

České vysoké učení technické v Praze

# **Bakalárska práca**

2017

Peter Kret



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav procesní a zpracovatelské techniky

BAKALÁRSKA PRÁCA

## **Vplyv miešania na účinnosť flokulácie**

Autor bakalárskej práce: Peter Kret

Vedúci bakalárskej práce: doc. Ing. Radek Šulc, Ph. D.

## P r e h l á s e n i e

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne s tým, že jej výsledky môžu byť ďalej použité podľa uváženia vedúceho bakalárskej práce ako jej spoluautora.

Súhlasím tiež s prípadnou publikáciou výsledkov bakalárskej práce alebo jej podstatnej časti, pokiaľ budem uvedený ako jej spoluautor.

V Prahe dňa 15. augusta 2017

Podpis

**Názov bakalárskej práce:**

Vplyv miešania na účinnosť flokulácie

**Abstrakt:**

Táto bakalárska práca je venovaná téme flokulácie a vplyvom na jej účinnosť. Práca je rozdelená do troch častí. Cieľom teoretickej časti je vymedzenie základných pojmov ako flokulácia, koagulácia, flokulačné činidlá, vplyvy miešania a ich výskumy. Tieto teoretické poznatky sú následne prenesené do metodologickej časti, a to najmä prostredníctvom makroskopického modelu flokulácie. Metodická časť obsahuje spôsoby vyhodnocovania experimentu a následný postup na aplikáciu do väčšej mierky. V experimentálnej časti sú aplikované poznatky z teoretickej časti, na základe ktorých boli spracované experimentálne údaje a prebehlo ich vyhodnotenie. Ďalším cieľom práce je prostredníctvom vyhodnotených parametrov stanoviť vplyv vybraných parametrov na účinnosť flokulácie. V závere práce sú zhrnuté všetky zistenia a poznatky plynúce z experimentálnej časti, a na základe nich formulované ďalšie odporúčania.

**Kľúčové slová:**

Flokulácia, koagulácia, miešanie, kinetika flokulácie, zväčšovanie mierky

**Title of the Bachelor's Thesis:**

Effect of mixing onto flocculation efficiency

**Abstract:**

This bachelor thesis aims to discuss topic of flocculation and particular forces that determine its effectivity. It is divided to three sections. The main goal of the theoretical part is to define essential terminology such as flocculation, coagulation, flocculation agents, blending forces and their research. Methodological part consequently incorporates already acquired theoretical knowledge mostly through macroscopic model of flocculation. It also encompasses methodology of experiment evaluation and subsequent practice of application within greater scale. Experimental part applies theoretical knowledge based on which experimental data were processed and evaluated. The secondary goal of this work is to determine impact of particular variables on flocculation effectivity through earlier evaluated variables. At last, this work summarizes all acquired findings and knowledge emerging from experimental study and formulates further suggestions.

**Key words:**

Flocculation, coagulation, mixing, flocculation kinetics, increase scale

## **Pod'akovanie**

Touto cestou by som sa rád pod'akoval vedúcemu mojej bakalárskej práce doc. Ing. Radkovi Šulcovi, Ph.D. za jeho hodnotné rady, pripomienky a odborné vedenie práce. V neposlednom rade by som sa chcel pod'akovať mojej rodine a priateľom za veľkú podporu a trpezlivosť.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kret** Jméno: **Peter** Osobní číslo: **408569**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávatel/ katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**  
Studijní program: **Strojírenství**  
Studijní obor: **Energetika a procesní technika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Vliv míchání na účinnost flokulace**

Název bakalářské práce anglicky:

**Effect of mixing onto flocculation efficiency**

Pokyny pro vypracování:

Experimentálně stanovte vliv míchání na vyčištění při flokulaci v mechanicky míchané nádobě.

Podrobné cíle práce:

- 1) Proveďte literární řešení se zaměřením zejména na vliv míchání na účinnost flokulace v míchané nádobě.
- 2) Experimentálně stanovte vliv vybraných parametrů (doba míchání, intenzita míchání, dávka flokulantu, typ míchadla) na účinnost flokulace.
- 3) Proveďte vyhodnocení experimentálních dat dle navržených modelů a zhodnotte dosažené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Radek Šulc Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **10.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **09.06.2017**

Platnost zadání bakalářské práce:

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam povolené literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

**10-04-2017**

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

## Obsah

Zoznam použitých symbolov .....	11
Úvod .....	13
TEORETICKÁ ČASŤ .....	14
1. Flokulácia všeobecne .....	14
1.1. Využitie flokulácie .....	14
1.2. Vplyv na flokuláciu .....	14
2. Flokulácia a Koagulácia .....	15
2.1. Kinetika agregácie častíc .....	15
2.1.1. Perikinetická fáza .....	15
2.1.2. Ortokinetická fáza .....	15
2.1.3. Kinetika agregácie .....	16
2.2. Činidlá na úpravu vody .....	16
2.3. Hodnotenie priebehu flokulácie .....	19
2.4. Vplyv miešania .....	19
2.5. Modely flokulácie .....	22
2.5.1. Mikroskopický model .....	22
2.5.2. Makroskopický model .....	23
METODICKÁ ČASŤ .....	24
3. Flokulačná krivka .....	24
3.1. Účinnosť flokulácie .....	24
3.2. Doba flokulácie .....	24
4. Sedimentačná krivka .....	25
4.1. Účinnosť sedimentácie .....	25
4.2. Model .....	25
5. Zväčšovanie mierky .....	26
5.1. Prepočet podmienok na zväčšenie mierky .....	26
EXPERIMENTÁLNA ČASŤ .....	27
6. Experimentálna aparátúra .....	27
6.1. Nádoba .....	27
6.2. Miešadlá .....	28
6.2.1. Pohon miešadla .....	28
6.3. Meranie zákalu .....	28



6.4.	Látky použité v experimente.....	28
7.	Postup merania .....	29
8.	Vplyv dávky flokulantu a koncentrácie kaolínu na flokuláciu pre merný príkon $40 \text{ W/m}^3$ .....	29
8.1.	Kaolín, koncentrácia $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ .....	29
8.1.1.	Flokulačná krivka .....	29
8.1.2.	Sedimentačná krivka .....	31
8.2.	Kaolín, koncentrácia $c_{k0} = 750 \text{ mg/l}$ .....	33
8.2.1.	Flokulačná krivka .....	33
8.2.2.	Sedimentačná krivka .....	36
8.3.	Kaolín, koncentrácia $c_{k0} = 1\,000 \text{ mg/l}$ .....	38
8.3.1.	Flokulačná krivka .....	38
8.3.2.	Sedimentačná krivka .....	40
8.4.	Porovnanie .....	42
9.	Vplyv zmeny príkonu na flokuláciu pre koncentráciu kaolínu $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ a bezrozmernú dávku flokulantu $D_F/c_{k0} = 0,26 - 1,04 - 3,04 \text{ mg/g}$ .....	44
9.1.	Kaolín, koncentrácia $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ , bezrozmerná dávka flokulantu $D_F/c_{k0} = 0,26 \text{ mg/g}$ .....	44
9.1.1.	Flokulačná krivka .....	44
9.1.2.	Sedimentačná krivka .....	47
9.2.	Kaolín, koncentrácia $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ , bezrozmerná dávka flokulantu $D_F/c_{k0} = 1,04 \text{ mg/g}$ .....	49
9.2.1.	Flokulačná krivka .....	49
9.2.2.	Sedimentačná krivka .....	51
9.3.	Kaolín, koncentrácia $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ , bezrozmerná dávka flokulantu $D_F/c_{k0} = 3,04 \text{ mg/g}$ .....	53
9.3.1.	Flokulačná krivka .....	53
9.3.2.	Sedimentačná krivka .....	55
9.4.	Porovnanie .....	57
10.	Vplyv zmeny merného príkonu na flokuláciu pre koncentráciu kaolínu $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ a bezrozmernú dávku flokulantu $D_F/c_{k0} = 0,26 - 1,04 - 3,04 \text{ mg/g}$ pre šesťlopatkové miešadlo. ....	59
10.1.	Kaolín, koncentrácia $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ , bezrozmerná dávka flokulantu $D_F/c_{k0} = 0,26 \text{ mg/g}$ .....	59
10.1.1.	Flokulačná krivka .....	59

10.1.2. Sedimentačná krivka .....	62
10.2. Kaolín, koncentrácia $c_{k0} = 500$ mg/l, bezrozmerná dávka flokulantu $D_F/c_{k0} = 1,04$ mg/g.....	63
10.2.1. Flokulačná krivka .....	63
10.2.2. Sedimentačná krivka .....	66
10.3. Kaolín, koncentrácia $c_{k0} = 500$ mg/l, bezrozmerná dávka flokulantu $D_F/c_{k0} = 3,04$ mg/g .....	67
10.3.1. Flokulačná krivka .....	67
10.3.2. Sedimentačná krivka .....	70
10.4. Porovnanie .....	71
Záver.....	74
Zoznam literatúry .....	76

## Zoznam použitých symbolov

A	parameter
$A^*$	súčiniteľ zmeny reziduálneho znečistenia
B	parameter
C	parameter
$c_{k0}$	koncentrácia kaolínu
D	priemer nádoby
$D_F$	dávka flokulantu
H	výška kvapaliny vo vode
$H_2$	výška miešadla nad dnom nádoby
n	otáčky miešadla
$n_i, n_j$	koncentrácie častíc o veľkosti i a j
$[nt_F]_{\min}$	bezrozmerná doba flokulácie
P	príkon miešadla
$t_F$	doba flokulácie
$t_F^*$	bezrozmerná doba flokulácie
$t_{\text{sed}}$	doba sedimentácie
$t_{\text{sed}50}$	doba sedimentácie, v ktorej bola dosiahnutá hodnota $Z_r^* = 0,5$
$u_{\text{sed}}$	sedimentačná rýchlosť
V	objem
$Z_{r0}$	počiatočný zákal pred flokuláciou / sedimentáciou
$Z_r(t_F)$	zbytkový (reziduálny) zákal v čase flokulácie $t_F$
$Z_r(t_{\text{sed}})$	zbytkový (reziduálny) zákal v čase sedimentácie $t_{\text{sed}}$
$Z_{r \min}$	minimálny zbytkový (reziduálny) zákal
$Z_r^*$	stupeň reziduálneho znečistenia v bezrozmernom čase flokulácie $t_F^*$
$Z_{r \min}^*$	minimálny stupeň reziduálneho znečistenia pri flokulácii/sedimentácii
$Z_r^*(t_{\text{sed}})$	stupeň reziduálneho znečistenia v čase sedimentácie $t_{\text{sed}}$

### **Grécke písmená**

$\alpha$	kolízna účinnosť
$\beta$	frekvencia kolízií medzi časticami o veľkosti $i$ a $j$
$\Delta[D_F/c_{k0}]$	premenná
$\Delta[nt_F]$	premenná
$\Delta Z_r^*$	premenná
$\varepsilon_v$	merný objemový príkon

### **Horné indexy**

*	bezrozmerná veličina
---	----------------------

### **Dolné indexy**

log	dekadický logaritmus
min	minimum

### **Skratky**

POM	prírodný organický materiál
FNU	Formazin Nephelometric Units

# Úvod

Flokulácia plní veľmi dôležitú úlohu v procesoch separácie pevných látok, v čistení odpadových vôd a dodávaní vody. Primárnym účelom flokulácie je premeniť menšie častice na väčšie agregáty (vločky), tak aby sa dosiahla efektívna separácia.

Činidlá používané pri flokulácii sa nazývajú flokulanty a ich dávka závisí od podmienok miešania, typu flokulantu a podmienok prípravy. Flokulačné činidlá používané v procesoch čistenia odpadových vôd sú pomerne drahé. Aby sa dosiahla čo najväčšia efektivita flokulácie, a zároveň sa prevádzkové náklady nezvyšovali, je treba venovať pozornosť výskumu tohto procesu.

Cieľom práce je v prvom rade teoretické vymedzenie základných pojmov, ktoré priamo súvisia s témou práce. Sú to pojmy ako flokulácia, koagulácia, flokulačné činidlá, vplyvy miešania a ich výskumy. Metodická časť si kladie za cieľ popísať postup vyhodnotenia na základe predchádzajúceho výskumu a nových poznatkov, a zároveň definovať pravidlá na zväčšovanie mierky. V experimentálnej časti sa sleduje vplyv doby miešania, intenzity miešania, dávky flokulantu a typu miešadla na účinnosť flokulácie. Následne sú v tejto časti predstavené výsledky meraní s využitím predchádzajúcich zistení.

Prvá kapitola práce sa zaoberá definíciou flokulácie, ktorá tvorí základ pre pochopenie danej témy. Súčasťou kapitoly je aj popis vplyvov na flokuláciu.

Druhá kapitola nadväzuje na spomínanú definíciu a popisuje typy agregácie častíc z hľadiska transportných mechanizmov. Taktiež obsahuje definície používaných flokulačných činidiel. Následne sa venuje hodnoteniam priebehu flokulácie a vplyvom miešania na základe predchádzajúcich výskumov. Kapitola obsahuje aj popísané modely flokulácie.

Tretia kapitola je venovaná metodike práce, ktorá popisuje postup vyhodnotenia experimentu. Súčasťou kapitoly je aj definovanie pravidiel na zväčšovanie mierky pre účely aplikácie v priemysle.

Experimentálna aparatúra a postup merania sú popísané na začiatku experimentálnej časti. Nasledujúce kapitoly 8 až 10, sú zamerané na vyhodnotenie samotného experimentu, a to na základe modelov popísaných v metodickej časti. Tieto kapitoly obsahujú aj porovnanie jednotlivých meraní na základe rôznych dávok flokulantu alebo rôznych príkonov.

V závere práce sú zhrnuté poznatky experimentu, vyslovené závery a ďalšie odporúčania.

Namerané parametre experimentu sú uvedené na samostatnom CD nosiči priloženom k tejto bakalárskej práci.

# TEORETICKÁ ČASŤ

## 1. Flokulácia všeobecne

Koagulácia a flokulácia sú najbežnejšie metódy chemicko – technickej úpravy vody zvyčajne aplikované pred sedimentáciou a filtráciou pre zvýšenie schopnosti procesu separácie častíc.

Koagulácia zahŕňa prídanie chemických látok tzv. koagulantov za účelom kondicionovania nerozpustených, koloidných alebo rozpustených látok pre následné spracovanie pomocou flokulácie.

Flokulácia je agregácia nestabilných častíc vytvorených prídanim koagulantov a produktov zrážania, tzv. *flocs* (v preklade vločiek). (Howe, 2012)

### 1.1. Využitie flokulácie

Rozpustené a rozptýlené častice sú prítomné vo väčšine prírodných vôd. Tieto suspendované materiály väčšinou vznikajú z erózie pôdy, rozpustenia minerálov, rozpadu vegetácie a z vypúšťania odpadov z domácností a priemyslu.

Takýto prírodný organický materiál (POM) môže zahŕňať rozpustené organické alebo anorganické zložky, rovnako ako niekoľko biologických organizmov ako sú baktérie, riasy alebo vírusy. Tento materiál sa musí odstrániť, pretože spôsobuje zhoršenie kvality vody tým, že znižuje viditeľnosť (napr. zákal, farba) a obsahuje patogénne organizmy alebo toxické zlúčeniny adsorbované na ich povrchu.

Odstránenie rozpusteného POM je dôležité, pretože mnoho zložiek, ktoré obsahujú rozpustené prírodné organické látky, sú prekursori tvorby vedľajších produktov dezinfekcie pri použití chlóru na dezinfekciu. (Howe, 2012)

### 1.2. Vplyv na flokuláciu

Flokuláciu ovplyvňuje množstvo chemických a fyzikálnych faktorov. Konkrétne chemické faktory skúmali Garzon-Sanabria, Davis, Nikolov (2012). V ich štúdiu sledovali hodnotu pH vody, dávku flokulantu a ďalších pomocných koagulačných prostriedkov, a dokázali, že každý z týchto faktorov flokuláciu skutočne ovplyvňuje. V štúdiu boli obsiahnuté aj fyzikálne parametre (doba flokulácie, teplota). Aby sa počas flokulácie vytvorili väčšie vločky, je potrebné, aby dochádzalo k vzájomnému zrážaniu jednotlivých častíc, čo je možné zabezpečiť miešaním. Intenzita miešania je jedným z najdôležitejších faktorov ovplyvňujúcich flokuláciu. Je potrebné nastaviť parametre tak, aby ku vzájomnej zrážke vôbec došlo, no na druhej strane aby intenzita nebola príliš vysoká a nedochádzalo tak k rozbíjaniu už vytvorených vločiek.

## 2. Flokulácia a Koagulácia

### 2.1. Kinetika agregácie častíc

Existujú dva typy agregácie častíc z hľadiska transportných mechanizmov, perikinetická a ortokinetická fáza. Rozdiel medzi týmito dvoma typmi agregácie je založený na veľkosti spracovávaných častíc.

#### 2.1.1. Perikinetická fáza

Perikinetická fáza, tiež známa ako koagulácia. Počas tejto fázy dochádza k tvorbe mikrovločiek, na základe destabilizácie častíc. Tento jav sa tiež nazýva Brownov pohyb. V tejto fáze flokulácie sa tvoria častice o veľkosti 0,001-1  $\mu\text{m}$  ťažko viditeľné voľným okom. Príspevok tohto mechanizmu nie je dominantný pre cieľový efekt, rozhoduje ďalšia fáza. (Tchobanoglous, Burton, Stensel, Metcalf & Eddy, Inc.,2003)

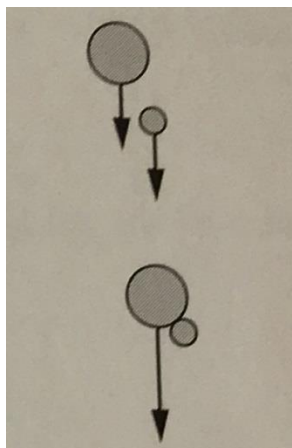
#### 2.1.2. Ortokinetická fáza

Ortokinetická fáza, alebo flokulácia, označuje agregáciu častíc väčších ako 1  $\mu\text{m}$ . Počas tejto fázy nemôže byť uplatnený Brownov pohyb. Agregáciu možno vyvolať miešaním, alebo sedimentáciou. Dochádza k zrážaniu mikrovločiek a tvorbe väčších vločiek.

Flokulácia, vyvolaná miešaním tekutiny (viď Obrázok 2.2), spočíva v rýchlejšom pohybe častíc, ktoré predstihnú pomalšie častice v rýchlostnom poli. V prípade, že do seba tieto častice narazia, môžu sa spojiť do väčšej častice, ktorú je v procese separácie možné jednoduchšie odstrániť. (Tchobanoglous, Burton, Stensel, Metcalf & Eddy, Inc.,2003;)

Druhou možnosťou ako vyvolať agregáciu, je sedimentácia, kde väčšia častica predstihne menšiu v priebehu usadzovania spôsobeného gravitáciou. Podobne ako v prvom prípade, pri narazení väčšej častice na menšiu vznikne ešte väčšia častica.

Obrázok 2.1 Flokulácia vyvolaná sedimentáciou

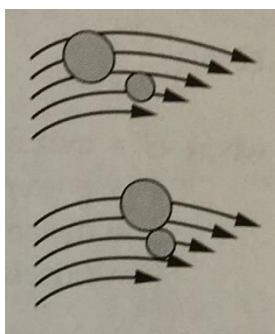


Zdroj: TCHOBANOGLIOUS,G., BURTON,F.L., STENSEL, H. D., Metcalf & Eddy, Inc. *Wastewater engineering: Treatment and reuse* (4th ed.). New York: McGraw-Hill. 2003. ISBN 0-07-041878-0

### 2.1.3. Kinetika agregácie

Tento proces sa rozdeľuje podľa intenzity miešania. Je to veľmi zložitý proces, pri ktorom sa malé častice vo vode zrážajú, lepia, alebo spájajú navzájom tak, aby vytvorili väčšie agregáty. Počas fázy rýchleho miešania (rýchlostný gradient cca 500-1500 s<sup>-1</sup>, doba zdržania 5-30 s) je koagulant premiešavaný s nečistotami (malé častice alebo koloidné materiály). Počas tohto procesu koagulant hydrolyzuje na povrchu nečistôt, čo vedie k destabilizácii nečistôt a k vytváraniu malých vločiek. Pri pomalom miešaní (rýchlostný gradient 50-100 s<sup>-1</sup>, doba zdržania 30-60 min), sa mikrovločky, ktoré vznikli v predchádzajúcom procese a ich vzájomná odpudivosť je nízka, môžu pomocou mechanického alebo hydraulického miešania kolidovať, a následne utvárať väčšie vločky. Avšak pri veľmi vysokej intenzite miešania, môže dochádzať vplyvom šmykových síl k rozbíjaniu vločiek. (Tchobanoglous, Burton, Stensel, Metcalf & Eddy, Inc., 2003; Ying, 2011; Dítl a kol, 2011)

Obrázok 2.2 Flokulácia vyvolaná miešaním



Zdroj: Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H. D., Metcalf & Eddy, Inc. Wastewater engineering: Treatment and reuse (4th ed.). New York: McGraw-Hill. 2003. ISBN 0-07-041878-0

## 2.2. Činidlá na úpravu vody

Používané činidlá sa dajú rozdeliť do 3 skupín, a to na anorganické koagulanty, organické flokulanty a koagulanty a na pomocné chemikálie. Tieto chemikálie slúžia na úpravu samotnej vody, aby spĺňala požadované kvalitatívne parametre, ktoré požaduje legislatíva. V práci sú uvedené príklady flokulačných a koagulačných činidiel používaných pri úprave vody (Prevzaté z materiálov spoločností Kemwater ProChemie s.r.o, Severočeské vodovody a kanalizace a.s. Teplice).

### ALG – síran hlinitý pevný

Jeden zo základných koagulantov, vhodný na výrobu pitnej a úžitkovej vody čírením a pre čistenie odpadových vôd, taktiež použiteľný v papierenskom a stavebnom priemysle. Produkt sa vyrába ako prášok alebo granule v dvoch frakciách s minimálnym obsahom nerozpustného podielu, a dobre sa rozpúšťa vo vode.



### **ALS – síran hlinitý tekutý 40%**

Anorganický koagulačný prostriedok, ktorý sa hodí predovšetkým na čistenie komunálnych a priemyslových odpadných vôd, alebo pre aplikácie v stavebnom a papierenskom priemysle.

### **Chlorid hlinitý**

Účinný koagulant na báze hliníka so širokým uplatnením pri úprave a čistení vody.

### **PAS 3 polyaluminiumsulfát**

Vysoko efektívny hlinitý koagulant na upravovanie a čistenie vody s nízkym obsahom síranov a zvýšenou bazicitou pre špeciálne aplikácie, napr. vody s nízkou alkalitou.

### **PAX – 18 polyaluminiumchlorid**

Vysoko účinný tekutý koagulant na báze polyhlinitéhochloridu so širokým spektrom využitia ako napr. pitná, priemyslová a odpadná voda, komunálna odpadná voda, papierenský priemysel a bazénové vody.

### **Kyselina sírová**

Používa sa najmä k úprave pH vody, k regenerácii meničov iontov a k neutralizácii odpadných vôd.

### **Organické flokulanty Superfloc**

Široká škála anionaktívnych, kationaktívnych a neionogenných organických polymerov, vyberá sa na základe laboratórnych skúšok.

### **Kryštalický mramor**

Prostriedok na stvrdenie a odkyslenie pitnej vody.

### **Dusičnan vápenatý**

Slúži na redukciu zápachu sírovodíka v kanalizáciách.

### **Vápenný hydrát**

Je to obyčajné vápno, ktoré sa bežne používa v stavebníctve. Prírodné povrchové aj podzemné vody sú mierne kyslé. K ďalšiemu zníženiu hodnoty pH, tiež aj k okysľovaniu dochádza pri dávkovaní síranu hlinitého, preto je nutné pri úprave ich pH zvýšiť. Vápno sa požíva práve k zvyšovaniu hodnoty pH. Dávkovanie prebieha vo forme vápenného mlieka, alebo vápennej vody.

### **Vápenec, Dolomit, Mramor a iné odkysľovacie hmoty**

Tieto hmoty sú prírodnými materiálmi, ktoré sa používajú k odkysľovaniu vody prevažne podzemného pôvodu. Ak má voda zo zdroja mierne vyššiu kyslosť, je nutné

kyslosť znížiť, alebo zvýšiť hodnotu pH. To sa deje prietokom vody cez vrstvu odkysľovacej hmoty, ktorá je nasýpaná vo filtri. Voda hmotu rozpúšťa a obohacuje sa minerálmi, najmä vápnikom a horčíkom. Zároveň voda stráca svoju kyslosť.

### **Hydroxid sodný**

V prípade, že prírodná voda pritekajúca do úpravovne je mierne kyslá, je potrebné jej kyslosť znížiť, alebo zvýšiť hodnotu pH. V úpravovňách, ktorých kapacita je malá, najviac niekoľko litrov za sekundu, by bolo neekonomické budovať vápenné hospodárstvo. Na úpravu hodnoty pH sa tu používa dávkovanie roztoku hydroxidu sodného.

### **Sóda**

V niektorých úpravovňách, ktoré upravujú kyslejšiu prírodnú vodu sa ako činidlo zvyšujúce hodnotu pH používa aj sóda, ktorá sa bežne používa v potravinárstve. Ide predovšetkým o úpravovne, ktoré sa nachádzajú v chránených územiach, kde nie je možné vybudovať vápenné hospodárstvo, alebo sú tieto úpravovne horšie prístupné, a doprava vápna do týchto miest by bola veľmi komplikovaná. Sóda sa dodáva v práškovej podobe, a na dávkovanie sa pripraví roztok o príslušnej koncentrácii.

### **Chlór, chlórnan sodný**

Pitná voda dodávaná spotrebiteľovi musí byť hygienicky ošetrená. Jednou z možností hygienického zabezpečenia vody je jej chlorácia. Tú je možné aplikovať dávkovaním plynného chlóru, alebo roztoku chlornanu sodného do upravenej vody.

### **Manganistan draselný**

Niektoré druhy podzemných a povrchových vôd obsahujú zvýšené množstvo rozpusteného železa a mangánu. Tieto prvky nie sú zdraviu škodlivé, ale môžu spôsobovať hnedé zafarbenie vody. Aby ich bolo možné pri úprave vody odstrániť, je potrebné ich previesť z formy rozpustenej na formu nerozpustenú, ktorú je možné potom odstrániť v pieskových filtroch. K tejto reakcii zvanej oxidácia sa používa manganistan draselný, taktiež nazývaný hypermangan.

### **Kyslík**

Tento plyn je pri úprave vody používaný v prípade, že voda obsahuje zvýšené množstvo železa, alebo mangánu. Do úpravovne vody je kyslík dodávaný v tlakových nádobách, z ktorých sa dávkuje do vody. Kyslík oxiduje železo a mangán na nerozpustenú formu, ktorá sa následne odstráni v pieskových filtroch.

### **Ozón**

Tento plyn sa vyrába priamo v úpravovni vody zo vzdušného, alebo čistého kyslíka pomocou elektrického výboja. V niektorých úpravovňách sa tento plyn používa ako prostriedok pre oxidáciu látok prítomných vo vode. Ozón je veľmi nestály a vo vode sa spätne rozpadá na kyslík. Okrem oxidačných účinkov má aj dezinfekčné účinky, pretože je schopný hubiť prítomné mikroorganizmy.

## Oxid uhličitý

Niektoré druhy prírodných vôd sú veľmi málo mineralizované. Mineralizácia týchto vôd sa prevádza spoločným dávkovaním vápna a oxidu uhličitého do upravenej vody.

Výhody použitia týchto činidiel spočívajú v urýchlení sedimentácie vločiek a následnom zlepšení možnosti odfiltrovania. Naproti tomu sú tieto činidlá v porovnaní s ostatnými nákladmi na čistenie vody pomerne drahé, a preto je veľmi dôležité nastaviť správne parametre flokulácie, aby bola účinnosť procesu čo najvyššia.

### 2.3. Hodnotenie priebehu flokulácie

Hodnotenie samotného účinku flokulácie, je bežne založené na kritériách čistej vody, a to pre povrchovú a upravenú vodu. (Ying, 2011) Sledované vlastnosti sú venované vzniknutému kalu, a to veľkosť a štruktúra vzniknutých častíc, rýchlosť sedimentácie, filtrovateľnosť, čas flokulácie. Pri hodnotení je veľmi dôležité zohľadniť aj podmienky miešania. (CHO a kol. 2006)

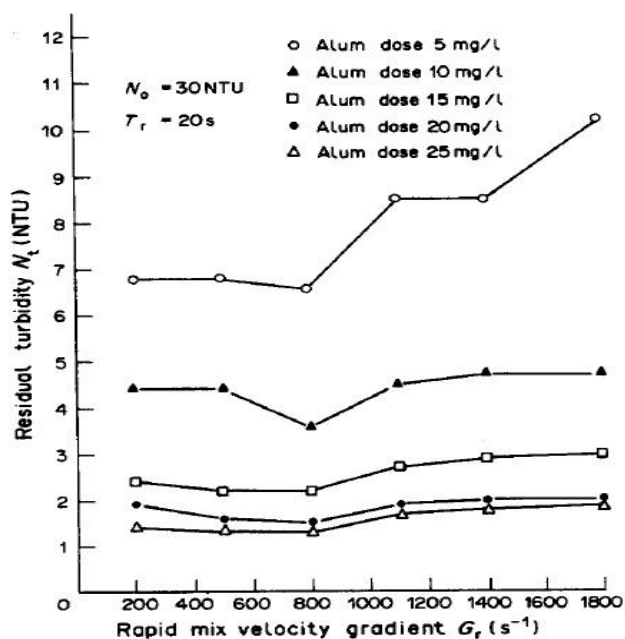
### 2.4. Vplyv miešania

*„Keďže koagulácia – flokulácia závisí na niekoľkých nezávislých premenných, fyzikálnych aj chemických, je nutné použiť experimentálnu metódu, ktorá umožňuje udržať čo najviac parametrov na konštantnej hodnote počas štúdie zvoleného parametru.“* (Mhaisalkar a kol. 1991)

Súčasný výskum sa snažia z tohto spôsobu vychádzať, a snažia sa zamerať na vyhodnotenie hlavných fyzikálnych parametrov miešania ako sú otáčky, čas miešania a geometria nádoby na proces flokulácie.

Mhaisalkar a kol. (1991) uskutočnili výskum zameraný na intenzitu miešania a na sedimentáciu. Vzorky boli umiestnené v nádobách s podstavou štvorca a s kruhovou podstavou, kde časť nádob mala narážky a druhá časť bola bez narážok. Narážky boli štyri a boli rovnomerne rozmiestnené v nádobách po celej výške. Rozmery nádob boli usporodované tak, aby výška hladiny bola rovnaká v každej nádobe bez ohľadu na geometriu. Ako koagulačné činidlo bol použitý síran hlinitý o koncentrácii 2% (5, 10, 15, 20, 25 mg/l). Všetky chemické parametre, ktoré vplyvajú na koaguláciu a flokuláciu boli udržiavané na konštantnej hladine, pracovalo sa jedine s fyzikálnymi parametrami. Výskum prebehol na troch druhoch vody s nízkou, strednou a vysokou mierou zákalu. Parametre pomalého miešania a sedimentácie boli konštantné počas celého experimentu. Zvyškový zákal bol použitý na posúdenie účinnosti procesu. Upravované parametre pre experiment boli rýchlostný gradient (200, 500, 800, 1100, 1400, 1800 s<sup>-1</sup>) a čas miešania (20, 40, 60 s).

Obrázok 2.3 Závislosť zvyškového zákalu na rýchlostnom gradiente



Zdroj: MHAISALKAR, A. V., PARAMASIVAM, R., BHOLE, G. A. Optimizing physical parameters of rapid mix design for coagulation – flocculation of turbid waters. In Water Research 25 (1), January 1991; p. 43-52.

Jedna časť výskumu bola zameraná na množstvo zvyškového kalu, test prebehol na všetkých 3 druhoch vody. Pre rýchlostný gradient 200 až  $800 s^{-1}$  sa množstvo zvyškového kalu takmer nemenilo, v jedinom prípade a to pre použité množstvo koagulačného činidla 10 mg/l sa pri najvyšších otáčkach množstvo zvyškového kalu znížilo. Tento trend sa potvrdil pri všetkých časoch miešania.

V druhej časti sledovali množstvo a veľkosť vzniknutých vločiek. V sledovanom vzorku s nízkou mierou zákalu vody (čas miešania 40s, rýchlostný gradient 450 až  $750 s^{-1}$ , množstvo koagulačného činidla 16mg/l) test ukázal, že s nárastom otáčok sa zväčšovalo aj množstvo a veľkosť vzniknutých vločiek. Uviedli však, že aj pri nižších otáčkach by mohli dosiahnuť vločky veľkosti ako pri vyšších otáčkach, ak by bola doba miešania dlhšia. Tento výsledok sa nepotvrdil pri väčších množstvách počiatočného zákalu vody, tam sa zo zvyšovaním otáčok veľkosť vzniknutých vločiek začala znižovať pri gradiente  $400 s^{-1}$ .

