

ROBERT MUSZA SKI<sup>1</sup>

## **Wpływ czasu kontaktu fazy gazowej w wielostopniowych kolumnach kontaktowych ozonowania po redniego na redukcj st enia bromianów**

### **Effect of contact time of gaseous phase in multistage contact columns in the intermediate ozonation process for reduction of bromates**

<sup>1</sup> WOFIL OZONE TECHNOLOGY, ul. Rze niana 10/1, 33-380 Krynica – Zdrój, wofil@wofil.pl

#### **Streszczenie.**

W artykule zostały opisane badania nad zastosowaniem technologii ozonowania do oczyszczania wody powierzchniowej w obecności bromków. Instalacja pilotowa, na której przeprowadzono badania, wykorzystywała wielostopniowe kolumny kontaktowe do procesów ozonowania wody ze stabilizacją czasu kontaktu. W badaniach stwierdzono, że podstawą ograniczenia powstawania bromianów jest optymalna ilość ozonu resztkowego po procesach ozonowania oraz stały czas kontaktu z wodą. Dzięki temu rozważano na ograniczyć powstawanie związków szkodliwych dla zdrowia i zastosować technologię wykorzystującą ozon do wód zawierających prekursorów związków kancerogennych.

**Słowa kluczowe:** ozon, wielostopniowe kolumny kontaktowe, ozon resztkowy, stały czas kontaktu, bromiany

#### **Abstract.**

This article describes the research on the application of ozone technology for the purification of surface water at the presence of bromides. The pilot system has used the multistage contact columns for water-ozonation processes at stabilisation of contact time. The research has shown that the basis for limiting the formation of bromates is the optimum amount of residual ozone after ozonation process and the stable contact time with water. This solution allows for reducing of formation of harmful compounds and for the use of ozone technology for water containing carcinogenic precursors.

Key words: Ozone, multistage contact columns, residual ozone, stable contact time, bromates

## **1. Wstęp**

Ozon ze względu na swoje właściwości jest jednym z najskuteczniejszych środków dezynfekcyjnych, mocniejszych niż chlor i jego związki. Ozon łatwo reaguje z wieloma substancjami obecnymi w wodzie stanowiącymi jej zanieczyszczenia, jest przy tym nietrwały, co przejawia się m.in. w skłonności do samorozpadu po rozpuszczeniu w

wodzie[2]. Efekt ten obserwuje się w większym stopniu w środowisku alkalicznym. Chemizm ozonu w środowisku wodnym jest bardzo złożony i został opisany w wielu monografiach.

Większość dotychczasowych prac, dotyczących procesu ozonowania wody czerpanej z ujęć powierzchniowych i podziemnych dotyczyła głównie właściwości dezynfekcyjnych ozonu[5], pomijając jego właściwości utleniające i możliwość aglomeracji związków organicznych i nieorganicznych. Należy jednak zauważyć, że we wszystkich technikach i procesach uzdatniania wody stosuje się dodatkowo procesy, takie jak: napowietrzanie, koagulacja i filtracja, które prowadzą do uzyskania wody o odpowiednich parametrach jakościowych. Jeżeli będziemy rozpatrywać zastosowanie technologii ozonowania, jako jednego z elementów nowoczesnej stacji uzdatniania wody, to okaże się, że:

- do napowietrzania wody można wykorzystać odzyskany zdesorbowany ozon ze zbiorników kontaktowych, który szybko i bardzo reaktywnie prowadzi reakcje wstępnego napowietrzania i utleniania,
- procesy koagulacji zachodzą szybciej i wymagają mniejszych dawek reagentów,
- filtry pracują szybciej, a aglomeracja cząstek zwiększa prędkość filtracyjną[3].

Zastosowanie procesu ozonowania do wspomaganie wyżej wymienionych procesów jednostkowych sprawia, że diametralnie obniżają się koszty inwestycyjne i eksploatacyjne kompleksowych instalacji uzdatniania wody. Na przykład wstępne napowietrzanie wody prowadzone zwykłym powietrzem wymaga czasu kontaktu z wodą około 10 do 20 minut, a powietrzem zjonizowanym ozonem około 2 do 5 minut, co przekłada się na wielkość urządzeń[4].

