

Tretiranje otpadnih voda taloženjem

Petrić, Ivana

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:873538>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-27**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Ivana Petrić

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Ivana Petrić

TRETIRANJE OTPADNIH VODA TALOŽENJEM

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. Andrej Vidak

Zagreb, rujan 2021.

Zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Vladimiru Dananiću na savjetima i pomoći prilikom izrade završnog rada.

Također zahvaljujem prof. dr. sc. Gordani Matijašić na stručnim savjetima i omogućavanju izrade eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem i Željku Pavlinu na pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela rada na Zavodu za mehaničko i toplinsko inženjerstvo.

Veliko hvala mojim roditeljima na podršci prilikom mog dosadašnjeg studiranja.

SAŽETAK

U ovom je radu prikazana teorija taloženja koja se primijenjuje u procesu obrade otpadnih voda. Otpadne su vode različitog porijekla i sastava, obzirom na podrijetlo, pa u skladu s time prolaze četiri stupnja pročišćavanja vode – primarni, sekundarni, tercijarni i napredni. Talozenje otpadnih voda dio je prvoga stupnja obrade vode te se njime uklanjaju krute čestice. Općenito govoreći, talozenje je proces u kojem čestice suspenzije padaju na dno uslijed sile gravitacije ili centrifugalne sile. Spremnik u kojem se odvija talozenje djelovanjem sile gravitacije naziva se taložnik.

Ispravno dimenzioniranje taložnika preduvjet je za djelotvorno odvajanje. Najvažniji korak dimenzioniranja je utvrđivanje površine taložnika. Razvijene su različite metode obrade eksperimentalnih podataka, poput Coe-Clevengerove, Kynchove i Talmage-Fitchove, koje se mogu primijeniti za dimenzioniranje taložnika.

Eksperimentalno je proveden šaržni test taloženja, a potom je Talmage-Fitchovom metodom proveden postupak proračuna potrebne površine taložnika.

Ključne riječi: otpadna voda, talozenje, taložnik, test taloženja

SUMMARY

In this paper, the theory of sedimentation is applied to the process of wastewater treatment. The composition of wastewater varies depending on its origin and undergoes four stages of water purification accordingly – primary, secondary, tertiary and advanced stage. Wastewater sedimentation is a part of primary water treatment and it removes sedimentary solid particles. Generally speaking, precipitation is a process in which suspension particles recede to the bottom due to the force of gravity or centrifugal force. The tank in which precipitation takes place is called a precipitator.

In order to have an effective separation, proper sizing of the precipitator is required. The most important dimensioning step is to determine the surface of the precipitator. Various experimental data processing methods have been developed, such as Coe-Clevenger, Kynch, and Talmage-Fitch, which can be applied to precipitator sizing.

A batch settling test was experimentally conducted, and then the required precipitator area was calculated using the Talmage-Fitch method.

Key words: wastewater, settling, sedimentation tank, settling test

SADRŽAJ

1. UVOD	7
2. OPĆI DIO	7
2.1. Značajke i sastav otpadnih voda	7
2.1.1. Podvrste otpadnih voda	7
2.1.2. Sastav otpadnih voda	8
2.1.3. Pokazatelji kakvoće otpadnih voda	9
2.2. Obrada otpadnih voda	10
2.3. Teorija taloženja	12
2.3.1. Brzina taloženja	12
2.3.2. Režimi taloženja	13
2.3.3. Diskretno taloženje	14
2.3.4. Zonsko taloženje	17
2.4. Primjena metode taloženja u obradi otpadne vode	18
2.4.1. Test taloženja	19
2.4.2. Dizajn taložnika	20
2.4.2.1. Kynchova metoda	21
2.4.2.2. Talmage-Fitchova metoda	22
2.4.3. Taložnici	23
3. EKSPERIMENTALNI DIO	25
3.1. Aparatura i materijal	25
3.2. Uvjeti proračuna	25
4. REZULTATI I RASPRAVA	27
5. ZAKLJUČAK	32
6. SIMBOLI	33
7. LITERATURA	35

1. UVOD

Voda je bezbojna kapljevina bez mirisa i okusa koja je ujedno jedan od glavnih prirodnih resursa. Njena je primjena vrlo široka, od služenja za svakodnevne higijenske potrebe u kućanstvu do korištenja kao otapala u kemijskoj industriji. Također se koristi u uslužnim djelatnostima, agrokulturi i zdravstvenim ustanovama.

Kada se voda iskoristi za određenu svrhu, ona postaje otpadna. Oborinske vode isto tako ispiranjem površina, poput prometnica, postaju otpadne. Budući da se voda koristi svakodnevno u velikim količinama, jedan se dio takve iskorištene vode naposljetku ispušta u okoliš. Otpadna voda sadrži mnoge anorganske i organske tvari koje stvaraju potencijalnu opasnost za okoliš, a time i za zdravlje ljudi i ostalih živih bića.

Kako bi se mogla ponovno rabiti za iste ili druge svrhe, otpadna se voda tretira u postrojenjima za pročišćivanje voda u kojima prolazi i nekoliko stupnjeva obrade. U prvom se stupnju, između ostalog, primjenjuje taloženje, kojim se uklanjaju čvrste čestice iz vode uslijed djelovanja gravitacije. Gravitacijsko taloženje spada u najraširenije procese u tehnologiji obrade otpadne vode, zahvaljujući jednostavnoj izvedbi. Stoga je pravilno postupanje s otpadnom vodom u procesu obrade, uključujući taloženje, ključno za zaštitu okoliša i koncept održivog razvoja.

2. OPĆI DIO

2.1. Značajke i sastav otpadnih voda

2.1.1. Podvrste otpadnih voda

Otpadne se vode razlikuju po sastavu od uzorka do uzorka te ovisno o svojoj podvrsti. Tako se prema Tušar^[1] otpadne vode dijele na:

- sanitarne
- industrijske
- oborinske
- procjedne.

Pod sanitarne otpadne vode spadaju svakodnevno korištene vode iz kućanstva, uslužnih djelatnosti i ostalih mjesta na kojima voda služi za zadovoljavanje osnovnih životnih potreba. Ovakva je voda bogata organskom tvari što ju čini biorazgradivom. Razni se mikroorganizmi hrane biorazgradivom tvari iz voda, trošeći pri tome kisik. Ovisno o količini potrošenog kisika za razgradnju tvari, mijenja se biokemijska potrošnja kisika (BPK). Kao praktičniji pokazatelj, uobičajeno se koristi BPK₅, odnosno petodnevna biološka potreba kisika pri 20 °C, izraženo u mg O₂ L⁻¹.

Kako industrijski tehnološki procesi međusobno variraju, tako se i sastav otpadnih voda međusobno razlikuje ovisno o pogonu iz kojega potječu. Načelno postoje dvije osnovne skupine industrijskih voda:

- **biološki razgradive** (kompatibilne vode) koje se mogu zajedno odvoditi u kanalizaciju s komunalnim otpadnim vodama
- **biološki nerazgradive** (inkompatibilne vode) koje se ne mogu miješati s komunalnom otpadnom vodom ili se neposredno prije njihovog miješanja moraju podvrgnuti prethodnom postupku pročišćavanja.

U praktičnom se svijetu ova podvrsta otpadnih voda dijeli na onečišćene i uvjetno čiste vode. Uvjetno čiste vode podrazumijevaju vode koje se mogu priključiti gradskoj otpadnoj vodi bez prethodne obrade. To ujedno znači da za razliku od inkompatibilnih voda, uvjetno čiste vode ne sadrže:

- toksične i postojane tvari koje se gomilaju u živim organizmima te sprječavaju daljnju biološku razgradnju
- eksplozivne, korozivne, zapaljive i ostale tvari koje potencijalno uzrokuju štetu na kanalizacijskim objektima
- inhibitore koji onemogućavaju pročišćavanje otpadnih voda.

Pod oborinske otpadne vode spadaju vode koje na svom putu do obližnjeg prijemnika, odnosno kanalizacije, ispiru površinu zemlje te posljedično nose različite tvari koje se također ispuštaju u okoliš. Primjerice, kiše koje ispiru nečistoće s prometnica sa sobom nose izliveno motorno gorivo. U ovu skupinu voda također spadaju i vode nastale topljenjem snijega koje isto tako sadrže brojne onečišćujuće tvari.

Konačno, procjedne otpadne vode razlikuju se od prethodnih podvrsta po tome što su to podzemne, čiste vode. Filtrirane su prolaskom kroz slojeve tla. Njihova se odvodnja rješava posebnim kanalizacijskim sustavom, odnosno drenažom. Većina procjedne vode završava u drenaži procijeđivanjem s objekata koji su na padini brda ili u dubokim podrumima.

2.1.2. Sastav otpadnih voda

Otpadne vode mogu biti raznog podrijetla pa se shodno tome njihov sastav razlikuje. Mogu sadržavati različite anorganske i organske spojeve. Od anorganskih su spojeva prisutne kiseline, lužine, soli, metali, pijesak i ostale anorganske suspendirane čestice. S druge strane, organski se spojevi najčešće dijele na organske dušikove spojeve, u koje se ubrajaju urea, proteini, amini i aminokiseline, te na organske nedušikove spojeve, kao što su ugljikohidrati, masti i sapuni. U tablici 1 prikazane su vrste onečišćenja s obzirom na podrijetlo otpadnih voda.

