

RADOVAN KUKOBAT, LJILJANA VUKI ,
DIJANA DRLJA A, SAŠA PAPUGA

Originalni nau ni rad
UDC:628.161/.167

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

U radu je metodom jar-testa ispitan uticaj temperature vode i doze koagulanta Al-sulfata na proces bistenja vode rijeke Vrbas, sa ciljem dobijanja zahtjevanog kvaliteta sirove vode za odre ene namjene. Osnovna zapažanja tokom izvo enja testova koagulacije, donesena su na osnovu indirektnog pokazatelja prisustva koloidnih estica – turbiditeta (mutno e) vode. Pored ovog, pra eni su i drugi relevantni parametri procesa - sadržaj prirodnih organskih materija (POM), pH-vrijednost, specifi na provodljivost, sadržaj ukupnih organskih materija, kao i sadržaj aluminijuma. Na osnovu izmjerene mutno e u optimalnim uzorcima, kreiran je jednostavni matemati ki model, koji se može primijeniti za simulaciju procesa koagulacije/flokulacije, a sa ciljem optimalnog vo enja i mogu e automatizacije procesa.

Klju ne rije i: bistenje površinske vode, koagulacija/flokulacija, aluminijumsulfat, mutno a vode, matemati ki model.

1. UVOD

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

- prirodne organske materije (huminske i fulvo kiseline) ije je naelektrisanje posljedica prisutnih funkcionalnih grupa (COOH, OH, NH₂);
- neorganske koloidne primjese – alumosilikate, gdje je naelektrisanje posljedica zamjene Al- i Si- atoma u tetraedarskoj strukturi aluminijuma;
- estice 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 odre enu namjenu, potrebno je sadržaj navedenih koloidnih primjesa dovesti u odre ene granice, što se postiže procesima bistenja vode. Za efikasno bistenje površinskih voda prikladan je fizi ko-hemijski postupak koagulacije/flokulacije, pomo u kojeg se smanjuje sadržaj koloidnih estica njihovim razelektrisanjem i ukрупnjavanjem, uz naknadno uklanjanje taloženjem ili filtracijom [2-6].

Poznati su razli iti koagulant koji se koriste u obradi vode, a naj eš e primjenjivani u praksi su soli aluminijuma i željeza, ije djelovanje u velikoj mjeri zavisi od temperature vode. Novija istraživanja pokazuju da se efikasno uklanjanje mutno e

u procesu koagulacije/flokulacije može provesti i pomo u nove generacije tzv. kompozitnih koagulanata [7], potom prirodnih biljnih sredstava na bazi tanina [8] ili ekstrakta iz sjemena tropskog drveta Moringa oleifera, koji zna ajno ubrzava proces [9]. Ipak, aluminijum-sulfat još uvijek slovi za naj eš e 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 bistenja vode koagulacijom. Osnovna zapažanja tokom izvo enja procesa koagulacije pomo u jar-testova, donesena su na osnovu indirektnog pokazatelja prisustva koloidnih estica – turbiditeta (mutno e) vode. Pored ovih pra eni su i drugi relevantni parametri procesa - sadržaj prirodnih organskih materija (POM), pH-vrijednost, specifi na provodljivost, sadržaj ukupnih organskih materija, kao i sadržaj rezidualnog aluminijuma.

Na osnovu izmjerenog turbiditeta u optimalnim uzorcima na razli itim temperaturama, formirani su jednostavni matemati ki modeli koji se sastoje od matemati kih jedna ina sa jednom i dvije promjenljive, a koji najbolje opisuju dati proces. Na taj na in se bez izvo enja eksperimenta mogu izra unati optimalne koncentracije koagulanta, za date uslove procesa. Tako e, proces se može voditi u smislu automatskog doziranja koagulanta na osnovu *online* izmjerenih vrijednosti za ulaznu i izlaznu tvrdu u.

2. EKSPERIMENTALNI DIO

Za ispitivanja su korišteni uzorci vode rijeke Vrbas i ukupno je uzeto pet uzoraka razli itog stepena zamu enja. 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.Stepanovi a 73, 78000 Bana Luka

Primljeno za publikovanje: 11. 08. 2013.

Prihvajeno za publikovanje: 13. 10. 2013.