Celem badań opisanych w artykule było wykazanie celowości stosowania pionowych, wielostopniowych kolumn kontaktowych w procesie ozonowania po redniego. Dzięki takiemu rozwiązaniu zmniejsza się w istotny sposób ryzyko tworzenia się w procesie uzdatniania wody związków szkodliwych dla zdrowia, takich jak np. bromiany. W badaniach tych oceniono i przeanalizowano wpływ czasu kontaktu fazy gazowej z wodą w pierwszym stopniu filtracji na redukcję stężenia bromianów w procesie ozonowania po redniego wody w wielostopniowych pionowych kolumnach kontaktowych.

## 2. Metodyka badań i stosowana aparatura

Badania prowadzono na instalacji pilotowej, która wykorzystywała dwustopniowy proces ozonowania. Proces wstępnego ozonowania prowadzono za pomocą aeratora-desorbera, wykorzystując tego ozon zdesorbowany z kolumn kontaktowych i wymieszany z czystym filtrowanym powietrzem. Proces ozonowania po redniego prowadzono w kolumnach kontaktowych na dwóch stopniach, przygotowanych do działania przy zmiennych przepływach. Proces prowadzony był na wodzie surowej bez dodatków koagulantów i innych związków chemicznych. Woda surowa wykorzystywana w badaniach była pobierana z rurociągu dla głównej stacji uzdatniania wody, czerpiącej wodę na ujęciu brzegowym. Parametry wody pokazano w Tabeli 1.

