

RADOVAN KUKOBAT, LJILJANA VUKIĆ,  
DIJANA DRLJAČA, SAŠA PAPUGA

Originalni naučni rad  
UDC:628.161/.167

## Uticaj temperature vode i doze koagulanta na proces bistrenja površinske vode uz modelovanje procesa

*U radu je metodom jar-testa ispitan uticaj temperature vode i doze koagulanta Al-sulfata na proces bistrenja vode rijeke Vrbas, sa ciljem dobijanja zahtjevanog kvaliteta sirove vode za određene namjene. Osnovna zapažanja tokom izvođenja testova koagulacije, donesena su na osnovu indirektnog pokazatelja prisustva koloidnih čestica – turbiditeta (mutnoće) vode. Pored ovog, praćeni su i drugi relevantni parametri procesa - sadržaj prirodnih organskih materija (POM), pH-vrijednost, specifična provodljivost, sadržaj ukupnih organskih materija, kao i sadržaj aluminijuma. Na osnovu izmjerene mutnoće u optimalnim uzorcima, kreiran je jednostavni matematički model, koji se može primijeniti za simulaciju procesa koagulacije/flokulacije, a sa ciljem optimalnog vođenja i moguće automatizacije procesa.*

**Ključne riječi:** *bistrenje površinske vode, koagulacija/flokulacija, aluminijumsulfat, mutnoća vode, matematički model.*

### 1. UVOD

Površinske vode sadrže različite primjese u rastvorenom, koloidnom i suspendovanom obliku. Ovaj prirodni koloidni sistem u kome disperznu fazu čine čestice organskog i neorganskog porijekla može da sadrži [1]:

- prirodne organske materije (huminske i fulvo kiseline) čije je naelektrisanje posljedica prisutnih funkcionalnih grupa (COOH, OH, NH<sub>2</sub>);
- neorganske koloidne primjese – alumosilikate, gdje je naelektrisanje posljedica zamjene Al- i Si- atoma u tetraedarskoj strukturi aluminijuma;
- čestice pijeska i druge neorganske i organske materije, koje mogu da se naelektrišu adsorpcijom jona prisutnih u vodi kao disperznom sredstvu.

Da bi površinske vode bile prihvatljive za određenu namjenu, potrebno je sadržaj navedenih koloidnih primjesa dovesti u određene granice, što se postiže procesima bistrenja vode. Za efikasno bistrenje površinskih voda prikladan je fizičko-hemijski postupak koagulacije/flokulacije, pomoću kojeg se smanjuje sadržaj koloidnih čestica njihovim razelektrisanjem i ukрупnjavanjem, uz naknadno uklanjanje taloženjem ili filtracijom [2-6].

Poznati su različiti koagulant koji se koriste u obradi vode, a najčešće primjenjivani u praksi su soli aluminijuma i željeza, čije djelovanje u velikoj mjeri zavisi od temperature vode. Novija istraživanja pokazuju da se efikasno uklanjanje mutnoće

u procesu koagulacije/flokulacije može provesti i pomoću nove generacije tzv. kompozitnih koagulanata [7], potom prirodnih biljnih sredstava na bazi tanina [8] ili ekstrakta iz sjemena tropskog drveta Moringa oleifera, koji značajno ubrzava proces [9]. Ipak, aluminijum-sulfat još uvijek slovi za najčešće korišten koagulant, kako zbog svoje dostupnosti tako i zbog prihvatljive cijene.

U ovom radu ispitan je uticaj doze aluminijum-sulfata i temperature vode na proces bistrenja vode koagulacijom. Osnovna zapažanja tokom izvođenja procesa koagulacije pomoću jar-testova, donesena su na osnovu indirektnog pokazatelja prisustva koloidnih čestica – turbiditeta (mutnoće) vode. Pored ovih praćeni su i drugi relevantni parametri procesa - sadržaj prirodnih organskih materija (POM), pH-vrijednost, specifična provodljivost, sadržaj ukupnih organskih materija, kao i sadržaj rezidualnog aluminijuma.

Na osnovu izmjerenog turbiditeta u optimalnim uzorcima na različitim temperaturama, formirani su jednostavni matematički modeli koji se sastoje od matematičkih jednačina sa jednom i dvije promjenljive, a koji najbolje opisuju dati proces. Na taj način se bez izvođenja eksperimenta mogu izračunati optimalne koncentracije koagulanta, za date uslove procesa. Takođe, proces se može voditi u smislu automatskog doziranja koagulanta na osnovu *online* izmjerenih vrijednosti za ulaznu i izlaznu tvrdoću.

### 2. EKSPERIMENTALNI DIO

Za ispitivanja su korišteni uzorci vode rijeke Vrbas i ukupno je uzeto pet uzoraka različitog stepena zamućenja. Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za ekološko inženjerstvo na Tehnološkom fakultetu Univerziteta u Banjoj Luci.

---

Adresa autora: Univerzitet u Banjoj Luci, Tehnološki fakultet, V.S.Stepanovića 73, 78000 Bana Luka

Primijeno za publikovanje: 11. 08. 2013.