Tablica 1. Podrijetlo različitih vrsta onečišćenja ^[2]

Podrijetlo	Vrste onečišćenja
kućanstvo	masti, proteini, ugljikohidrati, suspendirane tvari
šećerana	ugljikohidrati, suspendirane tvari
destilerija	ugljikohidrati, proteini, suspendirane tvari
tvornica celuloze	ugljikohidrati, lignin, sulfati, suspendirane tvari
tekstilna industrija	bojila
proizvodnja guma	organske tvari, aditivi
proizvodnja škroba	ugljikohidrati, proteini

2.1.3. Pokazatelji kakvoće otpadnih voda

Mnogi pogoni za obradu otpadnih voda sadrže laboratorij u kojem se svakodnevno ispituje kakvoća i kvaliteta otpadne vode na ulazu i izlazu iz procesa obrade. Osim ukupnog opterećenja otpadne vode raznim onečišćenjima, također se analiziraju i fizikalni, kemijski te mikrobiološki pokazatelji.

Od fizikalnih pokazatelja onečišćenja, najvažniji je sadržaj čvrstih tvari u vodi, a to uključuje: ukupne, taložive, suspendirane i raspršene tvari. Prema definiciji, ukupna čvrsta tvar u uzorku vode je ostatak nakon isparavanja i sušenja uzorka pri 105 °C. ^[2] Od ostalih fizikalnih pokazatelja ključni su pH, temperatura, miris, boja i mutnoća. Temperatura je od velikog značaja zbog svog utjecaja na brzinu kemijske reakcije i razgradnje te na brojnost i prisutnost vodne flore i faune.

Glede kemijskih pokazatelja, bitni su sadržaj organskih tvari (proteini, ugljikohidrati, masti i ulja), koncentracija anorganskih tvari (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , teški metali) te otopljeni plinovi (O_2 , CO_2 , H_2S , CH_4) u otpadnoj vodi. Što se tiče organskih tvari, važno je uzeti u obzir ukupni organski ugljik (UOU). Sadržaj organskih tvari određuje se kemijskom analizom, ispitivanjem već ranije navedenog BPK-a i KPK-a (kemijske potrošnje kisika). Ova su dva pokazatelja od iznimne važnosti jer ukazuju na ukupno organsko opterećenje otpadne vode. ^[2]

U tablici 2 dani su pokazatelji sastava komunalnih otpadnih voda.

Tablica 2. Pokazatelji sastava komunalnih otpadnih voda ^[1]

POKAZATELJ		KONCENTRACIJA, mgL ⁻¹	
		RASPON	UOBIČAJENA VRIJEDNOST
FIZIKALNI			
KRUTINE	ukupne	300 – 1200	700
	taložive	50 – 200	100
	suspendirane	100 – 500	220
	raspršene	250 – 850	500
KEMIJSKI			
ORGANSKE TVARI	BPK5	100 – 400	250
	KPK	200 – 1000	500
	UOU	100 – 400	250
DUŠIK	ukupni (N)	15 – 90	40
	organski	5 – 40	25
	amonijak	10 – 50	25
	nitriti		
	nitрати		
FOSFOR	ukupni (P)	5 – 20	12
	organski	1 – 5	2
	anorganski	5 – 15	10
pH		7 – 7,5	7,0
KALCIJ		30 – 50	40
KLORIDI		30 – 85	50
SULFATI		20 – 60	15

2.2. Obrada otpadnih voda

Metode obrade otpadnih voda, u kojima dominira primjena sile, nose naziv jedinične operacije, dok se metode u kojima se uklanjaju onečišćujuće tvari pomoću kemijskih i bioloških reakcija nazivaju jedinični procesi. ^[3] Jedinične operacije i procesi zajedno tvore tretman otpadnih voda koji se dijeli na: prethodni, prvi, drugi, treći i napredni stupanj pročišćavanja. U tablici 3 sažeti su procesi unutar pojedinog stupnja pročišćavanja uz pripadajuća glavna onečišćenja.

Tablica 3. Klasifikacija procesa obrade otpadne vode ^[2]

Stupanj obrade	Svrha	Procesi obrade	Glavna onečišćenja	Klasifikacija prema mehanizmu
PRETHODNI	- zaštita sljedećih procesa	- odvajanje pomoću rešetki, u pjeskolovu ili mastolovu	- drvo, kamenje, papir, šljunak	- fizikalni
PRVI (primarni)	- ispuštanje u neosjetljiv prijemnik - priprema za drugi stupanj	- taloženje u primarnom taložniku - taloženje uz flokulante	- suspendirane tvari - teški metali, fosfor, biorazgradive organske tvari	- fizikalni - fizikalno-kemijski
DRUGI (sekundarni)	- obrada za ispuštanje u većinu prijemnika	- aerobna obrada aktivnim muljem, biološka filtracija, anaerobna obrada - koagulacija i flokulacija	- organska tvar - organska tvar, dušik i fosfor	- biološki - fizikalno-kemijski
TREĆI (tercijarni)	- ispuštanje u „osjetljiv“ prijemnik	- filtracija - dezinfekcija (Cl ₂ , O ₃)	- suspendirane tvari - patogeni mikroorganizmi	- fizikalni -kemijski
NAPREDNI	- zahtjev za visokom kakvoćom izlaznog toka	- ionska izmjena, membranska filtracija, adsorpcija - fotooksidacija	- dušik, metali, anorganske tvari - postojani organski spojevi	- fizikalni - kemijski

S obzirom na temu ovog završnog rada, potrebno je staviti taloženje u kontekst stupnja obrade. Talozenje, bilo ono u primarnom taložniku ili uz flokulante, spada u prvi stupanj obrade otpadnih voda, gdje se uklanjaju suspendirane tvari, teški metali, fosfor te biorazgradive organske tvari.

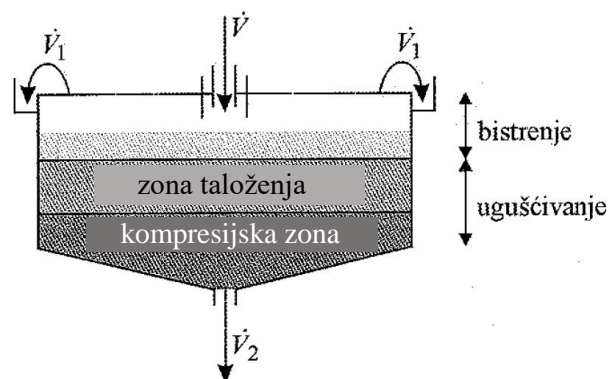
Cilj je primarne obrade uklanjanje taloživih organskih i anorganskih krutina taloženjem te plutajućih materijala flotacijom. Tijekom prvog stupnja obrade, uklanja se 50 do 70 % ukupne suspendirane krutine te 65 % ulja i masti, dok se vrijednost ulazne biokemijske potrošnje kisika nakon pet dana (BPK₅) smanji za približno 25 do 50 %. Neki se organski dušik, organski fosfor i teški metali povezani s krutim tvarima također uklanjaju tijekom primarnog taloženja, ali to ne utječe na koloidne i otopljene tvari. Efluent iz primarnih taložnih jedinica, koji izlazi u toku za daljnu obradu vode, naziva se primarnim efluentom. U mnogim industrijskim zemljama primarno je pročišćavanje minimalna razina obrade otpadnih voda prije ponovne upotrebe. Ta se razina može smatrati dovoljnom u obradi ako se obrađene

otpadne vode upotrebljavaju za navodnjavanje usjeva koje ljudi ne konzumiraju ili za navodnjavanje voćnjaka, vinograda i nekih prerađenih prehrambenih usjeva. Međutim, kako bi se spriječile nepodesni uvjeti u spremnicima vode ili rezervoarima za izjednačavanje protoka, u tim je zemljama obično potreban neki oblik sekundarne obrade, čak i u slučaju navodnjavanja neprehrambenih usjeva. Upotreba dijela primarno obrađene vode za navodnjavanje moguća je u slučaju predviđenog izvanmrežnog skladištenja. ^[4]

2.3. Teorija taloženja

Taloženje je odvajanje čvrstih čestica od kapljevine uzrokovano različitim gustoćama. Ono može biti gravitacijsko, kada se čestice talože uslijed gravitacije, ili centrifugalno, potaknuto centrifugalnom silom.

Prilikom gravitacijskog taloženja dolazi do visokog stupnja izbistrenja u pretoku taložnika i efekta zgušnjavanja u odtoku. Tipičan uređaj za provedbu taloženja je kružni taložnik shematski prikazan na slici 1. Kada započne taloženje, pri vrhu uređaja nastaje bistra zona, a koncentracija suspenzije raste prema dnu taložnika. Pri dnu taložnika je koncentracija najveća te se odvodi ugušćena suspenzija. Dotočna suspenzija uvodi centralno te se posljedično zbog veće gustoće od izbistrene tekućine, potapa do gornje granice zone taloženja. Zatim se dijeli na struje koje se radialno šire po presjeku taložnika. ^[5]



Slika 1. Shematski prikaz karakterističnih zona u kružnom taložniku ^[5]

2.3.1. Brzina taloženja

Opis gravitacijskog taloženja zahtjeva primjenu osnovnih zakonitosti optjecanja, tj. gibanja čestica u fluidu. ^[6] Na brzinu taloženja utječu:

- priroda samih čestica
- koncentracija suspenzije
- intenzitet flokuliranosti
- geometrija taložnika.

Općenito govoreći, veće se čestice brže talože, upravo zbog svoje veće mase koja povećava njihovu gravitacijsku silu. Sferične se čestice, na primjer, talože brže od nesferičnih zbog pružanja manjeg otpora gibanju. Taložna svojstva čestice također mogu poboljšati dodavanjem flokulanata, koji potiču stvaranje nakupina čestica (flokula) koje se tada brže talože.