V ich výskume presvedčivo ukázali, že fyzikálne parametre rýchleho miešania ako sú veľkosť otáčok, čas miešania a geometria nádoby majú veľký vplyv na proces flokulácie a že ich optimálna kombinácia je závislá na zákale suspenzie. Ďalej zistili, že pre danú suspenziu a geometriu nádoby existuje optimálna kombinácia otáčok a času miešania, ktorá umožňuje flokulačným časticiam dosiahnuť štruktúrnu rovnováhu, nutnú pre ich efektívne spájanie a následné odstránenie sedimentáciou. Výskum ukázal, že nádoba s podstavou štvorca s narážkami získala v porovnaní s ostatnými geometriami najlepšie výsledky.

Lin a kol. (2013) skúmali vplyv rýchleho miešania (otáčok) na stabilitu a pevnosť vločiek. Ďalej skúmali vplyv vysoko-rýchleho miešania použitím vysoko-rýchlostného mixéru (rýchlostný gradient  $>5000 \text{ s}^{-1}$ ) na účinnosť flokulácie. Ako vzorky boli použité povrchové vody s nízkou a vysokou mierou zákalu. Koncentrácia rozpusteného organického uhlíku (DOC) s veľmi zakalenou vodou bola vyššia ako s málo zakalenou vodou. Ako koagulačné činidlo bol použitý polyaluminum chlorid (PACL) o koncentrácii 10%. Analyzátor veľkosti častíc s malým uhlom rozptylu laseru bol použitý na sledovanie dynamiky agregácie častíc počas koagulácie.

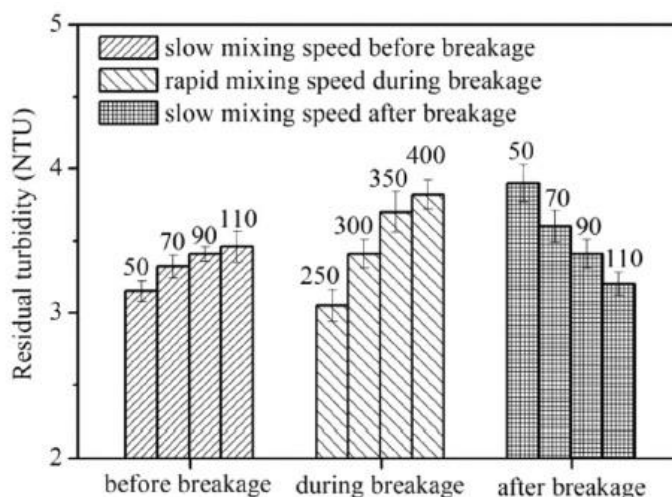
Zistili, že pri optimálnej dávke činidla zvyškový zákal a DOC je možné účinne znížiť zvýšením otáčok vo fáze rýchleho miešania. Vzniknuté vločky sú pevnejšie s rýchlym miešaním vo vode s nízkou mierou zákalu, ale intenzita rýchleho miešania vo vode s vysokou mierou zákalu má obmedzený efekt na pevnosť vločiek. Použitím vysoko-rýchlostného mixéru, sa môže účinnosť odstránenia zákalu a DOC zvýšiť.

Yukselen a kol. (2004) sa v ich výskume zamerali na rozpad vločiek a ich následnú schopnosť reverzibility. Deštrukcia vzniknutých vločiek prebiehala pri  $520 \text{ s}^{-1}$ , následne sa hodnota gradientu znížila na  $23 \text{ s}^{-1}$ . Ako činidlá použili koagulanty na báze hliníka a komerčné koagulanty s polyelectrolytami.

Na základe použitých podmienok u koagulantov na báze hliníka nastala rýchlejšia fáza tvorby vločiek ako u koagulantov s polyelectrolytami. Avšak vločky u koagulantov s polyelektrolitami boli významne väčšie ako u tých s hliníkom, čo prisúdili zvýšenej väzbovej sile medzi časticami.

Nan a kol. (2016) skúmali vplyv rýchlosti miešania na nový rast vločiek v troch fázach, a to pred rozpadom, počas rozpadu a po rozpade. Vlastnosti boli sledované optickým pozorovaním voľným okom a digitálnou obrazovou analýzou. Následne boli výsledky porovnávané na základe rôznych vplyvov. Ako vzorka bola použitá znečistená voda s pridaným obsahom kaolínu a kyseliny kumínovej. Ako koagulačné činidlo bol použitý polyaluminium chlorid. Za účelom zistenia vplyvu rôznych rýchlostí na vločky najskôr premiešali suspenziu (rýchlostný gradient  $175 \text{ s}^{-1}$ , čas miešania 90s), nasledovalo pridanie koagulantu a zníženie otáčok miešadla (rýchlostný gradient od 7 do  $27 \text{ s}^{-1}$ , čas miešania 20min). Ďalej sa suspenzia premiešala počas 1 minúty (rýchlostný gradient  $114 \text{ s}^{-1}$ ), vďaka čomu sa vločky rozbili, a nakoniec boli nastavené parametre tak, aby bol zabezpečený ďalší rast vločiek (gradient  $19 \text{ s}^{-1}$ , čas 10min). Na konci každého testu prebehla po dobu 20min sedimentácia, na zistenie zvyškového zákalu, ktorý reflektoval efektívnosť koagulácie. Na zistenie vlastností vločiek bola použitá Fraktálová teória.

Obrázok 2.4 Závislosť zvyškového zákalu na rýchlostnom gradiente



Zdroj: NAN, J., WANG, Z., YAO, M., YANG, Y., ZHANG, X. Characterization of re-grown floc size and structure: effect of mixing conditions during floc growth, breakage and re-growth process. In *Environmental Science and Pollution Research* 23 (23), December 2016; p. 23750-23757.

Pri skúmaní rýchlosti miešania na efektívnosť flokulácie zistili, že pri zvyšovaní otáčok počas rozpadu sa zvyšovalo aj množstvo zvyškového zákalu, čo znamená, že novoutvorené vločky je následne ťažšie odstrániť sedimentáciou. Je však treba spomenúť, že pre štádium po rozbití vločiek sa po zvýšení otáčok hodnota zvyškového zákalu znížila. Ďalej sa ukázalo, že vločky dosahovali najväčších rozmerov pri najpomalšom miešaní. Vyššia pomalá rýchlosť po rozbití vločiek má za následok menšiu priemernú veľkosť po rozbití a následnom raste, avšak to zabezpečí lepšiu rast a pevnejšiu stavbu menších vločiek.

Ako sa ukázalo pri viacerých výskumoch, ich výsledky sa môžu mierne líšiť, čo môže byť dôsledkom iných vstupných parametrov pri skúmaní flokulácie.

V súvislosti s vyššie spomenutými výskumami je treba podotknúť, že „*hoci by mal proces koagulácie pri úprave vody zabrániť rozpadu vločiek v čo najväčšej miere, rozpad a nový rast vločiek sa v praxi vyskytuje, pretože oblasti veľkých šmykových síl sú prevládajúce.*“ (Nan a kol. 2016)

## 2.5. Modely flokulácie

Thomas a kol. (1999) rozdelili modely flokulácie na základe ich reálnej použiteľnosti a na základe predošlých publikácií modelov flokulácie.

### 2.5.1. Mikroskopický model

Tento model predstavuje príležitosť jednoduchšieho modelovania, no opiera sa o empirické meranie pomocou experimentálnych výsledkov, je založený na charakterizácii systému prostredníctvom fraktálneho rozmeru ako funkcie času.

$$X = \alpha \cdot \beta(i, j) \cdot n_i \cdot n_j \quad (2.1)$$

kde:

X	predstavuje rýchlosť flokulácie
$\alpha$	je kolízna účinnosť
$\beta$ (i,j)	je frekvencia kolízií medzi časticami o veľkosti i a j
$n_i, n_j$	sú koncentrácie častíc pre častice o veľkosti i a j

Frekvencia kolízií  $\beta$  je funkciou spôsobu flokulácie, to znamená perikinetickú, alebo ortokinetickú flokuláciu. Funkciou stupňa destabilizácie častíc je  $\alpha$ , čím väčší je stupeň destabilizácie, tým väčšia je hodnota  $\alpha$ .

Avšak Thomas a kol. (1999) uvádzajú, že experimentálne výsledky založené na idealizovaných suspenziách budú nepravdepodobne popisovať reálne chovanie systému. Taktiež uvádzajú, že zameranie sa na mikroskopické správanie sa skutočných častíc v snahe odvodiť korelácie medzi parametrami procesu (napríklad intenzitou miešania, dávkovaním koagulantu) a kinetikou flokulácie (t.j. kolíznou schopnosťou) by bolo veľmi náročné.

### 2.5.2. Makroskopický model

Thomas a kol. (1999) odporúčajú namiesto spoliehania sa na empirické merania, zamerať sa na makroskopické merania flokulácie. Makroskopický model sleduje fraktálny rozmer D, vločiek vytvorených počas flokulácie.

Šulc (2003) zistil, že kinetika flokulácie vyjadrená ako závislosť reziduálneho znečistenia na čase flokulácie môže byť vyjadrená vzorcom:

$$Z_r^* = A \cdot \log^2(t_F^*) + B \cdot \log(t_F^*) + C \quad (2.2)$$

Závislosť reziduálneho znečistenia na dávke flokulantu:

$$Z_r^* = A \cdot \log^2(D_F) + B \cdot \log(D_F) + C \quad (2.3)$$

kde:

$Z_r^*$	je stupeň reziduálneho znečistenia v bezrozmernom čase $t_F^*$ (-)
$t_F^*$	je bezrozmerná doba flokulácie (-)
A, B, C	parametre modelu
$D_F$	je dávka flokulantu (ml/l)

# METODICKÁ ČASŤ

## 3. Flokulačná krivka

### 3.1. Účinnosť flokulácie

Účinnosť flokulácie bola hodnotená na základe reziduálneho znečistenia.

Stupeň zbytkového (reziduálneho) znečistenia definuje vzťah

$$Z_r^*(t_F) = \frac{Z_r(t_F)}{Z_{r0}} \quad (3.1)$$

kde:

$Z_r(t_F)$  je zbytkový (reziduálny) zákal v čase flokulácie  $t_F$  (FNU)

$Z_{r0}$  je počiatočný zákal pred flokuláciou (FNU)

### 3.2. Doba flokulácie

Šulc (2003) zistil, že kinetika flokulácie vyjadrená ako závislosť reziduálneho znečistenia  $Z_r^*$  na čase flokulácie  $t_F$  môže byť vyjadrená jednoduchým vzorcom:

$$Z_r^* = A \cdot \log^2(t_F^*) + B \cdot \log(t_F^*) + C \quad (3.2)$$

kde:

$Z_r^*$  je stupeň reziduálneho znečistenia v bezrozmernom čase  $t_F^*$  (-)

$t_F^*$  je bezrozmerná doba flokulácie (-)

A, B, C parametre

V miešanej nádobe je doba flokulácie v bezrozmernej podobe definovaná pre flokuláciu tak, aby brala do úvahy počet priechodov vložky oblasťou miešadla:

$$t_F^* = n \cdot t_F \quad (3.3)$$

kde:

n sú otáčky miešadla ( $\text{min}^{-1}$ )

$t_F$  je doba flokulácie (min)

Na základe rovnice 3.2 bola navrhnutá generalizovaná korelácia pre kinetiku flokulácie v miešanej nádobe, ktorá zohľadňuje rozbiehanie vložiek.

$$\Delta Z_r^* = 1 \cdot (\Delta [nt_F]_{\log}^*)^2 \quad (3.4)$$

kde:

$$\Delta Z_r^* = \frac{1}{A^*} \cdot \frac{Z_r^* - Z_{r_{\min}}^*}{Z_{r_{\min}}^*} \quad (3.5)$$

$$\Delta [nt_F]_{\log}^* = \frac{\log(nt_F) - \log([nt_F]_{\min})}{\log([nt_F]_{\min})} \quad (3.6)$$

kde:

$Z_{r_{\min}}^*$  je minimálny stupeň reziduálneho znečistenia (-)



$[nt_F]_{min}$  je bezrozmerný čas flokulácie (-), v ktorom môže byť  $Z_r^*_{min}$  dosiahnutý  
 $A^*$  je súčiniteľ zmeny reziduálneho znečistenia daný vzťahom

$$A^* = \frac{1}{\left(\frac{4 \cdot A \cdot C}{B^2} - 1\right)} = \frac{B^2}{4 \cdot A \cdot C - B^2} \quad (3.7)$$

Z konštant polynómu 3.2 sa určí  $(nt_F)_{min}$

$$\log([nt_F]_{min}) = -\frac{B}{2 \cdot A} \quad (3.8)$$

následne spätným dosadením sa určí  $Z_r^*_{min}$

$$Z_r^*_{min} = A \cdot \log^2([nt_F]_{min}) + B \cdot \log([nt_F]_{min}) + C \quad (3.9)$$

Pri použití tejto generalizovanej korelácie a premenných  $\Delta Z_r^*$ ,  $\Delta [nt_F]_{log}^*$  by sa mali krivky rôznych závislostí odmeraných za rôznych podmienok premietnuť do jednej paraboly  $\Delta Z_r^* = 1 \cdot (\Delta [nt_F]_{log}^*)^2$  s vrcholom v počiatku súradnicového systému transformovaných súradníc.

## 4. Sedimentačná krivka

### 4.1. Účinnosť sedimentácie

Účinnosť sedimentácie bola hodnotená na základe stupňa reziduálneho znečistenia.

Stupeň reziduálneho znečistenia definuje vzťah

$$Z_r^*(t_{sed}) = \frac{Z_r(t_{sed})}{Z_{r0}} \quad (4.1)$$

kde:

$Z_r(t_{sed})$  je zbytkový (reziduálny) zákal v čase sedimentácie  $t_{sed}$  (FNU)  
 $Z_{r0}$  je počiatočný zbytkový zákal pri sedimentácii (FNU)

### 4.2. Model

Pri vyhodnotení priebehu sedimentácie bolo zistené, že priebeh sedimentácie sa dá popísať pomocou S-krivky v tvare:

$$y = \frac{1}{1 + \exp(a_0 + a_1 \cdot x)} \quad (4.2)$$

kde:

$$y = (Z_r^*(t_{sed}) - Z_r^*_{min}) / (1 - Z_r^*_{min}) \quad (4.3)$$

$$x = (t_{sed} / t_{sed50}) \quad (4.4)$$

$$Z_r^*_{min} = \frac{Z_{rmin}}{Z_{r0}} \quad (4.5)$$

kde:	
$Z_{r\ min}^*$	je minimálna dosiahnutá hodnota stupňa reziduálneho znečistenia (-)
$t_{sed50}$	je čas sedimentácie, v ktorom bola dosiahnutá hodnota $Z_r^* = 0,5$ (min)
$Z_{r\ min}$	je minimálny zbytkový (reziduálny) zákal po sedimentácii (FNU)

## 5. Zväčšovanie mierky

Keďže je flokulácia veľmi zložitý proces ovplyvnený mnohými premennými, musia byť stanovené kritéria pre aplikáciu v priemyselnej mierke.

Pretože bol tento experiment pripravovaný a skúmaný v laboratórnych podmienkach, je treba stanoviť podmienky pre aplikáciu vo väčšej mierke. V tejto práci je skúmaný vplyv dávky flokulantu a čas flokulácie na účinnosť flokulácie pri rovnakých podmienkach. Pri splnení rovnakých kritérií môže byť očakávaná podobná účinnosť flokulácie.

Vločky sú počas miešania vytvárané v dôsledku kolízií medzi sebou, zvýšenie intenzity miešania má za následok častejšie kolízie a tým efektívnejšiu tvorbu vločiek. Avšak, ak je intenzita miešania príliš vysoká môžu turbulentné šmykové sily zapríčiniť rozpad už utvorených vločiek, čím sa zníži separačná účinnosť.

Šulc, Dítl (2009) skúmali vplyv uvedených parametrov na účinnosť flokulácie vo zväčšenej mierke. Ako dôležité kritéria pre podobnú účinnosť flokulácie vo zväčšenej mierke uviedli: intenzita miešania, čas flokulácie, chemické prostredie a separácia vločiek. Na základe ich výskumu navrhli na zväčšovanie mierky použiť tieto kritéria:

- Intenzita miešania:

$$\varepsilon_v = \frac{P}{V} = \textit{konšt.} \quad (5.1)$$

- Čas flokulácie:

$$t_F^* = n \cdot t_f = \textit{konšt.} \quad (5.2)$$

- Dávka flokulantu:

$$D_F = \textit{konšt.} \quad (5.3)$$

- Doba sedimentácie:

$$u_{sed} = \frac{H}{t_{sed}} = \textit{konšt.} \quad (5.4)$$

### 5.1. Prepočet podmienok na zväčšenie mierky

Prepočet podmienok pre nádobu o priemere  $\text{Ø}D_2$  z nádoby o priemere  $\text{Ø}D_1$  sa vypočíta podľa nasledujúcich vzťahov (Veličiny označené indexom 2 sa vzťahujú k nádobe o priemere  $\text{Ø}D_2$ , veličiny označené indexom 1 sa vzťahujú k nádobe o priemere  $\text{Ø}D_1$ ):

- Intenzita miešania:

V prípade, že príkonové číslo  $P_0 = \text{konšt.}$ , sa dá odvodiť:

$$\varepsilon_v = \frac{P}{V} = \frac{\rho \cdot n^3 \cdot d^5 \cdot P_0}{\approx d^3} \approx n^3 \cdot d^2 \quad (5.5)$$

určenie otáčok

$$n_1^3 \cdot d_1^2 = n_2^3 \cdot d_2^2 \quad (5.6)$$

- Čas flokulácie:

$$t_F^* = \frac{n_1 \cdot t_F}{n_2} \quad (5.7)$$

- Dávka flokulantu:

$$D_{F1} = D_{F2} \quad (5.8)$$

- Doba sedimentácie:

$$\frac{H_1}{t_1} = \frac{H_2}{t_2} \Rightarrow t_2 = \frac{H_2}{H_1} \cdot t_1 \quad (5.9)$$

kde:

$\varepsilon_v$	je merný objemový príkon ( $\text{W}/\text{m}^3$ )
P	je príkon miešadla (W)
V	je objem nádoby ( $\text{m}^3$ )
n	sú otáčky miešadla ( $\text{s}^{-1}$ )
$nt_F$	je bezrozmerná doba flokulácie (-)
$D_F$	je dávka flokulantu (ml/l)
$u_{\text{sed}}$	je sedimentačná rýchlosť (m/s)
H	je výška hladiny v nádobe (m)
$t_{\text{sed}}$	je doba sedimentácie (min)
d	je priemer miešadla (m)
$t_F$	je doba flokulácie (min)

## EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

### 6. Experimentálna aparatura

#### 6.1. Nádoba

Experiment prebiehal vo valcovej nádobe s plochým dnom a 4-ma narážkami o nasledovných parametroch:

Vnútorý priemer nádoby  $\text{ØD} = 190 \text{ mm}$

Výška hladiny v nádobe

$$\frac{H}{d} = 1 \Rightarrow H = 190 \text{ mm} \quad (6.1)$$

Narážky rozteč =  $90^\circ$

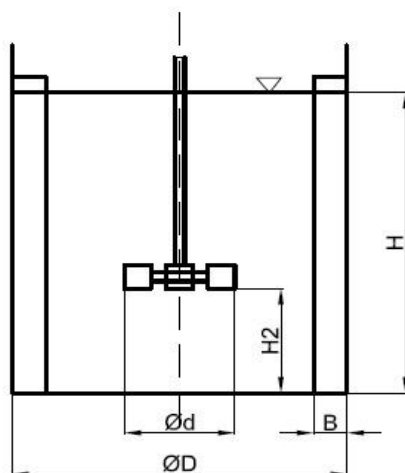
Šírka narážok

$$\frac{B}{D} = \frac{1}{10} \Rightarrow B = 20 \text{ mm} \quad (6.2)$$

## 6.2. Miešadlá

Na miešanie suspenzie bola použitá Rushtonova turbína ČSN 69 1021 o priemere  $\varnothing d = 66$  mm a šesť lopatkové miešadlo so šikmými lopatkami ČSN 69 1020 o priemere  $\varnothing d = 66$  mm. Miešadla boli umiestnené vo výške 66 mm od dna nádoby na spodok lopatky.

Obrázok 6.1 Schéma experimentálnej nádoby



### 6.2.1. Pohon miešadla

Na miešanie bola použitá pohonná jednotka EUROSTAR power control-visc. Pohonná jednotka bola nastavená na dopredu nastavené otáčky určené podľa vzťahu 5.5.

## 6.3. Meranie zákalu

Účinnosť flokulácie bola vyhodnocovaná podľa miery zákalu. Na sledovanie miery zákalu bol použitý prístroj MIQ/TC 2020 XT od firmy WTW so sondou so zabudovaným fotometrom. Prístroj meria zákal v jednotkách FNU ( Formazin Nephelometric Units ), ktoré sa najčastejšie používajú v súvislosti s normou ISO 7027 na meranie zákalu.

## 6.4. Látky použité v experimente

Na prípravu modelovej znečistenej vody bola použitá vodovodná voda a roztok kaolínu, ktorý bol pripravený v pomere 100g / 1l vody. Následne bol tento roztok kaolínu použitý na prípravu modelovej znečistenej vody o koncentráciách  $c_{k0} = 500, 750, 1000$  mg/l.

Ako flokulant bol použitý kopolymer akrylamidu a akrylátu sodného Sokoflok 16, ktorý bol dávkovaný ako vodný roztok o koncentrácii 0,1 % hm. Použité bezrozmerné dávky flokulantu boli  $D_f / c_{k0} = 0,26; 0,52; 1,04; 2,08; 3,04$  mg/g.

## 7. Postup merania

### 1) Príprava flokulantu

Použitý flokulant Sokoflok 16 bol pripravovaný vždy deň pred meraním, aby bol zaistený rovnaký účinok pre všetky merania.

### 2) Príprava modelovej znečistenej vody

Modelová znečistená voda bola pripravená zmiešaním roztoku kaolínu a vodovodnej vody, následne prebehla istá doba, kým sa dopredu pripravený roztok kaolínu premiešal vo vode a hodnota reziduálneho znečistenia sa ustálila. Pri každom ďalšom meraní bola pripravovaná nová dávka modelovej znečistenej vody.

### 3) Flokulácia

Flokulácia začala pridaním dávky flokulantu do modelovej znečistenej vody. Miera zákalu bola sledovaná po celú dobu flokulácie.

### 4) Sedimentácia

Po uplynutí doby flokulácie bol zastavený proces miešania a bola sledovaná miera zákalu pri sedimentovaní vzniknutých vločiek po celú dobu sedimentácie. Sedimentácia prebiehala až do momentu, keď sa zbytkový zákal ďalej neznižoval.

## 8. Vplyv dávky flokulantu a koncentrácie kaolínu na flokuláciu pre merný príkon $40 \text{ W/m}^3$

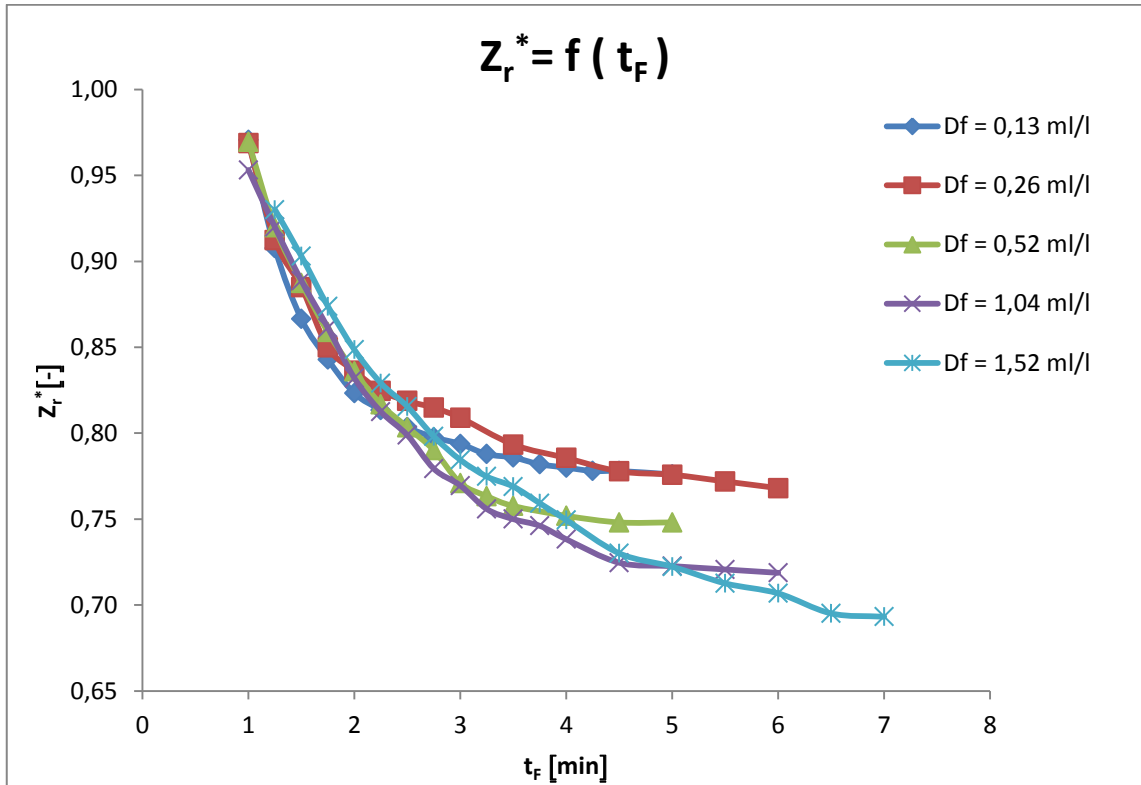
### 8.1. Kaolín, koncentrácia $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$

#### 8.1.1. Flokulačná krivka

##### Parametre merania:

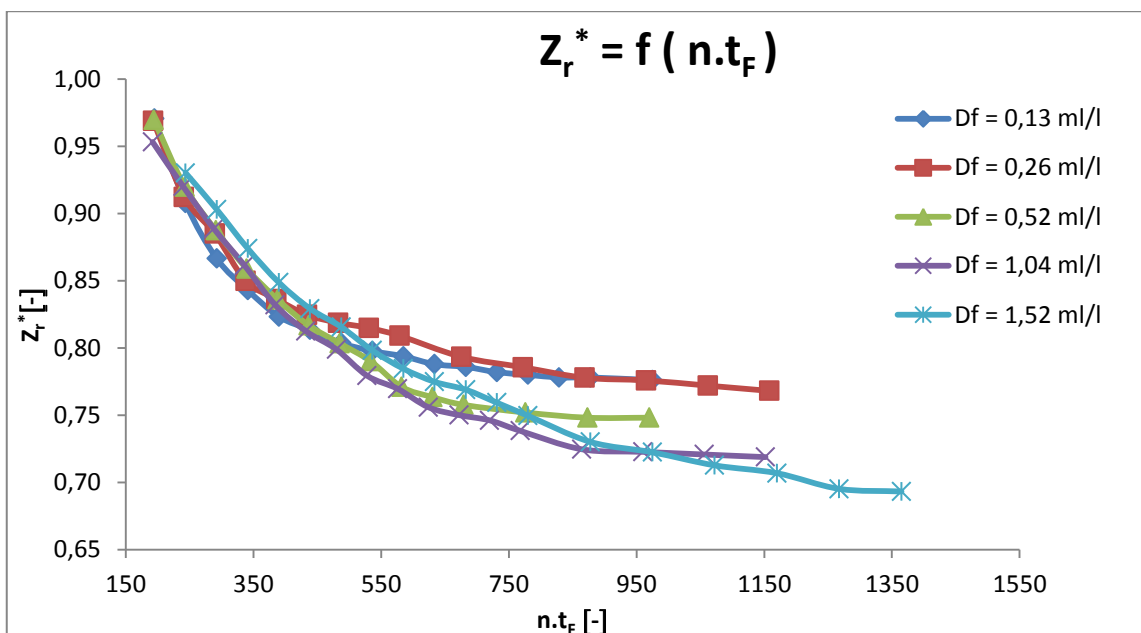
Koncentrácia	$c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$
Priemer nádoby	$D = 190 \text{ mm}$
Miešadlo	Rushtonova turbína $d = 66 \text{ mm}$
Intenzita miešania	$\mathcal{E}_v = 40 \text{ W/m}^3$
Otáčky	$n = 195 \text{ ot/min}$
Dávka flokulantu	$D_f = 0,13 - 1,52 \text{ ml/l}$

Obrázok 8.1 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na dobe flokulácie (kaolín  $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ )



S rastúcou dobou flokulácie dochádza k znižovaniu reziduálneho (zbytkového) znečistenia  $Z_r^*$ . Hodnota znečistenia klesá až do určitej minimálnej hodnoty, kedy už sa za daných podmienok ďalšie vločky netvoria, alebo už nerastú. S rastúcou dávkou flokulantu sa znižovalo aj zbytkové znečistenie, no narastal čas miešania, ktorý bol potrebný pre rast vločiek a dosiahnutie minimálneho zbytkového znečistenia.

Obrázok 8.2 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na bezrozmernej dobe flokulácie (kaolín  $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ )



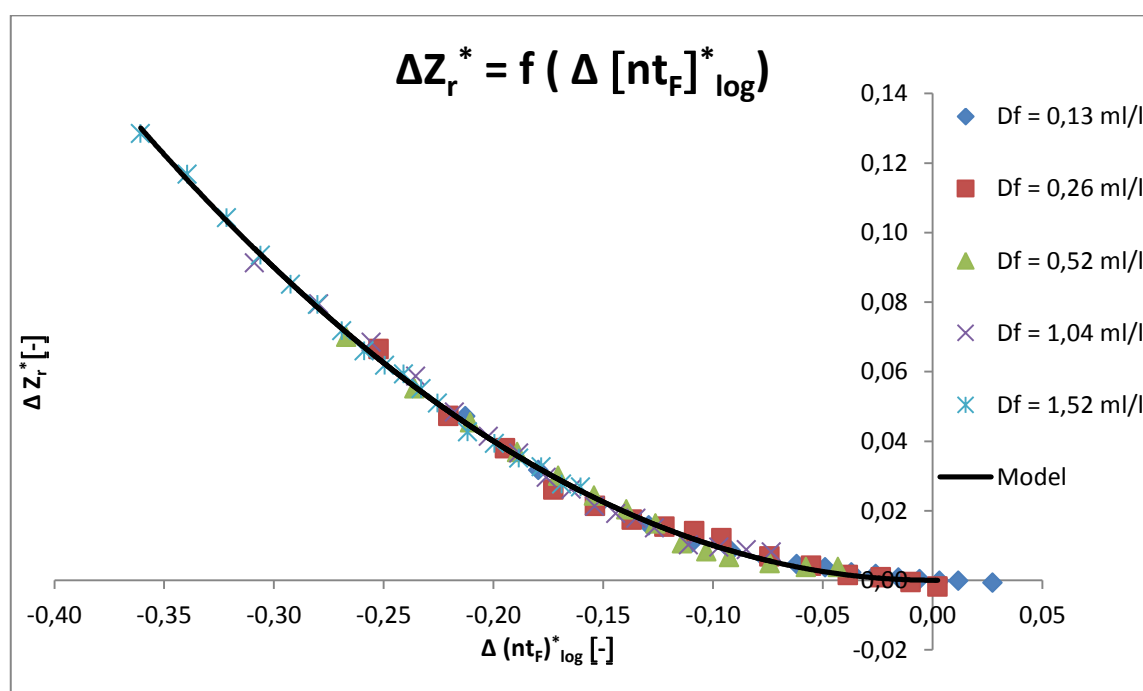
## Generalizovaná korelácia flokulácie

Namerané údaje boli vyhodnotené pomocou generalizovanej korelácie (3.4). Parametre modelu sú uvedené v tabuľke 8.1. Na obrázku 8.3, ktorý porovnáva experimentálne dáta a generalizovanú koreláciu, je vidieť, že podobnosť medzi experimentálnymi dátami a modelom je vysoká.