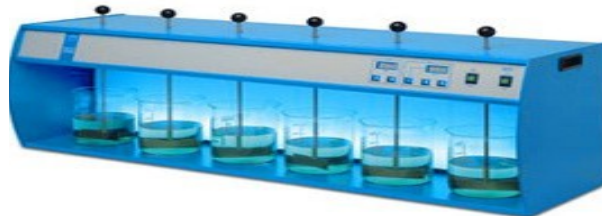
Prihvaćeno za publikovanje: 13. 10. 2013.

Neposredno po uzorkovanju, uzorci vode su analizirani na sljedeće parametre kvaliteta: pH- vrijednost, BPK<sub>5</sub>, ukupnu suhu materiju i njene frakcije: žareni ostatak, gubitak žarenjem i ukupne suspendovane materije, potom mutnoću, specifičnu provodljivost, ukupnu i karbonatnu tvrdoću i alkalitet.

Uzorci vode su u laboratorijskim uslovima podvrgnuti bistrenju postupkom koagulacije na aparaturi za jar-test (slika 1), uz variranje temperature vode i doze koagulant. Radne temperature vode bile su: 5 °C, 10 °C, 15 °C i 20 °C, a koncentracija radnog rastvora koagulant  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  - 10 g/L u odnosu na aktivnu komponentu. Tokom jar-testa nije doziran flokulant (polielektrolit). Uslovi miješanja bili su:

- brzo miješanje – 2 min, 200 ob/min;
- srednje brzo miješanje - 5 min, 90 ob/min;
- sporo miješanje - 10 min, 30 ob/min.

U supernatantu praćeni su: sadržaj prirodnih organskih materija (POM), pH-vrijednost, specifična provodljivost, sadržaj ukupnih organskih materija (KMnO<sub>4</sub>), kao i sadržaj rezidualnog aluminijuma. Za navedena ispitivanja kvaliteta sirove i izbitrene vode korištene su standardne metode. [10]



Slika 1 - Aparatura za jar-test

### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

#### 3.1. Fizičko-hemijski sastav sirove vode

Tabela 1 daje prikaz vrijednosti osnovnih relevantnih parametara kvaliteta sirove vode za svih 5 analiziranih uzoraka.

Tabela 1 - Fizičko-hemijske karakteristike uzoraka sirove vode

Parametar	Jedinica	Broj uzorka				
		1	2	3	4	5
Turbiditet	NTU	3,20	7,85	11,20	28,32	58,00
pH-vrijednost	-	7,25	7,33	7,76	7,79	7,76
Specifična provodljivost	μS/cm	440	443	420	415	422
BPK <sub>5</sub>	mgO <sub>2</sub> /L	1,18	-	0,38	0,79	1,20
Ukupna suva materija	mg/L	268	268	272	323	451
Suspendovane materije	mg/L	2,40	2,30	8,90	21,10	84,40
Žareni ostatak	mg/L	148	228	159	226	325
Gubitak žarenjem	mg/L	120	40	113	97	126
Ukupni alkalitet	mgCaCO <sub>3</sub> /L	206,72	218,00	204,15	212,08	202,72
Karbonatna tvrdoća	mgCaCO <sub>3</sub> /L	206,72	218,00	204,15	212,08	202,72
Ukupna tvrdoća	mgCaCO <sub>3</sub> /L	246,91	251,00	234,41	273,55	239,32
Sadržaj Al	mg/L	< 0,075	<0,075	< 0,075	< 0,075	< 0,075

Iz vrijednosti za navedene parametre u tabeli 1, može se konstatovati sljedeće:

•**Turbiditet** (mutnoća) kao osnovni indirektni parametar za praćenje sadržaja alumosilikata i prirodnih organskih materija (POM), koji čine osnovnu strukturu koloidnih čestica u prirodnim vodama, kretao se u vrlo širokim granicama. (3,5 – 58,0 NTU). Mutnoća površinskih voda uglavnom zavisi od meteoroloških uslova, odnosno stepena zamućenja vode izazvanog padavinama u datom periodu. Svrha je bila dobiti uzorke vode šireg opsega mutnoće, kako bi se pod tim uslovima pratila efikasnost ispitivanog koagulant;

•**Vrijednost pH** kretala se u granicama neutralnog do blago alkalnog (7,25-7,79), što predstavlja uobičajene vrijednosti za rijeku Vrbas, ali još uvijek i povoljan opseg pH za odvijanje koagulacije;

•**Specifična provodljivost** analiziranih uzoraka vode ukazuje na ujednačen mineralni jonski sadržaj i kreće se u granicama vrijednosti za površinske vode (50-500 μS/cm);

•Detektovan je povećan sadržaj **ukupne suve materije** u uzorcima sa povišenom mutnoćom, što vrijedi i za frakciju **suspendovanih materija** za iste uzorke. Ako se pak analiziraju frakcije **žareni ostatak i gubitak žarenjem**, vidi se

da u svim uzorcima dominiraju mineralne komponente, bilo da su prisutne u rastvorenom, koloidnom ili suspendovanom obliku;

