pratili, mogli bismo primijetiti da se dodirna površina bistra voda-koncentrirani mulj snižava kroz vrijeme (mnogo manjim brzinama nego dodirna površina bistra voda-suspenzija iz prvog dijela vježbe) i nakon dugo vremena dodirna površina bistra voda-koncentrirani mulj stabilizira se na određenoj visini koja se više ne mijenja.

Preoblikovanjem formule (20) dobivamo izraz prema Coe i Clevengeru pomoću kojeg možemo izračunati površinu taložnika:

$$\frac{A}{\dot{M}_0} = \frac{1}{v_s} \left( \frac{1}{c_s} - \frac{1}{c_{s,2}} \right) \rightarrow A = \frac{\dot{M}_0}{v_s} \left( \frac{1}{c_s} - \frac{1}{c_{s,2}} \right) \quad (21)$$

Uz pretpostavljene vrijednosti masenog protoka suspenzije:  $\dot{M}_0 = 1 \text{ kg/s}$  i koncentracije ugušćenog mulja od  $c_{s,2} = 400,0 \text{ kg/m}^3$ , izračunate su potrebne površine sedimentacijskih bazena i one iznose:

Tablica 4. Površine sedimentacijskih bazena

Koncentracija, $\text{kg/m}^3$	Površina, $\text{m}^2$
20,0	82,32
40,0	61,48
60,0	54,91
80,0	50,51
100,0	52,08

Budući da taložnik koji želimo mora za sve zadane koncentracije ugustiti mulj do željene vrijednosti, potrebno je nabaviti sedimentacijski bazen najveće izračunate površine, što je u ovom slučaju  $82,32 \text{ m}^2$ .

## 9 ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je primijeniti teoriju sedimentacije na tretiranje otpadnih voda. Rad pokriva područja od cjelokupnog procesa obrade otpadnih voda, preko detaljno objašnjene teorije sedimentacije te njene primjene kod idealnih i realnih sedimentacijskih bazena, pa do provođenja eksperimenta i dimenzioniranja taložnika.

Istraživanje sedimentacije različitih vodenih suspenzija čvrstih čestica u stacionarnoj koloni važno je za eksperimentalno određivanje parametara potrebnih za dizajn sedimentacijskih bazena.

Proveden je šaržni sedimentacijski test na suspenzijama praha kalcijevog karbonata u vodi masenog udjela 2, 4, 6, 8 i 10%. Eksperimentom je potvrđena pretpostavka da će koncentriranija suspenzija taložiti sporije.

Iz nagiba krivulje kod konstantne brzine taloženja izračunata je brzina taloženja za ispitivane koncentracije. Pomoću tih informacija i za zadane uvjete protoka ( $\dot{M}_0 = 1 \text{ kg/s}$ ) i željene konačne koncentracije ugušćenog mulja ( $c_{s,2} = 400,0 \text{ kg/m}^3$ ) izračunato je da je potrebna površina taložnika  $82,32 \text{ m}^2$ .



