

Juerg Aepli, Peter Dyer-Smith, Julie Plumridge

## Stosowanie ozonu w praktyce uzdatniania wody w Wielkiej Brytanii

W praktyce wodociągowej ostatnich lat obserwuje się stałą tendencję do całkowitego eliminowania chloru, lub stosowania go tylko w końcowym etapie uzdatniania wód powierzchniowych, przy jednoczesnym szerszym stosowaniu ozonu na różnych etapach uzdatniania wody [1]. Sprzyjają temu nowe rodzaje generatorów ozonu bazujące na czystym tlenie, które umożliwiają bardzo wydajną produkcję ozonu. Doprowadziło to stopniowo do zmniejszenia rozmiarów aparatury, uproszczenia procesu oraz spadku kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Od 1990 roku koszty zużycia energii zmniejszyły się w większości stacji ozonowania wody o około 2/3, z jednoczesnym obniżeniem kosztów inwestycyjnych o połowę [1].

W 1991 roku firma Ozonia Ltd. wprowadziła na rynek nową generację generatorów ozonu, tzw. serię AT (*Advanced Technology*). Najważniejszym osiągnięciem tej serii jest zastosowanie dielektryków z nowego szkło- i termoodpornego nieszkłanego materiału. Zastosowanie tych dielektryków, charakteryzujących się wysoką trwałością (są prawie niezniszczalne), zapewnia wyjątkowo niezawodne działanie instalacji [2]. Rozwój ten doprowadził do bardzo znacznego wzrostu stężeń produkowanego ozonu, przy jednoczesnej obniżce zużycia energii. W urządzeniach tych można uzyskać stężenie ozonu do 17% wagowych, co pozwala na optymalizację zużycia tlenu oraz kosztów inwestycyjnych.

Firma Ozonia Ltd., mająca ponad 30-letnie doświadczenie w dziedzinie wytwarzania i stosowania ozonu, projektuje i produkuje największe na świecie generatory ozonu o wydajności do 150 kgO<sub>3</sub>/h. W Wielkiej Brytanii stacje wodociągowe, wykorzystujące urządzenia firmy Ozonia Ltd., produkują ponad 60% całkowitej ilości ozonu stosowanego do uzdatniania wody.

W niniejszej pracy, na podstawie analizy instalacji firmy Ozonia Ltd. funkcjonujących na wodociągach w Wielkiej Brytanii, omówiono różne możliwości stosowania ozonu w procesie uzdatniania wody.

### Stosowanie ozonu do uzdatniania wody

Ozon w technologii uzdatniania wody może być stosowany na różnych etapach procesu technologicznego, służąc przy tym różnym celom [3].

#### Ozonowanie wstępne

Najczęściej jest to pierwszy etap uzdatniania wody, w którym stosuje się zwykle niskie dawki ozonu, przy krótkim czasie kontaktu (1+2 min), z uwagi na szybkość zachodzących reakcji. W tym układzie ozon resztkowy w wodzie występuje

zazwyczaj w nikłych ilościach lub nie występuje w ogóle. Ozonowanie wstępne ma na celu:

- utlenienie związków żelaza i manganu,
- obniżenie intensywności barwy wody,
- poprawę smaku i zapachu wody,
- ułatwienie mikroflokulacji,
- obniżenie potencjału tworzenia THM-ów,
- zaspokojenie niezwłocznego zapotrzebowania na ozon,
- utlenienie związków nieorganicznych, np. cyjanków, siarczków, azotynów,
- obniżenie liczebności glonów.

#### Ozonowanie końcowe

Najczęściej stosuje się je po procesach koagulacji i filtracji. Ponieważ w tym wypadku szybkości reakcji są niskie, dlatego też wymagany jest czas kontaktu wynoszący 4 min lub dłuższy. Do prawidłowej dezynfekcji wody wymagane jest zapewnienie iloczynu CT=1,6 min·g/m<sup>3</sup>, co pozwala na utrzymanie stężenia ozonu resztkowego w ilości 0,4 gO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>, przy 4-minutowym czasie kontaktu. Ozonowanie końcowe ma na celu:

- dezynfekcję wody,
- utlenienie związków organicznych, np. fenoli, detergentów, pestycydów,
- przemianę zanieczyszczeń do postaci biodegradowalnej,
- obniżenie dawek reagentów wymaganych do ochrony sieci wodociągowych,
- utlenienie związków kompleksowych, np. EDTA (kwas etyleno-diamino-tetraoctowy), NTA (kwas aminotrioctowy),
- obniżenie stężenia rozpuszczonego węgla organicznego, w przypadku połączenia ozonowania z sorpcją na granulowanym węglu aktywnym lub filtracją powolną.