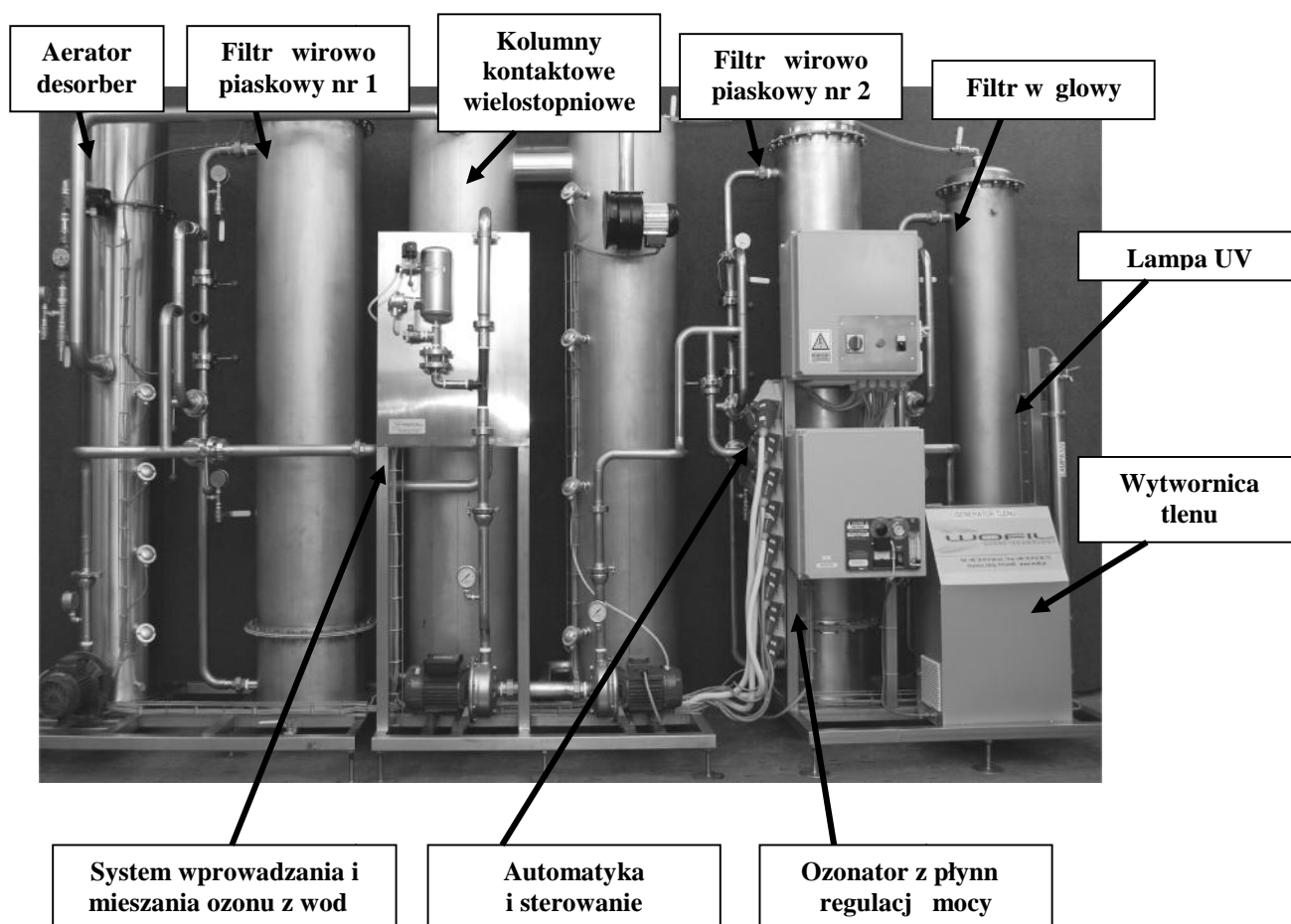
**Tabela 1**

Charakterystyka wody surowej użytej w badaniach (źródło: materiały wewnętrzne firmy WOFIL)

Rodzaj badania	Jednostka	Wynik badania	Dopuszczalna zawartość
----------------	-----------	---------------	------------------------

Bakterie grupy coli	jtk/100 cm <sup>3</sup>	547	0
Escherichia coli	jtk/100 cm <sup>3</sup>	17	0
Barwa	mg/l Pt	26	15
M tno	NTU	6,36	1
Zapach	-	akceptowalny	akceptowalny
pH	-	7,9	6,5 - 9,5
Bromiany	µg/dm <sup>3</sup>	0,7	10
Mangan	mg/dm <sup>3</sup>	17,7	50
Indeks nadmanganianowy (utleniałno )	mg/dm <sup>3</sup>	3,1	5

System ozonowania, który wykorzystano do badań to zespół urządzeń, odpowiedzialnych za wyprodukowanie ozonu i wprowadzenie go do wody za pomocą układu wprowadzania. System ozonowania składał się z: wytwornicy tlenu, bloku produkującego ozon, dwustopniowych kolumn kontaktowych, urządzenia pomiarowego ozonu resztkowego w wodzie, układu wprowadzania ozonu [4]. Schemat badawczej instalacji pilotowej, na której prowadzono badania przedstawiono na Rysunku 1.



**Rys. 1.** Widok badawczej stacji pilotowej ( Źródło: materiały wewnętrzne firmy WOFIL)

### 2.1. Wielostopniowe kolumny kontaktowe

W badaniach wykorzystywano pionowe kolumny kontaktowe o następującej charakterystyce.

Kolumny I (pierwszy stopień):

- średnica  $D = 0,4$  m;
- Wysokość całkowita  $H = 2,0$  m;
- Kolumna utleniająca - objętość całkowita  $= 0,2$  m<sup>3</sup>;
- Objętość czynna do pierwszego stopnia 1 kolumny  $V_c = 0,125$  m<sup>3</sup>;
- Kolumna odpowietrzenia - objętość całkowita  $= 0,2$  m<sup>3</sup>;
- Objętość reakcyjna po pierwszym stopniu kolumny  $V_c = 0,05$  m<sup>3</sup>;
- Czas kontaktu ozonu z wodą: około 10–12 minut;

Kolumny II (drugi stopień):

- średnica  $D = 0,4$  m;
- Wysokość całkowita  $H = 2,0$  m;
- Kolumna utleniająca - objętość całkowita  $= 0,2$  m<sup>3</sup>;
- Objętość czynna do drugiego stopnia 1 kolumny  $V_c = 0,19$  m<sup>3</sup>;
- Kolumna odpowietrzenia - objętość całkowita  $= 0,2$  m<sup>3</sup>;
- Objętość reakcyjna po drugim stopniu kolumny  $V_c = 0,15$  m<sup>3</sup>;
- Czas kontaktu ozonu z wodą: około 20–25 minut.