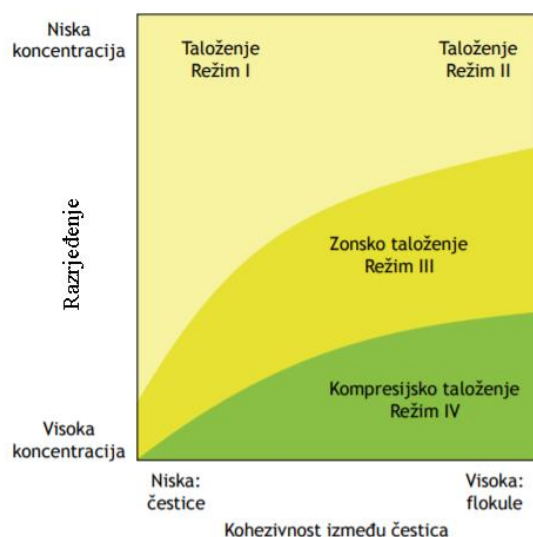
Kad je riječ o geometriji taložnika potrebno je uzeti u obzir njegov promjer. Stijenke u taložnicima manjih promjera mogu ometati taloženje čestica i utjecati na njihovu brzinu taloženja. Utjecaj stijenke može se zanemariti u slučaju kada je promjer taložnika barem sto puta veći od srednjeg promjera čestica.

2.3.2. Režimi taloženja

Ovisno o veličini čestica koje se talože, koncentraciji suspenzije i intenzitetu flokuliranja, postoje četiri režima taloženja. Prema van Loosdrecht ^[7], razlikuju se:

- diskretno taloženje bez flokulacije (režim I)
- diskretno taloženje s flokulacijom (režim II)
- zonsko taloženje ili ometano taloženje (režim III)
- kompresijsko taloženje (režim IV).

Područja ovih četiriju režima obzirom na razrjeđenje i kohezivnost između čestica prikazana su na slici 2.



Slika 2. Režimi taloženja ^[7]

Suspenzije niskih koncentracija, kao one u I. i II. režimu, sadrže čestice koje su u potpunosti raspršene, što znači da među njima nema fizičkog kontakta. Suspenzije su uglavnom previše razrijeđene da bi došlo do međusobnog utjecaja jedne čestice na drugu. Ukoliko je kohezivnost među česticama mala, što znači da ne pokazuju svojstva flokulacije, one se nalaze u režimu diskretnog taloženja bez flokulacije (režim I). Primjer takve suspenzije je granulirani mulj. No, ako je riječ o npr. uzorku otpadne vode s flokulama aktivnog mulja, odnosno suspenziji s prirodnom sklonošću flokulaciji čak i pri niskim koncentracijama, tada se s vremenom stvaraju veće flokule koje utječu na brzinu taloženja. Takav režim naziva se diskretno taloženje s flokulacijom (režim II). I. i II. režim razlikuju se po tome što se kod diskretnog taloženja s flokulacijom javlja dodatni proces flokulacije koji utječe na svojstva čestica, a time i na njihovu krajnju brzinu taloženja, dok kod klase I na krajnju brzinu taloženja utječu samo svojstva čestice kao što su oblik, veličina, poroznost i gustoća.

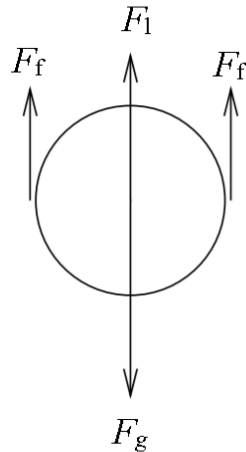
Ukoliko koncentracija krutina u taložniku prijeđe graničnu koncentraciju pri kojoj se čestice ne talože više neovisno jedna o drugoj, diskretno taloženje postaje ometano (režim III). Iznos granične koncentracije ovisi o stupnju flokuliranosti. Iznad te granične koncentracije, čestice se međusobno ometaju te su sile među njima dovoljno jake da povuku svaku česticu istom brzinom. Dakle, sve se čestice talože zajedno kao zona, što ujedno i objašnjava drugi naziv ovog režima taloženja – zonsko taloženje. U III. režimu formira se jasna granična površina između bistre zone i čestica koje se talože.

Kada se koncentracija dodatno poveća, taloženje postaje kompresijsko (režim IV), gdje također granična koncentracija ovisi o stupnju flokuliranosti. U IV. režimu čestice dolaze u međusobni fizički kontakt, a zbog težine gornjih čestica dolazi do sabijanja sloja. Brzina taloženja puno je niža nego u režimu III, tj. zonskom taloženju. ^[7] Koncentracija suspenzije je u kompresijskoj zoni najveća, a međučestična kohezivnosti najizraženija.

2.3.3. Diskretno taloženje

Diskretno ili partikulativno taloženje karakteristično je po tome da se tijekom procesa taloženja ne pojavljuje granična ploha između suspenzije i bistre kapljevine. Ta je vrsta taloženja prisutna u zoni bistenja (slika 1) ^[5], a zastupljena kod suspenzija manjih koncentracija čvrstih tvari i manjeg intenziteta flokuliranosti (slika 2). ^[6]

Kod razmatranja taloženja diskretne, neflokulirane čestice, u obzir se uzimaju Newtonov i Stokesov zakon. ^[8]



Slika 3. Sile koje djeluju na diskretnu česticu, gdje je F_g gravitacijska sila, F_l je sila uzgona, a F_f je sila trenja između čestice i kapljevine. ^[8]

Kako je prikazano na slici 3, na diskretnu česticu tijekom taloženja djeluju tri vrste sila – gravitacijska te sile uzgona i trenja. Potaknuta težinom čestice, gravitacijska ju sila vuče dolje, dok ju sila uzgona i sile trenja vuku u suprotnom smjeru, prema gore.

Prema Newtonovu zakonu vrijedi:

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

gdje su m i v oznake za masu i brzinu čestice.

Gravitacijska sila F_g dana je izrazom:

$$F_g = mg = \rho_p V_p g \quad (2)$$

gdje su ρ_p i V_p oznake za gustoću i volumen čestice, a g je gravitacijsko ubrzanje.

Sila uzgona dana je izrazom:

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

gdje je ρ_f gustoća fluida.

Sila trenja tj. sila otpora ovisi o brzini čestice, gustoći fluida, projiciranoj površini i faktoru otpora:

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

gdje su C_D faktor otpora, a A_p projicirana površina okomita na brzinu čestice.

Uvrštavanjem jednadžbi (2), (3) i (4) u izraz (1), dobiva se:

$$m \frac{dv}{dt} = g(\rho_p - \rho_f)V_p - \frac{C_D A_p \rho_f v^2}{2} \quad (5)$$

U slučaju stacionarnog stanja kada nema promjene brzine u vremenu ($\frac{dv}{dt} = 0$) dobije se izraz za brzinu diskretnog taloženja čestice:

$$v = \sqrt{\frac{2g(\rho_p - \rho_f)V_p}{C_D A_p \rho_f}} \quad (6)$$

Za sferičnu česticu promjera d , volumen i projicirana površina iznose:

$$V_p = \frac{\pi d^3}{6} \quad (7)$$

$$A_p = \frac{\pi d^2}{4} \quad (8)$$

Kad se izrazi (7) i (8) uvrste u izraz (6) slijedi jednadžba kojom se može izračunati brzina taloženja sferičnih čestica prema Newtonovu zakonu:

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

Kada je riječ o laminarnom toku, faktor otpora iznosi:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (10)$$

gdje je Re Reynoldsov broj koji je definiran izrazom:

$$Re = \frac{vd\rho_f}{\mu} \quad (11)$$

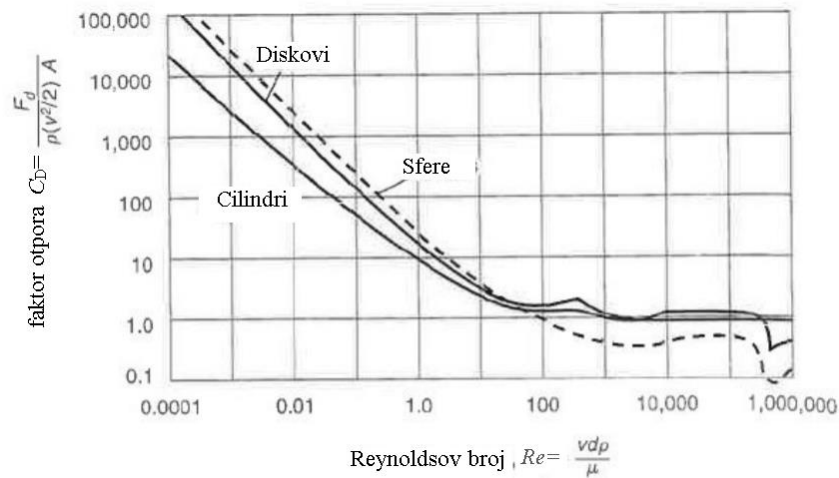
pri čemu je uvedena dinamička viskoznost fluida, μ .