Dodatkowo można zastosować nadtlenek wodoru w celu przyspieszenia usuwania pestycydów lub innych trwałych związków organicznych, a także w niektórych wypadkach celem usunięcia ozonu resztkowego.

#### Utlenianie związków organicznych

Najistotniejsze reakcje ozonu ze związkami organicznymi oparte są na rozbiciu podwójnego wiązania węgla (C=C), które zachowuje się jak nukleofil bądź jako atom z nadmiarem elektronów.

#### Poprawa smaku i zapachu wody

Problemy związane ze smakiem i zapachem mogą pojawiać się w każdej wodzie do picia. Uzdatnianie wody może prowadzić do przekształcenia substancji o słabym zapachu w substancje o bardzo intensywnym zapachu (np. aminy i fenole,

które podczas chlorowania wody przekształcane są w chloraminy i chlorofenole) [3]. Również metabolity organizmów występujących w wodzie mogą być przyczyną powstawania substancji o nieprzyjemnym zapachu. Najważniejszymi źródłami substancji o intensywnym zapachu są bakterie z rodziny *Actinomycetaceae* oraz sinice *Cyanophyceae*. Wśród metabolitów najczęściej pojawiają się związki o ziemisto-spleśniałym zapachu, jak geosmina i 2-metyloizoborneol [1]. Aby otrzymać wodę do picia bez smaku i zapachu, substancje te można eliminować przez:

- utlenianie ozonem lub ozonem w połączeniu z nadtlaniem wodoru; jest to zwykle jedyny efektywny sposób utleniania tych związków [4],

- adsorpcję na pylistym lub granulowanym węglu aktywnym, przy czym to drugie rozwiązanie jest bardziej efektywne, zwłaszcza gdy występuje jako drugi etap filtracji i następuje po procesie ozonowania wody, przedłużając czas ekspozycji filtra węglowego [5].

### Ozonowanie i sorpcja

Efektom stosowania procesu sorpcji na granulowanym węglu aktywnym w uzdatnianiu wody może być przebieg następujących procesów lub ich kombinacji:

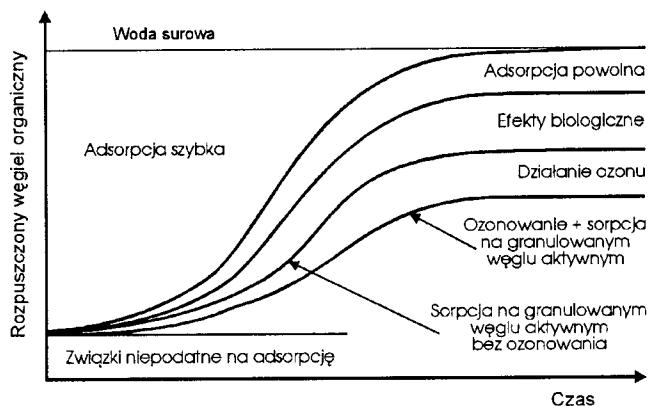
- adsorpcja związków organicznych, substancji powodujących smak i zapach, mikrozanieczyszczeń organicznych (np. pestycydy, chlorowane rozpuszczalniki i detergenty), przy współdziałaniu z poprzedzającym ją etapem ozonowania,

- biokonwersja związków organicznych podatnych na biodegradację oraz azotu amonowego; podczas ozonowania wody następuje wzrost stężeń związków podatnych na adsorpcję i biodegradację, spowodowany częściowym utlenieniem związków organicznych, przy czym biomasa zasiedlająca powierzchnię węgla aktywnego rozkłada związki podatne na biodegradację (większość aldehydów i ketonów),

- redukcja chemiczna; ozon resztkowy obecny w wodzie dopływającej do filtrów węglowych (zwykle  $<0,2 \text{ gO}_3/\text{m}^3$ ) wchodzi bardzo szybko w reakcję z węglem aktywnym, przy czym dodatkowo węgiel aktywny wykazuje zdolność do usuwania bromianów,

- filtracja; usuwanie zawieszin z wody jest również istotne, zwłaszcza w przypadku modernizowanych filtrów pospiesznych.