Tabuľka 8.1 Parametre generalizovanej korelácie: vplyv dávky –  $c_{K0} = 500 \text{ mg/l}$ ,  $\varepsilon_v = 40 \text{ W/m}^3$

$D_f$ [ml/l]	$n$ [1/min]	$Z_r^* \text{ min}$ [-]	$A^*$ [-]	$(nt_f)_{\text{min}}$ [-]
0,13	195	0,7786	5,2264	812
0,26	193	0,7733	3,7986	1139
0,52	194	0,7354	4,5450	1322
1,04	192	0,6958	4,0507	2013
1,52	195	0,6307	3,6962	5418

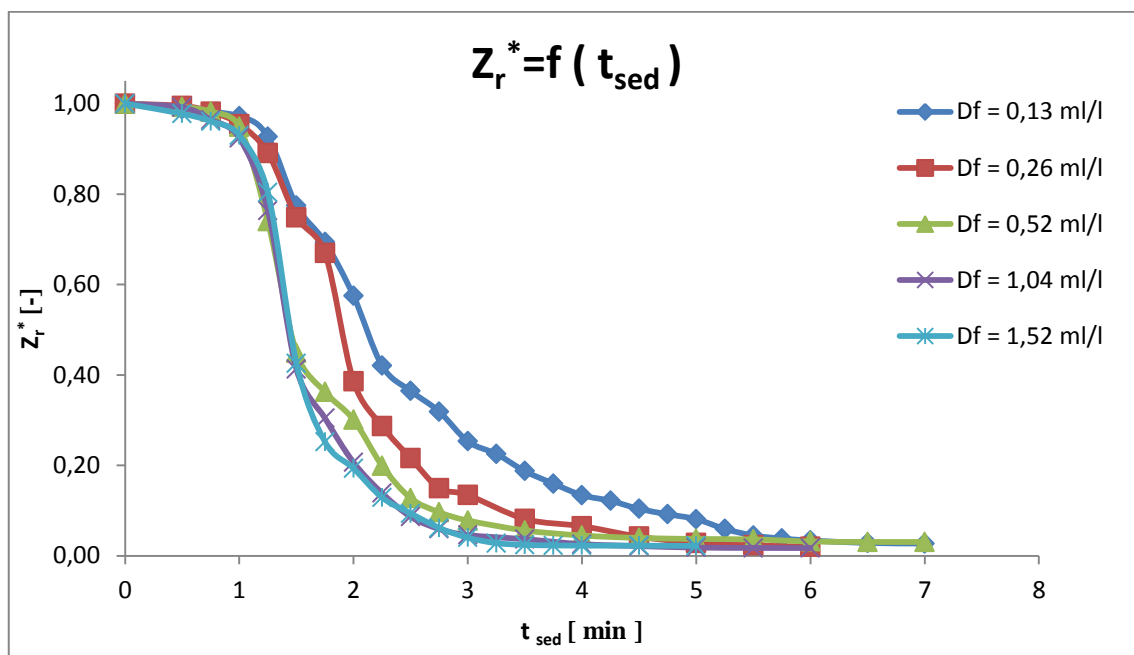
Obrázok 8.3 Generalizovaná korelácia pre kinetiku flokulácie v miešanej nádobe (kaolín  $c_{K0} = 500 \text{ mg/l}$ )



### 8.1.2. Sedimentačná krivka

V momente keď bola dosiahnutá minimálna hodnota zákalu pri flokulácii, miešadlo bolo zastavené, a vytvorené vločky sa nechali sedimentovať.

Obrázok 8.4 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na dobe sedimentácie (kaolín  $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ )



S rastúcou dobou sedimentácie dochádza k znižovaniu stupňa reziduálneho znečistenia  $Z_{r\ sed}^*$ . Pri daných otáčkach trvalo približne minútu kým sa pohyb suspenzie ustálil a vločky začali sedimentovať. S rastúcou dávkou flokulantu sa doba potrebná pre sedimentáciu všetkých vločiek skracovala, pričom všetky dávky flokulantu dosiahli po sedimentácii podobnú hodnotu reziduálneho zákalu, čo mohlo byť spôsobené nízkymi otáčkami pri flokulácii, kedy nedochádzalo k rozbíjaniu už vytvorených vločiek. Najkratšiu dobu sedimentácie dosiahla najvyššia dávka flokulantu.

### Generalizovaná korelácia sedimentácie

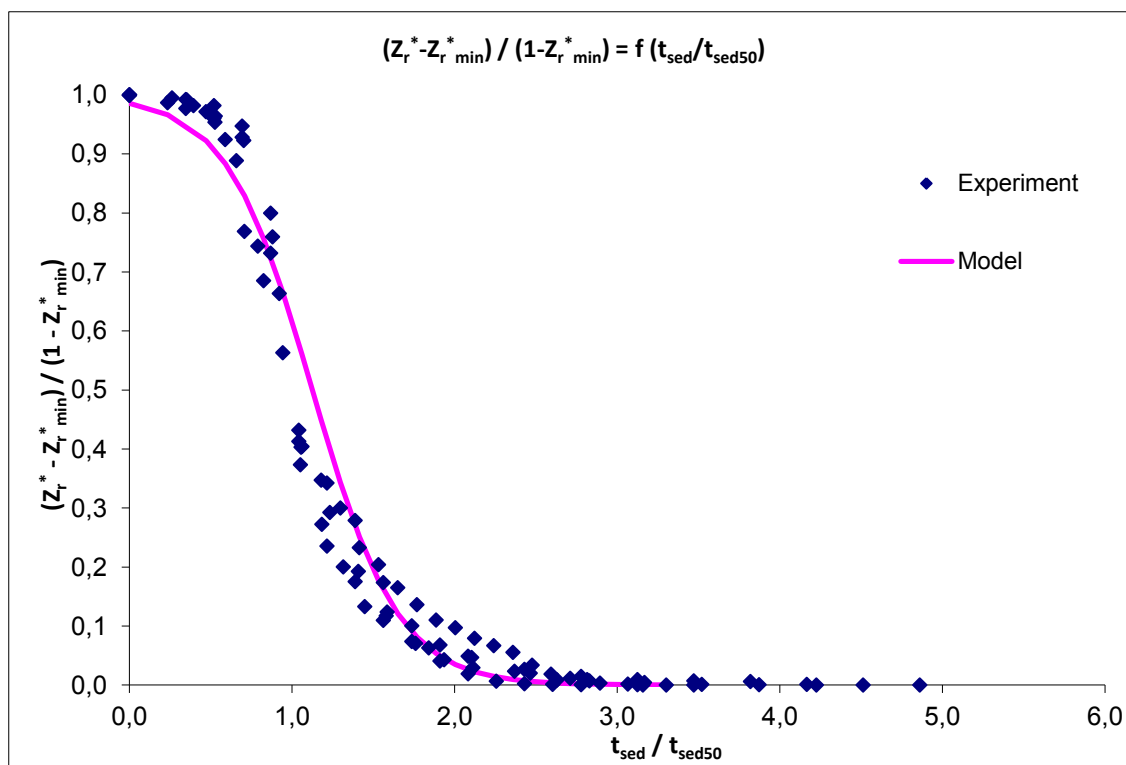
Namerané údaje boli vyhodnotené pomocou generalizovanej korelácie (4.2), založenej na modeli S - krivky. Parametre sedimentačného modelu sú uvedené v tabuľke 8.2. Na obrázku 8.5, ktorý porovnáva experimentálne dáta a model, je vidieť, že zhoda medzi experimentálnymi dátami a modelom je veľmi dobrá.

Tabuľka 8.2 Parametre generalizovanej korelácie pre sedimentáciu: vplyv dávky –  $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ ,  $\epsilon_v = 40 \text{ W/m}^3$

$D_f$ [ml/l]	$n$ [1/min]	$Z_{r\ min\ sed}^*$ [-]	$t_{sed50}$ [min]
0,13	0	0,0271	2,12
0,26	0	0,0198	1,90
0,52	0	0,0306	1,44
1,04	0	0,0171	1,42
1,52	0	0,0218	1,44



Obrázok 8.5 Generalizovaná korelácia pre sedimentáciu (kaolín  $c_{k0}=500$  mg/l)



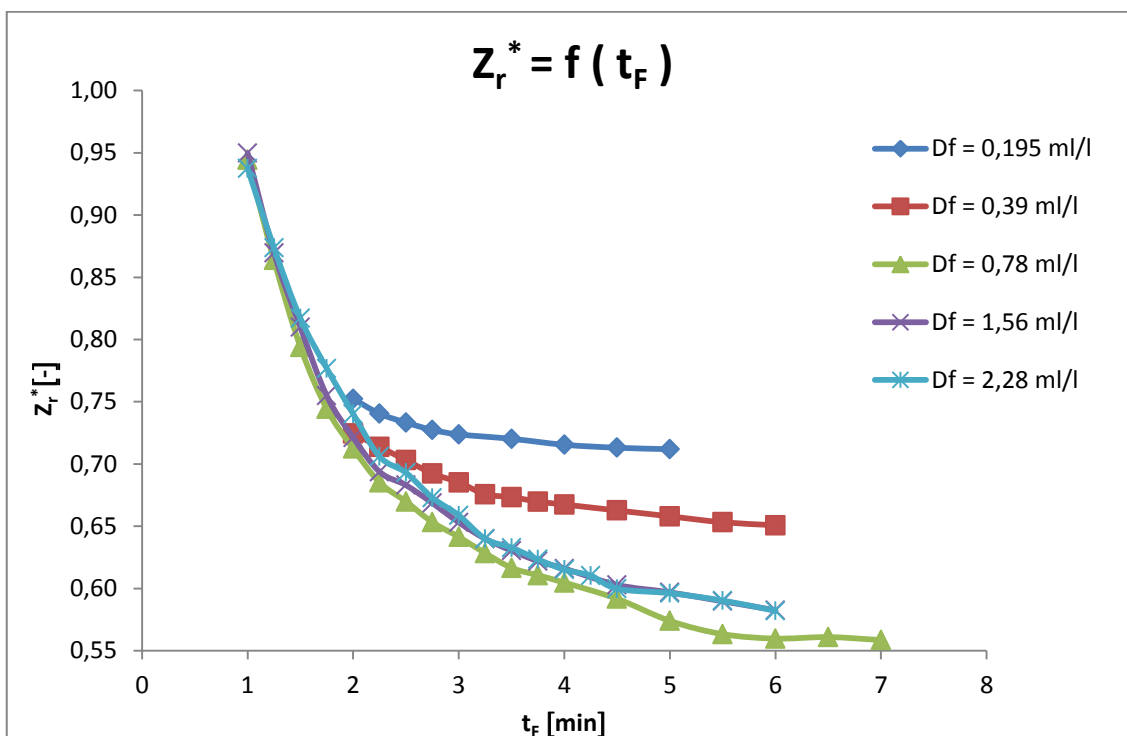
## 8.2. Kaolín, koncentrácia $c_{k0} = 750$ mg/l

### 8.2.1. Flokulačná krivka

#### Parametre merania:

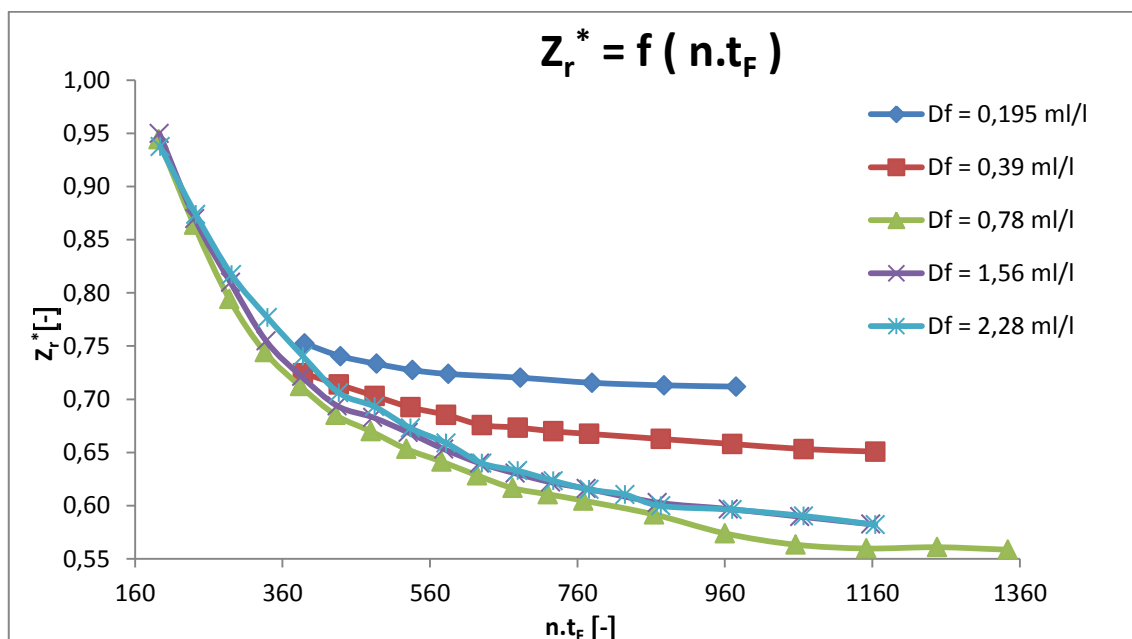
Koncentrácia	$c_{k0} = 750$ mg/l
Priemer nádoby	$D = 190$ mm
Miešadlo	Rushtonova turbína $d = 66$ mm
Intenzita miešania	$\mathcal{E}_v = 40$ W/m <sup>3</sup>
Otáčky	$n = 195$ ot/min
Dávka flokulantu	$D_f = 0,195 - 2,28$ ml/l

Obrázok 8.6 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na dobe flokulácie (kaolín  $c_{k0} = 750 \text{ mg/l}$ )



S rastúcou dobou flokulácie dochádza k znižovaniu reziduálneho (zbytkového) znečistenia  $Z_r^*$ . Hodnota znečistenia klesá až do určitej minimálnej hodnoty, kedy už sa za daných podmienok ďalšie vločky netvoria, alebo už nerastú. S rastúcou dávkou flokulantu sa znižovalo aj zbytkové znečistenie, no narastal čas miešania, ktorý bol potrebný pre rast vločiek a dosiahnutie minimálneho zbytkového znečistenia. Najnižšiu hodnotu minimálneho reziduálneho znečistenia dosiahla dávka flokulantu 0,78 ml/l, pri ďalšom zvyšovaní dávky sa už hodnota minimálneho znečistenia nezlepšovala, dokonca sa znižovala, čo bolo pravdepodobne spôsobené čiastočne vyššou počiatočnou hodnotou zákalu.

Obrázok 8.7 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na bezrozmernej dobe flokulácie (kaolín  $c_{k0} = 750 \text{ mg/l}$ )



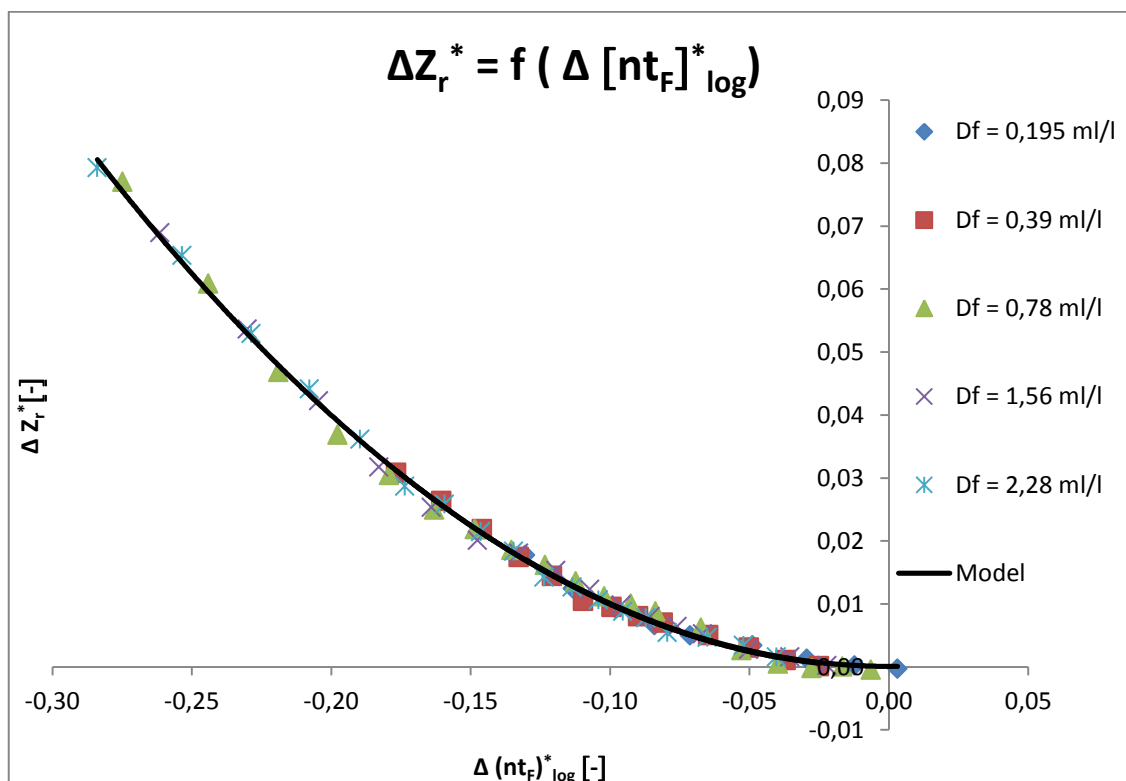
### Generalizovaná korelácia flokulácie

Namerané údaje boli vyhodnotené pomocou generalizovanej korelácie (3.4). Parametre modelu sú uvedené v tabuľke 8.3. Na obrázku 8.8, ktorý porovnáva experimentálne dáta a generalizovanú koreláciu, je vidieť, že podobnosť medzi experimentálnymi dátami a modelom je vysoká.

Tabuľka 8.3 Parametre generalizovanej korelácie: vplyv dávky –  $c_{k0} = 750 \text{ mg/l}$ ,  $\epsilon_v = 40 \text{ W/m}^3$

$D_f$ [ml/l]	$n$ [1/min]	$Z_{r \text{ min}}^*$ [-]	$A^*$ [-]	$(nt_f)_{\text{min}}$ [-]
0,195	195	0,7126	3,1412	954
0,39	193	0,6506	3,6827	1395
0,78	194	0,5608	8,8827	1409
1,56	192	0,5885	8,9014	1243
2,28	195	0,5748	7,9602	1566

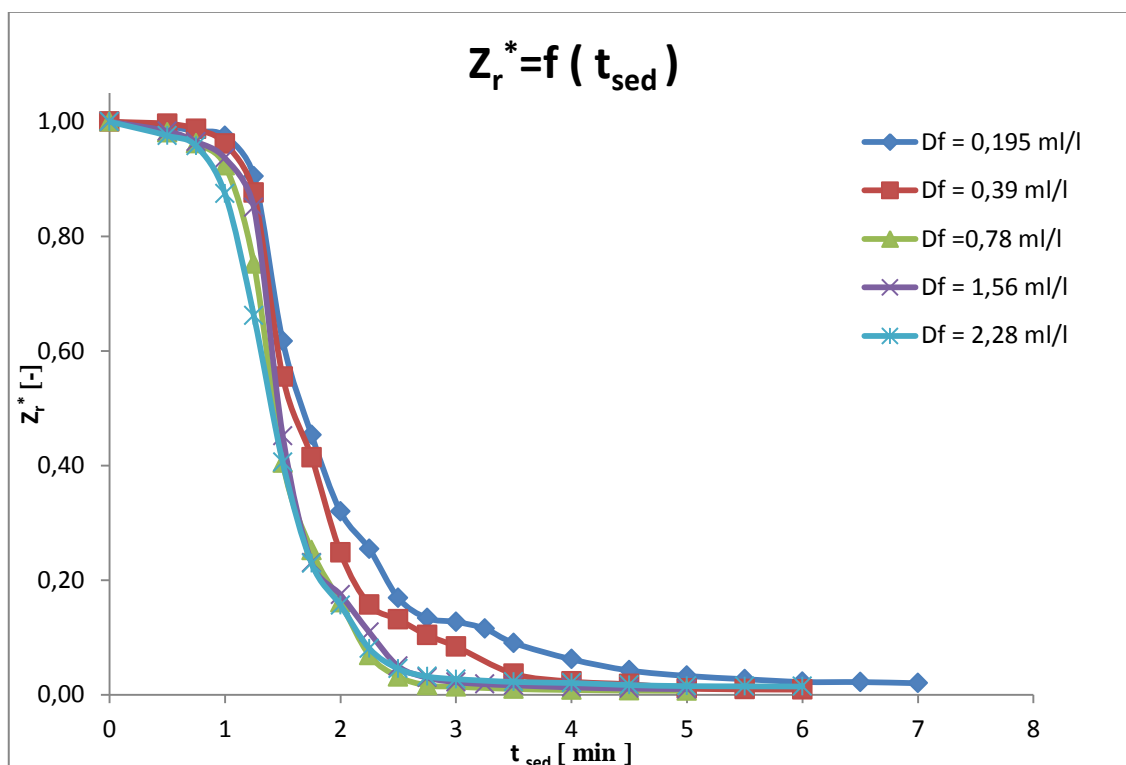
Obrázok 8.8 Generalizovaná korelácia pre kinetiku flokulácie v miešanej nádobe (kaolín  $c_{k0} = 750 \text{ mg/l}$ )



### 8.2.2. Sedimentačná krivka

V momente keď bola dosiahnutá minimálna hodnota zákalu pri flokulácii, miešadlo bolo zastavené, a vytvorené vločky sa nechali sedimentovať.

Obrázok 8.9 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na dobe sedimentácie (kaolín  $c_{k0} = 750 \text{ mg/l}$ )



S rastúcou dobou sedimentácie dochádza k znižovaniu stupňa reziduálneho znečistenia  $Z_{r\text{ sed}}^*$ . Pri daných otáčkach trvalo približne minútu kým sa pohyb suspenzie ustálil a vločky začali sedimentovať. S rastúcou dávkou flokulantu sa doba potrebná pre sedimentáciu všetkých vločiek skracovala, pričom všetky dávky flokulantu dosiahli po sedimentácii podobnú hodnotu reziduálneho zákalu. Najkratšiu dobu sedimentácie dosiahla dávka flokulantu 0,78 ml/l, pri ďalšom zvyšovaní dávky flokulantu sa už doba sedimentácie prakticky nemenila a zvýšenie dávky tak už nemalo vplyv na jej zníženie.

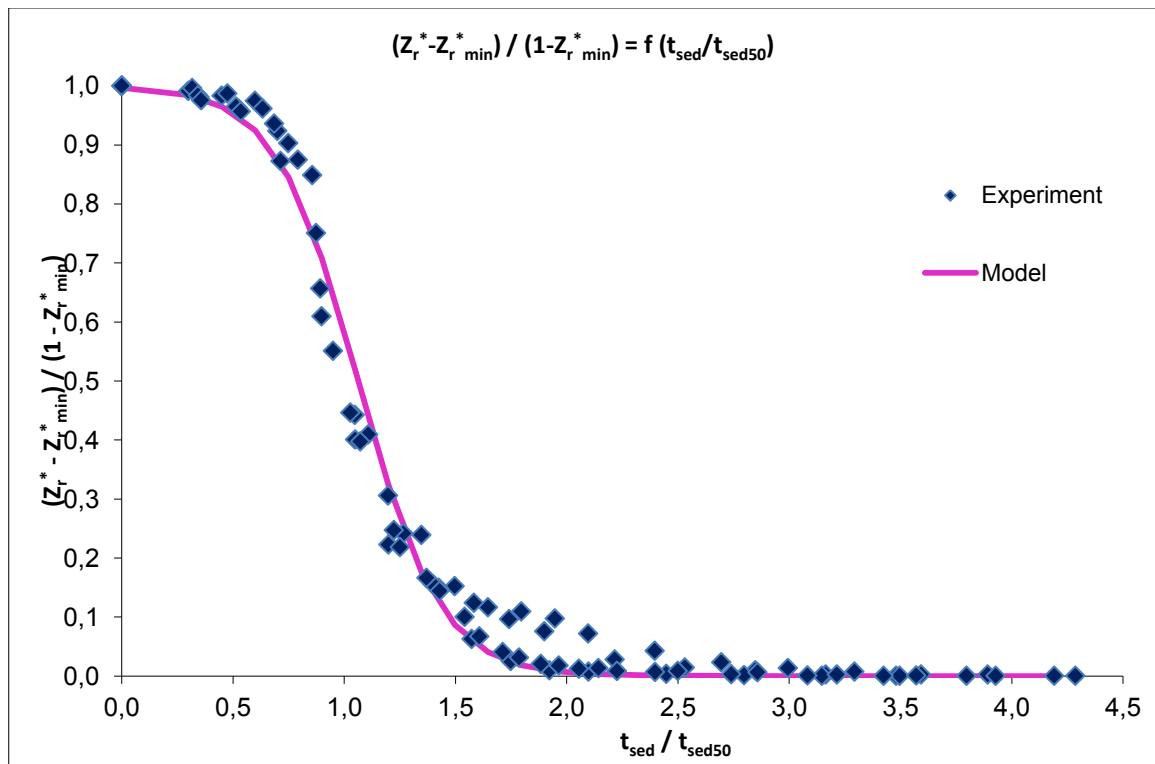
### Generalizovaná korelácia sedimentácie

Namerané údaje boli vyhodnotené pomocou generalizovanej korelácie (4.2), založenej na modeli S - krivky. Parametre sedimentačného modelu sú uvedené v tabuľke 8.4. Na obrázku 8.10, ktorý porovnáva experimentálne dáta a model, je vidieť, že zhoda medzi experimentálnymi dátami a modelom je veľmi dobrá.

Tabuľka 8.4 Parametre generalizovanej korelácie pre sedimentáciu: vplyv dávky –  $c_{K0} = 750 \text{ mg/l}$ ,  $\epsilon_v = 40 \text{ W/m}^3$

$D_F$ [ml/l]	$n$ [1/min]	$Z_{r\text{ min sed}}^*$ [-]	$t_{\text{sed}50}$ [min]
0,195	0	0,0201	1,67
0,39	0	0,0089	1,58
0,78	0	0,0068	1,43
1,56	0	0,0099	1,46
2,28	0	0,0144	1,40

Obrázok 8.10 Generalizovaná korelácia pre sedimentáciu (kaolín  $c_{k0} = 750 \text{ mg/l}$ )



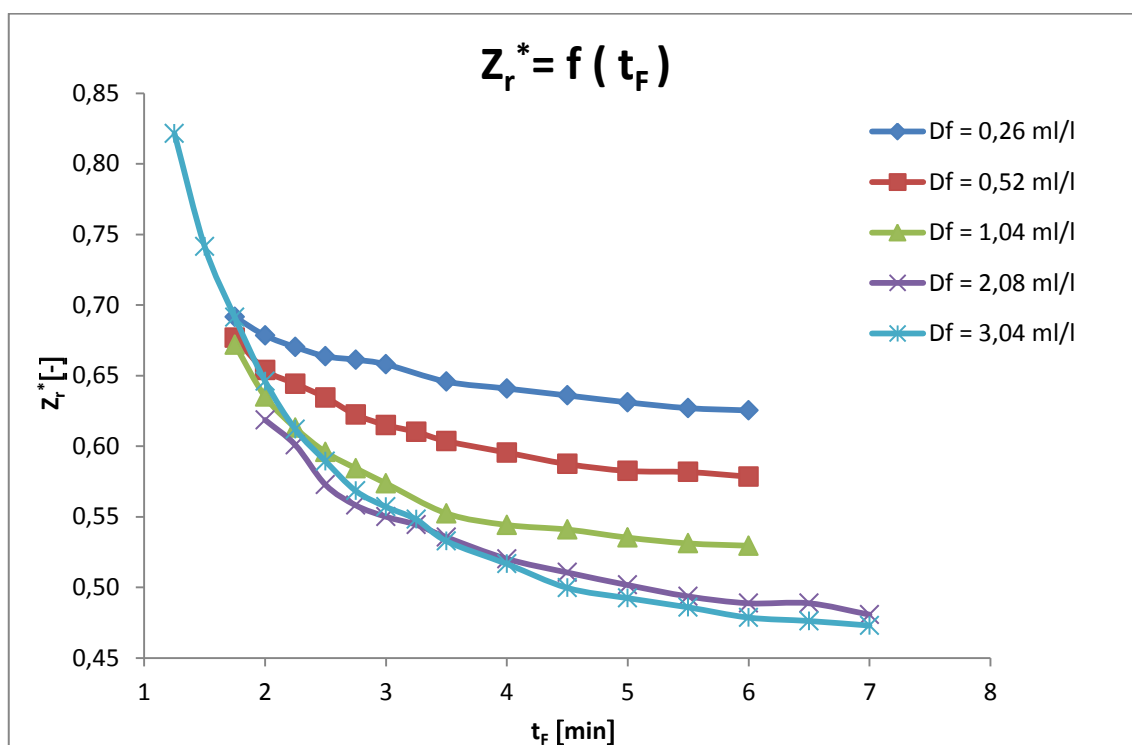
### 8.3. Kaolín, koncentrácia $c_{k0} = 1\ 000\ \text{mg/l}$

#### 8.3.1. Flokulačná krivka

##### Parametre merania:

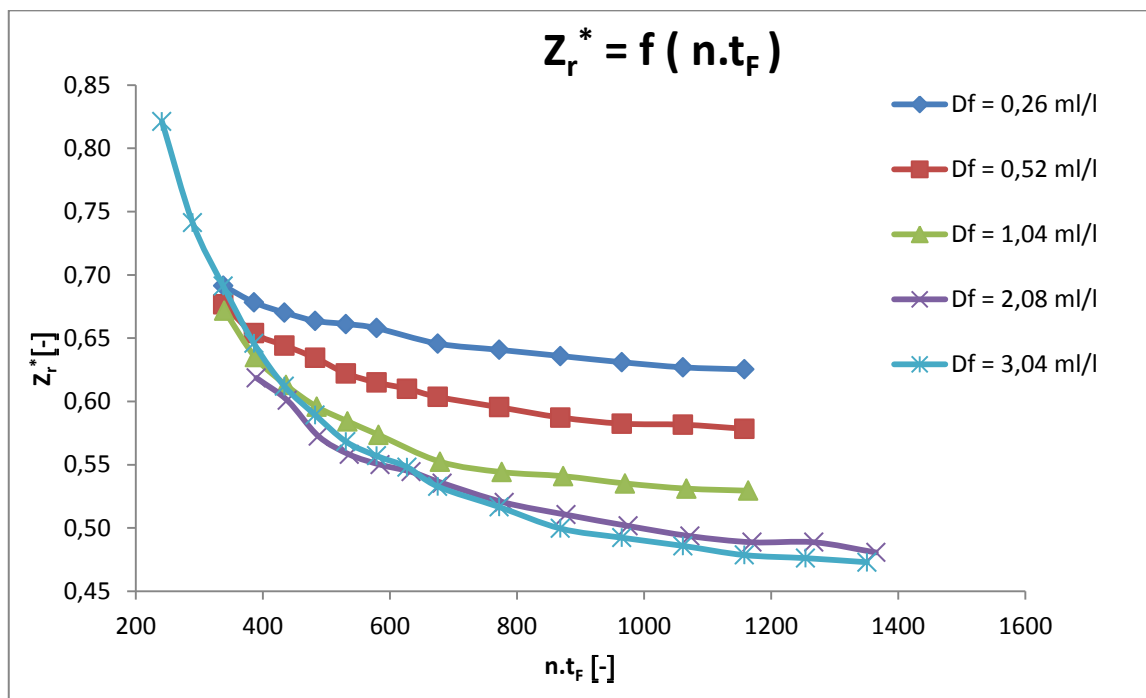
Koncentrácia	$c_{k0} = 1\ 000\ \text{mg/l}$
Priemer nádoby	$D = 190\ \text{mm}$
Miešadlo	Rushtonova turbína $d = 66\ \text{mm}$
Intenzita miešania	$\varepsilon_v = 40\ \text{W/m}^3$
Otáčky	$n = 195\ \text{ot/min}$
Dávka flokulantu	$D_f = 0,26 - 3,04\ \text{ml/l}$

Obrázok 8.11 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na dobe flokulácie (kaolín  $c_{k0} = 1\ 000\ \text{mg/l}$ )



S rastúcou dobou flokulácie dochádza k znižovaniu reziduálneho (zbytkového) znečistenia  $Z_r^*$ . Hodnota znečistenia klesá až do určitej minimálnej hodnoty, kedy už sa za daných podmienok ďalšie vločky netvoria, alebo už nerastú. S rastúcou dávkou flokulantu sa znižovalo aj zbytkové znečistenie, no narastal čas miešania, ktorý bol potrebný pre rast vločiek a dosiahnutie minimálneho zbytkového znečistenia.

Obrázok 8.12 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na bezrozmernej dobe flokulácie (kaolín  $c_{k0} = 1\ 000$  mg/l)



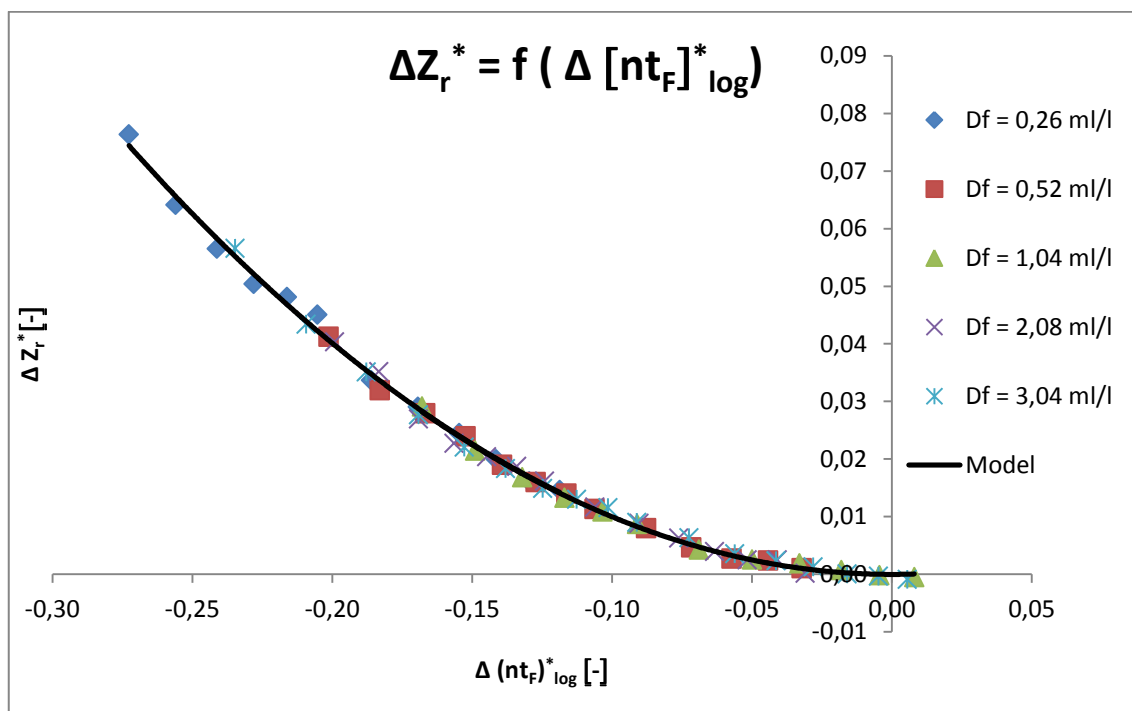
### Generalizovaná korelácia flokulácie

Namerané údaje boli vyhodnotené pomocou generalizovanej korelácie (3.4). Parametre modelu sú uvedené v tabuľke 8.5. Na obrázku 8.13, ktorý porovnáva experimentálne dáta a generalizovanú koreláciu, je vidieť, že podobnosť medzi experimentálnymi dátami a modelom je vysoká.