Kada se izrazi (10) i (11) uvrste u izraz (9), dobije se Stokesov zakon:

$$v = \frac{g(\rho_p - \rho_f)d^2}{18\mu} \quad (12)$$

Ovako formuliran Stokesov zakon omogućuje izračun brzine taloženja sferične čestice u laminarnim uvjetima. U slučaju da se radi o prijelaznom ili turbulentnom taloženju, primjenjuje se Newtonov zakon (jednadžba 9). Vrijednost faktora otpora (C_D) tada se iščitava iz indikatorskog dijagrama (slika 4). Vidljivo je iz slike da je u laminarnom režimu ($Re < 1$)

ovisnost faktora otpora o Reynoldsovom broju linearna, što objašnjava jednadžbu (10). Prijelazno je područje ono u kojem Re poprima iznos od 1 do 2000, a turbulentno je strujanje u slučaju $Re > 2000$.^[9]



Slika 4. Faktor otpora u funkciji Reynoldsova broja^[9]

2.3.4. Zonsko taloženje

Taloženje u zoni odvija se u suspenzijama velikih koncentracija u kojima su čestice toliko koncentrirane da međučestične sile ometaju taloženje okolnih čestica. To rezultira jednoličnim taloženjem svih čestica. Taloženje čestica istiskuje kapljevину koja struji prema gore kroz otvore između čestica. Kao rezultat, čestice se nastoje skupno taložiti pri čemu održavaju istu relativnu brzinu. To je poznato kao otežano taloženje koje je očekivano pri dnu taložnika.^[10]

Kada se skup čvrstih čestica taloži u mirujućoj kapljevini, određeni otpori smanjuju brzinu taloženja. Otpor se povećava kao rezultat blizine čestica unutar zone i uzlazni tok kapljevine koju istiskuju taložeće čestice. Prema Richardsonu i Zakiju, učinci ometanja snažno ovise o poroznosti ε . Sljedeći izraz daje jednostavan odnos između poroznosti i brzine taloženja:

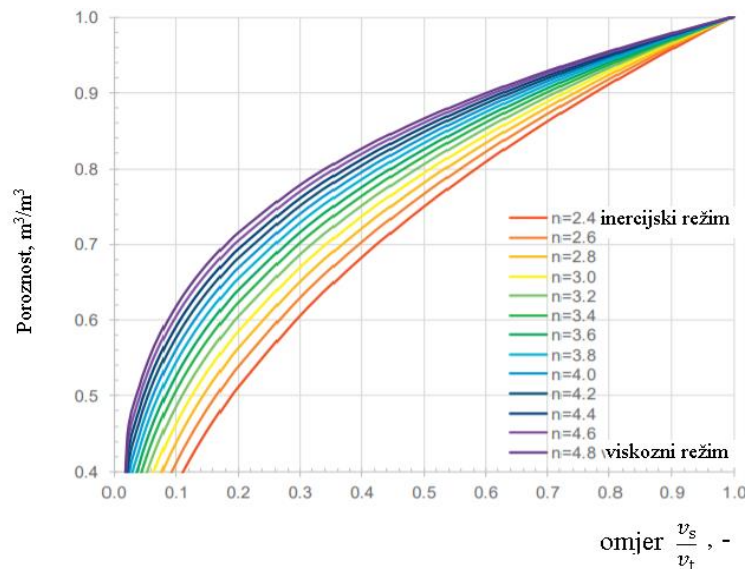
$$\varepsilon^n = \frac{v_s}{v_t} \quad (\varepsilon_{mf} < \varepsilon < 1) \quad (13)$$

gdje je v_s površinska brzina taloženja, v_t krajnja brzina taloženja, n Richardson-Zakijev indeks i ε_{mf} poroznost stanja minimalne fluidiziranosti.

Valjanost Richardson-Zakijeve jednadžbe ograničena je maksimalnom koncentracijom suspenzije koja odgovara koncentraciji u početnom fluidiziranom sloju ili pri minimalnim uvjetima fluidizacije gdje je $\varepsilon = \varepsilon_{mf} \approx 0,4$. Površinska je brzina v_s povezana s karakteristikama čestica i fluidiziranog sloja kao što je krajnja brzina taloženja v_t izolirane čestice u neomeđenoj kapljevini. Richardson-Zakijev model u teoriji ima dvije granične vrijednosti:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{v_s}{v_t} = 0 \quad \text{za } \varepsilon = 0 \\ \\ \frac{v_s}{v_t} = 1 \quad \text{za } \varepsilon = 1 \end{array} \right. \quad (14)$$

Vrijednost Richardson-Zakijevog indeksa n ovisi o režimu strujanja. Ta je ovisnost prikazana slikom 5, gdje je grafički prikazan omjer površinske brzine taloženja i krajnje brzine taloženja na apscisi te poroznost na ordinati. Poroznost je ovisna varijabla, a površinska je brzina taloženja neovisna varijabla. Kod viskozno strujanja Richardson-Zakijev indeks teži 4,8, dok u inercijskom režimu teži 2,4. Odstupanja u veličini i obliku čestica utječu na Richardson-Zakijev indeks, što dovodi do nepreciznijih predviđanja iznosa poroznosti. ^[11]



Slika 5. Ovisnost različitih iznosa Richardson-Zakijevog indeksa n o režimu strujanja ^[11]

2.4. Primjena metode taloženja u obradi otpadnih voda

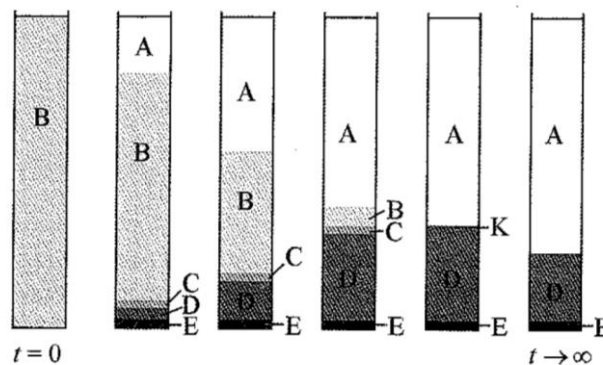
Taloženje malih čestica može trajati vrlo dugo, stoga se u praksi gravitacijsko taloženje koristi kod brzina taloženja većih od 10^{-5} ms^{-1} . Pri pročišćavanju otpadnih voda nailazi se na suspenzije različitih svojstava, koje se globalno dijele na zrnaste i pahuljičaste. Zrnaste su suspenzije sastavljene od čestica čija je brzina konstantna te se može primjeniti Stokesov zakon, dok pahuljičaste suspenzije imaju malu i neujednačenu brzinu taloženja. Uz to, čestice

pahuljičastih suspenzija mijenjaju oblik i masu te je teško na njih primjeniti matematičko-fizikalne jednadžbe, stoga se brzina taloženja takvih suspenzija određuje eksperimentalno testom taloženja. ^[1]

2.4.1. Test taloženja

Kako bi se dobila krivulja taloženja, odnosno prikaz promjene visine granične plohe između bistre zone i zone taloženja s vremenom, potrebno je napraviti tzv. test taloženja. Testom taloženja dobije se krivulja taloženja na temelju koje se provodi dizajn taložnika. Najvažniji parametar u dizajnu taložnika je određivanje površine poprečnog presjeka potrebne za taloženje kako bi se osigurala zadovoljavajuća kvaliteta pretoka. ^[6] Drugim riječima, cilj je dobivanje što manjeg sadržaja čvrste faze u kapljevine.

Mehanizam taloženja obično se prati u cilindričnim posudama promjera većeg od 50 mm kako bi se eliminirao utjecaj stijenke na proces (slika 6). Nedugo nakon početka taloženja stvara se granična površina između bistre zone (A, slika 6) i donje zone taloženja (B, slika 6). Ako postoje krupnije čestice u suspenziji, one razbijaju plastičnu, tj. pseudoplastičnu strukturu zone taloženja te padaju na dno posude (E, slika 6). Na samom dnu posude nalazi se kompresijska zona (D, slika 6) u kojoj se sakuplja gusta suspenzija. Između zone taloženja i kompresijske zone postoji prijelazna zona (C, slika 6) koja je konstantne debljine i koncentracije. Prijelazna zona putuje prema vrhu kolone te doseže vrh zone taloženja. S vremenom se smanjuje zona taloženja pa na kraju ostaju bistra zona i kompresijska zona, a položaj njihove granične plohe naziva se točka kompresije. ^[5]

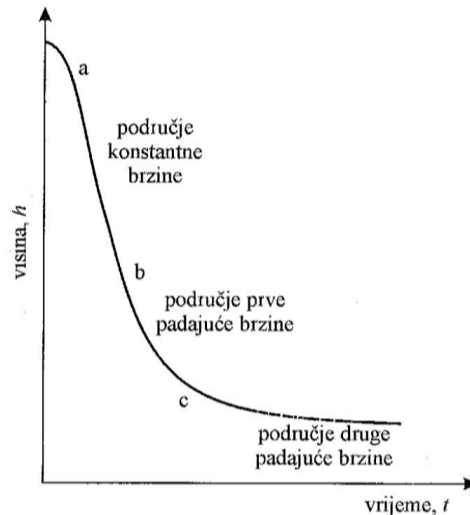


Slika 6. Zone u testu taloženja ^[5]

Provođenjem testa taloženja dobije se krivulja taloženja (slika 7) koja daje ovisnost visine granične plohe bistre zone (h) o vremenu trajanja taloženja (t). Oblik krivulje ovisi o vrsti suspenzije i njenoj gustoći.