Kolumny dostosowane do pracy przy zmiennych przepływach w zakresie od 0,5 do 2 m<sup>3</sup>/h. Dla lepszego zobrazowania pracy kolumn wielostopniowych przy zmiennych przepływach, prowadzono badania na trzech czasach kontaktu wody z ozonem, dostosowanych do przepływów:

- przepływ 1 m<sup>3</sup>, czas kontaktu około 10 minut (pierwszy stopień),
- przepływ 1 m<sup>3</sup>, czas kontaktu około 20 minut (drugi stopień),
- przepływ 0,5 m<sup>3</sup>, czas kontaktu około 50 minut (drugi stopień).

### 2.2. Opis instalacji

Woda surowa z rurociągu magistralnego wpływa do zbiornika uśredniającego, skąd pompowana jest do aeratora desorbera. Woda surowa wpływa do aeratora desorbera, w którym następuje proces usunięcia ewentualnych cząstek rozpuszczonych gazów z wody. Jednocześnie woda jest napowietrzana powietrzem wzbogaconym w nadmiar ozonu desorbującego z kolumn kontaktowych (powietrze zjonizowane), dla wspierania utleniania związków łatwo utleniających na tym etapie technologii. Wspieranie utleniania wody w aeratorze wspomaga procesy filtracyjne na pierwszym stopniu filtracji. Dodatkowo dla bezpieczeństwa, zainstalowano pułapki wodno-gazowe umożliwiające odprowadzenie nadmiaru wody do kanalizacji z separacją ozonu, w momencie przelania aeratora. Urządzenie jest niezabudowane w instalacjach, w których ozon używany jest do utleniania i dezynfekcji wody. Parametry zastosowanego aeratora-desorbera:

- średnica 300 mm,
- wysokość całkowita 1800 mm,
- wyposażony w kompletne orurowanie, armaturę i zestaw czujników,

- w komplecie z pułapką wodno-gazową.

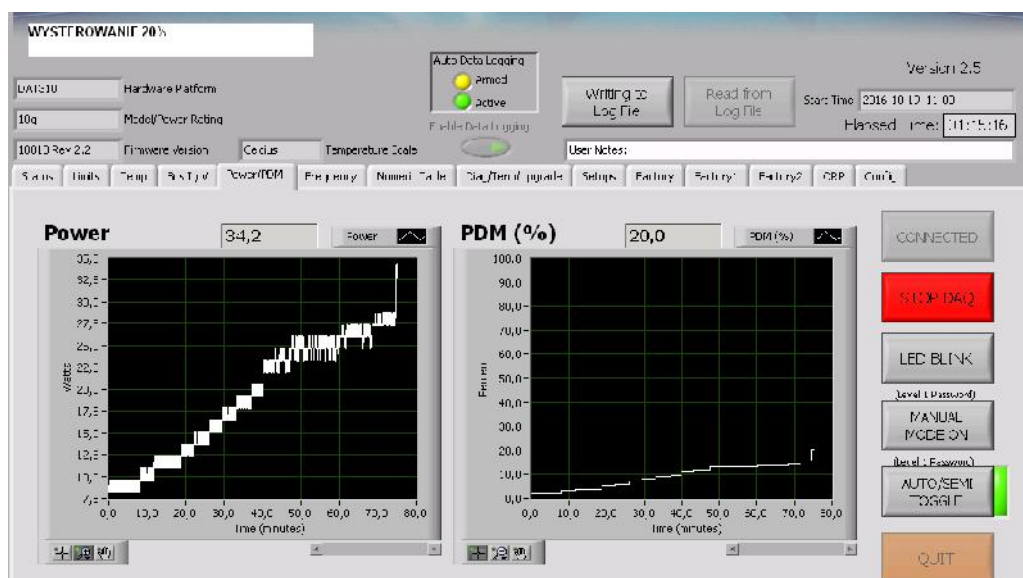
Zjonizowane powietrze doprowadzane jest do aeratora z kolumn kontaktowych systemu ozonowania. Wywiew powietrza wymusza się działaniem wentylatora nawiewnego do kolumn kontaktowych ozonowania, które wypycha nadmiar gazu.