Tabuľka 8.5 Parametre generalizovanej korelácie: vplyv dávky –  $c_{k0} = 1\ 000$  mg/l,  $\mathcal{E}_v = 40$  W/m<sup>3</sup>

$D_f$ [ml/l]	$n$ [1/min]	$Z_{r\ min}^*$ [-]	$A^*$ [-]	$(nt_f)_{min}$ [-]
0,26	195	0,6097	1,7561	2994
0,52	193	0,5759	4,2425	1465
1,04	194	0,5319	9,0406	1100
2,08	192	0,4801	7,1463	1719
3,04	195	0,4783	12,6760	1298

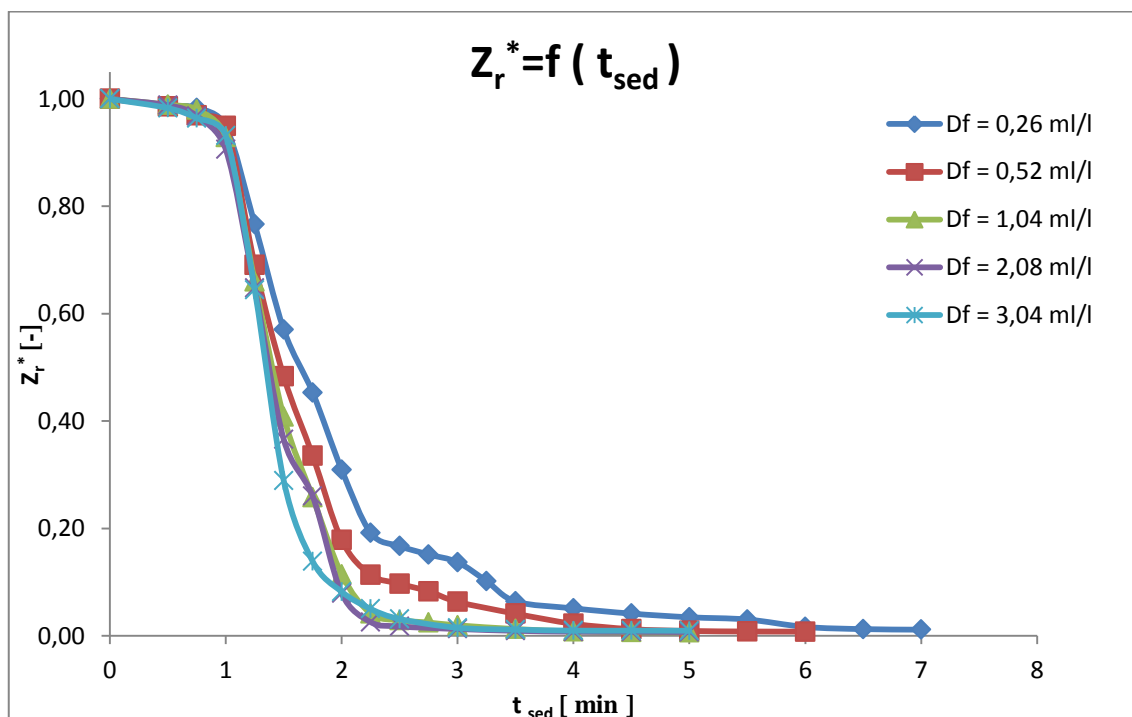
Obrázok 8.13 Generalizovaná korelácia pre kinetiku flokulácie v miešanej nádobe (kaolín  $c_{k0} = 1\ 000\ \text{mg/l}$ )



### 8.3.2. Sedimentačná krivka

V momente keď bola dosiahnutá minimálna hodnota zákalu pri flokulácii, miešadlo bolo zastavené, a vytvorené vločky sa nechali sedimentovať.

Obrázok 8.14 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na dobe sedimentácie (kaolín  $c_{k0} = 1\ 000\ \text{mg/l}$ )



S rastúcou dobou sedimentácie dochádza k znižovaniu stupňa reziduálneho znečistenia  $Z_{r\ \text{sed}}^*$ . Pri daných otáčkach trvalo približne minútu kým sa pohyb suspenzie ustálil a vločky začali sedimentovať. S rastúcou dávkou flokulantu sa doba potrebná pre



sedimentáciu všetkých vločiek skracovala, pričom všetky dávky flokulantu dosiahli po sedimentácii podobnú hodnotu reziduálneho zákalu, čo mohlo byť spôsobené nízkymi otáčkami pri flokulácii, kedy nedochádzalo k rozbíjaniu už vytvorených vločiek. Pre dávky flokulantu vyššie než 1,04 ml/l sa sedimentačná krivka prakticky nemenila a doba sedimentácie bola takmer rovnaká.

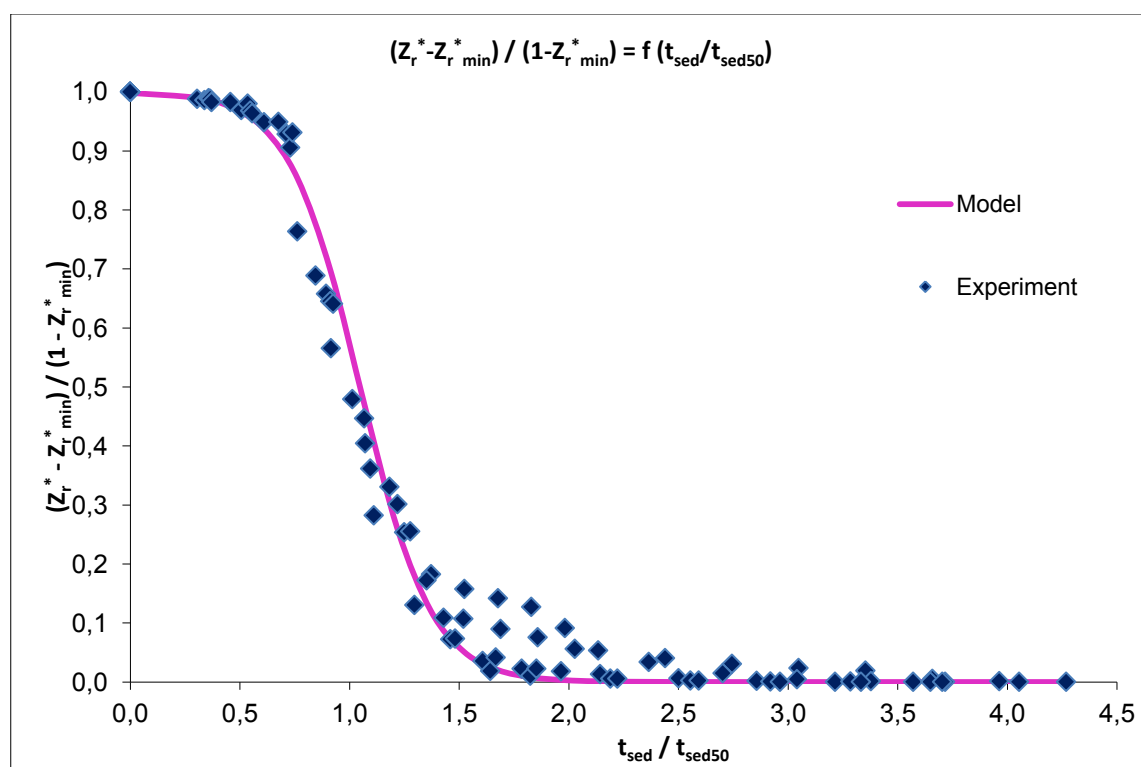
### Generalizovaná korelácia sedimentácie

Namerané údaje boli vyhodnotené pomocou generalizovanej korelácie (4.2), založenej na modeli S - krivky. Parametre sedimentačného modelu sú uvedené v tabuľke 8.6. Na obrázku 8.15, ktorý porovnáva experimentálne dáta a model, je vidieť, že zhoda medzi experimentálnymi dátami a modelom je veľmi dobrá.

Tabuľka 8.6 Parametre generalizovanej korelácie pre sedimentáciu: vplyv dávky –  $c_{K0} = 1\ 000\ \text{mg/l}$ ,  $\varepsilon_v = 40\ \text{W/m}^3$

$D_F$ [ml/l]	$n$ [1/min]	$Z_{r\ \text{min sed}}^*$ [-]	$t_{\text{sed}50}$ [min]
0,26	0	0,0114	1,64
0,52	0	0,0077	1,48
1,04	0	0,0065	1,40
2,08	0	0,0069	1,37
3,04	0	0,0094	1,35

Obrázok 8.15 Generalizovaná korelácia pre sedimentáciu (kaolín  $c_{k0} = 1\ 000\ \text{mg/l}$ )

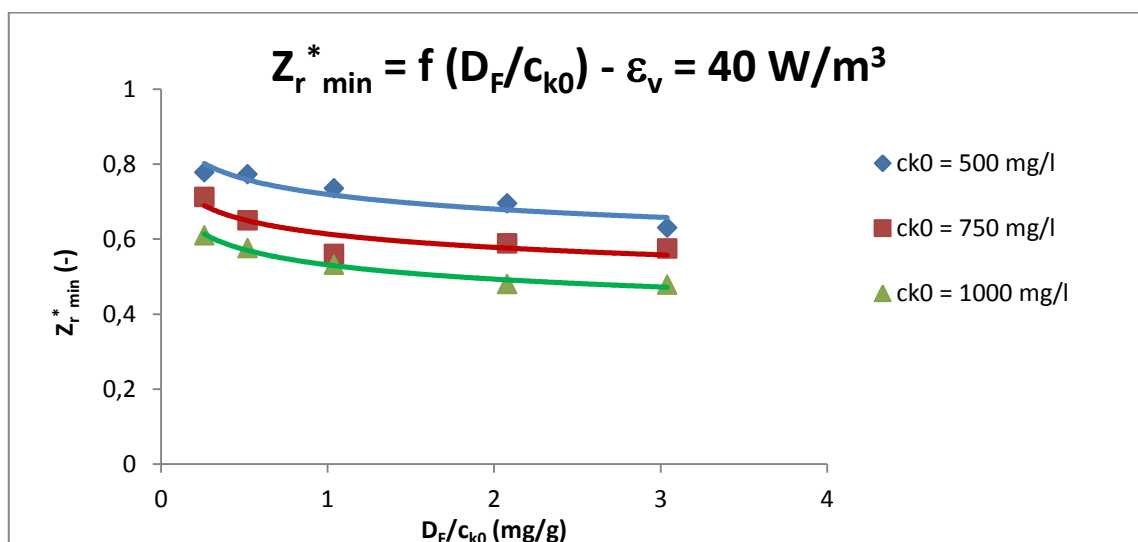


## 8.4. Porovnanie

Minimálny stupeň reziduálneho znečistenia  $Z_{r \min}^*$  v závislosti na bezrozmernej dávke flokulantu  $D_F/c_{k0}$ .

Ako je vidieť z grafu hodnota minimálneho znečistenia sa znižovala so zvyšujúcou sa dávkou flokulantu v takmer všetkých meraniach.

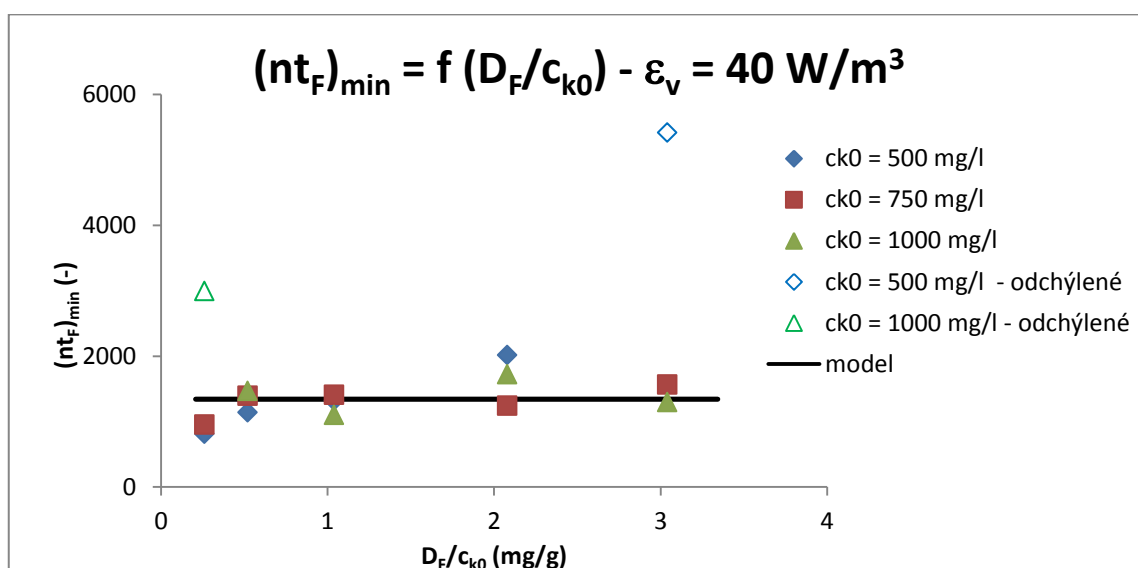
Obrázok 8.16 Závislosť minimálneho stupňa reziduálneho znečistenia na bezrozmernej dávke flokulantu ( $\varepsilon_v = 40 \text{ W/m}^3$ )



Bezrozmerný čas flokulácie  $(nt_F)_{\min}$ , v ktorom môže byť minimálny stupeň reziduálneho znečistenia  $Z_{r \min}^*$  dosiahnutý v závislosti na bezrozmernej dávke flokulantu  $D_F/c_{k0}$ .

Bezrozmerná doba flokulácie  $(nt_F)_{\min}$  nie je výrazne závislá na bezrozmernej dávke flokulantu  $D_F/c_{k0}$  a je rovná približne hodnote 1 500. Dve hodnoty sú pravdepodobne iba odchýlené.

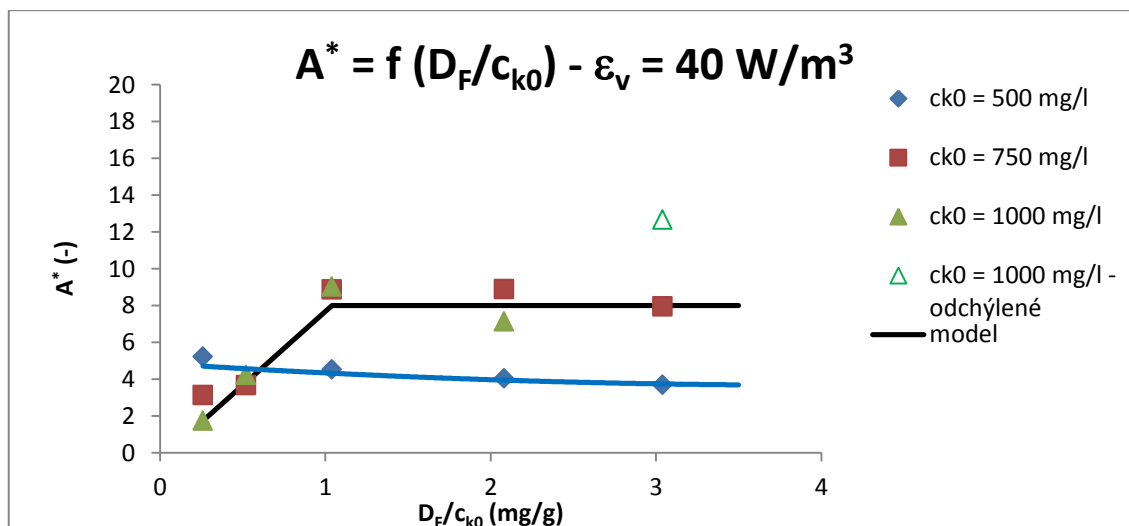
Obrázok 8.17 Závislosť bezrozmerného času flokulácie na bezrozmernej dávke flokulantu ( $\varepsilon_v = 40 \text{ W/m}^3$ )



Súčiniteľ zmeny reziduálneho znečistenia  $A^*$  v závislosti na bezrozmernej dávke flokulantu  $D_F/c_{k0}$ .

V prípade súčiniteľa reziduálneho znečistenia  $A^*$  nie je závislosť na bezrozmernej dávke flokulantu úplne jednoznačná. Z obrázka 8.18 vyplýva, že pre najmenšiu koncentráciu  $c_{k0} = 500$  mg/l sa súčiniteľ takmer nemenil, pre vyššie koncentrácie kaolínu sa zvyšoval.

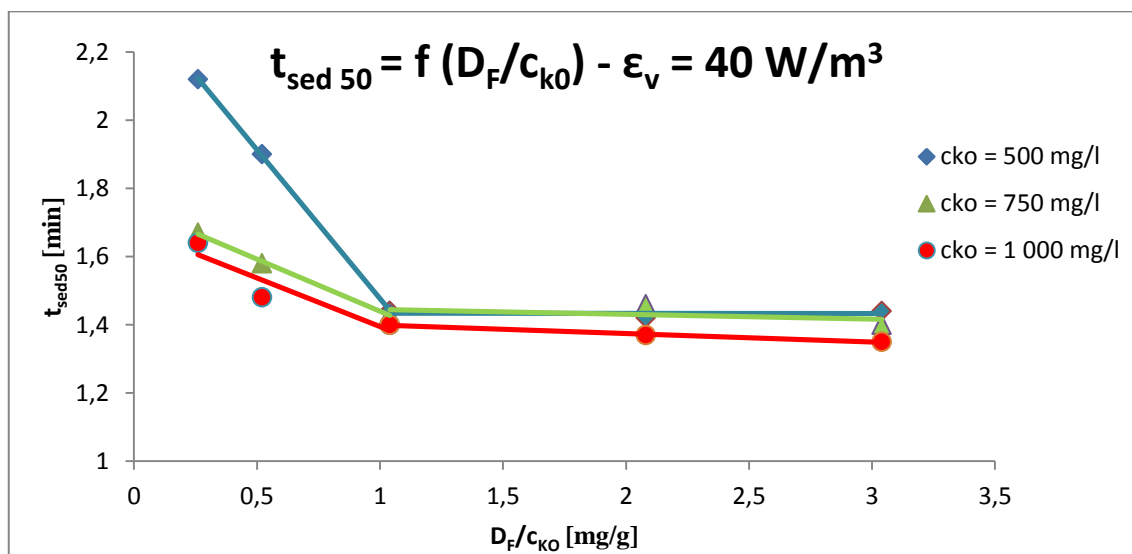
Obrázok 8.18 Závislosť súčiniteľa zmeny reziduálneho znečistenia na bezrozmernej dávke flokulantu ( $\epsilon_v = 40$  W/m<sup>3</sup>)



Čas sedimentácie, v ktorom bola dosiahnutá hodnota reziduálneho znečistenia  $Z_{r\ sed}^* = 0,5$  v závislosti na bezrozmernej dávke flokulantu  $D_F/c_{k0}$ .

Na obrázku 8.19 vidno, že čas sedimentácie, v ktorom bola dosiahnutá hodnota  $Z_{r\ sed}^* = 0,5$  sa skracoval pri zvyšujúcich sa dávkach flokulantu, až do bezrozmernej dávky flokulantu 1,04 mg/g a to pre všetky použité koncentrácie kaolínu. Pri použití vyšších dávok flokulantu ako 1,04 mg/g sa už čas sedimentácie  $t_{sed50}$  veľmi nemenil, alebo skracoval len minimálne.

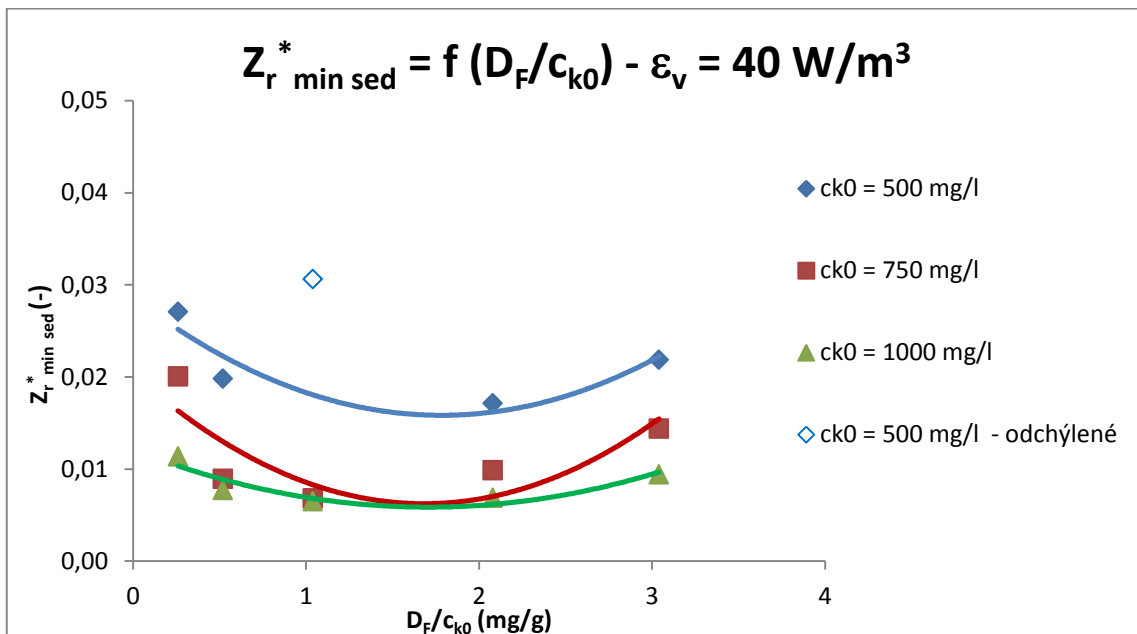
Obrázok 8.19 Závislosť doby sedimentácie na bezrozmernej dávke flokulantu ( $\epsilon_v = 40$  W/m<sup>3</sup>)



Minimálna dosiahnutá hodnota stupňa reziduálneho znečistenia pri sedimentácii  $Z_{r \text{ min sed}}^*$  v závislosti na bezrozmernej dávke flokulantu  $D_F/c_{k0}$ .

Z obrázka 8.20 vyplýva, že pre koncentrácie kaolínu 750 a 1 000 mg/l sa hodnota stupňa reziduálneho znečistenia  $Z_{r \text{ min sed}}^*$  znižovala až do bezrozmernej dávky flokulantu  $D_F/c_{k0} = 1,5$  mg/g, následne sa hodnota vyčistenia znova zvyšovala. Jedna hodnota je pravdepodobne iba odchýlená.

Obrázok 8.20 Závislosť minimálneho stupňa reziduálneho znečistenia pri sedimentácii na bezrozmernej dávke flokulantu ( $\epsilon_v = 40 \text{ W/m}^3$ )



## 9. Vplyv zmeny príkonu na flokuláciu pre koncentráciu kaolínu $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ a bezrozmernú dávku flokulantu $D_F/c_{k0} = 0,26 - 1,04 - 3,04 \text{ mg/g}$ .

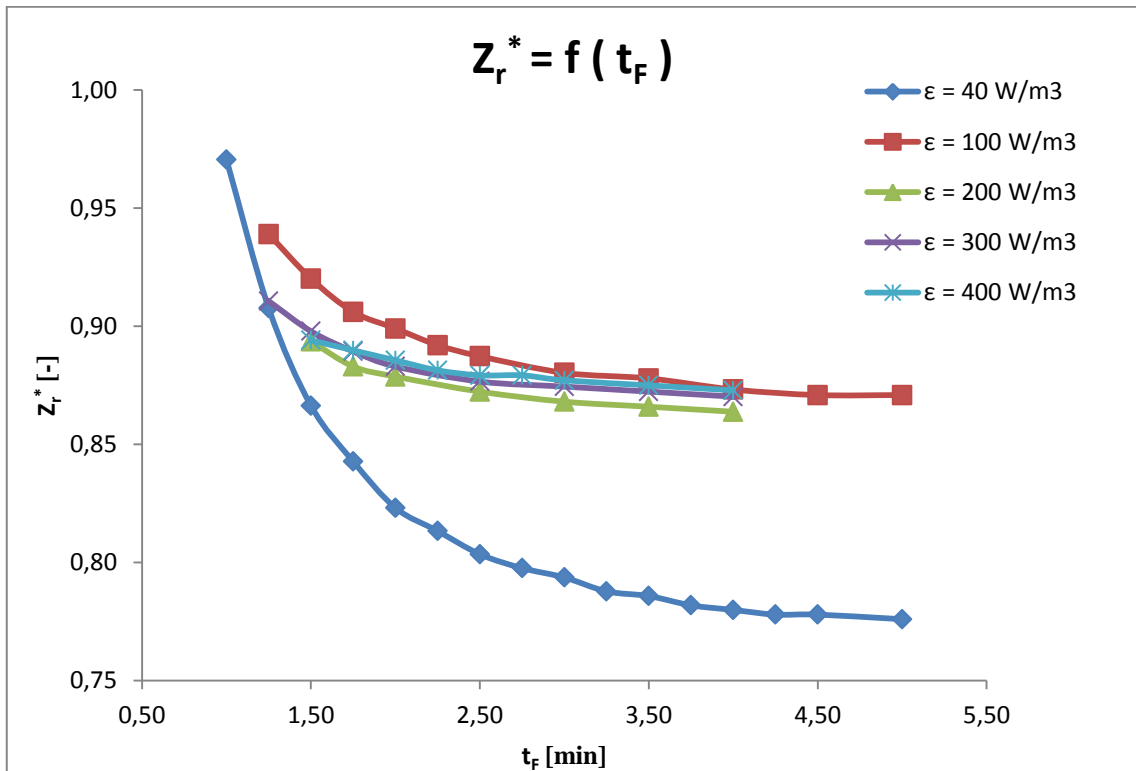
### 9.1. Kaolín, koncentrácia $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ , bezrozmerná dávka flokulantu $D_F/c_{k0} = 0,26 \text{ mg/g}$

#### 9.1.1. Flokulačná krivka

##### Parametre merania:

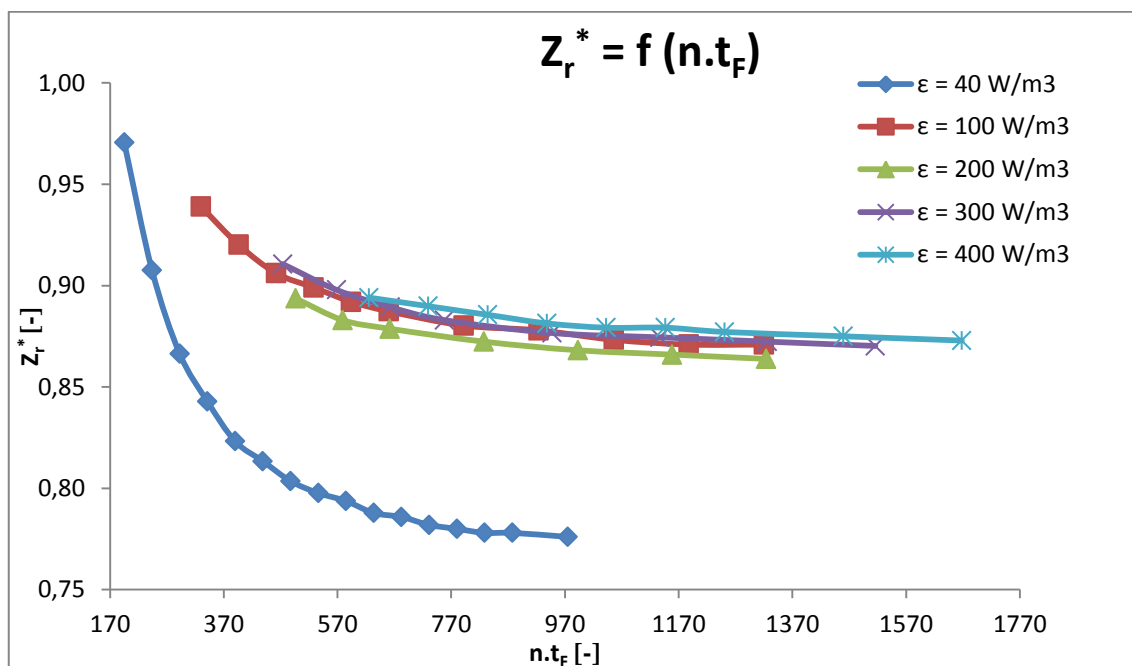
Koncentrácia	$c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$
Priemer nádoby	$D = 190 \text{ mm}$
Miešadlo	Rushtonova turbína $d = 66 \text{ mm}$
Intenzita miešania	$\epsilon_v = 40 - 400 \text{ W/m}^3$
Otáčky	$n = 195 - 417 \text{ ot/min}$
Dávka flokulantu	$D_f = 0,13 \text{ ml/l}$

Obrázok 9.1 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na dobe flokulácie ( $D_F = 0,13 \text{ ml/l} - \text{RT}$ )



S rastúcou dobou flokulácie dochádza k znižovaniu reziduálneho (zbytkového) znečistenia  $Z_r^*$ . Hodnota znečistenia klesá až do určitej minimálnej hodnoty, kedy už sa za daných podmienok ďalšie vločky netvoria, alebo už nerastú. Najnižšiu hodnotu zbytkového znečistenia  $Z_r^*$  dosiahol najnižší merný príkon  $\epsilon_v$ , všetky vyššie hodnoty merného príkonu dosiahli o dosť vyššie hodnoty zbytkového znečistenia, čo bolo pravdepodobne zapríčinené vyššími otáčkami pri flokulácii, kedy sa vločky lepšie tvorili, ale zároveň boli aj rozbíjané v dôsledku vyšších gradientov rýchlosti.

Obrázok 9.2 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na bezrozsmernej dobe flokulácie ( $D_F = 0,13 \text{ ml/l} - \text{RT}$ )



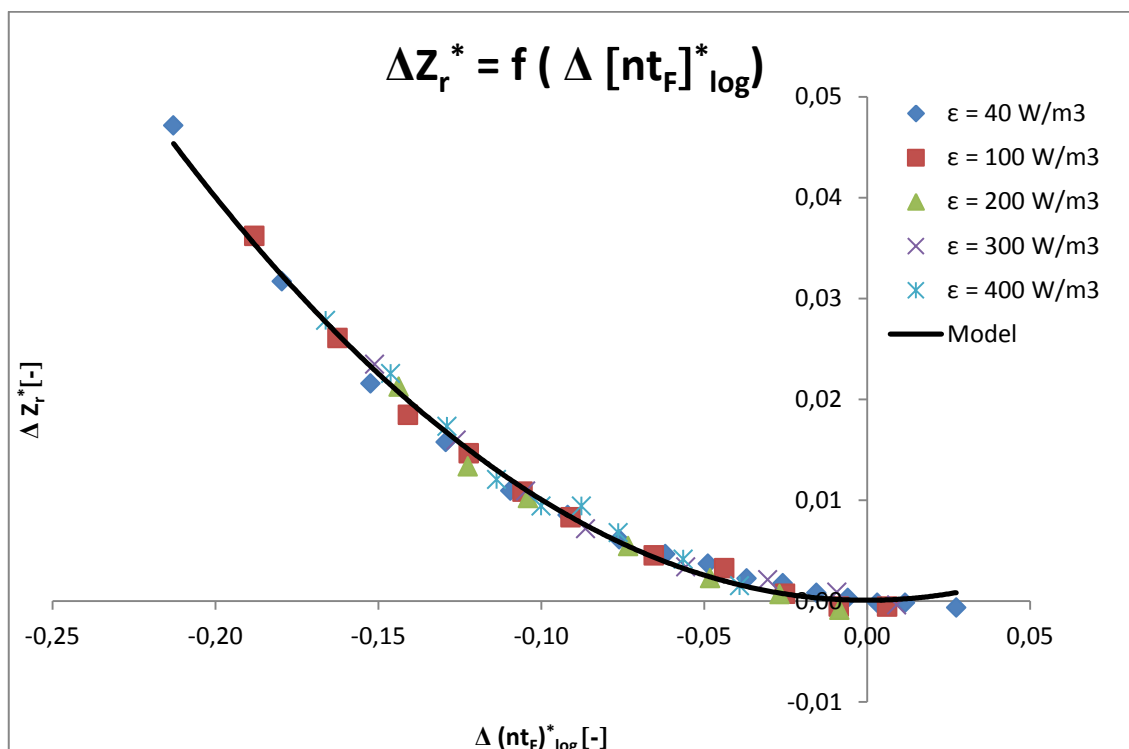
### Generalizovaná korelácia flokulácie

Namerané údaje boli vyhodnotené pomocou generalizovanej korelácie (3.4). Parametre modelu sú uvedené v tabuľke 9.1. Na obrázku 9.3, ktorý porovnáva experimentálne dáta a generalizovanú koreláciu, je vidieť, že podobnosť medzi experimentálnymi dátami a modelom je vysoká.