- **BPK<sub>5</sub>** vrijednosti se kreću u uobičajenim granicama za površinske vode i može se konstatovati da se radi o relativno čistoj vodi;
- Vrijednosti za **ukupnu i karbonatnu tvrdoću**, odnosno **ukupni alkalitet** su relativno ujednačene za sve uzorke. Voda rijeke Vrbas je srednje tvrda voda uz dominantno prisustvo karbonata i bikarbonata kalcijuma i magnezijuma rastvorenih u vodi. Ovo je važno kod unosa koagulanata u vodu, odnosno hidrolize Al-sulfata, kada se izdvaja ekvivalentna količina jake mineralne kiseline H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, što ima za posljedicu pomjeranje reakcije u lijevo i rastvaranje aluminijum-hidroksida. Prirodno prisutni bikarbonati i karbonati reaguju sa H-jonima (izdvojenim disocijacijom nastale mineralne kiseline), gradeći slabu ugljenu kiselinu i održavajući pH vrijednost u granicama povoljnim za odvijanje procesa koagulacije [2];

- Sadržaj Al - jona u sirovoj vodi je ispod granica detekcije. Ovi joni su određivani radi mogućeg praćenja rezidualnog sadržaja nakon provedene koagulacije.

### 3.2. Uticaj temperature i doze koagulanta

Testovi koagulacije na sirovoj vodi rijeke Vrbas provedeni su sa Al-sulfatom uz variranje radne temperature i doze koagulanta. Proba 1 je kontrolna proba u koju nije dozirano sredstvo za koagulaciju, a u probe 2-6 doziran je koagulant u rastućoj koncentraciji.

Na osnovu vizuelnog praćenja i određivanjem relevantnih parametara, izabrana je optimalna proba. Optimalna proba je ona, koja sa najmanjom dozom koagulanta daje najbolje karakteristike izbistrene vode (turbiditet <1 NTU).

U tabelama 2-6 predstavljeni su rezultati provedenih jar-testova uz variranje doze koagulanta pri različitim radnim temperaturama.

Tabela 2 - Testovi koagulacije sa Al-sulfatom pri različitim radnim temperaturama (uzorak 1: inicijalni turbiditet = 3,20 NTU).

Temp.	Parametar	1*	2	3	4	5	6**
5 °C	mgAl (SO <sup>2</sup> ) <sup>4</sup> /L	0	2,5	5	7,5	10	15
	Turbiditet, NTU	2,76	2,33	2,24	2,13	1,94	<b>1,03</b>
	pH	7,28	6,73	6,91	7,20	7,23	<b>7,26</b>
	Spec. vodlj., μS/cm	425	432	434	436	438	<b>439</b>
	POM, m <sup>-1</sup>	3,0	2,6	2,6	2,6	2,6	<b>2,6</b>
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	1,10	-	-	-	-	<b>0,93</b>
	Sadržaj Al, mg/L	<0,075	-	-	-	-	<b>0,13</b>
10 °C	Turbiditet, NTU	2,85	2,41	2,35	2,30	2,02	<b>0,98</b>
	pH	7,95	6,89	7,01	7,06	7,39	<b>7,00</b>
	Spec. vodlj., μS/cm	438	446	448	450	456	<b>452</b>
	POM, m <sup>-1</sup>	3,0	2,7	2,5	2,4	2,4	<b>2,4</b>
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	1,04	-	-	-	-	<b>0,91</b>
	Sadržaj Al, mg/L	<0,075	-	-	-	-	<b>0,14</b>
15 °C	Turbiditet, NTU	2,10	2,04	1,80	1,15	<b>0,92</b>	0,80
	pH	7,87	7,55	7,24	7,66	<b>7,03</b>	7,70
	Spec. vodlj., μS/cm	425	432	437	457	<b>460</b>	466
	POM, m <sup>-1</sup>	3,2	2,6	1,9	1,9	<b>1,9</b>	1,9
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	1,04	-	-	-	<b>0,89</b>	-
	Sadržaj Al, mg/L	<0,075	-	-	-	<b>0,14</b>	-
20 °C	Turbiditet, NTU	2,43	2,36	1,18	<b>0,61</b>	0,46	0,35
	pH	7,90	7,18	7,13	<b>7,01</b>	6,99	6,90
	Spec. vodlj., μS/cm	430	435	441	<b>449</b>	452	457
	POM, m <sup>-1</sup>	3,1	2,2	2,2	<b>2,2</b>	2,2	2,2
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	1,13	-	-	<b>0,92</b>	-	-
	Sadržaj Al, mg/L	<0,075	-	-	<b>0,16</b>	-	-

\*- kontrolna proba

\*\* - optimalna proba (bold)

Tabela 3 - Testovi koagulacije sa Al-sulfatom pri različitim radnim temperaturama (uzorak 2: inicijalni turbiditet = 7,85 NTU).