Podczas filtracji wody przez złożę węglowe przeważa proces szybkiej adsorpcji, podczas której prawie wszystkie związki organiczne mogą zostać zaadsorbowane na powierzchni węgla aktywnego. W zależności od pojemności adsorpcyjnej węgla oraz czasu pracy złoża, następuje spadek szybkiej adsorpcji na korzyść powolnej adsorpcji. W tym samym czasie wzrasta aktywność biologiczna węgla, co powoduje dodatkowe obniżenie stężeń związków organicznych (rys.1). Dalszy wzrost aktywności biologicznej węgla następuje w przypadku, gdy proces ozonowania wstępnego i/lub ozonowania końcowego ma miejsce przed procesem sorpcji. Część ubocznych produktów utleniania ulega adsorpcji na węglu i/lub biodegradacji, co prowadzi do dalszego obniżenia stężenia rozpuszczonego węgla organicznego w wodzie. Takie połączenie ozonowania i sorpcji poprawia jakość wody uzdatnionej oraz przedłuża czas pracy węgla aktywnego. Ryzyko rozwoju bakterii w sieci wodociągowej jest zminimalizowane, co ogranicza dawkę środka dezynfekcyjnego stosowanego w końcowym etapie procesu uzdatniania (np. chlor, dwutlenek chloru lub chloramina). Rozwiązuje to problemy związane z THM-ami oraz substancjami chemicznymi powodującymi zapach wody [3].



Rys. 1. Usuwanie związków organicznych w procesach sorpcji i ozonowania [7]

### Zapobieganie powstawaniu THM-ów

Podczas chlorowania domieszek wody chlor reaguje z grupami funkcyjnymi związków organicznych występujących w wodzie surowej (substancje humusowe, związki będące metabolitami glonów i in.), co prowadzi do powstawania lotnych związków haloorganicznych w wodzie uzdatnionej [8,9], najczęściej trihalometanów o ogólnym wzorze  $\text{CHX}_3$ . Stężenie THM-ów w wodzie uzdatnionej zależy od dawki chloru i osiąga maksimum, gdy jego dawka przekroczy punkt przełamania. Zależy ono również od pH (maksymalne stężenie występuje w środowisku zasadowym), czasu kontaktu (wzrasta stopniowo wraz z czasem kontaktu), temperatury (wzrasta wraz ze wzrostem temperatury) oraz zawartości prekursorów, o których informuje zawartość ogólnego węgla organicznego [1].

Cząsteczki THM-ów, z uwagi na niewielkie rozmiary, są trudne do usunięcia przy zastosowaniu procesów konwencjonalnych. Dlatego też należy raczej zapobiegać ich tworzeniu niż usuwać już powstałe związki. Stosowane są dwa rodzaje środków zapobiegawczych:

- ograniczenie stosowania chloru, co oznacza użycie go jedynie na końcu procesu uzdatniania,

- optymalizacja procesu uzdatniania w celu maksymalnego usunięcia prekursorów THM-ów przed procesem chlorowania.

Ozon może być zastosowany w obu przypadkach. Ozonowanie staje się dominującą techniką wstępnego utleniania i w połączeniu z sorpcją na węglu aktywnym jest najbardziej efektywną metodą pozwalającą na usuwanie rozpuszczonych substancji organicznych z wody.

### Dezynfekcja

Usuwanie organizmów chorobotwórczych oraz pierwotniaków *Giardia lamblia* i *Cryptosporidium parvum* jest jednym z głównych celów uzdatniania wody do picia. W tabeli 1 zestawiono wartości iloczynu CT wymagane w celu inaktywacji 99% najważniejszych organizmów patogennych. Ozon jest najsilniejszym środkiem dezynfekcyjnym oraz jedynym skutecznym czynnikiem zapewniającym inaktywację cyst oraz oocyst pasożytniczych pierwotniaków.

### Usuwanie herbicydów i pestycydów

Większość tych substancji jest skutecznie utleniana podczas pełnego procesu oczyszczania wody zaczynającego się od ozonowania wstępnego, a kończącego się na połączeniu ozonowania z sorpcją na granulowanym węglu aktywnym.