Neposredno po uzorkovanju, uzorci vode su analizirani na sljedeće parametre kvaliteta: pH-vrijednost, BPK₅, ukupnu suhu materiju i njene frakcije: žareni ostatak, gubitak žarenjem i ukupne suspendovane materije, potom mutno u, specifična 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 pronađeni su: sadržaj prirodnih organskih materija (POM), pH-vrijednost, specifični

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 ₅	mgO ₂ /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 ₃ /L	206,72	218,00	204,15	212,08	202,72
Karbonatna tvrdoća	mgCaCO ₃ /L	206,72	218,00	204,15	212,08	202,72
Ukupna tvrdoća	mgCaCO ₃ /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 aluminosilikata 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 zamutjenja 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;

na provodljivost, sadržaj ukupnih organskih materija (KMnO₄), 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.

- **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 ujednašen 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;
- **BPK₅** vrijednosti se kreću u uobičajenim granicama za površinske vode i može se konstatovati da se radi o relativno istoj vodi;
 - Vrijednosti za **ukupnu i karbonatnu tvrdu u**, odnosno **ukupni alkalitet** su relativno ujednašene 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 jakih mineralnih kiselina H₂SO₄, 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), grade i slabu ugljenu kiselinu i održavaju i 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 ₂ (SO ₄) ₃ /L	0	2,5	5	7,5	10	15
	Turbiditet, NTU	2,76	2,33	2,24	2,13	1,94	1,03
	pH	7,28	6,73	6,91	7,20	7,23	7,26
	Spec. vodlj., µS/cm	425	432	434	436	438	439
	POM, m ⁻¹	3,0	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
	KMnO ₄ , mg/L	1,10	-	-	-	-	0,93
	Sadržaj Al, mg/L	<0,075	-	-	-	-	0,13
10 °C	Turbiditet, NTU	2,85	2,41	2,35	2,30	2,02	0,98
	pH	7,95	6,89	7,01	7,06	7,39	7,00
	Spec. vodlj., µS/cm	438	446	448	450	456	452
	POM, m ⁻¹	3,0	2,7	2,5	2,4	2,4	2,4
	KMnO ₄ , mg/L	1,04	-	-	-	-	0,91
	Sadržaj Al, mg/L	<0,075	-	-	-	-	0,14
15 °C	Turbiditet, NTU	2,10	2,04	1,80	1,15	0,92	0,80
	pH	7,87	7,55	7,24	7,66	7,03	7,70
	Spec. vodlj., µS/cm	425	432	437	457	460	466
	POM, m ⁻¹	3,2	2,6	1,9	1,9	1,9	1,9
	KMnO ₄ , mg/L	1,04	-	-	-	0,89	-
	Sadržaj Al, mg/L	<0,075	-	-	-	0,14	-
20 °C	Turbiditet, NTU	2,43	2,36	1,18	0,61	0,46	0,35
	pH	7,90	7,18	7,13	7,01	6,99	6,90
	Spec. vodlj., µS/cm	430	435	441	449	452	457
	POM, m ⁻¹	3,1	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
	KMnO ₄ , mg/L	1,13	-	-	0,92	-	-
	Sadržaj Al, mg/L	<0,075	-	-	0,16	-	-

* - kontrolna proba

** - optimalna proba (bold)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ukoliko se analizira uticaj doze Al-sulfata na stepen bistrenja sirove vode i uopšte kvalitet izbi-strene vode, pri razli itim radnim temperaturama (tabele 2-6) može se konstatovati sljede e:

- Generalno, proces koagulacije se sporije i sa manjom efikasnoš u odvija pri nižim temperaturama, pogotovo ako voda ima nisku mutno u. Nasuprot tome, porastom temperature dolazi do efikasnijeg bistrenja vode usljed [3]:
 - ubrzavanja koagulacije,
 - smanjenja inkubacionog perioda u formiranju flokula,
 - ubrzavanja kretanja estica, a time i ve eg broja sudara izme u njih.
- Optimalne doze Al-sulfata se u najve em broju slu ajeva kre u u granicama 7,5-15 mg/L. Samo izuzetno visoke vrijednosti turbiditeta zahtijevaju ve e doze ovog koagulanta, 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 koagulanta, što se može objasniti time da ispitivana voda posjeduje dovoljnu koncentraciju karbonatnih i bikarbonatnih jona za vezivanje H-jona izdvojenih disocijacijom H₂SO₄, koji nastaju tokom hidrolize Al-sulfata;
- Jonska forma mineralnih materija izražena kroz specifi nu provodljivost, uglavnom ostaje nepromijenjena, odnosno proces koagulacije ne uti e 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 odre eni 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 ve em procentu. POM su odre ivane indirektnom metodom, odnosno UV apsorbancijom na 254 nm, koja se smatra pouzdanim mjerilom prisustva prirodnih organskih materija u vodi. Literatura potvr uje 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 odre ivan u tri uzorka od pet analiziranih, pri emu 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 odre ivanja sadržaja Al, usljed nedovoljno raspoložive koli ine supernatanta za ovu analizu. Postoji realna mogućnost pojave rezidualnih koncentracija ovog metala, posebno kod niskih inicijalnih mutno a ili kod nepoštivanja parametara procesa (na in doziranja, režim miješanja, na in dekantiranja supernatanta i sl.).

3.3. Razvoj matemati kog modela za proces koagulacije

Svrha matemati kog modelovanja procesa je da se na osnovu izmjerenih vrijednosti relevantnih parametara, dobiju matemati ke jedna ine koje najbolje opisuju dati proces. Na taj na in, u slu aju procesa koagulacije, bez provo enja eksperimenta mogu se izra unati optimalne koncentracije koagulanta.

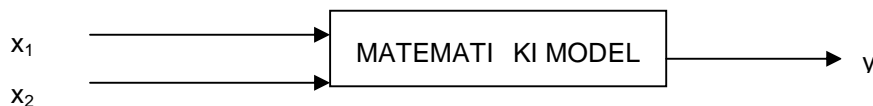
Postupak matemati kog modelovanja procesa može da se zasniva na jednom od dva osnovna pristupa:

- teorijskom - kada se daje suštinsko objašnjenje fizi kog procesa,
- empirijskom – kada se model zasniva na poznavanju razli itih osobina procesa.

U ovom radu korišten je empirijski metod, koji se formira na osnovu parametara koji uti u na pro-

ces koagulacije/flokulacije. Pri takvom pristupu formiraju se algebarske jedna ine koje povezuju promjenljive procesa.

Za odre ivanje parametara matemati kog modela primijenjena je metoda najmanjih kvadrata, a za numeri ku optimizaciju parametara korišten je matemati ki alat Solver iz programskog paketa Microsoft Excel.



Slika 2 - Šematski prikaz matemati kog modela procesa koagulacije

Radi jednostavnosti prikaza dobijenih jedna ina uvedene su sljede e promjenljive:

x_1 - mutno a prije tretmana,

x_2 - koli ina koagulant/flokulant koji se dodaje,

y - mutno a nakon tretmana.

Tokom izrade matemati kog modela dobijena su dva tipa jedna ina:

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

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

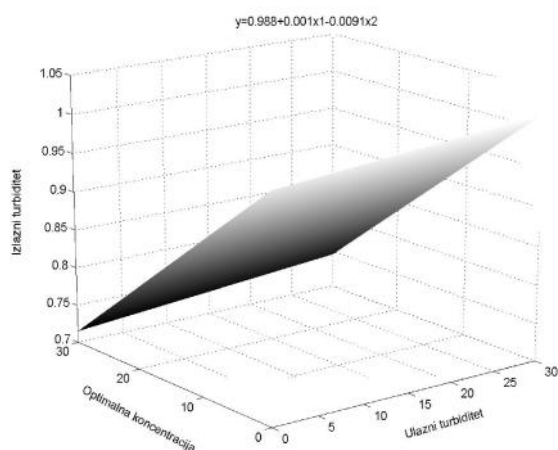
Tabela 7 - Uporedni prikaz dobijenih modela za $Al_2(SO_4)_3$