Temp.	Parametar	1	2	3	4	5	6
5 °C	mgAl <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> /L	0	5	10	15	20	25
	Turbiditet	3,79	2,78	1,93	<b>0,90</b>	0,67	0,64
	pH	7,82	7,49	7,36	<b>7,54</b>	6,34	7,45
	Spec. vodlj. (μS/cm)	442	445	447	<b>450</b>	489	493
	POM, m <sup>-1</sup>	3,2	3,1	3,1	<b>2,9</b>	2,7	2,7
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	-	-	-	-	-	-
	Sadržaj Al, mg/L	-	-	-	-	-	-
10 °C	Turbiditet, NTU	2,86	2,49	1,71	<b>0,88</b>	0,60	0,00
	pH	7,95	7,80	7,78	<b>7,63</b>	7,57	7,53
	Spec. vodlj. (μS/cm)	447	450	452	<b>453</b>	454	460
	POM	3,6	3,4	3,4	<b>3,2</b>	3,2	3,2
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	-	-	-	-	-	-
	Sadržaj Al, mg/L	-	-	-	-	-	-
15 °C	Turbiditet, NTU	4,03	2,69	1,54	<b>0,73</b>	0,53	0,00
	pH	7,48	7,51	7,51	<b>7,45</b>	7,53	7,43
	Spec. vodlj. (μS/cm)	440	452	458	<b>464</b>	470	480
	POM, m <sup>-1</sup>	3,3	3,2	3,2	<b>3,2</b>	3,2	3,0
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	-	-	-	-	-	-
	Sadržaj Al, mg/L	-	-	-	-	-	-
20 °C	Turbiditet, NTU	4,48	3,34	1,82	<b>0,63</b>	0,23	0,00
	pH	7,73	7,28	7,68	<b>7,67</b>	7,57	7,49
	Spec. vodlj. (μS/cm)	443	448	450	<b>452</b>	453	454
	POM, m <sup>-1</sup>	4,1	3,7	3,1	<b>3,1</b>	2,9	2,9
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	-	-	-	-	-	-
	Sadržaj Al, mg/L	-	-	-	-	-	-

Tabela 4 - Testovi koagulacije sa Al-sulfatom pri različitim radnim temperaturama (uzorak 3: inicijalni turbiditet = 11,20 NTU)

Temp.	Parametar	1	2	3	4	5	6
5 °C	mgAl <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> /L	0	5	10	15	20	25
	Turbiditet, NTU	9,0	4,71	2,25	<b>0,59</b>	0,49	0,00
	pH	7,84	7,60	7,40	<b>7,44</b>	7,48	7,40
	Spec. vodlj., μS/cm	429	445	447	<b>447</b>	452	453
	POM, m <sup>-1</sup>	2,6	2,3	2,3	<b>2,2</b>	2,2	2,2
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	0,87	-	-	<b>0,70</b>	-	-
	Sadržaj Al, mg/L	<0,075	-	-	<0,075	-	-
10 °C	Turbiditet, NTU	6,87	3,08	1,71	<b>0,50</b>	0,40	0,21
	pH	8,16	7,98	7,90	<b>7,82</b>	7,79	7,70
	Spec. vodlj., μS/cm	418	420	423	<b>425</b>	427	430
	POM, m <sup>-1</sup>	2,7	2,4	2,1	<b>2,1</b>	2,1	2,1
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	1,85	-	-	<b>0,70</b>	-	-
	Sadržaj Al, mg/L	<0,075	-	-	<0,075	-	-
15 °C	Turbiditet, NTU	7,15	4,84	1,61	<b>0,91</b>	0,00	0,00
	pH	7,89	7,58	7,50	<b>7,45</b>	7,40	7,38
	Spec. vodlj., μS/cm	418	423	425	<b>428</b>	431	434
	POM, m <sup>-1</sup>	2,9	2,0	1,3	<b>1,3</b>	1,2	1,2
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	0,83	-	-	<b>0,80</b>	-	-

	Sadržaj Al, mg/L	<0,075	-	-	<0,075	-	-
20 °C	Turbiditet, NTU	8,80	4,40	1,22	<b>0,71</b>	0,00	0,00
	pH	7,95	7,90	7,91	<b>7,90</b>	7,60	7,51
	Spec. vodlj., $\mu\text{S/cm}$	411	415	417	<b>419</b>	420	424
	POM, $\text{m}^{-1}$	2,9	1,6	1,4	<b>1,4</b>	1,4	1,4
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	0,80	-	-	<b>0,78</b>	-	-
	Sadržaj Al, mg/L	<0,075	-	-	<0,075	-	-

Tabela 5 - Testovi koagulacije sa Al-sulfatom pri različitim radnim temperaturama (uzorak 4: inicijalni turbiditet = 28,32 NTU).