Woda surowa po procesie wstępnego utlenienia powietrzem zjonizowanym, pompowana jest na pierwszy stopień filtracji, na filtrze wirowo-piaskowym o następujących parametrach: średnica filtra  $D = 400$  mm, wysokość  $H = 130$  cm, przepływ roboczy  $Q_{max} = 1$  m<sup>3</sup>/h, prędkość filtracji  $V_{max} = 8$  m/h, maksymalne ciśnienie na wejściu  $P_{max} = 1,5$  bar. Po filtrze wirowo-piaskowym, uzdatniana woda wpływa do dwustopniowych kolumn kontaktowych, które są częścią systemu ozonowania. Pojemność jednej kolumny wynosi 0,20 m<sup>3</sup>.

Przefiltrowana woda z I filtracji trafia do dwustopniowych kolumn kontaktowych: nr 1 (ZB2) i nr 2 (ZB3). Pojemność całkowita kolumn wynosi około 0,4 m<sup>3</sup>. Przed kolumnami kontaktowymi zainstalowany jest układ wprowadzania ozonu z pomp obiegowych. Ozon wytwarzany jest z tlenu produkowanego przez wytwornice tlenu. W kolumnach kontaktowych zachodzą reakcje utleniania i chemicznej dezynfekcji. Pozostały w kolumnach nadmiar gazu (ozonu), desorbują się z ozonowanej wody i w kolumnie odpowietrzającej zostaje zmieszany z powietrzem otaczającym i już jako powietrze zjonizowane wdmuchiwany do aeratora desorbera. Zastosowano wytwornicę tlenu o parametrach: 0,31 m<sup>3</sup>/h (50% na rotametrze); standardowe ciśnienie tlenu 0,6 bar; czystość tlenu 93%; punkt rosy -60°C.

Wykorzystano ozonator z elektrod dielektrycznych aluminiowych chłodzonych powietrzem do utlenienia zawartych w wodzie zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych. Umożliwia on płynną regulację mocy (wydajność 2–100%), pozwalając na zdalne regulowanie za pomocą potencjometra. Moduł ozonatora o wydajności 20 g/O<sub>3</sub> max posiada:

- regulację wydajności za pomocą modulacji gęstości impulsów (PDM);
- wysoką częstotliwość pracy oscylującą w granicach 25 kHz;
- komorę o kompaktowej konstrukcji profilowanego aluminium z duktami odprowadzającymi ciepło z ceramicznymi elektrodami wykorzystywanymi do wyładowań elektrycznych;
- dedykowany mikroprocesor zaimplementowany w układ sterowania typu DAT umożliwiający regulację urządzenia przez dedykowane urządzenie umożliwiające podłączenie za pomocą specjalizowanego adaptera do komputera z odpowiednim oprogramowaniem, dzięki któremu można wykonać diagnostykę pracy i analiz danych na podstawie dostępnego rejestru. Przykładowy widok diagnostyki pracy przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2 Przykładowy widok diagnostyki pracy generatora ozonu (ródło: materiały wewn trzne firmy WOFIL)

Ozon wytworzony w ozonatorze doprowadzany jest ci nieniowo do separatora wyposa onego w zabezpieczenia chroni ce ozonator przed zalaniem wod :

- in ektor,
- separator ozonu,
- zawór pneumatyczny odcinaj cy.

Po kolumnie kontaktowej nr 2, woda pompowana jest pomp na filtr w glowy (filtracja II). Podstawowe parametry tego filtra były nast puj ce: rednica filtra  $D = 250$  mm, wysoko zło a: 90 cm, przepływ roboczy  $Q_{max} = 1$  m<sup>3</sup>/h, pr dko filtracji  $V_{max} = 20$  m/h, maskymalne ci nienie na wej ciu  $P_{max} = 1,5$  bar. Proces filtracji prowadzony był w sposób automatyczny, a procesy płukania wstecznego – r cznie. Woda po procesie filtracji II stopnia na filtrze w glowym, przepływa jeszcze przez lamp UV słu c do ci głej dezynfekcji wody uzdatnionej. Zastosowano urz dzenie o nast puj cych parametrach: lampa niskoci nieniowa, wydajno maksymalna 1 m<sup>3</sup>/h, min. dawka 400 J/m<sup>2</sup> dla transmisji  $T=98\%$ , moc 75 wat UVC.