## 10 POPIS SIMBOLA

$A$  – površina sedimentiranja, poprečni presjek taložnika,  $m^2$

$A_{\xi}$  - projicirana površina čestice,  $m^2$

$C_D$  – faktor otpora

$c_s$  - masena koncentracija čvrstih čestica,  $kg/m^3$

$c_{s,2}$  - masena koncentracija guste suspenzije u odtoku,  $kg/m^3$

$d$  – promjer čestice,  $m$

$d_0$  – promjer najmanje čestice,  $m$

$e$  – prazan prostor u suspenziji

$F_f$  – sila trenja,  $N$

$F_g$  – gravitacijska sila,  $N$

$F_l$  – sila uzgona,  $N$

$g$  – ubrzanje sile teže,  $m/s^2$

$h_0$  – visina sedimentacijskog bazena,  $m$

$He$  – dubina na koju je istaložila čestica,  $m$

$K''$  - konstanta

$k''$  - konstanta za dani oblik čestica

$K_{\varphi}$  - faktor smetanog sedimentiranja

$K_{\psi}$  - dinamički faktor oblika

$L$  – dužina sedimentacijskog bazena,  $m$

$m$  – masa čestice,  $kg$

$\dot{M}_0$  – protok čvrstih čestica,  $kg/s$

$Q$  – protok suspenzije,  $m^3/d$

$Re$  – Reynoldsov broj

$S$  – fluks čvrstih čestica,  $kg/(s \cdot m^2)$

$t$  – vrijeme,  $s$

$v$  – brzina taloženja čestice,  $m/s$

$v_s$  – relativna brzina čvrstih čestica u odnosu na fluid,  $m/s$

$v_{ss}$  – brzina smetanog sedimentiranja čestica nepravilnog oblika,  $m/s$

$v_{tr}$  – brzina otjecanja guste suspenzije,  $m/s$

$v_0$  – najveća brzina taloženja čestica,  $m/s$

$V_{\xi}$  - volumen čestice,  $m^3$

$\dot{V}_1$  - volumni protok bistre tekućine,  $m^3/s$

$\dot{V}_2$  – volumni protok ugušćenog mulja,  $m^3/s$

$\rho_c$  - gustoća suspenzije,  $kg/m^3$

$\rho_{\xi}$  – gustoća čestice,  $kg/m^3$

$\rho_f$  - gustoća fluida,  $kg/m^3$

$\mu$  - dinamička viskoznost,  $Pa \cdot s$

$\mu_c$  - viskoznost suspenzije,  $Pa \cdot s$

$\frac{Q}{A}$  - površinsko opterećenje taložnika,  $\frac{m^3}{m^2 \cdot d}$

## 11 LITERATURA

- (1) Tušar B. (2009) Pročišćavanje otpadnih voda. Zagreb: Kigen d.o.o.
- (2) Briški, F. (2013) Zaštita okoliša: Interna skripta za studente preddiplomskih studija Ekoinženjerstvo i Kemijsko inženjerstvo, Zagreb: Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, str. 77-81
- (3) Zabava et al. (2016) Experimental study of the sedimentation of solid particles in wastewater, Craiova: Annals of the University of Craiova - Agriculture, Montanology, Cadastre Series
- (4) Tušar B. (2007) Uređaji za pročišćavanje otpadne vode, Hrvatska vodoprivreda 184, str. 64
- (5) Dobra voda za vse (2015) URL: [http://www.svetijurajabregu.hr/wordpress/wp-content/uploads/2016/10/2015\\_05\\_OP-Dobra-voda-za-vse-1.pdf](http://www.svetijurajabregu.hr/wordpress/wp-content/uploads/2016/10/2015_05_OP-Dobra-voda-za-vse-1.pdf) [pristup: 1.9. 2020.]
- (6) McGauhey P. H. (1956) Theory of Sedimentation. Denver: American Water Works Association str. 437-448.
- (7) van Loosdrecht et al. (2016) Eksperimentalne metode u obradi otpadnih voda. Zagreb: Synopsis d.o.o., str. 236-246.
- (8) Carlsson B. (1996) An introduction to sedimentation theory in wastewater treatment. Uppsala: Uppsala University
- (9) Aslam M. T. (2013) Settling of solids in raw wastewater – primary settling tanks and storm water tanks. Graz: TU Graz str. 17-23
- (10) Elementary Engineering (2018) Sedimentation Analysis – Stokes Law [YouTube video, 31. Kolovoz] URL: <https://www.youtube.com/watch?v=U6qnDuZ0xn0> [pristup: 25. 8. 2020.]
- (11) Robinson C. D. (1926) Some factors influencing sedimentation. Industrial & Engineering Chemistry, 18(8), str. 869-871
- (12) Steinour, H. H. (1944) Rate of Sedimentation. Industrial & Engineering Chemistry, 36(9), str. 840–847
- (13) Fair, Gordon M. & Geyer, John. Water Supply and Waste Water Disposal. John Wiley and Sons, New York (1954)
- (14) Hraste, M. (2003) Mehaničko procesno inženjerstvo – II. Izmijenjeno i dopunjeno izdanje. Zagreb: Hinus, str. 37-42