Početno razdoblje (do točke a, slika 7) predstavlja indukcijsko razdoblje u kojem se suspenzija oporavlja od početnih smetnji ili, ako je riječ o flokulirajućoj ili koagulirajućoj suspenziji, u kojem nastaju flokule. Zatim slijedi razdoblje u kojem se uočava konstantna brzina taloženja (od a do b, slika 7). U području konstantne brzine taloženja koncentracija suspenzije točno ispod granične plohe još je uvijek jednaka koncentraciji izvorne homogene suspenzije. Nakon toga slijedi prijelaz na područje prve padajuće brzine (od b do c, slika 7) do

tzv. točke kompresije, iza koje nastupa područje druge padajuće brzine. Dakle, na početku procesa sve se čestice talože naizgled jednakom brzinom. Tada porast koncentracija čvrstih čestica na dnu ometa promatranu brzinu taloženja ostalih čestica, zbog čega se taloženje počinje usporavati. Čestice se na mjestu kompresije (točka c, slika 7) dodiruju te se taloženje kao takvo više ne odvija. ^[12]



Slika 7. Krivulja taloženja ^[5]

2.4.2. Dizajn taložnika

Dizajn taložnika podrazumijeva određivanje dvaju ključnih veličina: površina poprečnog presjeka talonika te njegova dubina. Površina se taložnika uglavnom određuje iz rezultata testova taloženja. Takav se dizajn taložnika temelji na jednodimenzionalnoj analizi koja pretpostavlja uzlazni tok kapljevine u taložniku i silazni tok u zoni taloženja. ^[13]

Postoji nekoliko metoda kojima se određuje dizajn taložnika, a općenito se dijele na tri vrste: iskustvene metode, dinamičke metode i testovi taloženja. Iskustvene se metode uglavnom koriste radi preliminarne procjene investicijskih troškova u ranoj fazi razvoja projekta. Metode razvijene na temelju testova taloženja egzaktnijeg su karaktera. Primjeri takvih metoda su: Coe-Clevengerova, Kynchova i Talmage-Fitchova metoda. Njihova je prednost mogućnost primjene laboratorijski dobivenih rezultata na veće mjerilo (scale-up) i različite koncentracije. Nedostatak navedenih metoda je nemogućnost predviđanja dinamičkih promjena u procesu, a to se može s trećom vrstom metoda, tzv. dinamičkim metodama. Dinamičke metode, najnovije od navedenih, daju najbolje rezultate, ali uglavnom uključuju pilotne uređaje i velike količine uzorka. Proizvođači i dobavljači taložnika rade pilotne uređaje sa svim segmentima velikih taložnika te ako je moguće, preliminarne se ispitivanja provode direktno u postrojenju. ^[6]

2.4.2.1. Kynchova metoda

Kynchova se metoda temelji na jednom testu taloženja. S pomoću nje određuju se brzina taloženja za različite koncentracije suspenzije. Mogućnost dobivanja vrijednosti navedenih fizikalno-kemijskih veličina iz samo jednog testa taloženja velika je prednost u odnosu na druge metode.

Izvodi se šaržni test taloženja u kojem se prati promjena visine granične plohe, koja razdvaja bistru zonu i zonu taloženja, u ovisnosti o vremenu te se u skladu s dobivenim podacima snima krivulja taloženja (slika 7). Tijekom testa taloženja, čvrste čestice suspenzije prolaze kroz područja različite koncentracije kako padaju na dno taložnika. Koncentracije se mijenjaju od stanja potpune homogenosti, kao na početku testa, do stanja potpuno ugušćene suspenzije. U jednom trenutku suspenzija postiže kritičnu koncentraciju, koja je između navedenih stanja. Kritična koncentracija karakteristična je po zamišljenom sloju kroz koji prolazi manje čestica nego što u njega ulazi. Taj je sloj odlučujući kod određivanja kapaciteta obrade taložnika. Ono što je Kynch dokazao jest činjenica da zamišljeni sloj putuje prema površini suspenzije konstantnom brzinom u_s te tako utječe na koncentraciju u sloju ispod granične plohe bistre kapljevine. Mijenjanjem koncentracije suspenzije, mijenja se u konačnici i brzina taloženja.

Iz bilance čvrstih čestica u suspenziji dobiva se izraz:

$$c_0 A h_0 = c_j A t_j (v_{s,j} + u_s) \quad (15)$$

gdje se lijeva strana jednadžbe odnosi na ukupnu masu čvrstih čestica u suspenziji, a desna strana na masu čestica koje prolaze kroz zamišljeni sloj.

Prema Kynchu zamišljeni sloj putuje konstantnom brzinom:

$$u_s = \frac{h_j}{t_j} = \text{konst.} \quad (16)$$

Dalje slijedi iz jednadžbe (15) da je koncentracija suspenzije c_j u vremenu t_j jednaka:

$$c_j = \frac{c_0 h_0}{h_j + v_{s,j} t_j} = \frac{c_0 h_0}{h_i} \quad (17)$$

gdje je h_i visina koju bi suspenzija dostigla kada bi koncentracija čvrstih čestica bila jednaka kao i u graničnoj plohi. U grafičkom smislu, h_i je odječak na y-osi tangente na krivulju taloženja povučene u točki (h_j, t_j) . U konačnici, za bilo koji iznos visine h_i moguće je izračunati koncentraciju c_j te odrediti brzinu $v_{s,j}$. Brzina taloženja izračunava se kao nagib spomenute tangente. ^[5]

2.4.2.2. Talmage-Fitchova metoda

Talmage-Fitchova metoda spada u skupinu grafičkih metoda kojima se obrađuje krivulja taloženja te se izračunava površina taložnika. Iz povećane tangente na krivulju taloženja dobiva se koncentracija c_j koja nije nužno koncentracija pri kojoj se izvodi test taloženja.

Iz sljedeće jednadžbe izračunava se visina h_i koju bi imala suspenzija koncentracije c_j :

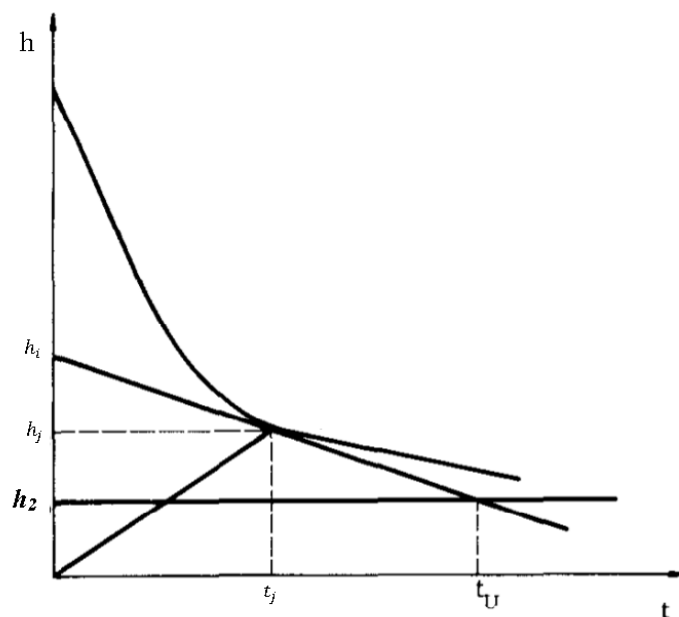
$$c_0 h_0 = c_j h_i \quad (18)$$

gdje je h_2 visina granične plohe u odtoku, tj. visina kompresijske zone, a $c_{s,2}$ koncentracija suspenzije u odtoku.

Na temelju izračunate visine h_i povlači se tangenta na krivulju taloženja (slika 8). Također se iz bilance (jedn. 18) izračunava visina kompresijske zone (h_2) koja odgovara koncentraciji ugušćene suspenzije u odtoku ($c_{s,2}$). Iz ove se visine na krivulji taloženja ucrtava pravac paralelan s osi apcise, kao što je to prikazano na slici 8. Dobiveno presjecište pravca h_2 i tangente iz h_i predstavlja vrijeme t_u potrebno za konačni izračun jedinične površine taložnika prema izrazu:

$$\frac{A}{\dot{M}_0} = \frac{t_u}{c_0 h_0} \quad [\text{m}^2 (\text{kg s}^{-1})^{-1}] \quad (19)$$

U stvarnosti, kod dizajna taložnika, dobivene krivulje taloženja izvan su područja taloženja u zoni te realnih uvjeta u taložniku. ^[12] Zbog toga se često u proračunima koriste tzv. sigurnosni faktori kojima se uvećava izračunata površina taložnika. Osnovni je nedostatak Talmage-Fitchove metode činjenica da ne uzima u obzir utjecaj različitih koncentracija odtoka pa je za dimenzioniranje pri različitim uvjetima potrebno postupak ponavljati za druge koncentracije odtoka.