Tabuľka 9.1 Parametre generalizovanej korelácie: vplyv merného príkonu –  $c_{K0} = 500 \text{ mg/l}$ ,  $D_F = 0,13 \text{ ml/l}$ , RT

$\epsilon \text{ [W/m}^3\text{]}$	$n \text{ [1/min]}$	$Z_{r \text{ min}}^* \text{ [-]}$	$A^* \text{ [-]}$	$(nt_F)_{\text{min}} \text{ [-]}$
40	195	0,7786	5,2264	812
100	264	0,8719	2,1238	1263
200	331	0,8650	1,5551	1408
300	379	0,8709	1,9450	1419
400	417	0,8717	0,9237	2256

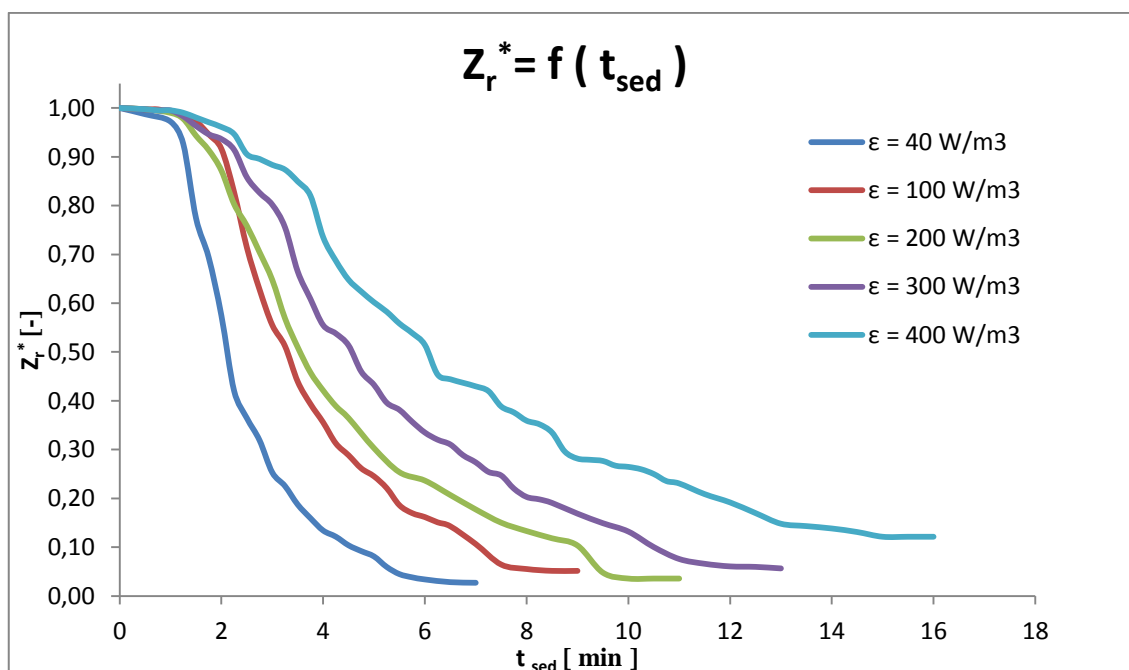
Obrázok 9.3 Generalizovaná korelácia pre kinetiku flokulácie v miešanej nádobe ( $D_F = 0,13 \text{ ml/l} - \text{RT}$ )



### 9.1.2. Sedimentačná krivka

V momente keď bola dosiahnutá minimálna hodnota zákalu pri flokulácii, miešadlo bolo zastavené, a vytvorené vločky sa nechali sedimentovať.

Obrázok 9.4 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na dobe sedimentácie ( $D_F = 0,13 \text{ ml/l} - \text{RT}$ )



S rastúcou dobou sedimentácie dochádza k znižovaniu stupňa reziduálneho znečistenia  $Z_{r \text{ sed}}^*$ . Pri daných otáčkach trvalo približne dve minúty kým sa pohyb suspenzie ustálil a vločky začali sedimentovať. S rastúcou hodnotou merného príkonu

sa doba potrebná pre sedimentáciu všetkých vločiek predlžovala, pričom najvyššie hodnoty merného príkonu nedosiahli po sedimentácii takú hodnotu reziduálneho zákalu ako menšie merné príkony, čo bolo spôsobené vysokými otáčkami pri flokulácii, kedy už dochádzalo k rozbíjaniu už vytvorených vločiek. Najkratšiu dobu sedimentácie dosiahol najmenší merný príkon.

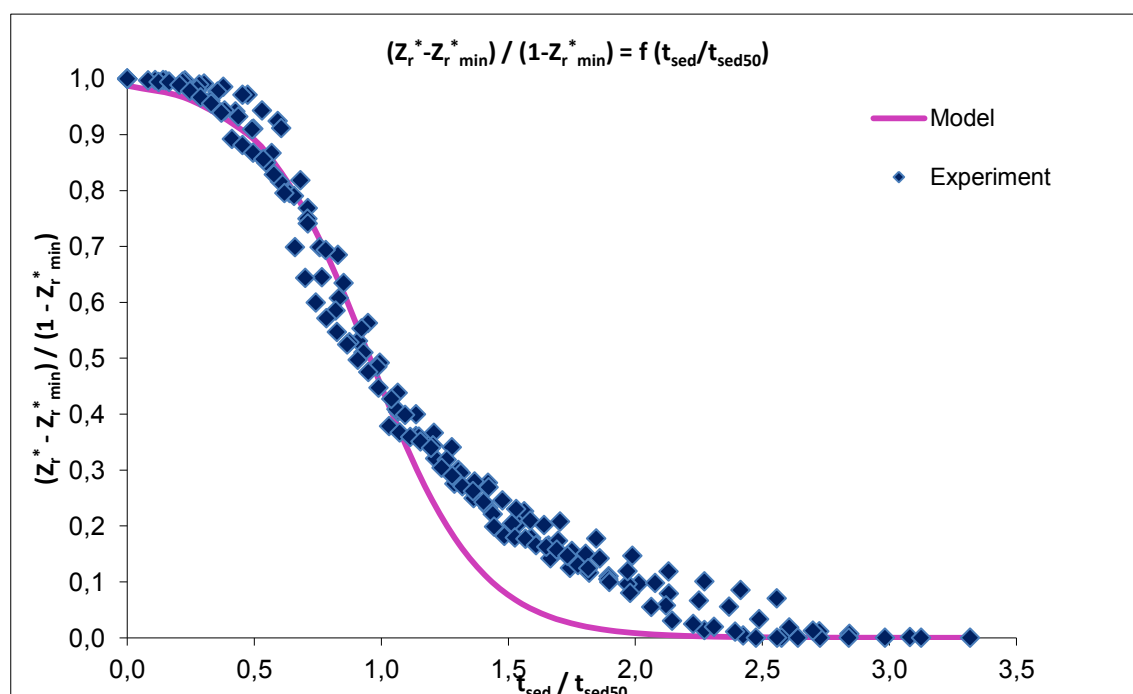
### Generalizovaná korelácia sedimentácie

Namerané údaje boli vyhodnotené pomocou generalizovanej korelácie (4.2), založenej na modeli S - krivky. Parametre sedimentačného modelu sú uvedené v tabuľke 9.2. Na obrázku 9.5, ktorý porovnáva experimentálne dáta a model, je vidieť, že zhoda medzi experimentálnymi dátami a modelom je veľmi dobrá v prvej polovici krivky. V druhej polovici krivky však model predpovedá omnoho rýchlejšiu sedimentáciu ako bola pozorovaná.

Tabuľka 9.2 Parametre generalizovanej korelácie pre sedimentáciu: vplyv merného príkonu  
 –  $c_{K0} = 500 \text{ mg/l}$ ,  $D_F = 0,13 \text{ ml/l}$ , RT

$\epsilon \text{ [W/m}^3\text{]}$	$n \text{ [1/min]}$	$Z_r^* \text{ min sed [-]}$	$t_{\text{sed}50} \text{ [min]}$
40	0	0,0271	2,11
100	0	0,0515	3,30
200	0	0,0357	3,52
300	0	0,0565	4,57
400	0	0,1214	6,06

Obrázok 9.5 Generalizovaná korelácia pre sedimentáciu ( $D_F = 0,13 \text{ ml/l}$  – RT)





## 9.2. Kaolín, koncentrácia $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ , bezrozmerná dávka flokulantu

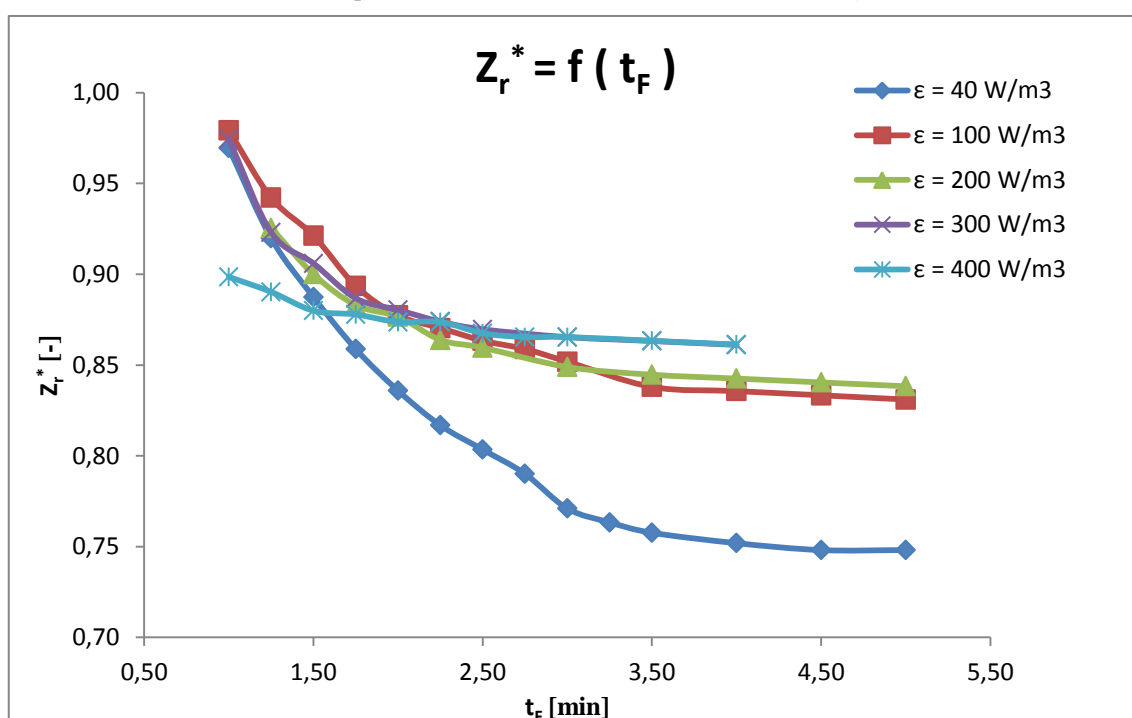
$$D_F/c_{k0} = 1,04 \text{ mg/g}$$

### 9.2.1. Flokulačná krivka

#### Parametre merania:

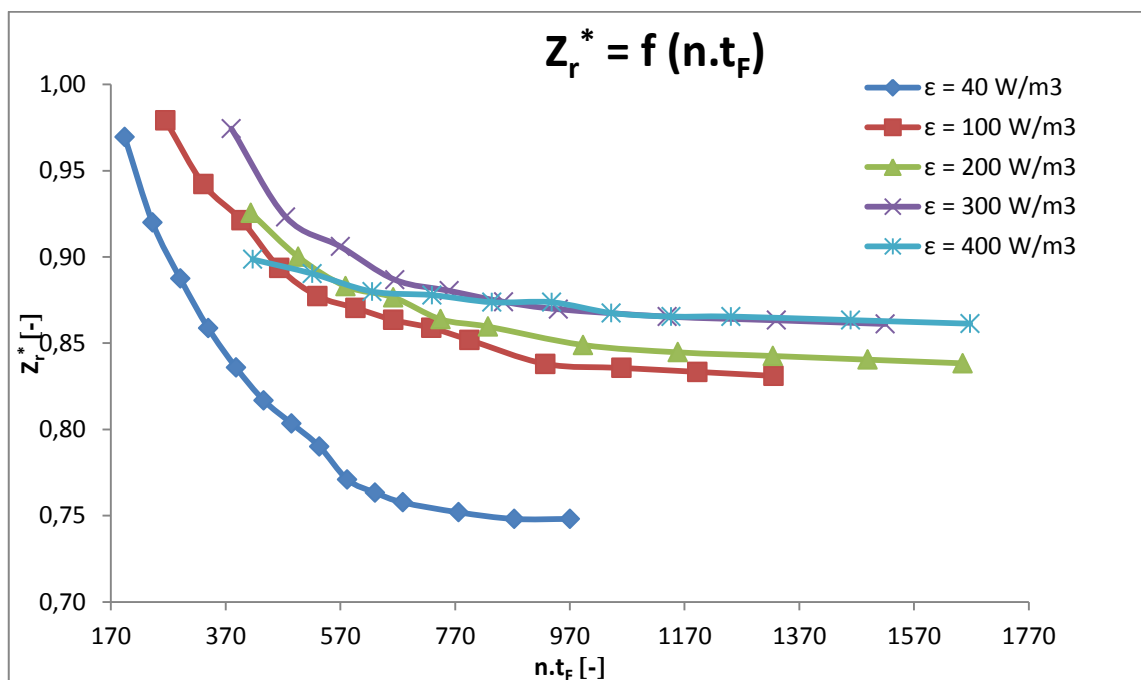
Koncentrácia	$c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$
Priemer nádoby	$D = 190 \text{ mm}$
Miešadlo	Rushtonova turbína $d = 66 \text{ mm}$
Intenzita miešania	$\epsilon_v = 40 - 400 \text{ W/m}^3$
Otáčky	$n = 195 - 417 \text{ ot/min}$
Dávka flokulantu	$D_f = 0,52 \text{ ml/l}$

Obrázok 9.6 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na dobe flokulácie ( $D_F = 0,52 \text{ ml/l} - \text{RT}$ )



S rastúcou dobou flokulácie dochádza k znižovaniu reziduálneho (zbytkového) znečistenia  $Z_r^*$ . Hodnota znečistenia klesá až do určitej minimálnej hodnoty, kedy už sa za daných podmienok ďalšie vločky netvorí, alebo už nerastú. S rastúcou hodnotou merného príkonu sa hodnota zbytkového znečistenia zvyšovala a nedosiahla také výsledky ako najnižší merný príkon. Počas flokulácie, pri vyšších otáčkach už pravdepodobne dochádzalo k rozbíjaniu už vytvorených vločiek, čo bolo príčinou vyššou hodnotou zbytkového znečistenia v tomto prípade.

Obrázok 9.7 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na bezrozmernej dobe flokulácie ( $D_F = 0,52 \text{ ml/l} - \text{RT}$ )



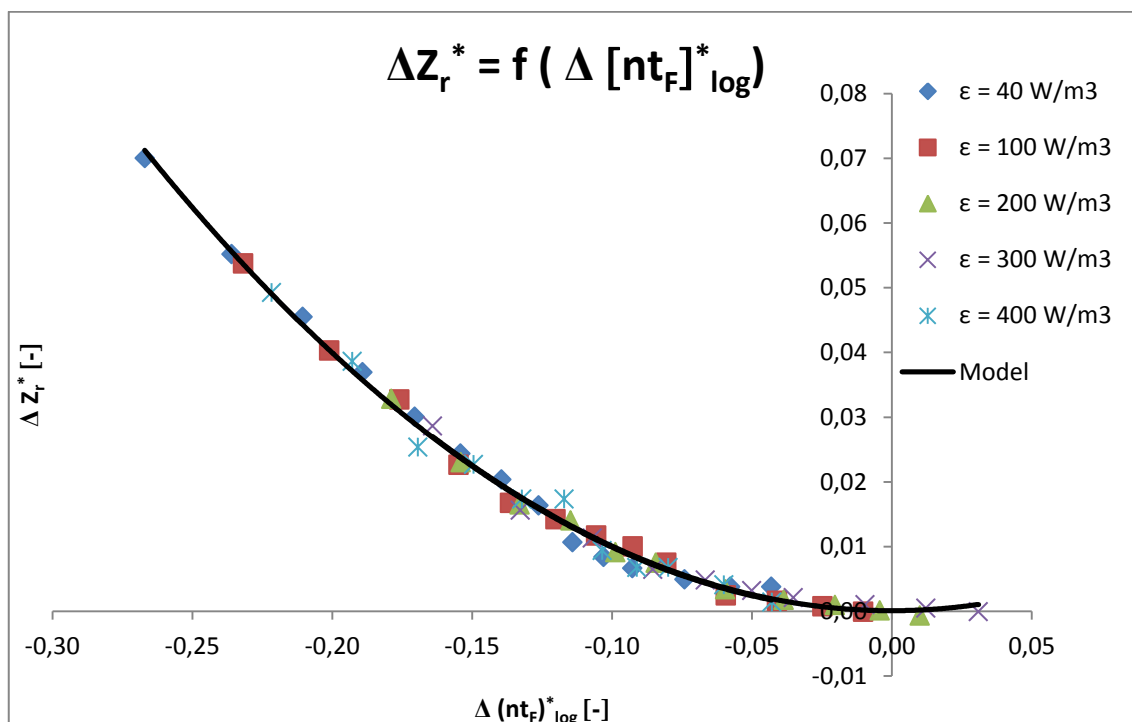
### Generalizovaná korelácia flokulácie

Namerané údaje boli vyhodnotené pomocou generalizovanej korelácie (3.4). Parametre modelu sú uvedené v tabuľke 9.3. Na obrázku 9.8, ktorý porovnáva experimentálne dáta a generalizovanú koreláciu, je vidieť, že podobnosť medzi experimentálnymi dátami a modelom je vysoká.

Tabuľka 9.3 Parametre generalizovanej korelácie: vplyv merného príkonu –  $c_{K0} = 500 \text{ mg/l}$ ,  $D_F = 0,52 \text{ ml/l}$ , RT

$\epsilon$ [ $\text{W/m}^3$ ]	$n$ [1/min]	$Z_r^*_{\min}$ [-]	$A^*$ [-]	$(nt_f)_{\min}$ [-]
40	195	0,7354	4,5450	1322
100	264	0,8312	3,3115	1427
200	331	0,8401	3,1008	1537
300	379	0,8613	4,5883	1220
400	417	0,8602	0,9064	2324

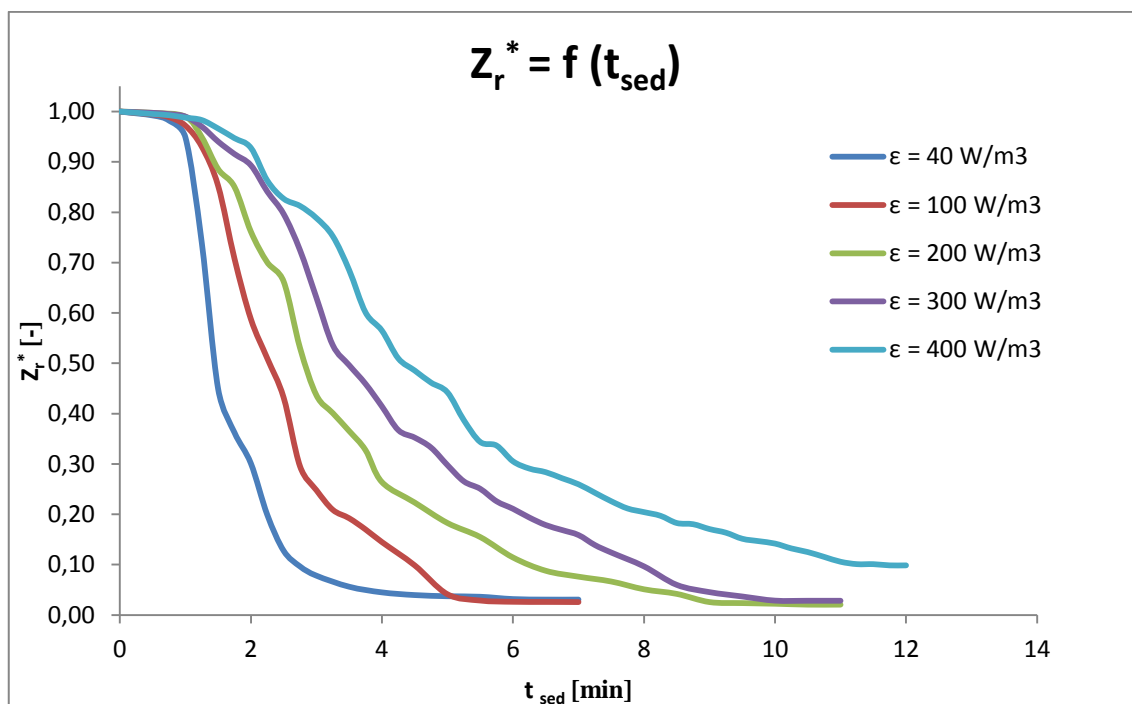
Obrázok 9.8 Generalizovaná korelácia pre kinetiku flokulácie v miešanej nádobe ( $D_F = 0,52 \text{ ml/l} - \text{RT}$ )



### 9.2.2. Sedimentačná krivka

V momente keď bola dosiahnutá minimálna hodnota zákalu pri flokulácii, miešadlo bolo zastavené, a vytvorené vločky sa nechali sedimentovať.

Obrázok 9.9 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na dobe sedimentácie ( $D_F = 0,52 \text{ ml/l} - \text{RT}$ )



S rastúcou dobou sedimentácie dochádza k znižovaniu stupňa reziduálneho znečistenia  $Z_{r \text{ sed}}^*$ . Pri daných otáčkach trvalo približne dve minúty kým sa pohyb suspenzie ustálil a vločky začali sedimentovať. S rastúcou hodnotou merného príkonu

sa doba potrebná pre sedimentáciu všetkých vločiek predlžovala, pričom najvyššie hodnoty merného príkonu nedosiahli po sedimentácii takú hodnotu reziduálneho zákalu ako menšie merné príkony, čo bolo spôsobené vysokými otáčkami pri flokulácii, kedy už dochádzalo k rozbíjaniu už vytvorených vločiek. Najkratšiu dobu sedimentácie dosiahol najmenší merný príkon.

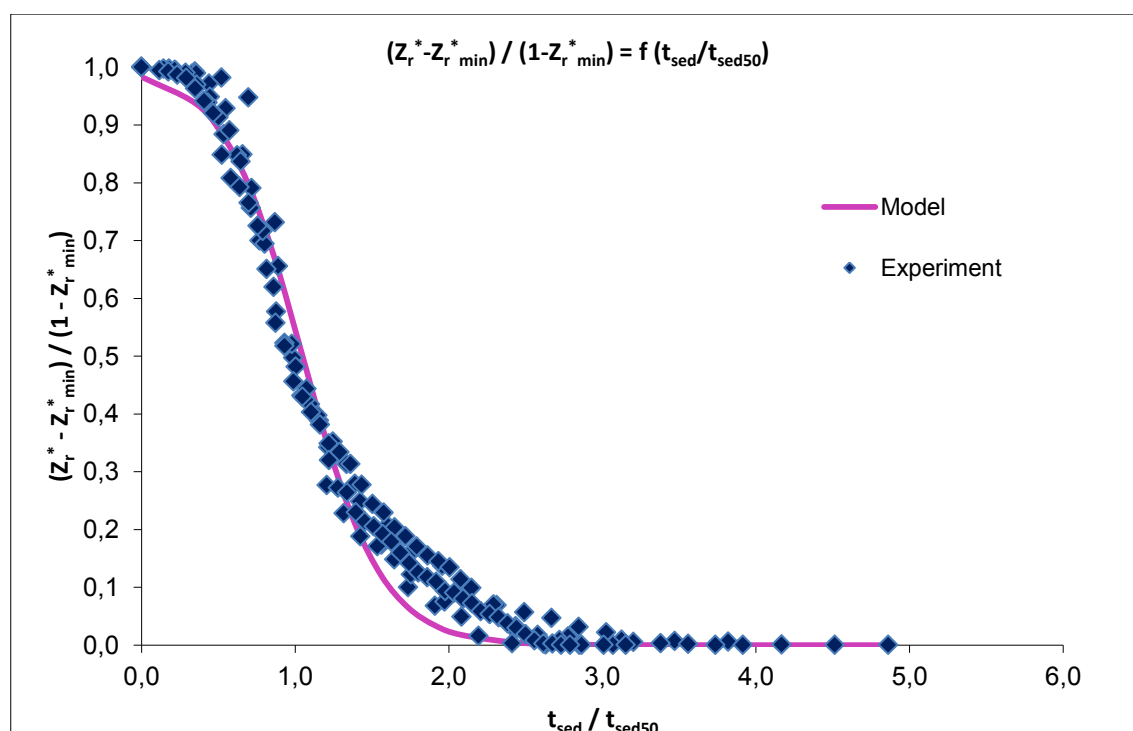
### Generalizovaná korelácia sedimentácie

Namerané údaje boli vyhodnotené pomocou generalizovanej korelácie (4.2), založenej na modeli S - krivky. Parametre sedimentačného modelu sú uvedené v tabuľke 9.4. Na obrázku 9.10, ktorý porovnáva experimentálne dáta a model, je vidieť, že zhoda medzi experimentálnymi dátami a modelom je opäť veľmi dobrá v prvej polovici krivky, v druhej polovici rozdiel nie je tak veľký ako v predchádzajúcom prípade.

Tabuľka 9.4 Parametre generalizovanej korelácie pre sedimentáciu: vplyv merného príkonu  
 –  $c_{K0} = 500 \text{ mg/l}$ ,  $D_F = 0,52 \text{ ml/l}$ , RT

$\epsilon \text{ [W/m}^3\text{]}$	$n \text{ [1/min]}$	$Z_{r \text{ min sed}}^* \text{ [-]}$	$t_{\text{sed}50} \text{ [min]}$
40	0	0,0306	1,44
100	0	0,0256	2,28
200	0	0,0206	2,81
300	0	0,0283	3,49
400	0	0,0986	4,30

Obrázok 9.10 Generalizovaná korelácia pre sedimentáciu ( $D_F = 0,52 \text{ ml/l} - \text{RT}$ )



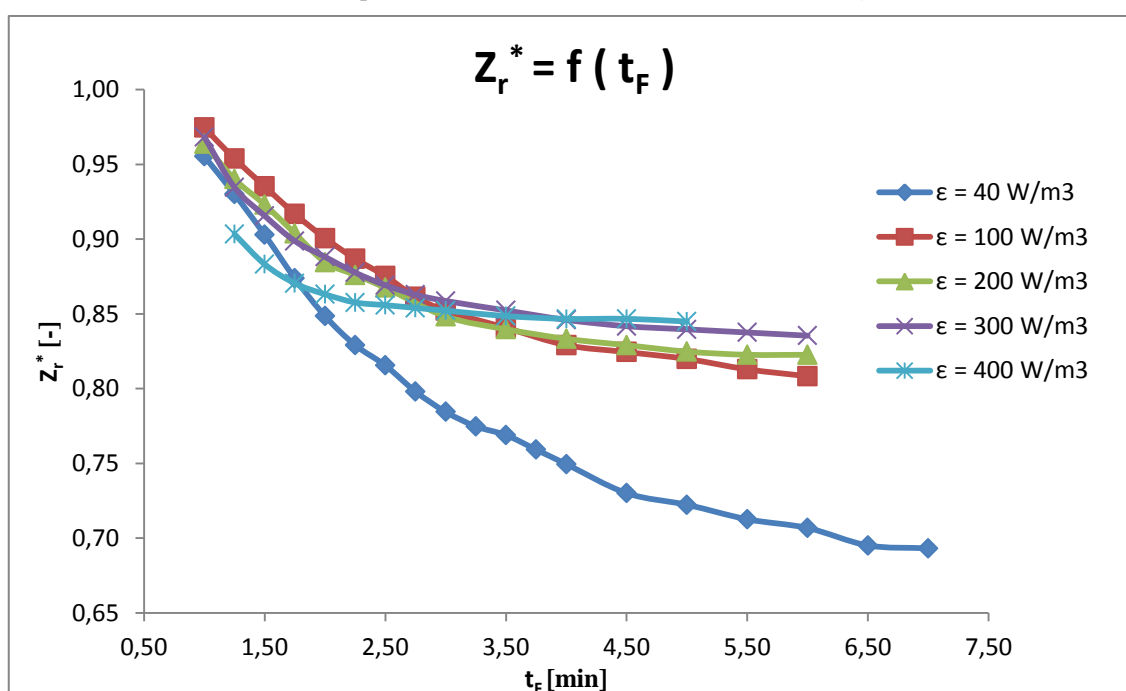
### 9.3. Kaolín, koncentrácia $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ , bezrozmerná dávka flokulantu $D_F/c_{k0} = 3,04 \text{ mg/g}$

#### 9.3.1. Flokulačná krivka

##### Parametre merania:

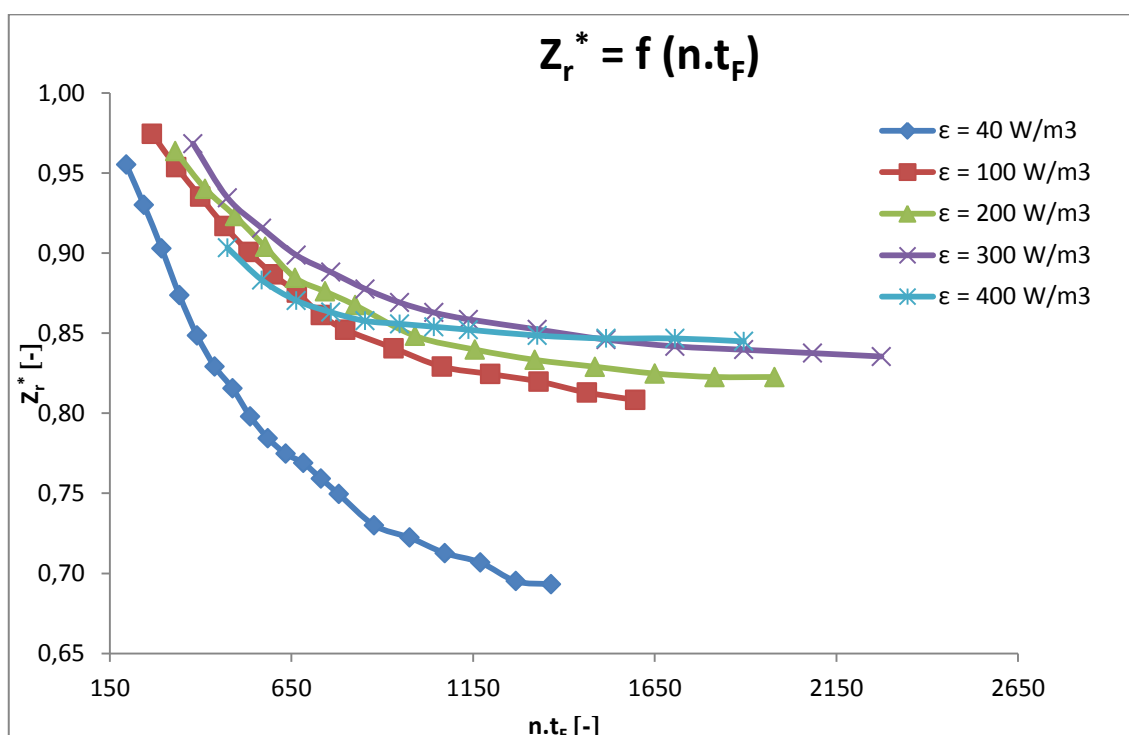
Koncentrácia	$c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$
Priemer nádoby	$D = 190 \text{ mm}$
Miešadlo	Rushtonova turbína $d = 66 \text{ mm}$
Intenzita miešania	$\epsilon_v = 40 - 400 \text{ W/m}^3$
Otáčky	$n = 195 - 417 \text{ ot/min}$
Dávka flokulantu	$D_f = 1,52 \text{ ml/l}$

Obrázok 9.11 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na dobe flokulácie ( $D_F = 1,52 \text{ ml/l} - \text{RT}$ )



S rastúcou dobou flokulácie dochádza k znižovaniu reziduálneho (zbytkového) znečistenia  $Z_r^*$ . Hodnota znečistenia klesá až do určitej minimálnej hodnoty, kedy už sa za daných podmienok ďalšie vločky netvoria, alebo už nerastú. Tak ako pri predošlých dávkach flokulantu sa hodnota zbytkového znečistenia zvyšovala s vyššími mernými príkonmi. Počas flokulácie, pri vyšších otáčkach pravdepodobne dochádzalo k rozbíjaniu už vytvorených vločiek, čo bolo príčinou vyššou hodnotou zbytkového znečistenia v tomto prípade. Najnižšie hodnoty zbytkového znečistenia dosiahol najmenší merný príkon.