Tabela 1. Wartości iloczynu CT wymagane do inaktywacji 99% (2log) mikroorganizmów w temperaturze 5-25 °C [1]

Mikroorganizm	Ozon pH=6-7	Chlor pH=6-7	Chloroamina pH=8-9	Dwutlenek chloru pH=6-7
<i>Escherichia coli</i>	0,02	0,03+0,05	95+180	0,4+180
Poliowirus 1	0,1+0,2	1,1+2,5	770+3500	0,2+6,7
Rotawirus	0,006+0,06	0,01+0,05	2810+6480	0,2+2,1
<i>Giardia lamblia</i> (cysty)	0,5+1,6	30+150	750+2200	10+36
<i>Cryptosporidium parvum</i> (oocysty)	2,5+18,4	7200	7200 (1log)	78 (1log)

Przykładem substancji występującej często w wodach powierzchniowych, a także podziemnych, jest atrazyna. Mimo iż nie jest ona substancją silnie toksyczną, jej dopuszczalne stężenie, podobnie jak i innych pestycydów, w wodzie do picia nie powinno przekraczać  $0,1 \text{ mg/m}^3$ . Usuwanie atrazyny z wody jest bardzo skomplikowane, na co wskazują następujące wskaźniki:

- 0+15% usuwane jest podczas koagulacji (do 20% jeśli zastosowano wstępne ozonowanie),
- 15+40% usuwane jest w procesie ozonowania, w zależności od zastosowanej dawki ozonu oraz czasu kontaktu,
- 25+45% usuwane jest podczas filtracji powolnej [10],
- 70% usuwane jest podczas koagulacji z użyciem pylistego węgla aktywnego oraz ozonu [11],
- 90+100% usuwane jest podczas sorpcji na granulowanym węglu aktywnym, lecz jedynie przy czasie użytkowania węgla poniżej jednego roku oraz przy stężeniach atrazyny zwykle występujących w wodzie surowej [11].

Połączenie ozonu z nadtlakiem wodoru w ilości około  $0,4 \text{ gH}_2\text{O}_2/\text{gO}_3$  powoduje powstawanie wolnych rodników hydroksylowych, co pozwala na efektywną destrukcję atrazyny, podobnie jak i innych związków organicznych opornych na działanie samego ozonu. Jedynie ta technika pozwala na uzyskanie stopnia usuwania atrazyny od 70 do 85%, przy zastosowaniu sorpcji na granulowanym węglu aktywnym, jako uzupełnienia procesu uzdatniania [1].

### Przykłady stosowania ozonu w praktyce uzdatniania wody w Wielkiej Brytanii

#### Thames Water

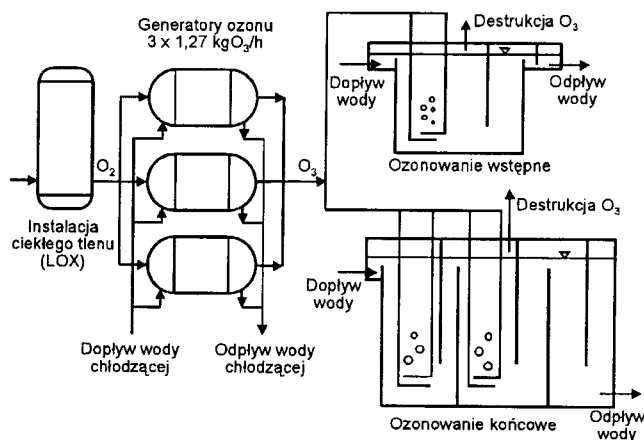
W 1992 roku pomiędzy przedsiębiorstwem wodociągowym Thames Water i firmą Ozonia Ltd. podpisano umowę na produkcję, wyposażenie, montaż i przekazanie do użytku jedenastu stacji uzdatniania wody opartych na procesie ozonowania. Do dziś zrealizowano dziewięć stacji, w których zastosowano ozonatory o wydajności  $584 \text{ kgO}_3/\text{h}$ , pozwalających na uzdatnienie 80% wody produkowanej przez firmę Thames Water.

Podobnie jak inne przedsiębiorstwa wodociągowe, firma Thames Water stwierdziła, że stosowanie konwencjonalnego procesu uzdatniania wody opartego na koagulacji, filtracji pospiesznej oraz filtracji powolnej nie zapewnia spełnienia wymagań norm europejskich (*EC Drinking Water Directive*) dotyczących jakości wody do picia. Dlatego też uznano, że zaawansowane metody uzdatniania, takie jak sorpcja na granulowanym węglu aktywnym oraz ozonowanie, są niezbędne i rozpoczęto badania dotyczące różnych rozwiązań procesu sorpcji oraz wdrożenia technologii łączącej zalety sorpcji na granulowanym węglu aktywnym z filtracją powolną (GAC Sandwich<sup>TM</sup>) [12].