Red. br.	T (°C)	Model	R ²
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

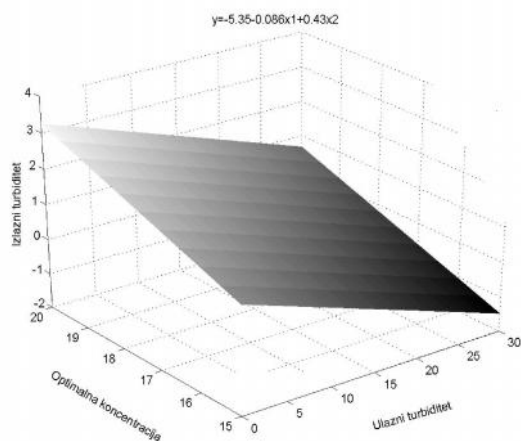
Model koji e se koristiti za simulaciju izabran je koriš enjem dva kriterijuma. Prvi kriterijum je koeficijent korelacije, dok se drugi kriterijum odnosi na jednostavnost modela za prakti nu primjenu kao i osobinu modela da prati ponašanje sistema utvr eno tokom laboratorijskih ispitivanja.

Na osnovu postavljenih kriterijuma najprihvatljiviji su se pokazali **multilinearni modeli 1 i 2 na 5°C i 10 °C**. Ovi modeli su predstavljeni trodimenzionalnim grafi kim prikazom na slikama 3 i 4. Nelinearni model se pokazao dobrim u pogledu koeficijenta korelacije, ali zbog kompleksnosti nema prakti nu primjenu.

Izvedeni modeli nisu univerzalni, odnosno ograni eni su samo na oblast promjenljivih u kojoj se nalaze eksperimentalno dobijeni podaci. Dakle, ovi empirijski modeli se ne mogu upotrijebiti za druge sli ne 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 koristi za približno izra unavanje optimalne doze koagulanata na osnovu ulaznog i željenog turbiditeta, na datoj temperaturi.



Slika 3 - Grafi ki prikaz multilinearog modela 1 na 5 °C, za $Al_2(SO_4)_3$



Slika 4 - Grafi ki prikaz multilinearog modela 2 na 10 °C, za $Al_2(SO_4)_3$

Model koagulacije može da se kombinuje i sa modelima drugih procesa obrade vode, npr. sa modelom adsorpcije policikličkih aromatskih jedinjenja (PAC) [13]. Tako e, mogu e je uklju iti i druge promjenljive koje uti u 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. ZAKLJU AK

Na osnovu laboratorijskih ispitivanja uticaja temperature vode i doze koagulanta na bistrenje vode rijeke Vrbas mogu se sumirati sljede i zaklju ci:

1. Voda rijeke Vrbas spada u relativno nezagaene površinske vode sa ujedna enim sadržajem rastvorenih materija. U periodu ispitivanja, mutno a 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 pi e, potrebno ju je izbistriti, što se efikasno može postiti i procesom koagulacije/flokulacije;
3. Koagulant $Al_2(SO_4)_3$ razli ito se ponaša kod uklanjanja mutno e vode, pri razli itim 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 matemati kog modela, baziranog na eksperimentalno dobijenim podacima, dobijeni su numeriki izrazi, pomo u kojih se pri datim uslovima eksperimenta mogu približno izra unati 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 tretmant, UK, 2006, pp. 171-175.
- [2] Ga eša, S., Klašnja, M., Tehnologija vode i otpadnih voda, Jugoslovensko udruženje pivara, 1994., str. 15-49.
- [3] Še erov, R., Sokolovi, S., Inženjerstvo u zaštiti okoline, Tehnološki fakultet, Novi Sad, 2002., str. 42-56.
- [4] Simi i, H., Procesi obrade otpadnih voda, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Tuzli, 2002., str. 149-152.
- [5] Maksimovi, M., Vuki, Lj., Prora un 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 pi e u svjetlu novih standarda i normativa, Prirodno-matemati ki 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., Ivan ev-Tumbas, I., Prirodne organske materije u vodi, PMF, Novi Sad 2002., str 26-44..
- [12] Dalmacija, B., Kvalitet vode za pi e - problemi i rješenja, Prirodno-matemati ki 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., Jakši , J., Vojinovi -Miloradov, M., Miloradov, M., Matemati ki model procesa flokulacije postrojenja za tretman otpadnih voda rafinerije, Me unarodna konferencija: Otpadne vode, komunalni vrsti 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.