Obrázok 9.12 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na bezrozmernej dobe flokulácie ( $D_F = 1,52 \text{ ml/l} - \text{RT}$ )



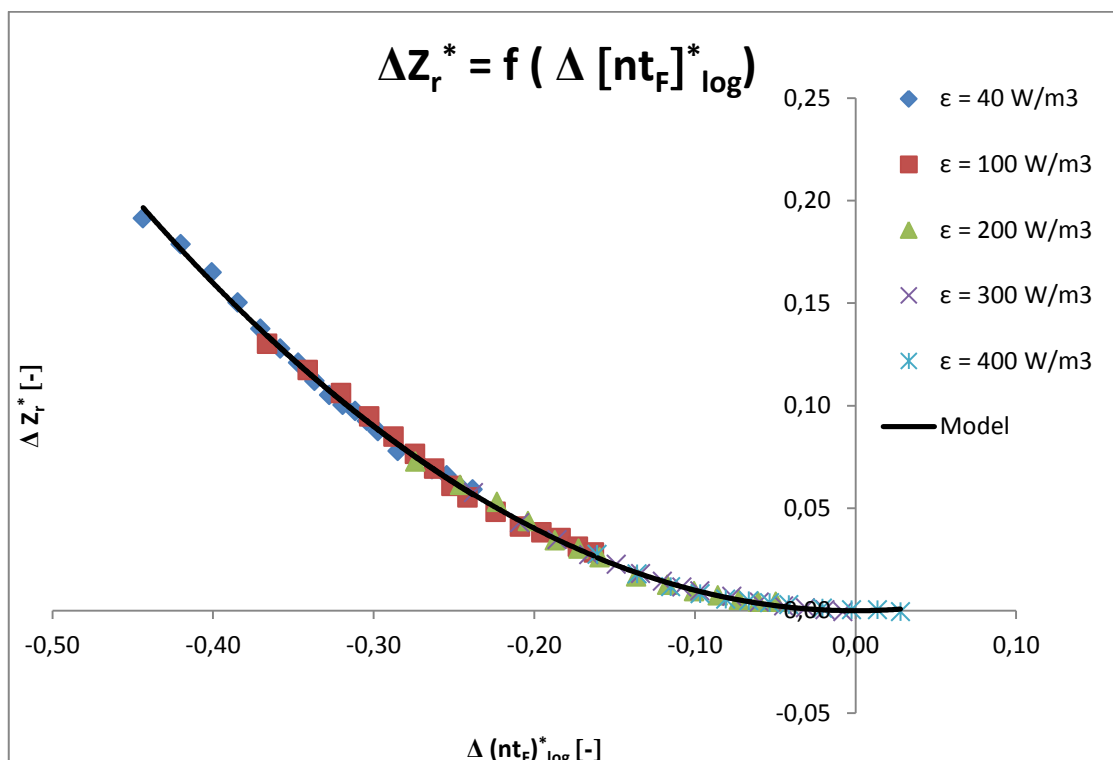
### Generalizovaná korelácia flokulácie

Namerané údaje boli vyhodnotené pomocou generalizovanej korelácie (3.4). Parametre modelu sú uvedené v tabuľke 9.5. Na obrázku 9.13, ktorý porovnáva experimentálne dáta a generalizovanú koreláciu, je vidieť, že podobnosť medzi experimentálnymi dátami a modelom je veľmi vysoká.

Tabuľka 9.5 Parametre generalizovanej korelácie: vplyv merného príkonu –  $c_{K0} = 500 \text{ mg/l}$ ,  $D_F = 1,52 \text{ ml/l}$ , RT

$\epsilon \text{ [W/m}^3\text{]}$	$n \text{ [1/min]}$	$Z_{r \text{ min}}^* \text{ [-]}$	$A^* \text{ [-]}$	$(nt_F)_{\text{min}} \text{ [-]}$
40	195	0,6307	3,6962	5418
100	264	0,7620	2,1440	6701
200	331	0,8213	3,3575	2157
300	379	0,8365	2,7351	2417
400	417	0,8460	2,4642	1542

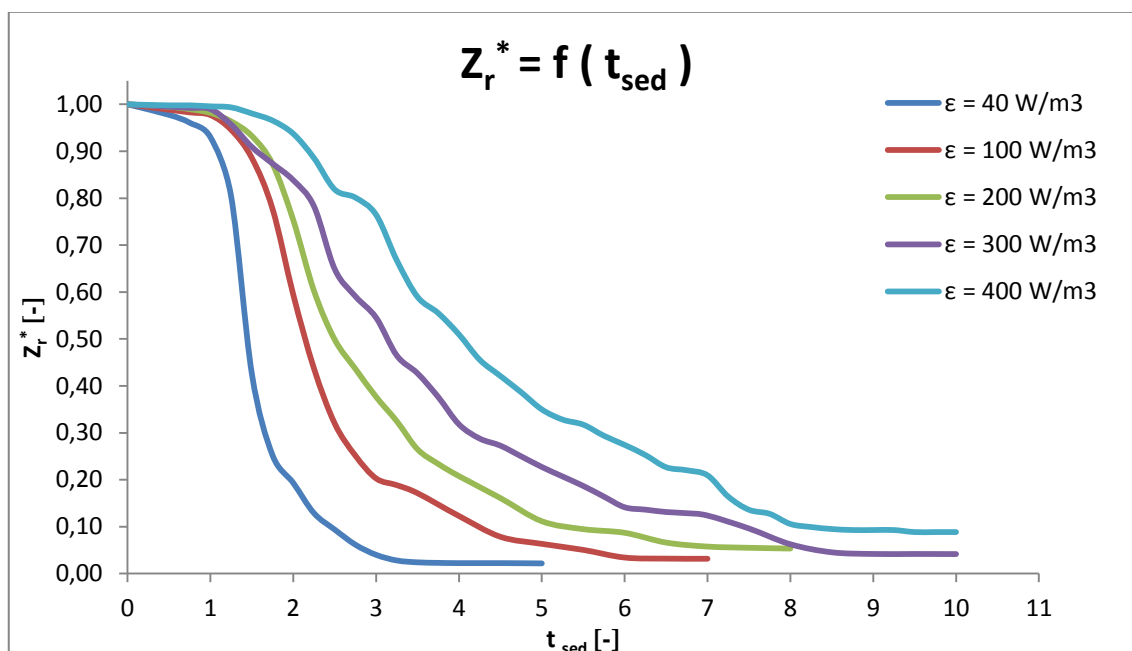
Obrázok 9.13 Generalizovaná korelácia pre kinetiku flokulácie v miešanej nádobe ( $D_F = 1,52 \text{ ml/l} - \text{RT}$ )



### 9.3.2. Sedimentačná krivka

V momente keď bola dosiahnutá minimálna hodnota zákalu pri flokulácii, miešadlo bolo zastavené, a vytvorené vločky sa nechali sedimentovať.

Obrázok 9.14 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na dobe sedimentácie ( $D_F = 1,52 \text{ ml/l} - \text{RT}$ )



S rastúcou dobou sedimentácie dochádza k znižovaniu stupňa reziduálneho znečistenia  $Z_{r \text{ sed}}^*$ . Pri daných otáčkach trvalo približne dve minúty kým sa pohyb suspenzie ustálil a vločky začali sedimentovať. S rastúcou hodnotou merného príkonu

sa doba potrebná pre sedimentáciu všetkých vločiek predlžovala, pričom najvyššie hodnoty merného príkonu nedosiahli po sedimentácii takú hodnotu reziduálneho zákalu ako menšie merné príkony, čo bolo spôsobené vysokými otáčkami pri flokulácii, kedy už dochádzalo k rozbíjaniu už vytvorených vločiek. Najkratšiu dobu sedimentácie dosiahol opäť najmenší merný príkon.

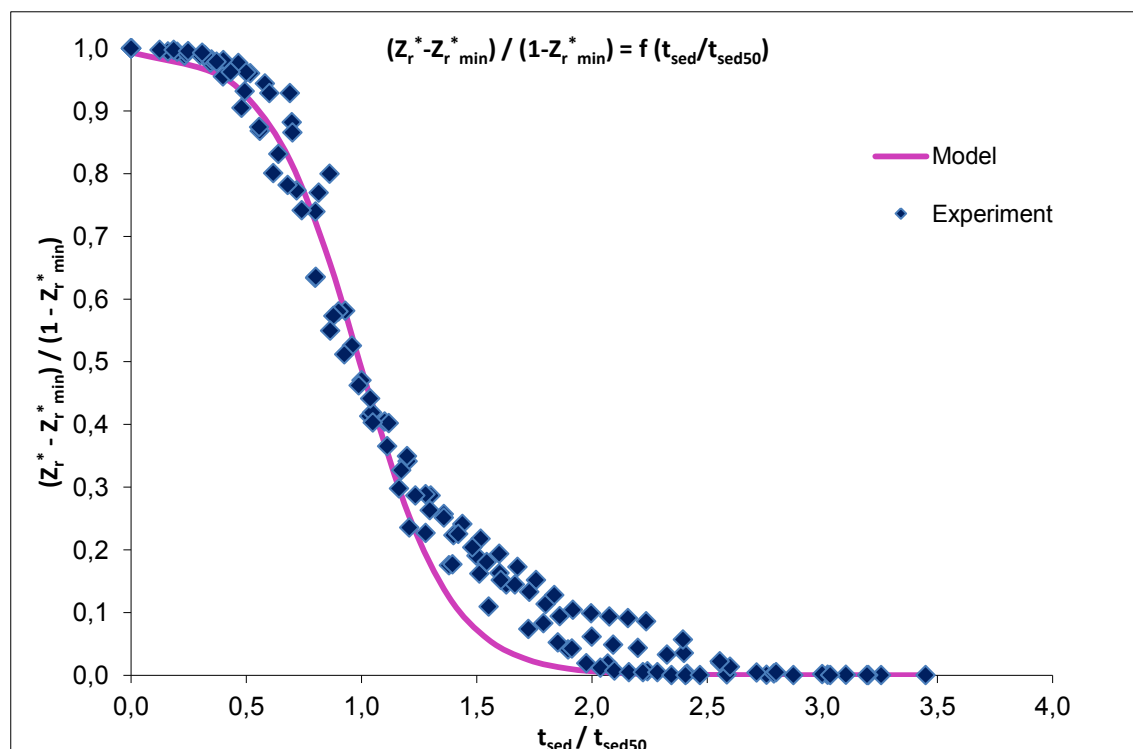
### Generalizovaná korelácia sedimentácie

Namerané údaje boli vyhodnotené pomocou generalizovanej korelácie (4.2), založenej na modeli S - krivky. Parametre sedimentačného modelu sú uvedené v tabuľke 9.6. Na obrázku 9.15, ktorý porovnáva experimentálne dáta a model, je vidieť, že zhoda medzi experimentálnymi dátami a modelom je veľmi dobrá znova v prvej polovici krivky.

Tabuľka 9.6 Parametre generalizovanej korelácie pre sedimentáciu: vplyv merného príkonu  
 –  $c_{K0} = 500 \text{ mg/l}$ ,  $D_F = 1,52 \text{ ml/l}$ , RT

$\epsilon \text{ [W/m}^3\text{]}$	$n \text{ [1/min]}$	$Z_{r \text{ min sed}}^* \text{ [-]}$	$t_{\text{sed}50} \text{ [min]}$
40	0	0,0218	1,45
100	0	0,0317	2,15
200	0	0,0535	2,50
300	0	0,0417	3,13
400	0	0,0886	4,05

Obrázok 9.15 Generalizovaná korelácia pre sedimentáciu ( $D_F = 1,52 \text{ ml/l}$  – RT)



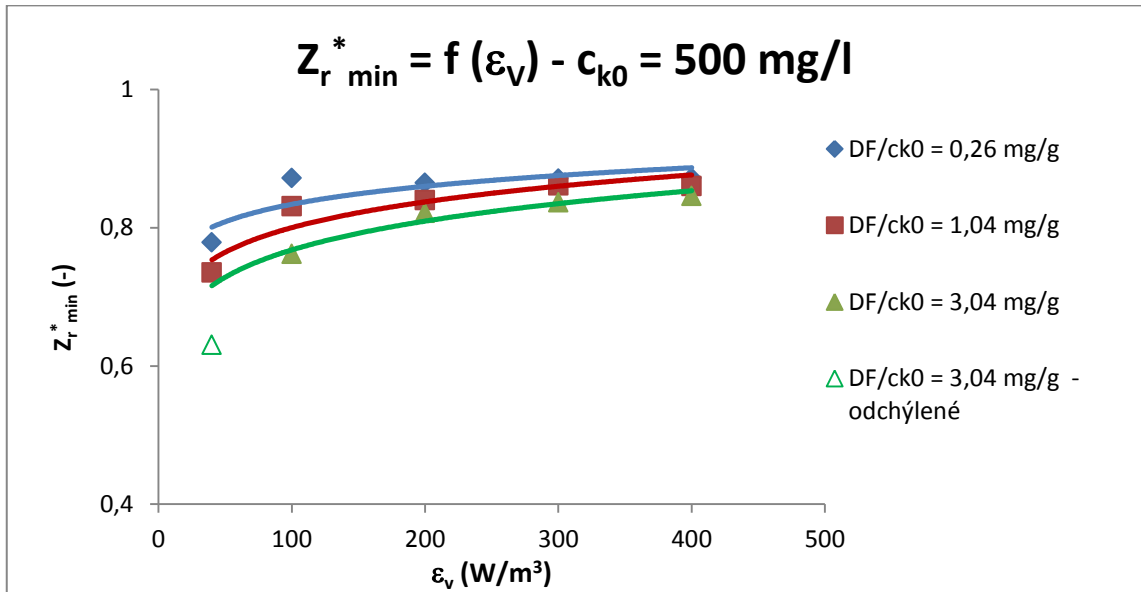


#### 9.4. Porovnanie

Minimálny stupeň reziduálneho znečistenia  $Z_{r \min}^*$  v závislosti na mernom príkone  $\varepsilon$ .

Ako je vidieť z grafu hodnota minimálneho znečistenia sa zvyšovala so zvyšujúcou sa hodnotou merného príkonu vo všetkých meraniach.

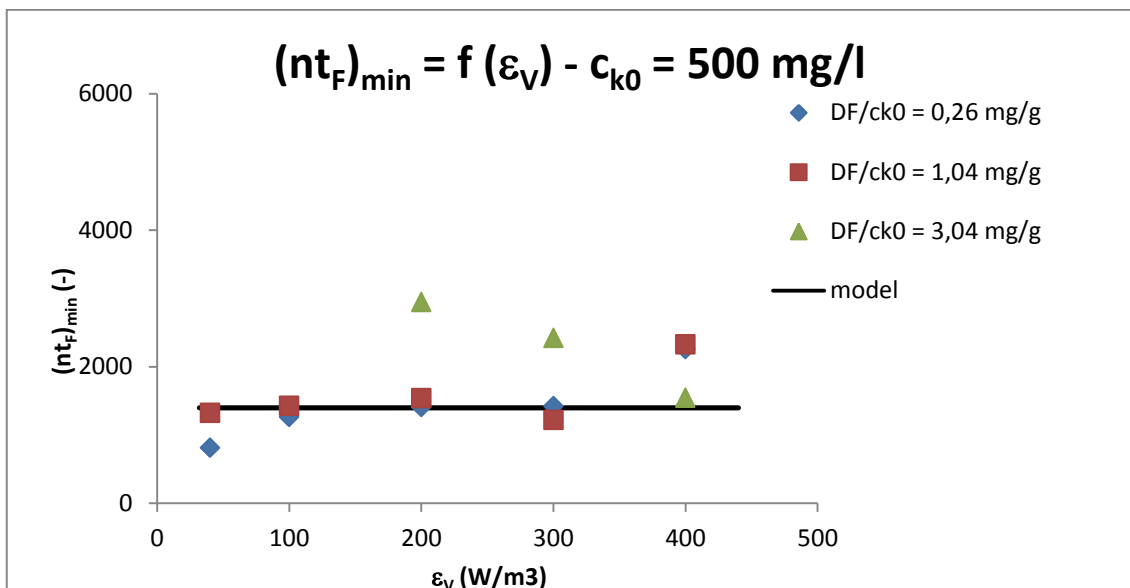
Obrázok 9.16 Závislosť minimálneho stupňa reziduálneho znečistenia na mernom príkone ( $c_{k0} = 500 \text{ mg/l- RT}$ )



Bezrozmerný čas flokulácie  $(nt_F)_{\min}$ , v ktorom môže byť minimálny stupeň reziduálneho znečistenia  $Z_{r \min}^*$  dosiahnutý v závislosti na mernom príkone  $\varepsilon$ .

Ako je vidieť z grafu bezrozmerná doba flokulácie  $(nt_F)_{\min}$  nie je výrazne závislá na bezrozmernej dávke flokulantu  $DF/ck_0$  a je rovná približne hodnote 1 600. Niektoré hodnoty boli pravdepodobne len vychýlené.

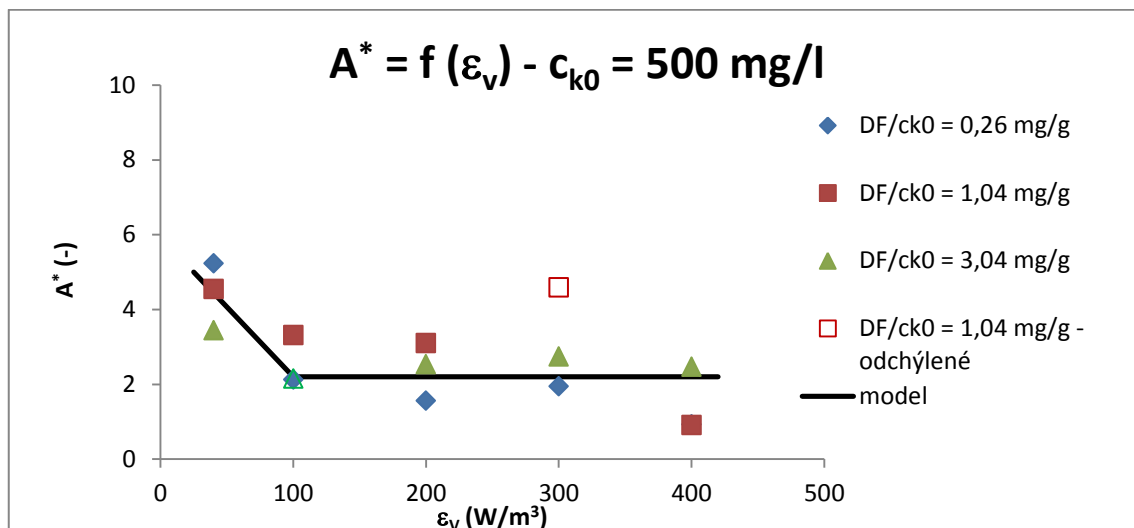
Obrázok 9.17 Závislosť bezrozmerného času flokulácie na mernom príkone ( $c_{k0} = 500 \text{ mg/l- RT}$ )



Súčiniteľ zmeny reziduálneho znečistenia  $A^*$  v závislosti na mernom príkone  $\varepsilon$ .

Z obrázka 9.18 vyplýva že pre všetky bezrozmerné dávky flokulantu  $D_F/c_{k0}$  sa súčiniteľ zmeny reziduálneho znečistenia  $A^*$  znižoval po hodnotu merného príkonu  $\varepsilon_v = 100 \text{ W/m}^3$ , následne boli jeho hodnoty takmer konštantné, jedna hodnota bola pravdepodobne len mierna odchýlka.

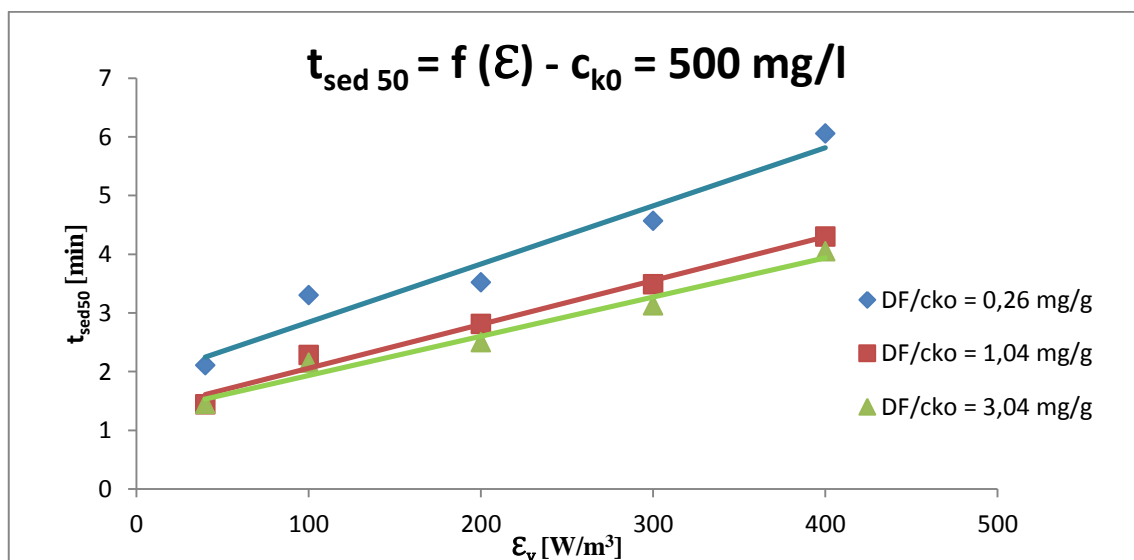
Obrázok 9.18 Závislosť súčiniteľa zmeny reziduálneho znečistenia na mernom príkone ( $c_{k0} = 500 \text{ mg/l- RT}$ )



Čas sedimentácie, v ktorom bola dosiahnutá hodnota reziduálneho znečistenia  $Z_{r \text{ sed}}^* = 0,5$  v závislosti na mernom príkone  $\varepsilon_v$ .

V obrázku 9.19 vidno, že čas sedimentácie, v ktorom bola dosiahnutá hodnota  $Z_{r \text{ sed}}^* = 0,5$  sa predlžoval pri zvyšujúcich sa hodnotách merného príkonu  $\varepsilon_v$ , a to pre všetky použité bezrozmerné dávky flokulantu  $D_F/c_{k0}$ . Pri vyšších dávkach flokulantu sa pravdepodobne vytvárajú kompaktnějšíe vločky, ktoré rýchlejšie sedimentujú a vďaka tomu sú hodnoty doby sedimentácie pre vyššie bezrozmerné dávky flokulantu nižšie.

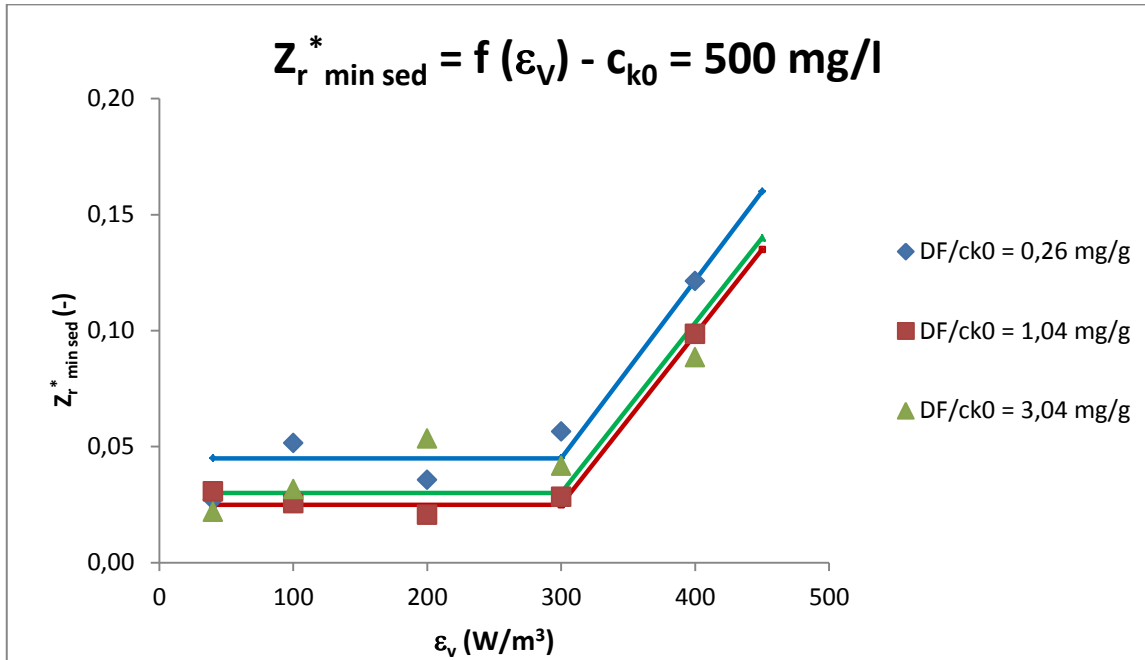
Obrázok 9.19 Závislosť doby sedimentácie na mernom príkone ( $c_{k0} = 500 \text{ mg/l- RT}$ )



Minimálna dosiahnutá hodnota reziduálneho stupňa vyčistenia pri sedimentácii  $Z_{r \min \text{ sed}}^*$  v závislosti na mernom príkone  $\varepsilon$ .

Z obrázka 9.20 vyplýva, že pre všetky bezrozmerné dávky flokulantu  $D_F/c_{k0}$  sa hodnota reziduálneho stupňa znečistenia  $Z_{r \min \text{ sed}}^*$  takmer nemenila po merné príkony do  $\varepsilon = 300 \text{ W/m}^3$ , následne pri ďalšom zvýšení merného príkonu začala hodnota  $Z_{r \min \text{ sed}}^*$  rásť.

Obrázok 9.20 Závislosť minimálneho stupňa reziduálneho znečistenia pri sedimentácii na mernom príkone ( $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ - RT)



## 10. Vplyv zmeny merného príkonu na flokuláciu pre koncentráciu kaolínu $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ a bezrozmernú dávku flokulantu $D_F/c_{k0} = 0,26 - 1,04 - 3,04 \text{ mg/g}$ pre šesť lopatkové miešadlo.

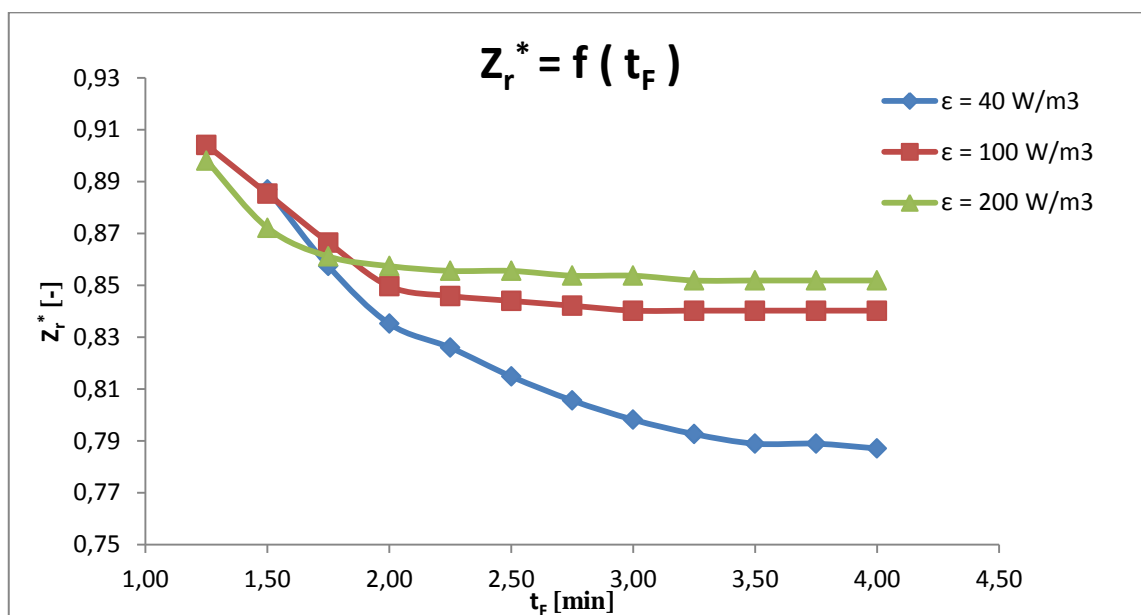
### 10.1. Kaolín, koncentrácia $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ , bezrozmerná dávka flokulantu $D_F/c_{k0} = 0,26 \text{ mg/g}$

#### 10.1.1. Flokulačná krivka

##### Parametre merania:

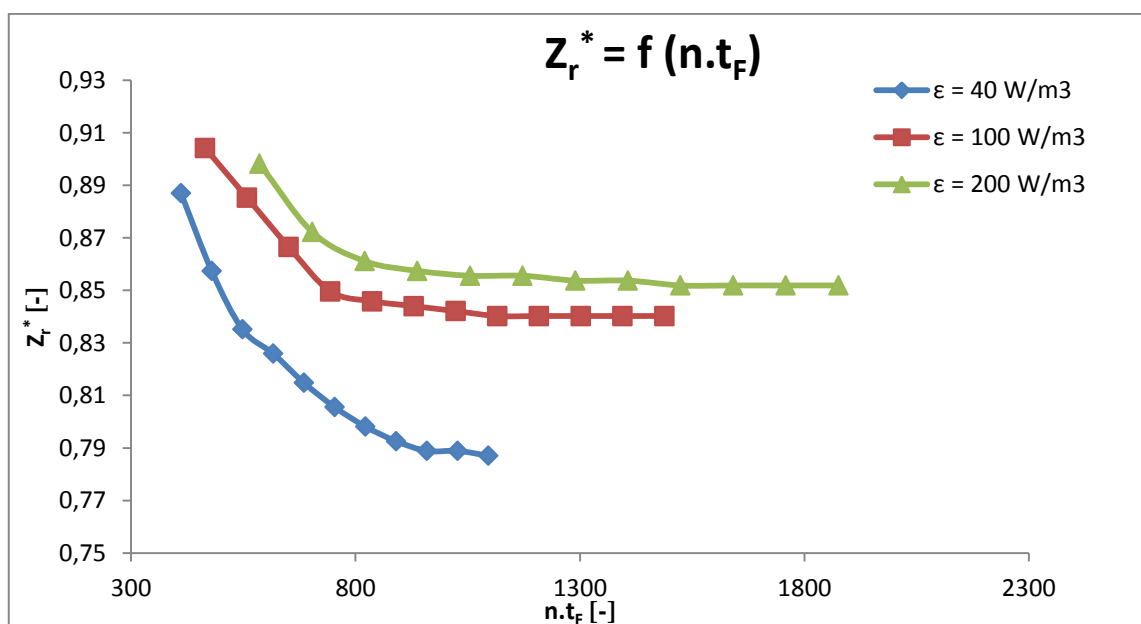
Koncentrácia	$c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$
Priemer nádoby	$D = 190 \text{ mm}$
Miešadlo	Šesť lopatkové miešadlo so šikmými lopatkami $d = 66 \text{ mm}$
Intenzita miešania	$\varepsilon_v = 40 - 400 \text{ W/m}^3$
Otáčky	$n = 274 - 468 \text{ ot/min}$
Dávka flokulantu	$D_f = 0,13 \text{ ml/l}$

Obrázok 10.1 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na dobe flokulácie ( $D_F = 0,13 \text{ ml/l}$  - šestlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)



S rastúcou dobou flokulácie dochádza k znižovaniu reziduálneho (zbytkového) znečistenia  $Z_r^*$ . Hodnota znečistenia klesá až do určitej minimálnej hodnoty, kedy už sa za daných podmienok ďalšie vločky netvorí, alebo už nerastú. Najnižšiu hodnotu zbytkového znečistenia  $Z_r^*$  dosiahol najnižší merný príkon  $\epsilon = 40 \text{ W/m}^3$ , všetky vyššie hodnoty merného príkonu dosiahli o dosť vyššie hodnoty zbytkového znečistenia, čo bolo pravdepodobne zapríčinené vyššími otáčkami pri flokulácii, kedy sa vločky tvorili, ale zároveň boli aj rozbíjané.

Obrázok 10.2 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na bezrozmernom čase flokulácie ( $D_F = 0,13 \text{ ml/l}$  - šestlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)



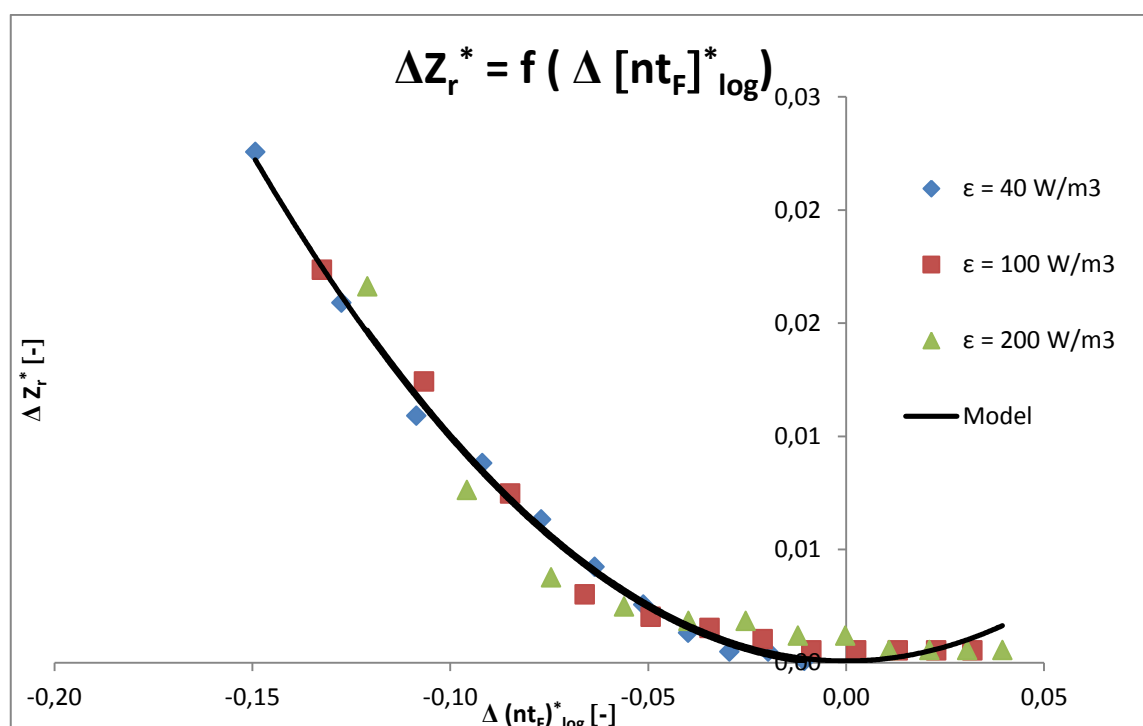
## Generalizovaná korelácia flokulácie

Namerané údaje boli vyhodnotené pomocou generalizovanej korelácie (3.4). Parametre modelu sú uvedené v tabuľke 10.1. Na obrázku 10.3, ktorý porovnáva experimentálne dáta a generalizovanú koreláciu, je vidieť, že podobnosť medzi experimentálnymi dátami a modelom je dobrá.