Temp.	Parametar	1	2	3	4	5	6
5 °C	mgAl <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> /L	0	5	10	15	20	25
	Turbiditet, NTU	13,39	9,02	<b>0,00</b>	0,00	0,00	0,00
	pH	7,80	5,73	<b>5,84</b>	5,88	5,71	5,62
	Spec. vodlj., $\mu\text{S/cm}$	399	406	<b>412</b>	415	416	418
	POM, $\text{m}^{-1}$	2,7	2,5	<b>2,4</b>	2,4	2,4	2,0
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	0,90	-	<b>0,80</b>	-	-	-
	Sadržaj Al, mg/L	<0,075	-	<0,075	-	-	-
10 °C	Turbiditet, NTU	12,80	8,79	2,96	<b>0,08</b>	0,00	0,00
	pH	7,98	6,69	6,57	<b>6,81</b>	6,75	6,30
	Spec. vodlj., $\mu\text{S/cm}$	406	420	425	<b>431</b>	440	447
	POM, $\text{m}^{-1}$	2,5	2,3	2,2	<b>2,1</b>	2,0	1,9
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	0,83	-	-	<b>0,72</b>	-	-
	Sadržaj Al, mg/L	<0,075	-	-	<0,075	-	-
15 °C	Turbiditet, NTU	13,42	8,29	1,74	<b>0,74</b>	0,00	0,00
	pH	7,70	6,88	6,87	<b>6,80</b>	6,50	6,40
	Spec. vodlj., $\mu\text{S/cm}$	421	424	435	<b>436</b>	437	440
	POM, $\text{m}^{-1}$	2,6	2,4	2,4	<b>2,4</b>	2,2	2,2
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	0,91	-	-	<b>0,80</b>	-	-
	Sadržaj Al, mg/L	<0,075	-	-	<0,075	-	-
20 °C	Turbiditet, NTU	12,24	4,68	2,13	<b>0,00</b>	0,00	0,00
	pH	7,77	6,93	6,91	<b>6,86</b>	6,80	6,76
	Spec. vodlj., $\mu\text{S/cm}$	422	428	430	<b>432</b>	433	438
	POM, $\text{m}^{-1}$	2,5	2,3	2,0	<b>2,0</b>	2,0	1,9
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	0,89	-	-	<b>0,70</b>	-	-
	Sadržaj Al, mg/L	<0,075	-	-	<0,075	-	-

Tabela 6 - Testovi koagulacije sa Al-sulfatom pri različitim radnim temperaturama (uzorak 5: inicijalni turbiditet = 58,0 NTU).

Temp.	Parametar	1	2	3	4	5	6
5 °C	mgAl <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> /L	0	10	20	30	40	50
	Turbiditet, NTU	28,23	8,77	2,3	<b>0,83</b>	0,71	0,60
	pH	6,90	6,63	6,20	<b>6,39</b>	6,58	6,64
	Vodlj. ( $\mu\text{S/cm}$ )	445	449	438	<b>439</b>	439	442
	POM, $\text{m}^{-1}$	3,7	3,3	2,3	<b>2,3</b>	2,3	2,2
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	-	-	-	-	-	-
	Sadržaj Al, mg/L	-	-	-	-	-	-
10 °C	Turbiditet, NTU	29,55	7,08	<b>0,78</b>	0,72	0,50	0,45
	pH	6,63	6,47	<b>5,66</b>	6,11	5,98	6,30
	Vodlj. ( $\mu\text{S/cm}$ )	420	425	<b>430</b>	435	437	430
	POM, $\text{m}^{-1}$	4,3	3,4	<b>3,3</b>	2,4	2,4	2,4
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	-	-	-	-	-	-

	Sadržaj Al, mg/L	-	-	-	-	-	-
15 °C	Turbiditet, NTU	30,07	10,93	2,01	<b>0,92</b>	0,00	0,00
	pH	6,16	6,53	6,48	<b>6,40</b>	6,53	6,65
	Vodlj. (μS/cm)	428	429	432	<b>434</b>	435	438
	POM, m <sup>-1</sup>	3,7	3,3	2,9	<b>2,8</b>	2,5	2,2
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	-	-	-	-	-	-
	Sadržaj Al, mg/L	-	-	-	-	-	-
20 °C	Turbiditet, NTU	27,51	5,04	2,73	<b>0,66</b>	0,00	0,00
	pH	7,08	7,09	7,12	<b>7,01</b>	7,01	7,03
	Vodlj. (μS/cm)	496	426	433	<b>431</b>	435	434
	POM, m <sup>-1</sup>	4,6	3,1	3,1	<b>2,3</b>	2,1	1,9
	KMnO <sub>4</sub> , mg/L	-	-	-	-	-	-
	Sadržaj Al, mg/L	-	-	-	-	-	-

Ukoliko se analizira uticaj doze Al-sulfata na stepen bistrenja sirove vode i uopšte kvalitet izbitrene vode, pri različitim radnim temperaturama (tabele 2-6) može se konstatovati sljedeće:

- Generalno, proces koagulacije se sporije i sa manjom efikasnošću odvija pri nižim temperaturama, pogotovo ako voda ima nisku mutnoću. Nasuprot tome, porastom temperature dolazi do efikasnijeg bistrenja vode usljed [3]:
  - ubrzavanja koagulacije,
  - smanjenja inkubacionog perioda u formiranju flokula,
  - ubrzavanja kretanja čestica, a time i većeg broja sudara između njih.
- Optimalne doze Al-sulfata se u najvećem broju slučajeva kreću u granicama 7,5-15 mg/L. Samo izuzetno visoke vrijednosti turbiditeta zahtijevaju veće doze ovog koagulant, odnosno 20-30 mg/L (uzorak 5);
- Al-sulfat, pokazuje manju efikasnost pri nižim temperaturama vode, što je posebno izraženo u uzorcima vode sa nižim inicijalnim turbiditetom, a što je u skladu sa literaturnim podacima [1].
- pH vrijednost se bitno ne mijenja u odnosu na dozu koagulant, što se može objasniti time da ispitivana voda posjeduje dovoljnu koncentraciju karbonatnih i bikarbonatnih jona za vezivanje H-jona izdvojenih disocijacijom H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, koji nastaju tokom hidrolize Al-sulfata;
- Jonska forma mineralnih materija izražena kroz specifičnu provodljivost, uglavnom ostaje nepromijenjena, odnosno proces koagulacije ne utiče na smanjenje rastvorenih neorganskih jedinjenja. Koagulacijom se efikasno uklanja koloidna forma prirodno prisutnih alumosilikata;
- Prirodne organske materije su veoma zastupljene, kako u podzemnim tako i površinskim vodama. Smatra se da su 80-95 % prirodnih organskih

materija- huminske materije, a da 5-20 % predstavljaju sve ostale organske specije [11]. Primjetan je određeni stepen redukcije sadržaja POM, uz pretpostavku da su u rastvoru uglavnom zaostale fulvo kiseline (MM < 1.500), a da je huminska frakcija, koja je prije svega prisutna u koloidnoj formi (MM > 2.000), uklonjena u daleko većem procentu. POM su određivane indirektnom metodom, odnosno UV apsorbcijom na 254 nm, koja se smatra pouzdanim mjerilom prisustva prirodnih organskih materija u vodi. Literatura potvrđuje da se koagulacijom može, pored koloidnih, ukloniti i dio rastvorenih POM, ali da je ovaj proces bistrenja uglavnom efikasan za uklanjanje huminskih kiselina, odnosno POM sa srednjom (MM= 1.000-10.000) i velikom (MM = 10.000-100.000) molekulskom masom [12]. Preporučeni postupak uklanjanja fulvo kiselina je adsorpcija na aktivnom uglju;

- Sadržaj rezidualnog Al je određivan u tri uzorka od pet analiziranih, pri čemu je isti detektovan samo u jednoj optimalnoj probi ispitivanih uzoraka (uzorak 1: 0.16 mgAl/L). Ovo se svakako mora uzeti sa rezervom, jer uzorci vode nisu koncentrovani prije određivanja sadržaja Al, usljed nedovoljno raspoložive količine supernatanta za ovu analizu. Postoji realna mogućnost pojave rezidualnih koncentracija ovog metala, posebno kod niskih inicijalnih mutnoća ili kod nepoštivanja parametara procesa (način doziranja, režim miješanja, način dekantiranja supernatanta i sl.).

### 3.3. Razvoj matematičkog modela za proces koagulacije

Svrha matematičkog modelovanja procesa je da se na osnovu izmjerenih vrijednosti relevantnih parametara, dobiju matematičke jednačine koje najbolje opisuju dati proces. Na taj način, u slučaju

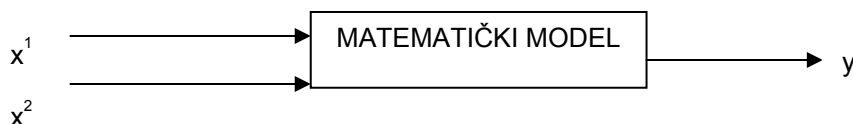
procesa koagulacije, bez provođenja eksperimenata mogu se izračunati optimalne koncentracije koagulanta.

Postupak matematičkog modelovanja procesa može da se zasniva na jednom od dva osnovna pristupa:

- teorijskom - kada se daje suštinsko objašnjenje fizičkog procesa,
- empirijskom – kada se model zasniva na poznavanju različitih osobina procesa.

U ovom radu korišten je empirijski metod, koji se formira na osnovu parametara koji utiču na proces koagulacije/flokulacije. Pri takvom pristupu formiraju se algebarske jednačine koje povezuju promjenljive procesa.

Za određivanje parametara matematičkog modela primijenjena je metoda najmanjih kvadrata, a za numeričku optimizaciju parametara korišten je matematički alat Solver iz programskog paketa Microsoft Excel.



Slika 2 - Šematski prikaz matematičkog modela procesa koagulacije

Radi jednostavnosti prikaza dobijenih jednačina uvedene su sljedeće promjenljive:

- $x_1$  - mutnoća prije tretmana,
- $x_2$  - količina koagulanta/flokulanta koji se dodaje,
- $y$  - mutnoća nakon tretmana.

Tokom izrade matematičkog modela dobijena su dva tipa jednačina:

- multilinearne sa dvije promjenljive i
- nelinearne sa jednom promjenljivom na konstantnoj temperaturi.

U tabeli 7, data su poređenja dobijenih modela za koagulant aluminijum-sulfat.