Slika 8. Grafički prikaz Talmage-Fitchove metode ^[14]

2.4.3. Taložnici

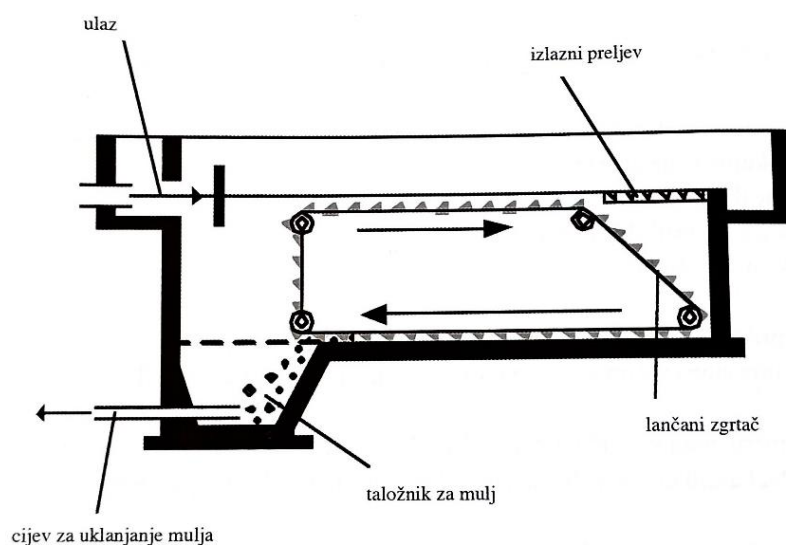
Primarni ili prethodni taložnici sastavni su dio cjelokupnog sustava pročišćavanja otpadnih voda. Kako se sustav razvijao posljednja tri desetljeća, njihova funkcija i rad postali su složeniji. To mogu biti okrugli ili pravokutni bazeni, obično duboki 3 do 5 m, s hidrauličkim vremenom zadržavanja između 2 i 3 sata. Taložive čestice, tj. primarni mulj, obično se uklanjaju s dna spremnika grabljama za mulj. Mulj se prikuplja kod središnjeg otvora, a potom se pumpom transportira do jedinice za preradu mulja. [4]

S pomoću taložnika moguće je ukloniti od 50 do 70 % suspendiranih tvari i od 25 do 40 % raspršenih tvari. Kada se pročišćuju otpadne vode čiji podaci analize nisu poznati, tada se planira vrijeme zadržavanja u taložniku od 1 do 2 sata. Što je vrijeme zadržavanja veće, to je obujam taložnika veći, ali se ne postižu bolji učinci pročišćivanja. [1]

Njihova je izvedba u obliku betona, a prema Tušar [1], dijele se na više vrsta:

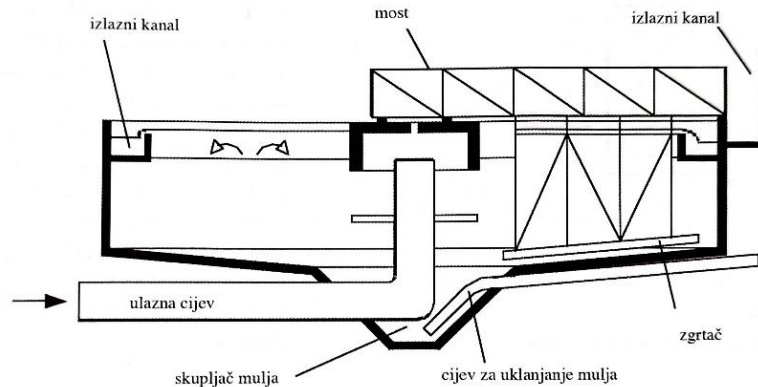
- pravokutni ili uzdužni taložnici
- kružni ili radijalni taložnici
- ljevčkasti ili vertikalni taložnici
- dvokatni taložnici.

Pravokutni taložnik (slika 9) bazen je na čijem se užem dijelu nalazi uređaj za raspodjelu vode, dok su ispod njega jame za sakupljanje mulja. Na drugoj se strani nalazi preljev čiste vode, a ispred njega uronjena je viseća pregrada kojom se površina bazena odvaja od samog preljeva. Samovozni zgrtač sabire istaložene i plivačuje tvari te vuče zgrtalicu mulja po dnu bazena, protustrujno dotoku vode. Ako se radi o velikim količinama mulja, postavljaju se lančani kontinuirani zgrtači mulja. Prednosti pravokutnog taložnika su manja potrebna površina i povoljniji uvjeti za natkrivanje objekta.



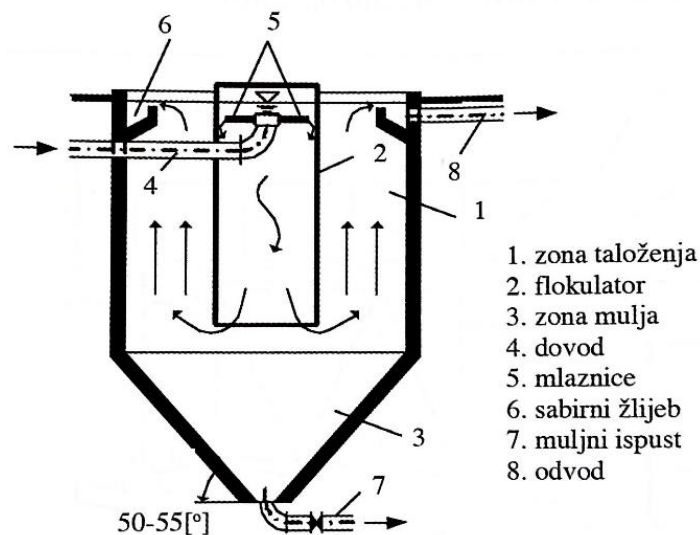
Slika 9. Shema pravokutnog taložnika s lančanim zgrtačem [1]

Kružni, odnosno radijalni taložnik (slika 10) ima dovod vode u sredini objekta, ispod kojeg je prostor za mulj. Voda struji iz središta prema obodu, čime se smanjuje brzina protjecanja, a to povoljno djeluje na proces taloženja. Mulj se prevrće zgrtalicom ovješenoj o poslužni most, koji je s jedne strane pričvršćen u samo središte objekta, a s druge strane se nalazi na obodu taložnika. Po obodu kruži kontinuirano pokretan elektromotorom.



Slika 10. Shema kružnog taložnika [1]

Taložnik s vertikalnim dotokom vode (slika 11) primjenjuje se kada je riječ o manjim uređajima, bez dodatne opreme. Donji dio taložnika konusnog je oblika, a zidovi su stranica pod kutom od 45° do 65° . Zbog kosine zidova, mulj samostalno klizi prema središtu taložnika, u prostor za sakupljanje mulja. Na sredini gornjem dijelu taložnika nalazi se cilindar u koji dotječe voda. Voda se zatim diže uvis, suprotno smjeru taloženja čestica, što dovodi do sudaranja čestica. Posljedično, povećava se masa i težina čestica te one brže talože. Nedostatak ovakvog taložnika jest njegova velika dubina.



Slika 11. Shema taložnika s vertikalnim dovodom vode

3. EKSPERIMENTALNI DIO

Proveden je šaržni test taloženja kako bi se na temelju dobivene krivulje taloženja odredila potrebna površina taložnika. Izračun je proveden primjenom prateći Talmage-Fitchove metode.

2.5. Aparatura i materijal

Aparatura koja se koristi jest *W2 MKII Sedimentation Studies Apparatus*, tj. laboratorijski stalak opremljen s pet staklenih kolona unutrašnjeg promjera 51 mm te visine 1300 mm, prikazan na slici 12. Iza svake kolone nalazi se skala u milimetrima za određivanje visine granične plohe između bistre zone i zone taloženja.



Slika 12. Kolone za taloženje (*W2 MKII Sedimentation Studies Apparatus*)^[15]

Za test taloženja pripremljena je suspenzija kalcijeva karbonata i vode koncentracije 80 kg m^{-3} . Jedna je kolona napunjena do visine 75 cm što odgovara početnoj visini h_0 .

2.6. Uvjeti proračuna

Kolona napunjena suspenzijom jednoliko se izmiješa do stanja vizualne homogenosti te se postavi na stalak gdje ostaje do kraja mjerenja. Početna visina suspenzije (h_0) iznosi 750 mm, dok je početna koncentracija suspenzije (c_0) 80 kg m^{-3} . Prateći vrijeme na digitalnom satu, bilježi se promjena visine granične plohe suspenzije unutar 90 minuta.

Za proračun su odabrani podaci prikazani u tablici 4.

Tablica 4. Podaci odabrani za dimenzioniranje taložnika

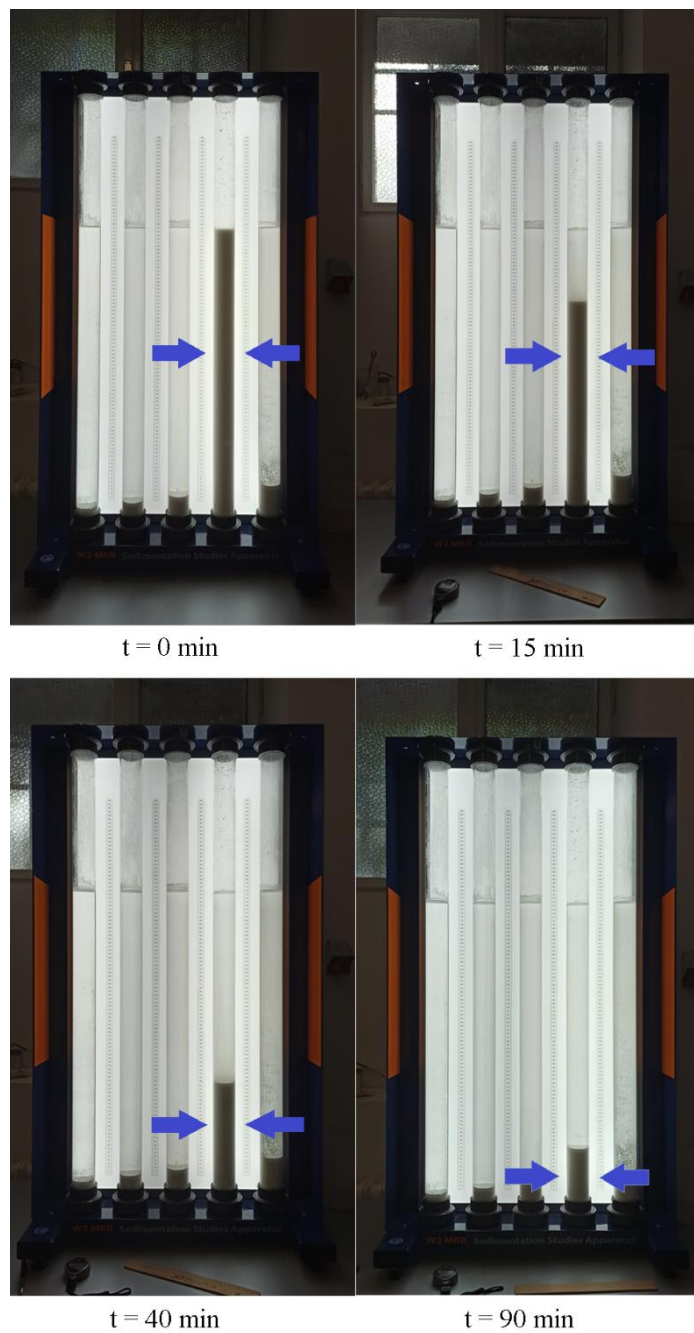
Koncentracija suspenzije, c_j	95 kg m ⁻³
Koncentracija u odtoku, $c_{s,2}$	400 kg m ⁻³
Maseni protok suspenzije, \dot{M}_0	1 kg s ⁻¹