W czasie prac badawczych prowadzono płukanie wsteczne filtra wirowo-piaskowego oraz w glowego z zanieczyszcze stałych oraz utlenionych i filtrowanych na zło u. Płukanie przeprowadzano raz dziennie. Próbki do bada były pobierane co najmniej dwie godziny po odpłukaniu zło a, po ustabilizowaniu pracy filtra.

W badaniach wykorzystano urz dzenie do pomiaru ozonu resztkowego w wodzie po procesie ozonowania, dzi ki któremu mo na ustali stał dawek dozowanego ozonu do wody na podstawie ozonu resztkowego (czyli pozostałego w wodzie po reakcji). Ozon resztkowy badano co 3 godziny, w wodzie po kolumnie odgazowania. Opis badania: ozon reaguje gwałtownie z jonami jodkowymi utleniaj c je do jodu wolnego, który w obecno ci odczynnika daje trwałe czerwone zabarwienie (oznaczenie przy pomocy komparatora i

odczynnika w tabletkach). Dysk przeznaczony jest dla zakresu od 0.05 do 0.45 mg/dm<sup>3</sup> ozonu (O<sub>3</sub>) w krokach co 0,05, z zastosowaniem kuwet 13,5 mm o pojemności 10 cm<sup>3</sup>.

### 3. Wyniki badań i dyskusja wyników

Podczas badań skupiono się na:

- oznaczaniu ozonu resztkowego po procesie utleniania,
  - na ilości ozonu dawkowanego do wody,
  - ilości przepływającej wody w czasie przez kolumny wielostopniowe,
  - zawartości bromianów w wodzie po poszczególnych procesach technologicznych.
- Dodatkowo oznaczano miano, barwę i mangan w celach porównawczych.

**Tabela 2**

Parametry jakościowe wody uzyskanej w trakcie badań na pilotowej instalacji ozonowania

Miejsce poboru	Przepływ, m <sup>3</sup>	Dawka ozonu, g/m <sup>3</sup>	Ozon resztkowy, mg/dm <sup>3</sup>	Miano, NTU	Barwa, mg/dm <sup>3</sup> Pt	Mangan, µg/dm <sup>3</sup>	Bromiany, µg/dm <sup>3</sup>
<b>Woda surowa</b>							
Ekspr. 1	1			2,89	11	38,6	0,1
Ekspr. 2	1			2,5	10	40,5	0,1
Ekspr. 3	1			1,87	10	36,8	0,3
Ekspr. 4	1			1,51	10	36,8	0,7
Ekspr. 5	1			6,37	7	270	0,1
Ekspr. 6	0,5			4,86	-*	-*	0,1
Ekspr. 7	1			2,67	-*	-*	0,3
<b>Po aeratorze (zjonizowane powietrze)</b>							
Ekspr. 1	1			1,54	10	19,8	0,0
Ekspr. 2	1			1,66	10	22,9	0,1
Ekspr. 3	1			1,63	9	26,5	0,5
Ekspr. 4	1			1,51	9	26,5	0,3
Ekspr. 5	1			4,82	5	250	0,1
Ekspr. 6	0,5			5,05	-*	-*	0,1
Ekspr. 7	1			0,14	-*	-*	0,7
<b>Po filtrze wirowo piaskowym</b>							
Ekspr. 1	1			1,04	10	8,3	0,0
Ekspr. 2	1			1,08	9	5,4	0,2
Ekspr. 3	1			0,98	8	0,4	0,2
Ekspr. 4	1			0,87	8	0,4	0,3
Ekspr. 5	1			1,52	1	18,7	0,1
Ekspr. 6	0,5			1,08	-*	-*	0,2
Ekspr. 7	1			0,12	-*	-*	0,2
<b>Po ozonowaniu po rednim</b>							
Ekspr. 1	1	2	0,05	0,92	3	8,2	0,4
Ekspr. 2	1	2,5	0,1	0,98	3	5,1	3,4
Ekspr. 3	1	3	0,15	0,86	3	0,4	3,6
Ekspr. 4	1	3,2	0,2	0,62	3	0,4	3,8
Ekspr. 5	1	3,2	0,05	1,17	5	16,7	1,7
Ekspr. 6	0,5	3,9	0,25	0,89	-*	-*	24
Ekspr. 7	1	2,5	0,15	0,11	-*	-*	4,2