Tabuľka 10.1 Parametre generalizovanej korelácie: vplyv merného príkonu –  $c_{K0} = 500 \text{ mg/l}$ ,  $D_F = 0,13 \text{ ml/l}$ , šesťlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami

$\epsilon \text{ [W/m}^3\text{]}$	$n \text{ [1/min]}$	$Z_r^* \text{ [-]}$	$A^* \text{ [-]}$	$(nt_F)_{\min} \text{ [-]}$
40	274	0,7867	5,6486	1181
100	372	0,8382	4,5325	1187
200	468	0,8503	3,3877	1409

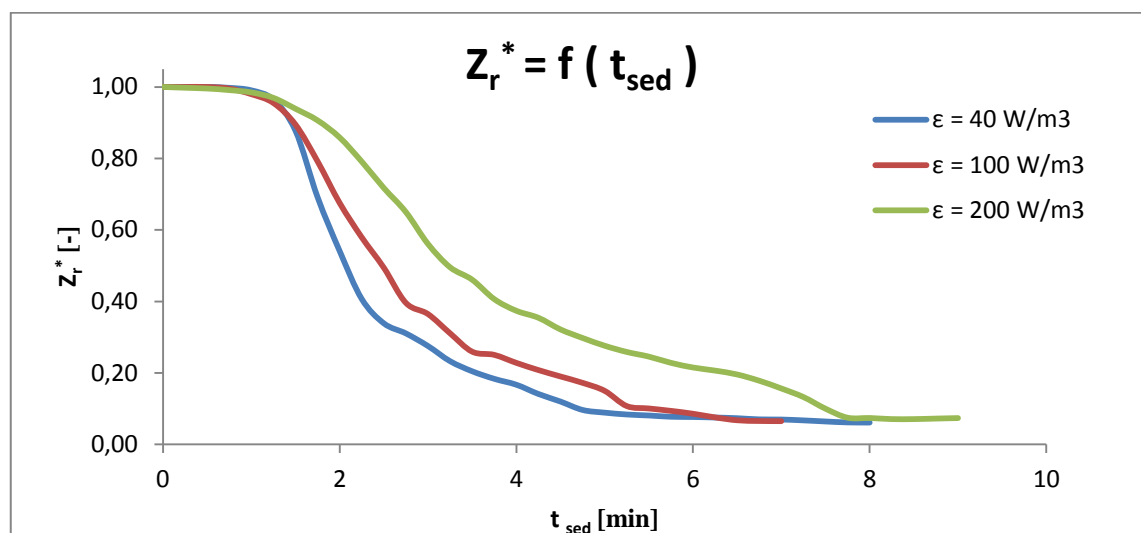
Obrázok 10.3 Generalizovaná korelácia pre kinetiku flokulácie v miešanej nádobe ( $D_F = 0,13 \text{ ml/l}$  - šesťlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)



### 10.1.2. Sedimentačná krivka

V momente keď bola dosiahnutá minimálna hodnota zákalu pri flokulácii, miešadlo bolo zastavené, a vytvorené vločky sa nechali sedimentovať.

Obrázok 10.4 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na dobe sedimentácie ( $D_F = 0,13 \text{ ml/l}$  - šesťlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)



S rastúcou dobou sedimentácie dochádza k znižovaniu stupňa reziduálneho znečistenia  $Z_{r \text{ sed}}^*$ . Pri daných otáčkach trvalo takmer dve minúty kým sa pohyb suspenzie ustálil a vločky začali sedimentovať. Najdlhší čas sedimentácie  $t_{sed}$  dosiahol najväčší merný príkon  $\epsilon = 200 \text{ W/m}^3$ , čo mohlo byť spôsobené vysokými otáčkami pri flokulácii, kedy už dochádzalo k rozbiťaniu už vytvorených vločiek. Všetky hodnoty merného výkonu dosiahli podobné hodnoty stupňa reziduálneho znečistenia.

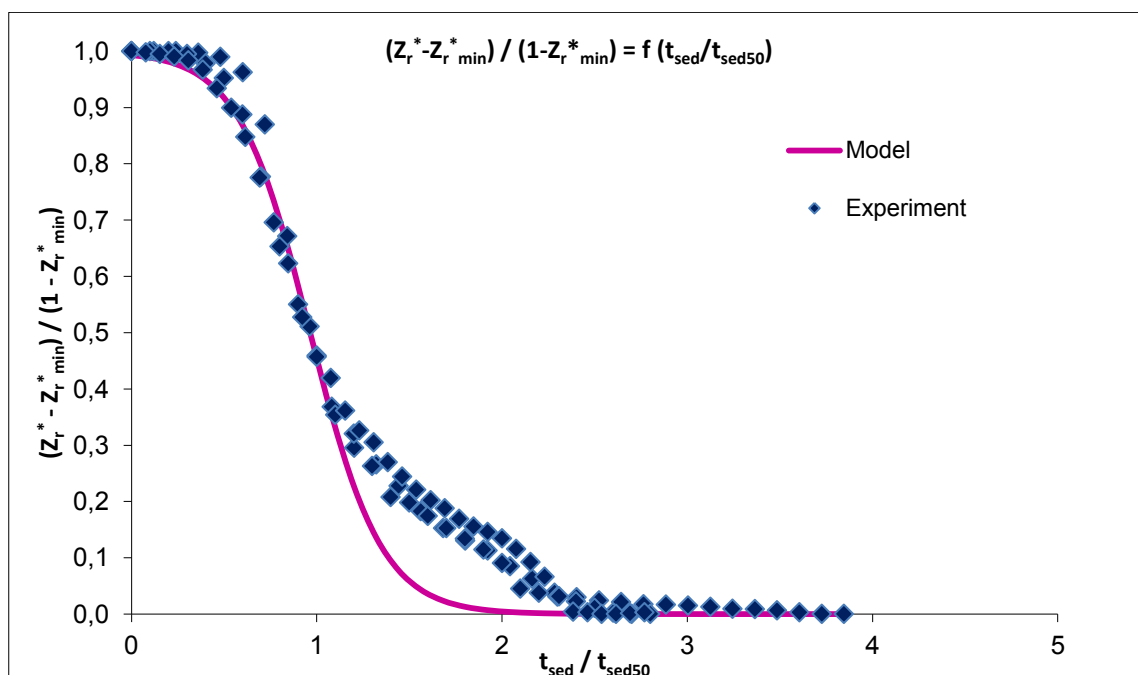
#### Generalizovaná korelácia sedimentácie

Namerané údaje boli vyhodnotené pomocou generalizovanej korelácie (4.2), založenej na modeli S - krivky. Parametre sedimentačného modelu sú uvedené v tabuľke 10.2. Na obrázku 10.5, ktorý porovnáva experimentálne dáta a model, je vidieť, že zhoda medzi experimentálnymi dátami a modelom je opäť veľmi dobrá v prvej polovici krivky.

Tabuľka 10.2 Parametre generalizovanej korelácie pre sedimentáciu: vplyv merného príkonu –  $c_{K0} = 500 \text{ mg/l}$ ,  $D_F = 0,13 \text{ ml/l}$ , šesťlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami

$\epsilon$ [ $\text{W/m}^3$ ]	$n$ [1/min]	$Z_{r \text{ min sed}}^*$ [-]	$t_{sed50}$ [min]
40	0	0,0612	2,08
100	0	0,0651	2,50
200	0	0,0709	3,25

Obrázok 10.5 Generalizovaná korelácia pre sedimentáciu  
( $D_F = 0,13 \text{ ml/l}$  - šestlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)



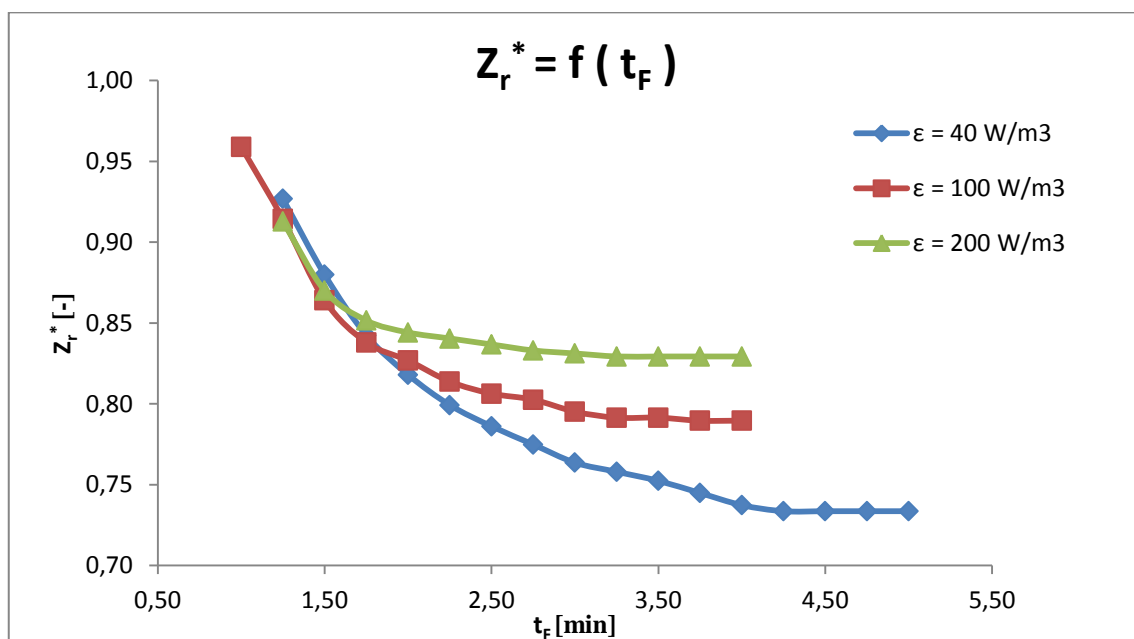
**10.2. Kaolín, koncentrácia  $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ , bezrozmerná dávka flokulantu  
 $D_F/c_{k0} = 1,04 \text{ mg/g}$**

**10.2.1. Flokulačná krivka**

**Parametre merania:**

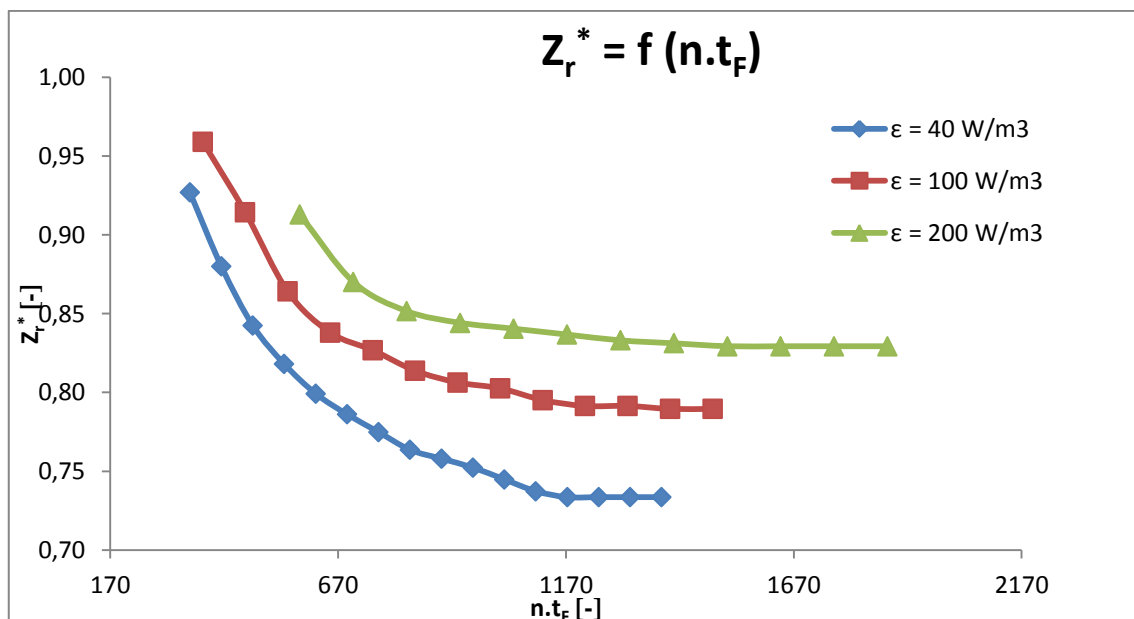
Koncentrácia	$c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$
Priemer nádoby	$D = 190 \text{ mm}$
Miešadlo	Šesť lopatkové miešadlo so šikmými lopatkami $d = 66 \text{ mm}$
Intenzita miešania	$\epsilon_v = 40 - 400 \text{ W/m}^3$
Otáčky	$n = 274 - 468 \text{ ot/min}$
Dávka flokulantu	$D_f = 0,52 \text{ ml/l}$

Obrázok 10.6 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na dobe flokulácie ( $D_F = 0,52 \text{ ml/l}$  - šestlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)



S rastúcou dobou flokulácie dochádza k znižovaniu reziduálneho (zbytkového) znečistenia  $Z_r^*$ . Hodnota znečistenia klesá až do určitej minimálnej hodnoty, kedy už sa za daných podmienok ďalšie vločky netvoria, alebo už nerastú. Najnižšiu hodnotu zbytkového znečistenia  $Z_r^*$  dosiahol najnižší merný príkon  $\epsilon$ , všetky vyššie hodnoty merného príkonu dosiahli vyššie hodnoty zbytkového znečistenia, čo bolo pravdepodobne zapríčinené vyššími otáčkami pri flokulácii, kedy sa vločky tvorili, ale zároveň boli aj rozbiťané.

Obrázok 10.7 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na bezrozmernej dobe flokulácie ( $D_F = 0,52 \text{ ml/l}$  - šestlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)





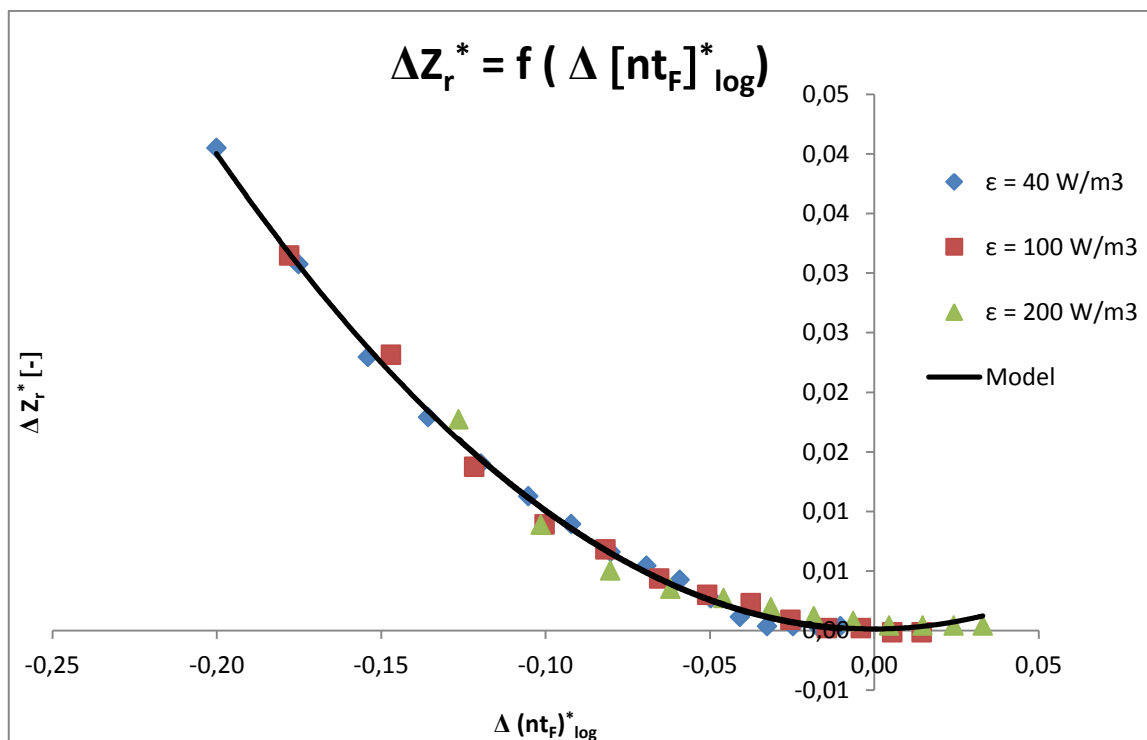
## Generalizovaná korelácia flokulácie

Namerané údaje boli vyhodnotené pomocou generalizovanej korelácie (3.4). Parametre modelu sú uvedené v tabuľke 10.3. Na obrázku 10.8, ktorý porovnáva experimentálne dáta a generalizovanú koreláciu, je vidieť, že podobnosť medzi experimentálnymi dátami a modelom je vysoká.

Tabuľka 10.3 Parametre generalizovanej korelácie: vplyv merného príkonu –  $c_{K0} = 500 \text{ mg/l}$ ,  $D_F = 0,52 \text{ ml/l}$ , šesťlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami

$\epsilon \text{ [W/m}^3\text{]}$	$n \text{ [1/min]}$	$Z_r^* \text{ [-]}$	$A^* \text{ [-]}$	$(nt_f)_{\min} \text{ [-]}$
40	274	0,7319	6,5764	1488
100	372	0,7904	6,7811	1344
200	468	0,8273	5,8298	1474

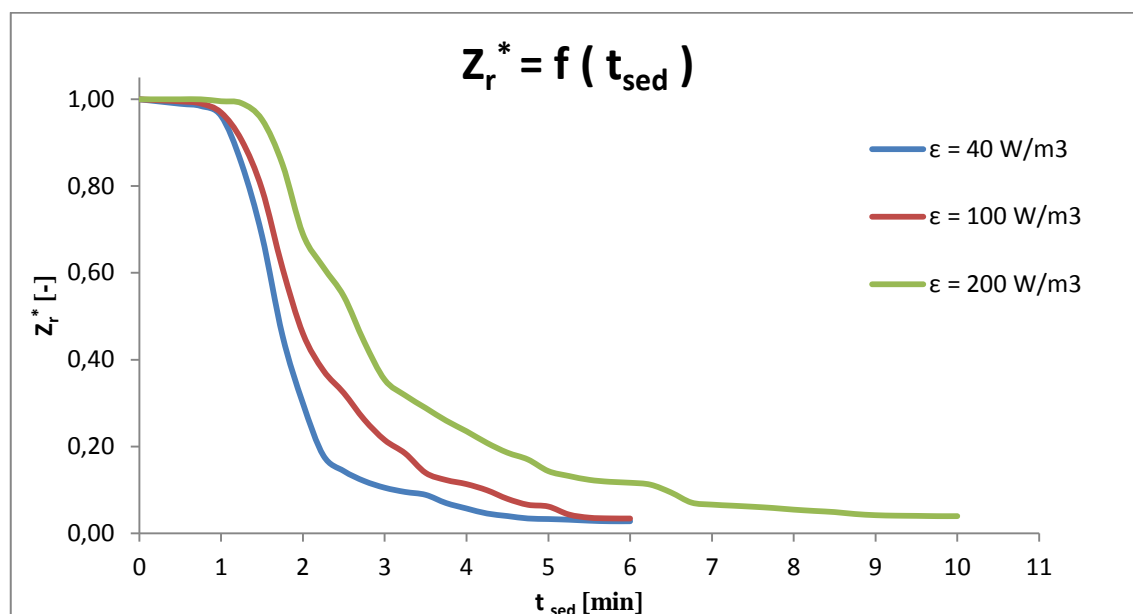
Obrázok 10.8 Generalizovaná korelácia pre kinetiku flokulácie v miešanej nádobe ( $D_F = 0,52 \text{ ml/l}$  - šesťlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)



### 10.2.2. Sedimentačná krivka

V momente keď bola dosiahnutá minimálna hodnota zákalu pri flokulácii, miešadlo bolo zastavené, a vytvorené vločky sa nechali sedimentovať.

Obrázok 10.9 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na dobe sedimentácie ( $D_F = 0,52 \text{ ml/l}$  - šesťlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)



S rastúcou dobou sedimentácie dochádza k znižovaniu stupňa reziduálneho znečistenia  $Z_{r \text{ sed}}^*$ . Pri daných otáčkach trvalo takmer dve minúty kým sa pohyb suspenzie ustálil a vločky začali sedimentovať. Všetky hodnoty merných príkonov dosiahli podobné hodnoty stupňa reziduálneho znečistenia, no najväčšiemu mernému príkonu  $\epsilon = 200 \text{ W/m}^3$  trvalo takmer dvojnásobnú dobu sedimentácie, aby sa dostala na podobnú hodnotu stupňa reziduálneho znečistenia ako menšie merné príkony. Čo mohlo byť spôsobené vysokými otáčkami pri flokulácii, kedy už dochádzalo k rozbíjaniu už vytvorených vločiek.

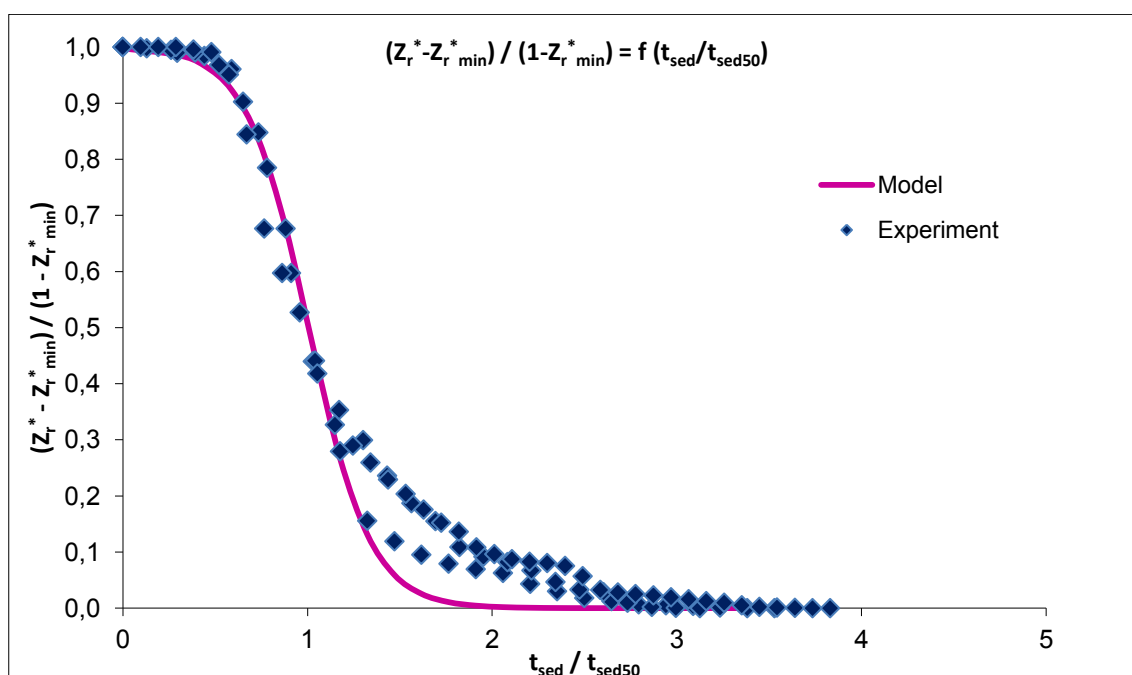
#### Generalizovaná korelácia sedimentácie

Namerané údaje boli vyhodnotené pomocou generalizovanej korelácie (4.2), založenej na modeli S - krivky. Parametre sedimentačného modelu sú uvedené v tabuľke 10.4. Na obrázku 10.10, ktorý porovnáva experimentálne dáta a model, je vidieť, že zhoda medzi experimentálnymi dátami a modelom je dobrá.

Tabuľka 10.4 Parametre generalizovanej korelácie pre sedimentáciu: vplyv merného príkonu –  $c_{K0} = 500 \text{ mg/l}$ ,  $D_F = 0,52 \text{ ml/l}$ , šesťlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami

$\epsilon$ [ $\text{W/m}^3$ ]	$n$ [1/min]	$Z_{r \text{ min sed}}^*$ [-]	$t_{sed50}$ [min]
40	0	0,0276	1,70
100	0	0,0340	1,92
200	0	0,0394	2,61

Obrázok 10.10 Generalizovaná korelácia pre sedimentáciu  
( $D_F = 0,52 \text{ ml/l}$  - šestlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)



### 10.3. Kaolín, koncentrácia $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ , bezrozmerná dávka flokulantu

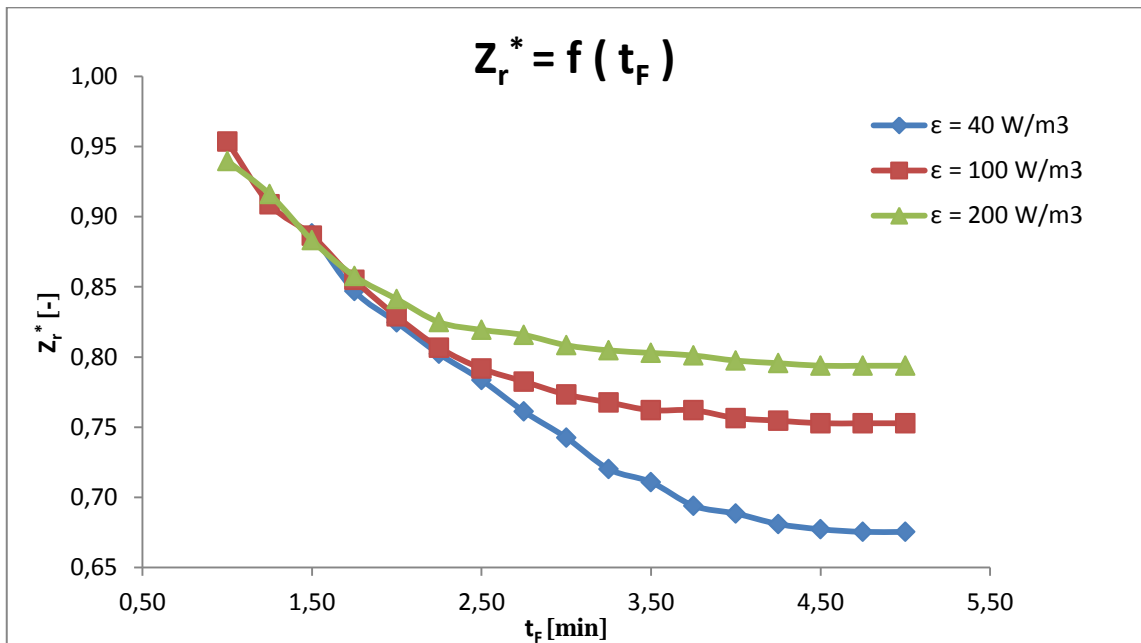
$D_F/c_{k0} = 3,04 \text{ mg/g}$

#### 10.3.1. Flokulačná krivka

##### Parametre merania:

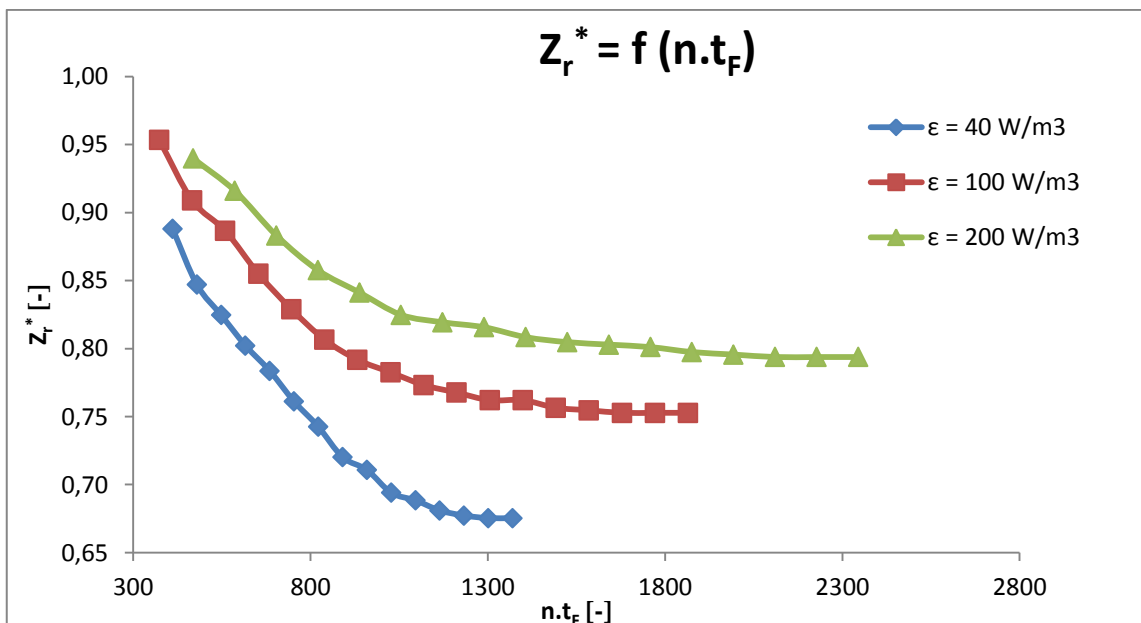
Koncentrácia	$c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$
Priemer nádoby	$D = 190 \text{ mm}$
Miešadlo	Šesť lopatkové miešadlo so šikmými lopatkami $d = 66 \text{ mm}$
Intenzita miešania	$\epsilon_v = 40 - 400 \text{ W/m}^3$
Otáčky	$n = 274 - 468 \text{ ot/min}$
Dávka flokulantu	$D_f = 1,52 \text{ ml/l}$

Obrázok 10.11 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na dobe flokulácie  
( $D_F = 1,52 \text{ ml/l}$  - šestlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)



S rastúcou dobou flokulácie dochádza k znižovaniu reziduálneho (zbytkového) znečistenia  $Z_r^*$ . Hodnota znečistenia klesá až do určitej minimálnej hodnoty, kedy už sa za daných podmienok ďalšie vločky netvorí, alebo už nerastú. Najnižšiu hodnotu zbytkového znečistenia  $Z_r^*$  dosiahol najnižší merný príkon  $\epsilon$ , všetky vyššie hodnoty merného príkonu dosiahli vyššie hodnoty zbytkového znečistenia, čo bolo pravdepodobne zapríčinené vyššími otáčkami pri flokulácii, kedy sa vločky tvorili, ale zároveň boli aj rozbíjané.