Tabela 7 - Uporedni prikaz dobijenih modela za  $Al_2(SO_4)_3$

Red. br.	T (°C)	Model	R <sup>2</sup>
1	5	$y = -0,0084x_2^2 + 0,3788x_2 - 2,945$	0,84
		$y = 0,988 + 0,001x_1 - 0,0091x_2$	0,82
2	10	$y = 0,0383x_2^4 - 0,3433x_2^3 + 0,9617x_2^2 - 1,1567x_2 + 1,48$	1
		$y = -5,35 - 0,086x_1 + 0,43x_2$	0,97
3	15	$y = 0,0017x_2^2 - 0,0676x_2 + 1,4267$	0,48
		$y = 0,78 + 0,00016x_1 + 0,003x_2$	0,06
4	20	$y = 0,0016x_2^2 - 0,0578x_2 + 0,9533$	0,12
		$y = 0,026 - 0,051x_1 + 0,064x_2$	0,30

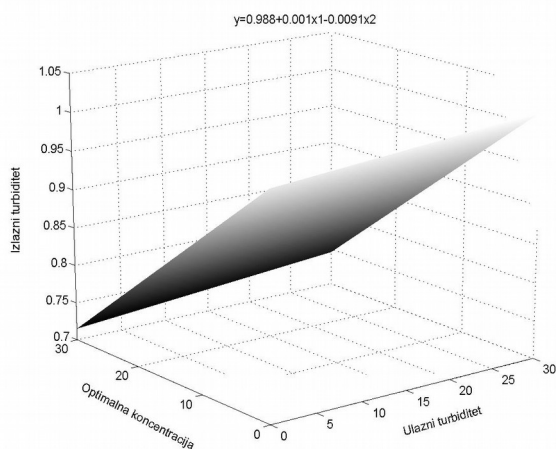
Model koji će se koristiti za simulaciju izabran je korišćenjem dva kriterijuma. Prvi kriterijum je koeficijent korelacije, dok se drugi kriterijum odnosi na jednostavnost modela za praktičnu primjenu kao i osobinu modela da prati ponašanje sistema utvrđeno tokom laboratorijskih ispitivanja.

Na osnovu postavljenih kriterijuma najprihvatljiviji su se pokazali **multilinearni modeli 1 i 2 na 5°C i 10 °C**. Ovi modeli su predstavljeni trodimenzionalnim grafičkim prikazom na slikama 3 i 4. Nelinearni model se pokazao dobrim u pogledu

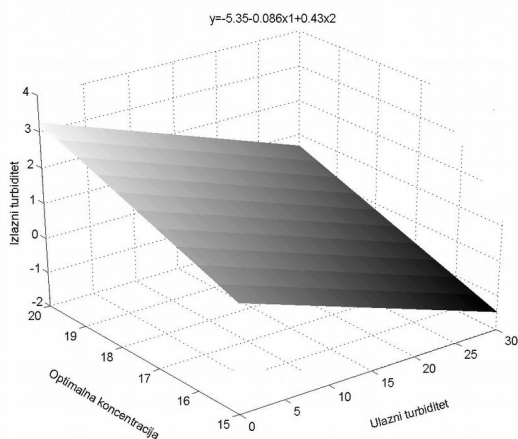
koeficijenta korelacije, ali zbog kompleksnosti nema praktičnu primjenu.

Izvedeni modeli nisu univerzalni, odnosno ograničeni su samo na oblast promjenljivih u kojoj se nalaze eksperimentalno dobijeni podaci. Dakle, ovi empirijski modeli se ne mogu upotrijebiti za druge slične procese, pa ni za isti proces pod drugim uslovima, kao ni za isti proces pri istim temperaturama, ali za vrijednosti promjenljivih izvan razmatranih oblasti. Ipak, ovi modeli mogu da budu od ko-

risti za približno izračunavanje optimalne doze koagulanata na osnovu ulaznog i željenog turbiditeta, na datoj temperaturi.



Slika 3 - Grafički prikaz multilinearog modela 1 na  $5^{\circ}\text{C}$ , za  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$



Slika 4 - Grafički prikaz multilinearog modela 2 na  $10^{\circ}\text{C}$ , za  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Model koagulacije može da se kombinuje i sa modelima drugih procesa obrade vode, npr. sa modelom adsorpcije policikličnih aromatskih jedinjenja (PAC) [13]. Takođe, moguće je uključiti i druge promjenljive koje utiču na brzinu i efikasnost koagulacije, kao što je pH-vrijednost vode [14], ili koncentracija i priroda organskih materija u sirovoj vodi uz dodatak kiselih ili alkalnih supstanci radi pH-kontrole sirove vode [15].