Po filtrze w głowym							
Ekspr. 1	1			0,67	3	10,2	0,3
Ekspr. 2	1			0,47	2	1,4	3,3
Ekspr. 3	1			0,71	3	1,2	4,3
Ekspr. 4	1			0,59	3	1,2	9,1
Ekspr. 5	1			1,04	1	6,5	1,8
Ekspr. 6	0,5			0,89	-*	-*	21,4
Ekspr. 7	1			0,07	-*	-*	3,6

\*Barwy i manganu nie badano z powodu uszkodzenia aparatu.

W trakcie pierwszych 4 dni bada uzyskano maksymaln m tno wody surowej wynosz c 2,89 NTU, dawka ozonu do wody wynosiła max 3,2 g/m<sup>3</sup>, m tno po filtrze w głowym wynosiła minimalnie 0,47 NTU, ozon resztkowy ustabilizowany był na poziomie maksymalnie 0,2 mg/dm<sup>3</sup>. Przy takich nastawach systemu ozonowania i maksymalnym przeci eniu układu filtracyjnego, jako wody była w normie, a warto bromianów nie przekroczyła 9,1 µg. Mo na zauwa y jak ze wzrostem ozonu resztkowego rosła zawarto bromianów po ozonowaniu po rednim. Oczywi cie ilo bromianów przy czasie reakcji do 12 minut i ozonie resztkowym max 0,2 mg/dm<sup>3</sup> dla innej matrycy wody mo e zmieni swoj warto , a wpływ na proces mog nie inne parametry, które w tym momencie nie s badane. Dlatego tak wa ne s badania pilotowe przy zastosowaniu technologii ozonowania, aby odpowiednio dobra dawki i czasy reakcji. Co wa ne, czas reakcji utrzymywany był na stałym poziomie, czego nie mo na osi gn prawie nigdy przy dotychczas stosowanych reaktorach.

W kolejnym pi tym dniu obni ył si ozon resztkowy ze wzgl du na jako wody, któr oceniono na podstawie wybranych parametrów. Na podstawie przedstawionych wyników bada mo na zaobserwowa , jak obni enie ozonu resztkowego przy stałym dozowaniu ozonu wpływa na tworzenie si bromianów. Okazuje si , e zwi kszone zawarto wszystkich zwi zków łatwo i trudno utleniających ma du y wpływ na rozkład i zu ywanie si ozonu [5], co obserwuje si w zmniejszonej ilo ci ozonu resztkowego po procesach zachodz cych w kolumnach kontaktowych. Ma to tak e du y wpływ na tworzenie bromianów pomimo utrzymywania stałego przepływu wody przez instalacje.

W szóstym dniu wydłu ono czas przetrzymania wody w kolumnach kontaktowych dwukrotnie, przez zmniejszenie przepływu z 1 m<sup>3</sup> do 0,5 m<sup>3</sup> oraz pracy na drugim wyszym stopniu ozonowania. Czas kontaktu wynosił około 50 minut. Zwi kszone tak e ozon resztkowy w wodzie po kolumnie odgazowania, zwi kszej c ilo dozowanego ozonu do wody. Nie badano barwy i manganu z powodu uszkodzenia aparatu. Przy takich nastawach pracy stacji pilotowej warto bromianów przekroczyła norm i wynosiła około 20 µg, co było przekroczeniem normy o 100%. Wpływ na taki wzrost bromianów po procesie ozonowania miała tak e wzgl dnie lepsza jako wody, która zmniejszyła zapotrzebowanie na ozon. Wydłu ony czas kontaktu ozonu w kolumnie kontaktowej przy niewielkim wzro cie dozowanego ozonu jest kolejnym przykładem na to, e jako wody ma ogromny wpływ na tworzenie bromianów w wodzie po procesach ozonowania. Ozon nie rozkłada si szybko na zanieczyszczeniach mimo długiego czasu reakcji[2].