4. REZULTATI I RASPRAVA

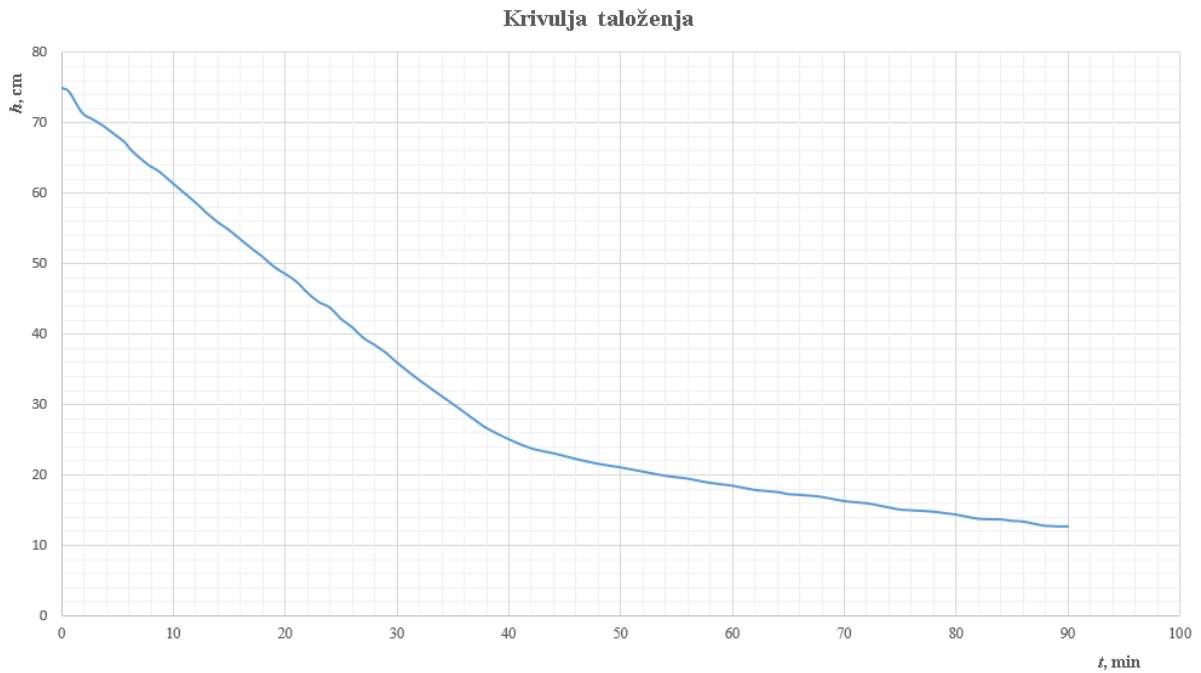
U tablici 5 prikazani su rezultati testa taloženja, položaj visine granične plohe u određenom vremenu testa. Vizualna promjena navedene plohe prikazana je slikom 13. Dobivena krivulja taloženja priložena je u obliku slike 14.

Tablica 5. Promjena visine granične plohe u vremenu

<i>t</i> , min	<i>h</i> , cm
0	75
5	68,1
10	61,4
15	54,8
20	48,6
25	42,2
30	36
35	30,1
40	25,1
45	22,7
50	21,1
55	19,7
60	18,5
65	17,3
70	16,3
75	15,1
80	14,4
85	13,5
90	12,7



Slika 13. Postupno smanjivanje visine granične plohe u koloni



Slika 14. Krivulja taloženja ispitivane suspenzije kalcijeva karbonata i vode

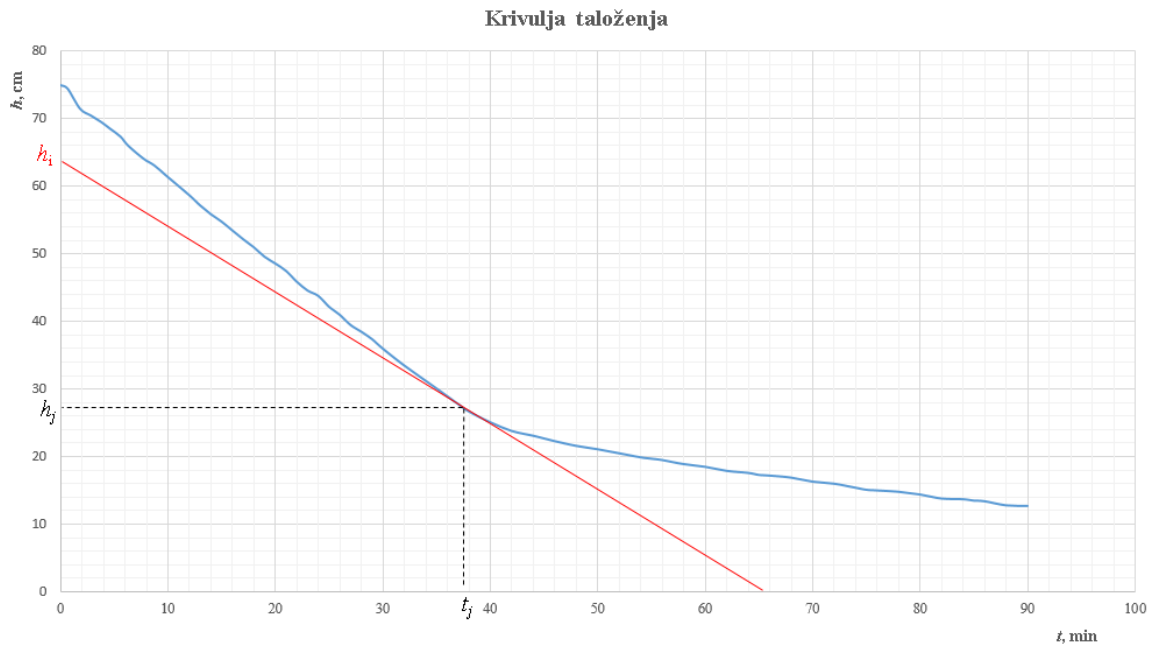
Visina granične plohe suspenzije opada s vremenom kako je i očekivano (tablica 5, slika 14).

Na temelju proizvoljno odabrane koncentracije suspenzije (95 kg m^{-3}) izračunata je pripadajuća visina (h_i) koju bi imala suspenzija.

$$h_i = \frac{c_0 h_0}{c_j} = \frac{80 \text{ kg m}^{-3} * 75 \text{ cm}}{95 \text{ kg m}^{-3}} = 63,2 \text{ cm}$$

Iz izračunate visine povučena je tangenta na krivulju taloženja (slika 15). Nagib tangente odgovara brzini taloženja suspenzije koncentracije 95 kg m^{-3} :

$$v_s = \frac{dh}{dt} = \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{h_i}{\Delta t} = \frac{63,2 \text{ cm}}{64,5 \text{ min}} = 0,980 \text{ cm min}^{-1} = 0,00016 \text{ m s}^{-1}$$



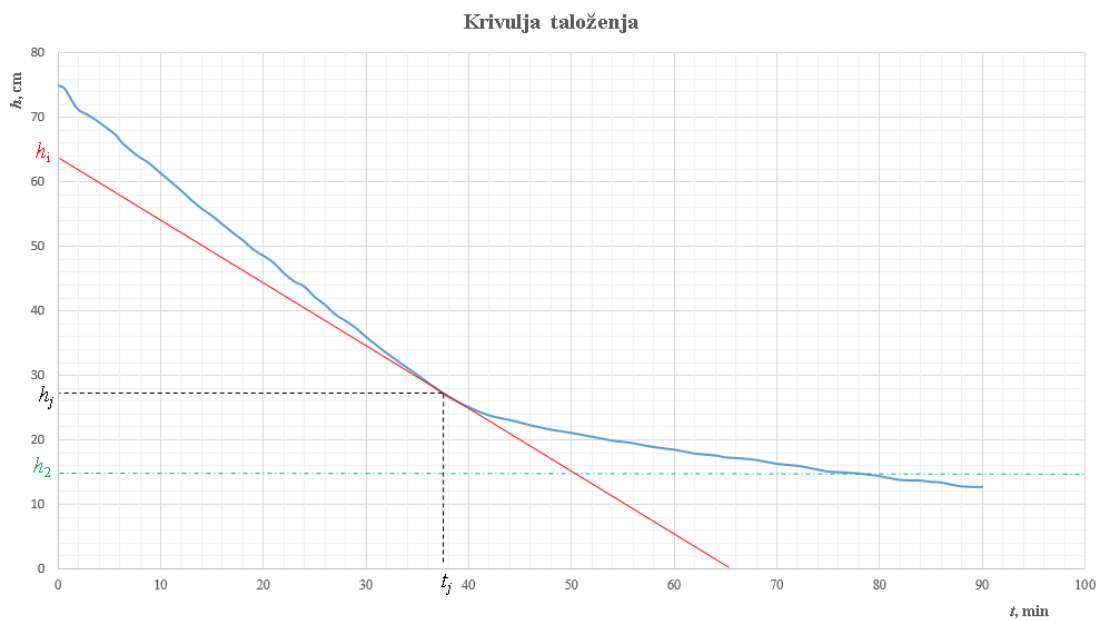
Slika 15. Tangenta povučena na krivulju taloženja za suspenziju koncentracije 95 kg m^{-3}