#### 4. ZAKLJUČAK

Na osnovu laboratorijskih ispitivanja uticaja temperature vode i doze koagulanta na bistenje vode rijeke Vrbas mogu se sumirati sljedeći zaključci:

1. Voda rijeke Vrbas spada u relativno nezagađene površinske vode sa ujednačenim sadržajem rastvorenih materija. U periodu ispitivanja, mutnoća vode kao indirektni pokazatelj sadržaja koloidnih i suspendovanih primjesa, varirala je u širokim granicama (3.5 – 58.0 NTU). To je prije svega zavisilo od klimatskih uslova, odnosno obima padavina tokom perioda uzorkovanja;
2. Da bi sirova voda postigla potreban kvalitet za korištenje u industriji, ili kao voda za piće, potrebno ju je izbistriti, što se efikasno može postići procesom koagulacije/flokulacije;
3. Koagulant  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  različito se ponaša kod uklanjanja mutnoće vode, pri različitim temperaturama. Za postizanje optimalnog turbiditeta (<1 NTU) pokazuje manju efikasnost pri nižim temperaturama vode, što je posebno izraženo u uzorcima vode sa nižim inicijalnim turbiditetom.
4. Razvojem matematičkog modela, baziranog na eksperimentalno dobijenim podacima, dobijeni su numerički izrazi, pomoću kojih se pri datim uslovima eksperimenta mogu približno izračunati optimalne doze koagulanta, na osnovu ulaznog i željenog turbiditeta, na datoj temperaturi.

#### 5. LITERATURA

- [1] Bratby, J., Coagulation and flocculation in water and waste water treatment, UK, 2006, pp. 171-175.
- [2] Gaćeša, S., Klačnja, M., Tehnologija vode i otpadnih voda, Jugoslovensko udruženje pivara, 1994., str. 15-49.
- [3] Šećerov, R., Sokolović, S., Inženjerstvo u zaštiti okoline, Tehnološki fakultet, Novi Sad, 2002., str. 42-56.
- [4] Simičić, H., Procesi obrade otpadnih voda, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Tuzli, 2002., str. 149-152.
- [5] Maksimović, M., Vukić, Lj., Proračun i dimenzionisanje operacijskih aparata u procesnoj industriji i ekološkom inženjerstvu, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci 2009., str. 82-86.
- [6] Dalmacija, B., Priprema vode za piće u svjetlu novih standarda i normativa, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, 1997., str. 99-123.
- [7] Tzoupanos, N.D., Zouboulis, A.I., Coagulation-Flocculation Processes in Water/Wastewater Treatment: The Application of New Generation of Chemical Reagents, 6th IASME/WSEAS International Conference On Heat Transfer, Thermal Engineering And Environment (Hte'08) Rhodes, Greece, August 20-22, 2008, p.309-317.



- [8] Sanchez-Martin, J., Beltran-Heredia, J., Solera-Hernandez, C., (2010) Surface Water and Wastewater Treatment Using a New Tanin-based Coagulant, *Journal of Environmental Management*, **91**, 2051-2058.
- [9] Sánchez-Martín, J., Beltrán-Heredia, J., Peres, J.A., (2012) Improvement of the Flocculation Process in Water Treatment by Using *Moringa Oleifera* Seeds Extract, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, **29** (3), 495 – 501.
- [10] APHA-AWWA-WPCF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, part I, American Public Health Association, Washington, 20 th edition 1998.
- [11] Dalmacija, B., Ivančev-Tumbas, I., Prirodne organske materije u vodi, PMF, Novi Sad 2002., str 26-44..
- [12] Dalmacija, B., Kvalitet vode za piće - problemi i rješenja, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 1998., str. 29-48.
- [13] M. Szlachta, M., Adamski, W., (2009) Efficiency of DOM Removal by Adsorption Determined on the Basis of Bench-Scale Results, *Polish J. of Environ. Stud.*, **18** (3), 481-486.
- [14] Gobor, Z., Turk, M., Jakšić, J., Vojinović-Miloradov, M., Miloradov, M., Matematički model procesa flokulacije postrojenja za tretman otpadnih voda rafinerije, Međunarodna konferencija: Otpadne vode, komunalni čvrsti otpad i opasni otpad, Zlatibor, Srbija 19-23. April 2005, str. 141-146.
- [15] Van Leeuwen, J., Holmes, M., Heidenrich, C., et.al., Modelling the Application of Inorganic Coagulants and pH Control Reagents for Removal of Organic Matter from Drinking Waters, MODSIM Integrative Modelling of Biophysical, Social and Economic Systems for Resource Management Solutions, Townsville, Australia, 14-17 July 2003, CD-ROM, p. 1835-1840.

## ABSTRACT

### WATER TEMPERATURE AND FLOCCULANT CONCENTRATION INFLUENCE ON THE SURFACE WATER CLARIFICATION WITH PROCESS MODELING

*Applying the jar-test method, the influence of water temperature and coagulant Al-sulphate dosage on a clarification process of water from river Vrbas have been analysed, in order to obtain the required quality of raw water for certain purposes. The main observations during conduction of coagulation tests, are based on indirect indicators of the presence of colloidal particles - turbidity of water. Also, the other relevant process parameters - the content of natural organic matter (POM), pH, specific conductivity, the total content of organic matter and aluminum content, have been determined. Based on the measured turbidity in optimal samples, a simple mathematical model was developed. Developed model can be applied to simulate the process of coagulation/flocculation, with the goal of optimisation of control and possible automation of process.*

**Keywords:** surface water clarification, coagulation/flocculation, aluminium sulphate, turbidity of water, mathematical model.

*Scientific paper*

*Received for Publication: 11. 08. 2013.*

*Accepted for Publication: 13. 10. 2013.*