Obrázok 10.12 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na bezrozmernej dobe flokulácie  
( $D_F = 1,52 \text{ ml/l}$  - šestlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)



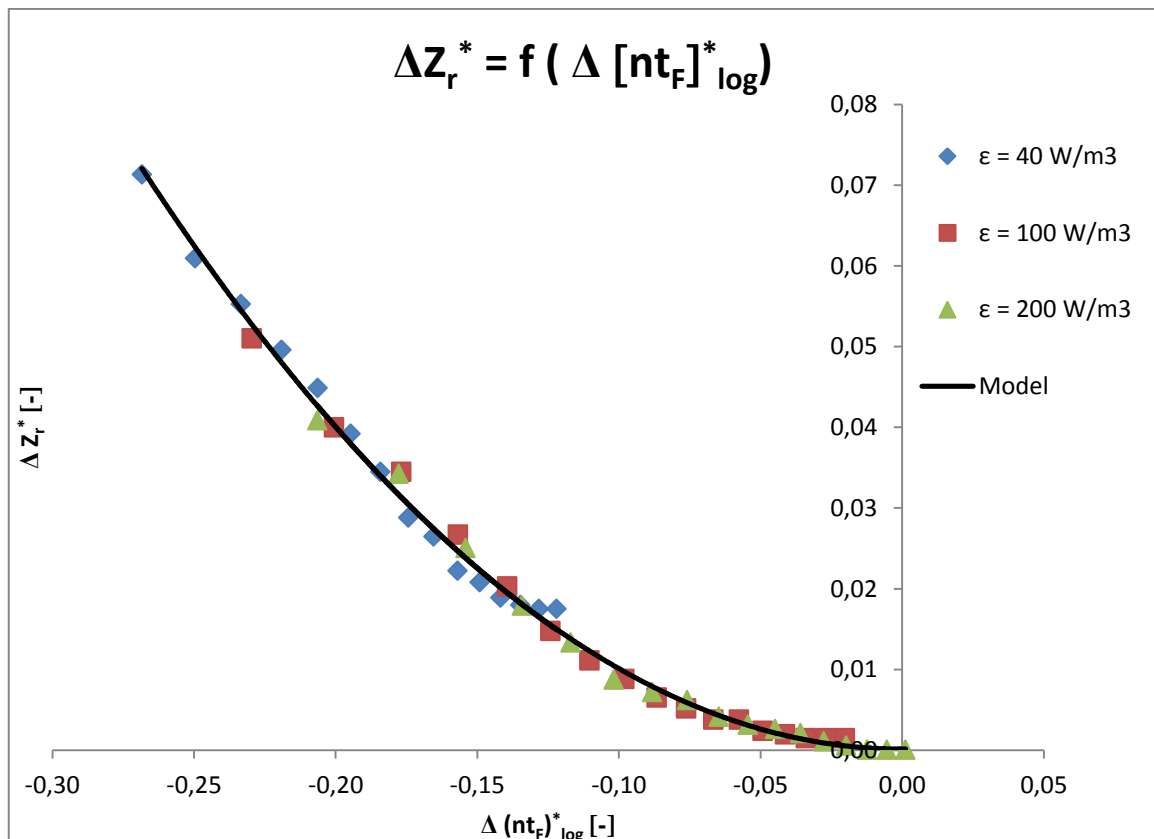
## Generalizovaná korelácia flokulácie

Namerané údaje boli vyhodnotené pomocou generalizovanej korelácie (3.4). Parametre modelu sú uvedené v tabuľke 10.5. Na obrázku 10.13, ktorý porovnáva experimentálne dáta a generalizovanú koreláciu, je vidieť, že podobnosť medzi experimentálnymi dátami a modelom je vysoká.

Tabuľka 10.5 Parametre generalizovanej korelácie: vplyv merného príkonu –  $c_{K0} = 500 \text{ mg/l}$ ,  $D_F = 1,52 \text{ ml/l}$ , šesťlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami

$\epsilon \text{ [W/m}^3\text{]}$	$n \text{ [1/min]}$	$Z_r^* \text{ [-]}$	$A^* \text{ [-]}$	$(nt_f)_{\min} \text{ [-]}$
40	274	0,6063	6,5182	3738
100	372	0,7468	5,4288	2179
200	468	0,7935	4,5094	2324

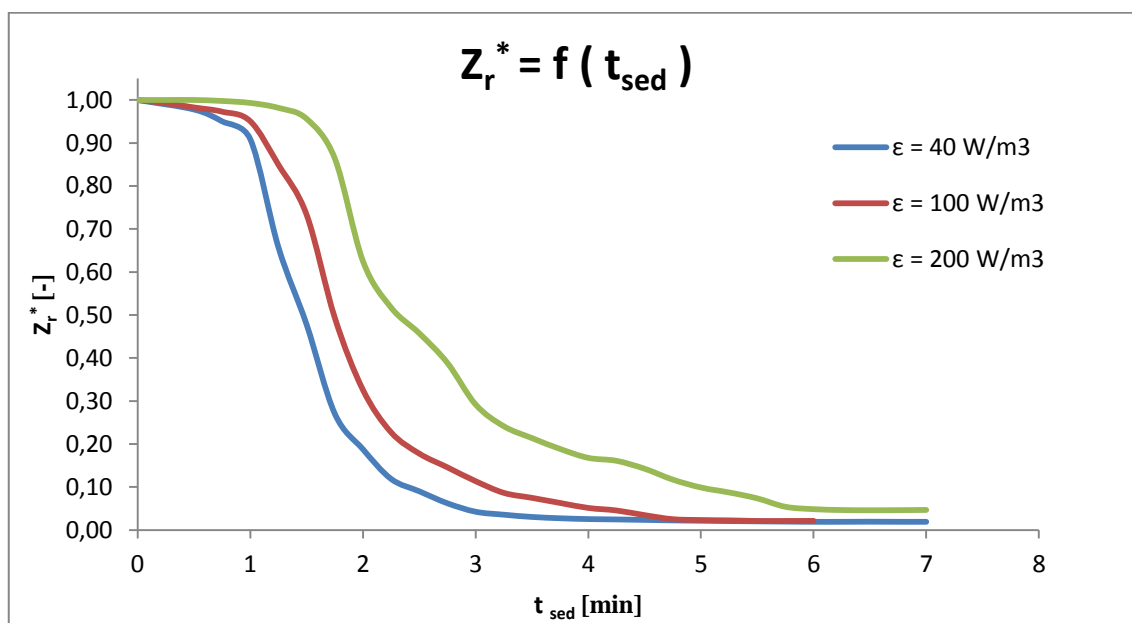
Obrázok 10.13 Generalizovaná korelácie pre kinetiku flokulácie v miešanej nádobe ( $D_F = 1,52 \text{ ml/l}$  - šesťlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)



### 10.3.2. Sedimentačná krivka

V momente keď bola dosiahnutá minimálna hodnota zákalu pri flokulácii, miešadlo bolo zastavené, a vytvorené vločky sa nechali sedimentovať.

Obrázok 10.14 Závislosť stupňa reziduálneho znečistenia na dobe sedimentácie ( $D_F = 1,52 \text{ ml/l}$  - šesťlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)



S rastúcou dobou sedimentácie dochádza k znižovaniu stupňa reziduálneho znečistenia  $Z_{r \text{ sed}}^*$ . Pri daných otáčkach trvalo takmer dve minúty kým sa pohyb suspenzie ustálil a vločky začali sedimentovať. S rastúcou hodnotou merného príkonu sa doba potrebná pre sedimentáciu všetkých vločiek predlžovala, pričom sa najvyššej hodnote merného príkonu  $\epsilon = 200 \text{ W/m}^3$  ani nepodarilo dosiahnuť rovnakého stupňa reziduálneho znečistenia ako menším merným príkonom, čo mohlo byť spôsobené vysokými otáčkami pri flokulácii, kedy už dochádzalo k rozbíjaniu už vytvorených vločiek.

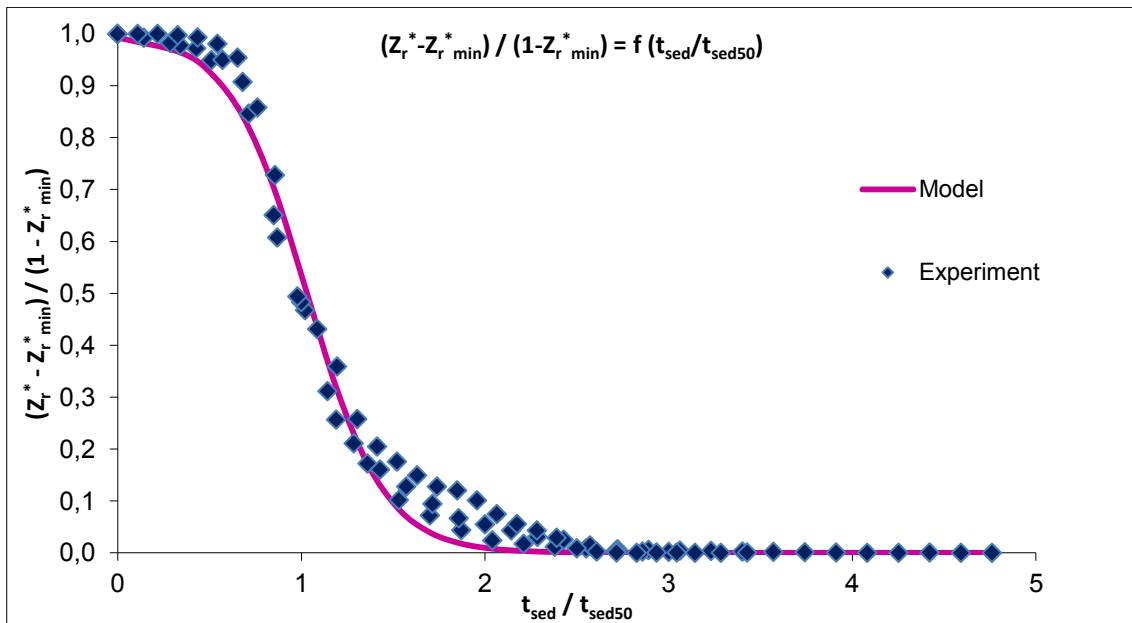
#### Generalizovaná korelácia sedimentácie

Namerané údaje boli vyhodnotené pomocou generalizovanej korelácie (4.2), založenej na modeli S - krivky. Parametre sedimentačného modelu sú uvedené v tabuľke 10.6. Na obrázku 10.15, ktorý porovnáva experimentálne dáta a model, je vidieť, že zhoda medzi experimentálnymi dátami a modelom je dobrá.

Tabuľka 10.6 Parametre generalizovanej korelácie pre sedimentáciu: vplyv merného príkonu –  $c_{K0} = 500 \text{ mg/l}$ ,  $D_F = 1,52 \text{ ml/l}$ , šesťlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami

$\epsilon \text{ [W/m}^3\text{]}$	$n \text{ [1/min]}$	$Z_{r \text{ min sed}}^* \text{ [-]}$	$t_{sed50} \text{ [min]}$
40	0	0,0191	1,47
100	0	0,0210	1,75
200	0	0,0460	2,30

Obrázok 10.15 Generalizovaná korelácia pre sedimentáciu  
( $D_F = 1,52 \text{ ml/l}$  - šestlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)

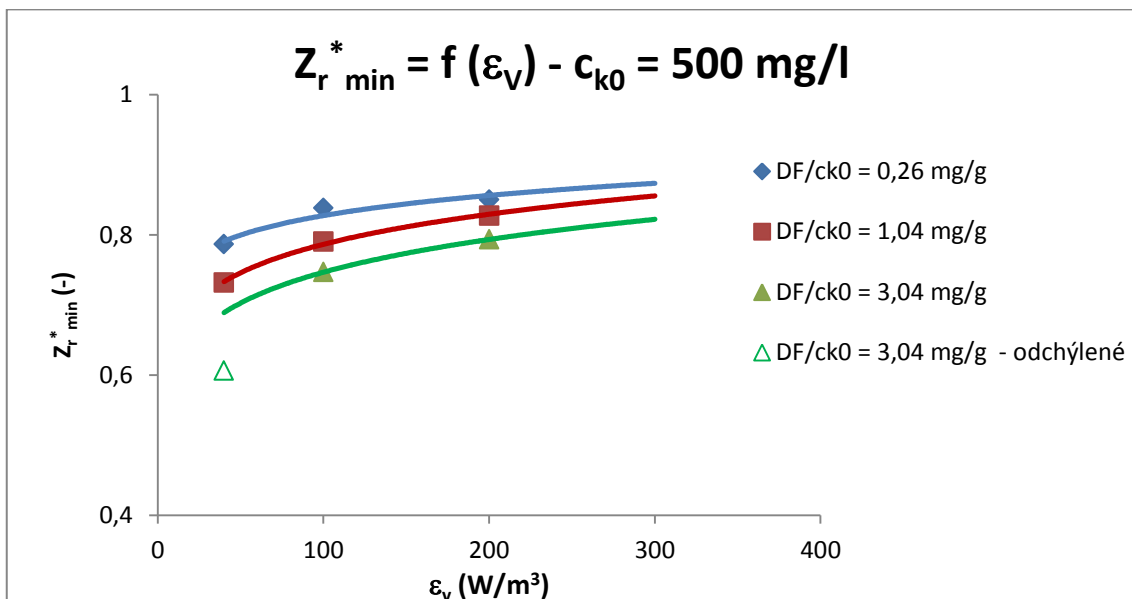


#### 10.4. Porovnanie

Minimálny stupeň reziduálneho znečistenia  $Z_{r \min}^*$  v závislosti na mernom príkone  $\varepsilon$ .

Ako je vidieť z grafu hodnota minimálneho znečistenia sa zvyšovala so zvyšujúcou sa hodnotou merného príkonu pri všetkých bezrozmerných dávkach flokulantu. Najnižšia bezrozmerná dávka flokulantu  $D_F/c_{k0} = 0,26 \text{ mg/g}$  mala najmenší rast minimálneho stupňa reziduálneho znečistenia.

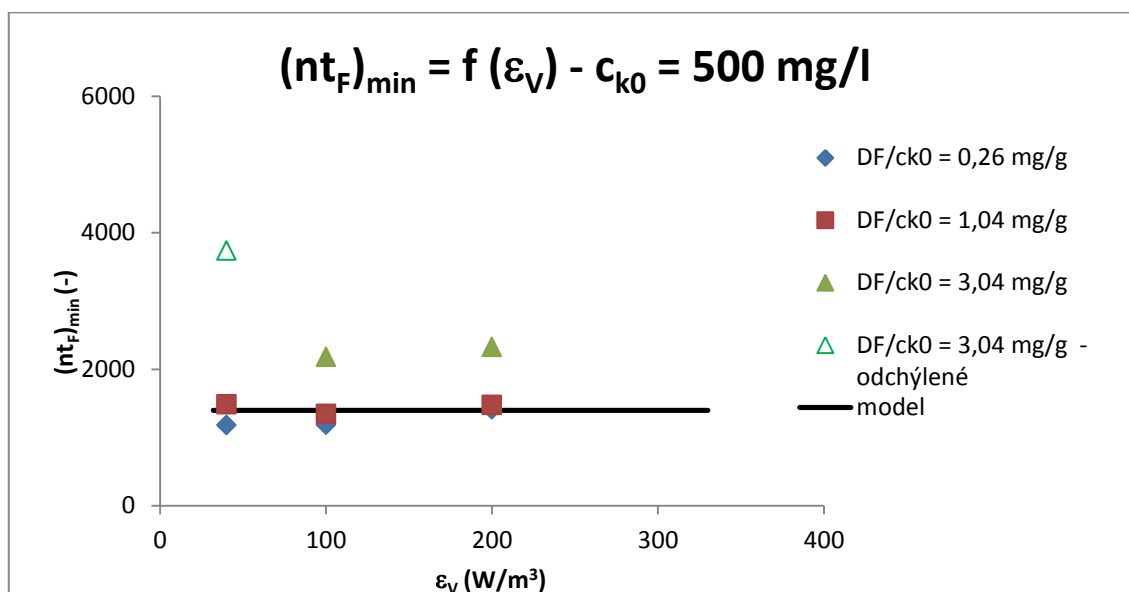
Obrázok 10.16 Závislosť minimálneho stupňa reziduálneho znečistenia na mernom príkone  
( $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$  - šesťlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)



Bezrozmerný čas flokulácie  $(nt_F)_{min}$ , v ktorom môže byť minimálny stupeň reziduálneho znečistenia  $Z_r^*_{min}$  dosiahnutý v závislosti na mernom príkone  $\varepsilon$ .

Bezrozmerná doba flokulácie  $(nt_F)_{min}$  nie je výrazne závislá na bezrozmernej dávke flokulantu  $D_F/c_{k0}$  a je rovná približne hodnote 1 600. Jedna hodnota bola pravdepodobne len vychýlená.

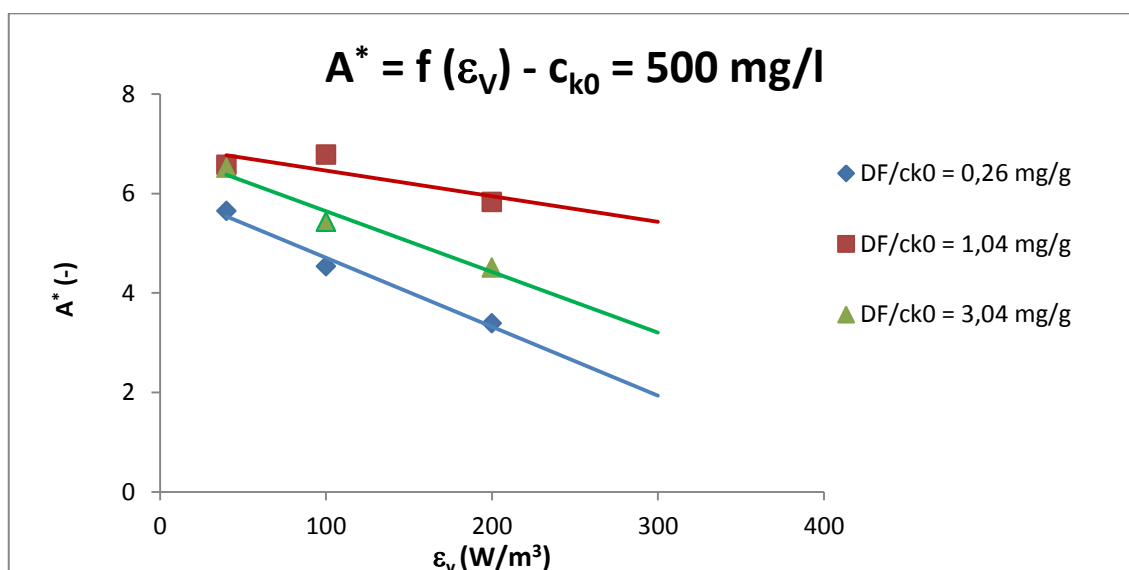
Obrázok 10.17 Závislosť bezrozmerného času flokulácie na mernom príkone ( $c_{k0} = 500$  mg/l- šesťlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)



Súčiniteľ zmeny reziduálneho znečistenia  $A^*$  v závislosti na mernom príkone  $\varepsilon$ .

Z obrázka 10.18 vyplýva že pre všetky bezrozmerné dávky flokulantu  $D_F/c_{k0}$  sa súčiniteľ zmeny reziduálneho znečistenia  $A^*$  pri zvyšovaní merného príkonu postupne snižoval.

Obrázok 10.18 Závislosť súčiniteľa zmeny reziduálneho znečistenia na mernom príkone ( $c_{k0} = 500$  mg/l- šesťlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)

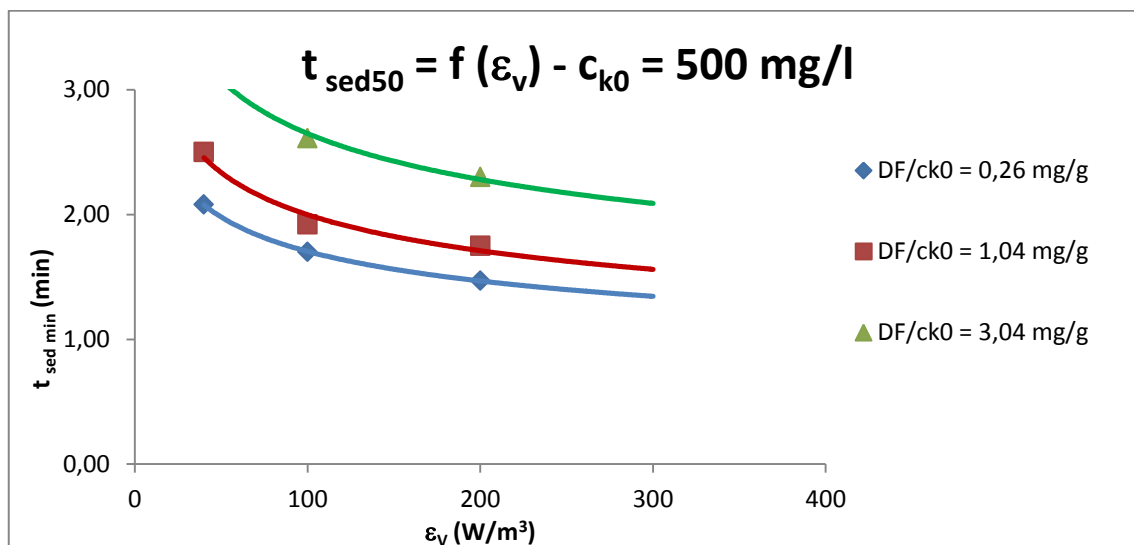




Čas sedimentácie, v ktorom bola dosiahnutá hodnota reziduálneho znečistenia  $Z_{r\text{ sed}}^* = 0,5$  v závislosti na mernom príkone  $\varepsilon$ .

V obrázku 10.19 vidno, že narozdiel od Rushtonovej turbíny (obr. 9.19), čas sedimentácie, v ktorom bola dosiahnutá hodnota  $Z_{r\text{ sed}}^* = 0,5$  sa skracoval pri zvyšujúcich sa hodnotách merného príkone  $\varepsilon$ , a to pre všetky použité bezrozmerné dávky flokulantu  $D_F/c_{k0}$  a zároveň nižšie doby sedimentácie boli pozorované pri nižších dávkach flokulantu a naopak vyššie doby sedimentácie pri vyšších dávkach flokulantu.

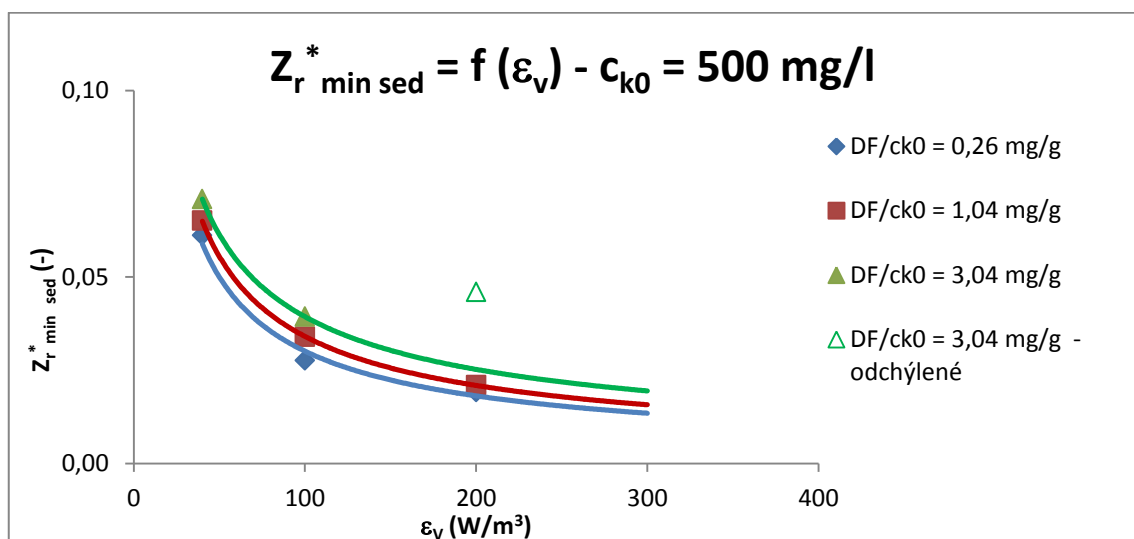
Obrázok 10.19 Závislosť doby sedimentácie na mernom príkone ( $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ - šesťlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)



Minimálna dosiahnutá hodnota reziduálneho stupňa znečistenia pri sedimentácii  $Z_{r\text{ min sed}}^*$  v závislosti na mernom príkone  $\varepsilon$ .

Z obrázka 10.20 vyplýva, že pre všetky bezrozmerné dávky flokulantu  $D_F/c_{k0}$  sa hodnota stupňa reziduálneho znečistenia  $Z_{r\text{ min sed}}^*$  znižovala. Jedna hodnota bola pravdepodobne len vychýlená.

Obrázok 10.20 Závislosť minimálneho stupňa reziduálneho znečistenia pri sedimentácii na mernom príkone ( $c_{k0} = 500 \text{ mg/l}$ - šesťlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami)



## Záver

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo na úvod v teoretickej rovine vymedziť základné pojmy, ktoré súvisia s flokuláciou a parametrami, ktoré na flokuláciu vplyvajú. Medzi tieto parametre patrili doba miešania, intenzita miešania, dávka flokulantu a typ miešadla.

Princípy koagulácie a flokulácie a základné pojmy boli vymedzené v kapitole 1. V kapitole dva sú popísane modely flokulácie, ktoré poskytli teoretický základ pre praktickú časť práce. Prínos teoretickej časti pre prácu spočíval najmä v prepojení teoretických poznatkov o flokulácii a ich využitia v praxi. Analýza vybraných výskumov potvrdila, že vybrané parametre pre experiment skutočne patria medzi najhlavnejšie faktory ovplyvňujúce účinnosť flokulácie, na ktoré sa vo výskumoch upriamuje veľká pozornosť.

Metodická časť si okrem analýzy flokulačnej a sedimentačnej krivky, kládla za cieľ formulovať podmienky na zväčšovanie mierky prostredníctvom stanovených parametrov. Jednotlivé parametre boli vybrané na základe predchádzajúceho výskumu a pri ich dodržaní poskytujú dostatočnú záruku na zaručenie podobnej účinnosti flokulácie ako pri experimente. Ako hlavné parametre pre zväčšovanie mierky boli vybrané intenzita miešania, čas flokulácie, dávka flokulantu a doba sedimentácie.

Experimentálna časť obsahuje podrobný popis použitých látok, kde bol ako modelový roztok znečistenej vody použitý roztok kaolínu a vodovodná voda. Ako flokulačné činidlo bol použitý organický flokulant Sokoflok 16 o koncentrácii 0,1 % hm. Použité bezrozmerné dávky flokulantu boli  $D_f / c_{k0} = 0,26; 0,52; 1,04; 2,08; 3,04$  mg/g.

Následne boli v experimentálnej časti spracované namerané údaje z experimentu, na základe ktorých boli vyhodnotené parametre použitých modelov. Experiment prebiehal na válcovej nádobe so štyrmi radiálnymi narážkami. Na miešanie vzniknutej suspenzie bola použitá Rushtonova turbína a šesťlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami. Podrobné predstavenie realizovaného experimentu a jeho výsledkov sa nachádza v kapitolách 6 až 10.

Jedným z cieľov experimentálnej časti bol sledovať vplyv dávky flokulantu a koncentrácie kaolínu na účinnosť flokulácie pre konštantný merný príkon  $\epsilon = 40$  W/m<sup>3</sup>. Použité miešadlo bola Rushtonova turbína. Bolo zistené, že hodnota minimálneho znečistenia sa znižovala so zvyšujúcou sa dávkou flokulantu pre všetky tri koncentrácie znečistenia. Bezrozmerná doba flokulácie  $(nt_F)_{\min}$  prakticky výrazne nezávisela na bezrozmernej dávke flokulantu  $D_f/c_{k0}$  a bola rovná približne hodnote 1 500. V prípade súčiniteľa reziduálneho znečistenia  $A^*$  nebola závislosť na bezrozmernej dávke úplne jednoznačná. Pre najmenšiu koncentráciu  $c_{k0} = 500$  mg/l sa súčiniteľ takmer nemenil, pre vyššie koncentrácie kaolínu sa zvyšoval. Čas sedimentácie, v ktorom bola dosiahnutá hodnota  $Z_{r\text{ sed}}^* = 0,5$  sa skracoval pri zvyšujúcich sa dávkach flokulantu, až do bezrozmernej dávky flokulantu 1,04 mg/g a to pre všetky použité koncentrácie kaolínu. Pri použití vyšších dávok flokulantu ako 1,04 mg/g sa už čas sedimentácie  $t_{\text{sed}50}$  veľmi nemenil, alebo skracoval len minimálne. Pre

koncentrácie kaolínu 750 a 1 000 mg/l sa hodnota stupňa reziduálneho znečistenia  $Z_{r \text{ min}}^*$  sed znižovala až do bezrozmernej dávky flokulantu  $D_F/c_{k0} = 1,5$  mg/g, následne sa hodnota znečistenia znova zvyšovala.

Táto časť experimentu skutočne potvrdila, že účinnosť flokulácie skutočne závisí na dávke flokulantu a na miere znečistenia modelovej suspenzie.

Druhá časť experimentálneho výskumu bola zameraná na vplyv zmeny príkonu na účinnosť flokulácie pre koncentráciu kaolínu  $c_{k0} = 500$  mg/l a bezrozmerné dávky flokulantu  $D_F/c_{k0} = 0,26; 1,04; 3,04$  mg/g, kedy sa merný príkon menil v rozsahu  $\varepsilon_v = 40 - 400$  W/m<sup>3</sup>. Použité miešadlo bola Rushtonova turbína.

Výsledky realizovaného experimentu presvedčivo dokázali, že intenzita miešania má preukázateľný vplyv na účinnosť flokulácie, kedy najnižšie hodnoty merného príkonu  $\varepsilon_v = 40$  W/m<sup>3</sup> dosahovali v porovnaní z vyššími hodnotami o dosť nižšie hodnoty stupňa reziduálneho znečistenia  $Z_r^*$ , tento trend ostal aj pri sedimentácii, kedy sa už pri vyšších hodnotách merného príkonu nepodarilo dosiahnuť ani podobných hodnôt stupňa reziduálneho znečistenia.

V tretej časti experimentu bolo použité šesťlopatkové miešadlo so šikmými lopatkami pri koncentrácii kaolínu  $c_{k0} = 500$  mg/l a bezrozmerných dávkach flokulantu  $D_F/c_{k0} = 0,26; 1,04; 3,04$  mg/g, kde sa merný príkon menil v rozsahu  $\varepsilon_v = 40 - 200$  W/m<sup>3</sup>.

Tretia časť experimentu potvrdila výsledky z druhej časti, najnižšie hodnoty merného príkonu  $\varepsilon_v = 40$  W/m<sup>3</sup> dosiahli najlepšie výsledky pre všetky dávky flokulantu. Treba však poznamenať, že šesťlopatkové miešadlo dosahovalo lepšiu účinnosť flokulácie ako Rushtonova turbína.

Na základe výsledkov práce, je treba povedať, že vybrané parametre naozaj ovplyvňujú účinnosť flokulácie, preto je určite potrebné pokračovať v experimentálnej činnosti. Bolo by vhodné venovať pozornosť rozsiahlejšiemu výskumu použitia šesťlopatkového miešadla, ktoré dosiahlo lepšie výsledky v porovnaní s Rushtonovou turbínou, prípadne sa zamerať na ďalšie typy miešadiel. Taktiež by mohli byť študované rozdielne dávky flokulantu ako tie, ktoré boli použité v tejto práci. Rovnako by predmetom ďalšieho výskumu mohlo byť experimentálne overenie účinnosti flokulácie pre iné flokulačné činidlo.

## Zoznam literatúry

CHO,M.,LEE,CH.,LEE,S. *Effect of flocculation conditions on membrane permeability in coagulation – microfiltration*. In Desalination 191 (1-3), May 2006; p. 386-396.

DITL, P., RIEGER, F., ŠULC, R., KUNCEWICZ, C. *Dobór układów mieszających w technologii oczyszczania ścieków*. In: Przemysł chemiczny. 2011, roč. 90, č. 9, s. 1633-1638. ISSN 0033-2496.

GARZON-SANABRIA, A. J.,DAVIS, R. T.,NIKOLOV, Z. L. *Harvesting Nannochloris oculata by inorganic electrolyte flocculation: Effect of initial cell density, ionic strength, coagulant dosage, and media pH*. In Bioresource Technology 118, August 2012; p. 418-424.

HOWE, K. J. a kol. *Principles of Water Treatment*. New Jersey: John Wiley & Sons,Inc., 2012. ISBN 0-47-040538-4

Kemwater ProChemie s.r.o (citované 23.3.2017, dostupné z: <http://www.prochemie.cz/chemikalie.htm>)

LIN,J.,PAN,R.J.,HUANG,Ch. *Enhanced particle destabilization and aggregation by flash-mixing coagulation for drinking water treatment*. In Separation and Purification Technology 115, August 2013; p. 145-151.

MHAISALKAR, A. V., PARAMASIVAM, R., BHOLE, G. A. *Optimizing physical parameters of rapid mix design for coagulation – flocculation of turbid waters*. In Water Research 25 (1), January 1991; p. 43-52.

NAN, J., WANG, Z., YAO, M., YANG, Y., ZHANG, X. *Characterization of re-grown floc size and structure: effect of mixing conditions during floc growth, breakage and re-growth process*. In Environmental Science and Pollution Research 23 (23), December 2016; p. 23750-23757.

Severočeské vodovody a kanalizace a.s. Teplice (citované 23.3.2017, dostupné z: <http://www.scvk.cz/vse-o-vode/pitna-voda/chemikalie/>)

ŠULC, R. *Flokulace v turbulentně míchané vsádce*. Disertační práce. Ústav procesní a zpracovatelské techniky, ČVUT v Praze, 2003

Šulc, R., Dítl, P.: *Scale up of clay slurry flocculation in an agitated tank*. Chemical and Process Engineering, 2009, Vol. 30, No.3, pp. 443-451, ISSN 00208-6425

Thomas, D.N., Judd, S.J., Fawcett, N.: *Flocculation modeling: A review*. Wat. Res., 1999, Vol. 33, No. 7, pp. 1579-1592

TCHOBANOGLOUS,G., BURTON,F.L., STENSEL, H. D., Metcalf & Eddy, Inc. *Wastewater engineering: Treatment and reuse* (4th ed.). New York: McGraw-Hill. 2003. ISBN 0-07-041878-0

YING F. *Investigation on flocculation process of composite poly-Si-Fe coagulant*. In *Desalination and Water Treatment* 30 (1-3), 2011; p. 122-133.

YUKSELEN,A.M., GREGORY, J. *The reversibility of floc breakage*. In *International Journal of Mineral Processing* 73 (2-4), February 2004; p. 251-259.