U sljedećem je koraku izračunata visina granične plohe koja odgovara koncentraciji suspenzije u odtoku:

$$h_2 = \frac{c_0 h_0}{c_{s,2}} = \frac{80 \text{ kg m}^{-3} * 75 \text{ cm}}{400 \text{ kg m}^{-3}} = 15 \text{ cm}$$

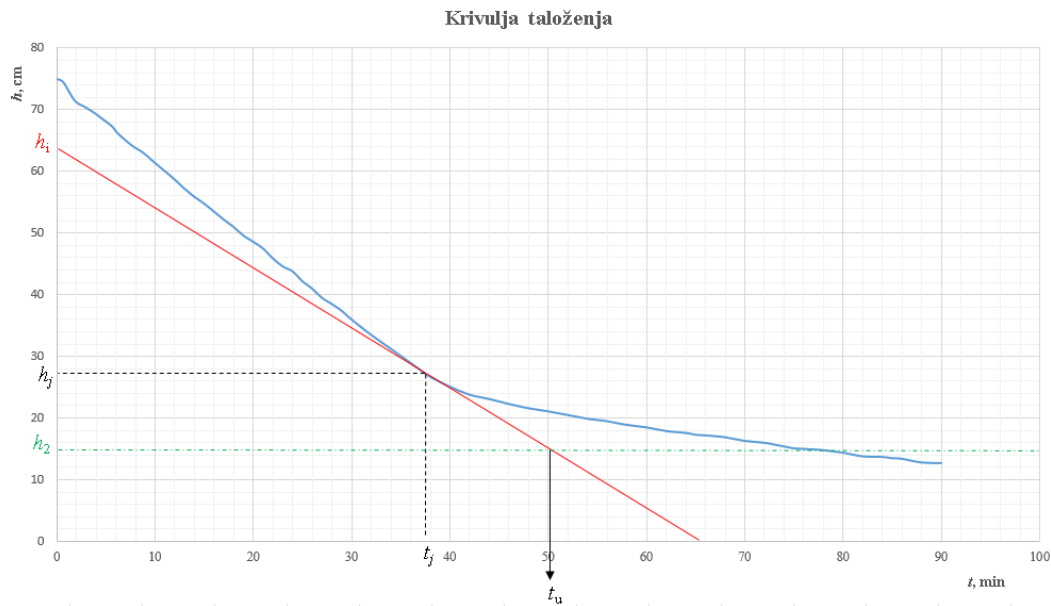
Koncentracija ugušćene suspenzije u odtoku ($c_{s,2}$) je 400 kg m^{-3} .

Od točke h_2 povlači se pravac paralelno s x-osi, kao što je prikazano slikom 16.



Slika 16. Pravac h_2 paralelan s osi apscise, označen isprekidanom zelenom linijom

Nacrtanim se pravcem dobila točka presjecišta s tangentom iz točke h_i te je iščitano vrijeme t_u koje iznosi 50 min (slika 17).



Slika 17. Presjecište pravca h_2 i tangente iz h_i , iz kojeg proizlazi vrijeme t_u

Jedinična površina taložnika izračunata je pomoću jednadžbe (19):

$$\frac{A}{\dot{M}_0} = \frac{t_u}{c_0 h_0} = \frac{3000 \text{ s}}{80 \text{ kg m}^{-3} * 0,75 \text{ m}} = 50 \text{ m}^2 (\text{kg s})^{-1}$$

Ovisno o masenom protoku suspenzije na ulazu u taložnik moguće je izračunati površinu poprečnog presjeka taložnika. Uzme li se da je maseni protok 1 kg s^{-1} , odgovarajuća površina taložnika iznosi 50 m^2 .

5. ZAKLJUČAK

Obrada otpadnih voda složen je proces zbog promjenjivog sastava ulazne otpadne vode. Taloženjem, koji je dio primarne obrade, uklanja se veći dio krutih taloživih čestica, što olakšava daljnji proces obrade. Uređaji u kojima čestice talože nazivaju se taložnici, a mogu biti raznih izvedbi. Za učinkovito odvajanje nužno je dimenzioniranje taložnika.

U ovom radu je proveden šaržni test taloženja suspenzije kalcijeva karbonata i vode, koncentracije 80 kg m^{-3} . Primijenjena je Talmage-Fitchova metoda dimenzioniranja na temelju koje je izračunata površina taložnika potrebna za separaciju 1 kg s^{-1} suspenzije koncentracije 95 kg m^{-3} , uzimajući u obzir da je koncentracija suspenzije na izlazu iz taložnika 400 kg m^{-3} .

6. SIMBOLI

A – poprečni presjek taložnika (površina sedimentiranja), m^2

A_p – 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, $kg\ m^{-3}$

C_v – volumni udio čvrste faze

c_0 – masena koncentracija suspenzije prije taloženja, $kg\ m^{-3}$

d – promjer čestice, m

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 granične plohe suspenzije prije taloženja, m

h_2 – visina granične plohe u odtoku (visina kompresijske zone), m

K – sigurnosni faktor

m – masa čestice, kg

\dot{M}_0 – maseni protok čvrstih čestica, $kg\ s^{-1}$

m – Richarson-Zakijev eksponent

Re – Reynoldsov broj

S – fluks čvrstih čestica (gustoća toka), $kg/(sm^2)$

S_{krit} – kritični fluks, $kg/(sm^2)$

t – vrijeme, s

u_s – brzina kojom Kynchov zamišljeni sloj putuje prema površini suspenzije, $m\ s^{-1}$

v – brzina čestice, $m\ s^{-1}$

V_p – volumen čestice, m^3

v_s – relativna brzinu taloženja čvrstih čestica u odnosu na fluid, $m\ s^{-1}$

v_t – krajnja brzina taloženja, $m\ s^{-1}$

v_{th} – brzina zonskog taloženja, $m\ s^{-1}$

v_{tr} – brzina oticanja guste suspenzije, $m\ s^{-1}$

\dot{V} – volumni protok odtoka, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

ρ_p – hustota čestice, kg m^{-3}

ρ_f – hustota fluida, kg m^{-3}

μ – dynamická viskozita fluida, Pa s

7. LITERATURA

- [1] Tušar, B., Pročišćavanje otpadnih voda, Kigen d.o.o., Zagreb, 2009.
- [2] Briški, F., Zaštita okoliša, Nastavni materijali, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2013.
- [3] Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D., Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4th ed. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2002.
- [4] Zahra, A., Introduction of Preliminary and Secondary Treatment, u Hamidi, A. A., Mojiri, A., Wastewater Engineering: Advanced Wastewater Treatment Systems, IJSR Publications, 2014.
- [5] Hraste, M., Mehaničko procesno inženjerstvo, Hinus, Zagreb, 2003.
- [6] Matijašić, G., Jedinične operacije u ekoinženjerstvu, Nastavni materijali, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2016.
- [7] van Loosdrecht, M. C. M., Nielsen, P.H., Lopez-Vazquez, C. M., Brdjanovic, D., Eksperimentalne metode u obradi otpadnih voda, Synopsis d.o.o., Zagreb, 2016.
- [8] Carlsson, B., An introduction to sedimentation theory in wastewater treatment. Wastewater treatment course materials, Uppsala University, Uppsala, 1996.
- [9] Aslam M. T., Settling of solids in raw wastewater – primary settling tanks and storm water tanks, Doctoral thesis, TU Graz, Graz, 2013.
- [10] Haan, C. T., Barfield, B. J., Hayes, J. C., Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments, Academic Press, Inc., California, 1994.
- [11] Kramer, O. J. I., de Moel, P. J., Baars, E. T., van Vugt, W. H., Padding, J. T., van der Hoek, J. P., Improvement of the Richardson-Zaki liquid-solid fluidisation model on the basis of hydraulics, Powder Technol. 343, 2019.
- [12] Rushton, A., Ward, A. S., Holdich, R. G., Solid-Liquid Filtration and Separation Technology, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Germany, 1996.
- [13] McCabe, W. L., Smith, J. C., Harriott, P., Unit Operations of Chemical Engineering, McGraw Hill, Singapore, 1993.
- [14] Concha, F., Barrientos, A., A Critical Review of Thickener Design Methods, KONA, 1993.
- [15] Armfield. <https://armfield.co.uk/product/w2-mkii-sedimentation-studies-apparatus/> (pristup 5.7.2021.)