W dniu kolejnym (siódmym), jako wody znowu była lepsza, a ozon resztkowy ustawiono na warto 0,15 mg/dm<sup>3</sup> przy przepływie 1 m<sup>3</sup> na drugim stopniu ozonowania kolumn kontaktowych. Obni ono dawkowanie ozonu do wody.

Na podstawie wyników bada wida , e ilo ozonu resztkowego dla tej matrycy wody (jako ci wody) po procesie ozonowania wynosz ca 0,15 mg/dm<sup>3</sup> jest najodpowiedniejsza ze wzgl du na mał ilo bromianów powstaj cych po procesach



ozonowania. Wartość otrzymano przy stałym przepływie i wynosiła 3,6 µg/dm<sup>3</sup>.

#### 4. Wnioski

W badaniach na instalacji pilotowej stwierdzono, że podstawowymi (krytycznymi) parametrami, które można i należy wykorzystać do sterowania procesów oczyszczania wody, w technologii ozonowania są zawartość ozonu resztkowego w wodzie po kolumnach kontaktowych oraz względnie stały czas kontaktu ozonu z wodą. Stabilność czasu kontaktu jest o tyle istotna, że w tych przypadkach, gdzie instalacje są przewymiarowane, czas kontaktu może wahać się w granicach do 1000% zalecanej wartości, co ma ogromny wpływ na ilość powstających bromianów. Pomiar ozonu resztkowego, a nie ilość dozowanego ozonu do wody jest parametrem umożliwiającym optymalne sterowanie procesem. Zwiększenie przepływu i zmniejszenie jakości wody. Im woda lepszej jakości, tym mniejsze zapotrzebowanie na ozon przy stałym przepływie. I odwrotnie: im woda jest gorszej jakości, tym zwiększa się zapotrzebowanie na ozon przy stałym przepływie, aby utrzymać ozon resztkowy po kolumnach kontaktowych na stałym poziomie. O ile wzrost ozonu resztkowego powoduje niewielki wzrost ilości bromianów, o tyle wydłużenie czasu reakcji ozonu z wodą powoduje ogromny wzrost bromianów w wodzie.

Do właściwej instalacji ozonowania o zmiennych parametrach matrycy wody wystarczy zastosowanie stałego przepływu przez zbiornik kontaktowy i utrzymywanie automatycznie ozonu resztkowego po procesie ozonowania w granicach 0,1 do 0,15 mg/dm<sup>3</sup> O<sub>3</sub> aby ograniczyć powstawanie bromianów i innych związków kancerogennych, szkodliwych dla zdrowia.

#### 5. Literatura

1. Konferencja „Ozon w Polsce”, Krynica 2014, Materiały wewnętrzne firmy WOFIL.
2. Perkowski J., Zarzycki R. (red.) *Wystrawienie i właściwości ozonu*, Polska Akademia Nauk Oddział w Łodzi Komisja Ochrony środowiska, Łódź 2005
3. Muszanski R., *Ogólne zasady projektowania instalacji oczyszczania wody, w których ozon jest zaawansowanym utleniaczem*, Sympozjum Ogólnokrajowe HYDROPREZENTACJE XVIII 2015, Krynica – Zdrój, 16- 18 czerwca 2015 r., 93-107
4. Muszanski R., *OZONOWANIE WODY - Ogólne zasady projektowania instalacji oczyszczania wody i cieków z zastosowaniem ozonu*, Zeszyt Specjalny Izby Gospodarczej „Wodociągi Polskie”, Bydgoszcz 2015
5. Huang WJ., Tsai YY., Chu Ch., *Evaluation of disinfection by-products formation during ozonation of bromide containing groundwater*, Journal of Environmental Science and Health, Part A – Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, Vol. A38, No. 12, 2013, 2919 – 2931.