Zastosowanie dwustopniowego procesu uzdatniania wody, obejmującego ozonowanie wstępne poprzedzające filtrację pospieszną oraz ozonowanie końcowe poprzedzające filtrację powolną, okazało się skuteczną metodą usuwania pestycydów, a także ograniczenia tworzenia się THM-ów oraz obniżania zawartości ogólnego węgla organicznego. Technologia ta okazała się również korzystna dla dezynfekcji, poprawy barwy, smaku i zapachu oraz usuwania mętności wody.

Kierując się pomyślnym i skutecznym przebiegiem procesu oraz skutecznością przeprowadzonych badań stwierdzono, iż najlepszą technologią umożliwiającą usunięcie pestycydów oraz związków organicznych jest zastosowanie sorpcji na granulowanym węglu aktywnym lub też połączenie sorpcji z ozonowaniem. Technologia GAC Sandwich<sup>TM</sup> wprowadzono na pełną skalę w Ashford Common, Coppermills, Hampton oraz Kempton. Wszystkie cztery stacje uzdatniania mają już lub zamówiły ozonatory firmy Ozonia Ltd. Technologia GAC Sandwich<sup>TM</sup>, w połączeniu z ozonowaniem, umożliwiła spełnienie norm europejskich dotyczących zawartości pestycydów wcześniej niż planowano, zaopatrując w wodę 6 mln mieszkańców rejonu Londynu [13].

Jedną z pierwszych stacji ozonowania wody, wykonanych przez firmę Ozonia Ltd. dla przedsiębiorstwa wodociągowego Thames Water, zainstalowano na wodociągach w Grimsbury (rys.2). Stacja ta jest wyposażona w trzy generatory ozonu o wydajności  $1,27 \text{ kgO}_3/\text{h}$  każdy (6% wag. ozonu w tlenie), służące do uzdatniania wody w ilości  $21 \text{ tys.m}^3/\text{d}$ . Jest ona całkowicie zautomatyzowana. Stopień ozonowania wstępnego zaprojektowano tak, aby zapewnić usuwanie glonów i polepszyć flokulację, natomiast ozonowanie końcowe wprowadzono w celu niszczenia pestycydów oraz polepszenia smaku i zapachu wody [13].



Rys. 2. Schemat układu ozonowania wody w Grimsbury [13]

Stacja ozonowania wody na wodociągach w Coppermills, stosujących ozon w celu niszczenia pestycydów, została oddana do użytku w październiku 1996 r. Przy wydajności 144 kgO<sub>3</sub>/h i stężeniu ozonu w tlenie wynoszącym 10% wag., umożliwia ona uzdatnianie wody w ilości 738 tys.m<sup>3</sup>/d i tym samym została uznana, wraz ze stacją w Ashford Common (690 tys.m<sup>3</sup>/d), za największą stacją ozonowania wody w Wielkiej Brytanii. Ozon jest tam doprowadzany do dwóch głównych zbiorników kontaktowych ze stacji produkcji ozonu oddalonych o 600 m.

### Anglian Water

Również w 1992 roku podpisano umowę pomiędzy przedsiębiorstwem wodociągowym Anglian Water Services a firmą Ozonia Ltd., obejmującą wykonanie, instalację oraz rozruch jedenastu stacji ozonowania wody.

Stacja ozonowania wody na wodociągach w Grafham obsługuje zarówno ozonowanie wstępne (dawka 1 gO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>) jak i ozonowanie końcowe (dawka 4 gO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>), po którym następuje sorpcja na granulowanym węglu aktywnym (filtr dwuprzepływowy – Degremont Biflux GAC), uzdatniając wodę w ilości 359 tys.m<sup>3</sup>/d. Dodatkowo zastosowano nadtlenuk wodoru w ilości 30+50% dawki ozonu, co sprzyjało tworzeniu się rodników hydroksylowych i poprawiło usuwanie atrazyny. Zastosowanie niższych dawek ozonu obniżyło powstawanie bromianów.

Firma Anglian Water przeprowadziła badania nad wyborem optymalnego miejsca dawkowania nadtlenuku wodoru, w których stwierdzono, że jego stosowanie przed ozonowaniem końcowym daje nieco gorsze rezultaty niż jego dawkowanie podczas ozonowania końcowego. Stwierdzono również, że im później nadtlenuk wodoru jest dodawany do wody tym mniejszy jest stopień usuwania bromianów. Stąd też miejsce dawkowania nadtlenuku wodoru musi być określone w zależności od problemu, jaki ma do rozwiązania dana stacja wodociągowa [15]. Optymalizacja dawki ozonu oraz miejsca stosowania nadtlenuku wodoru na stacji w Grafham umożliwiła utrzymanie ilości bromianów w wodzie na poziomie poniżej 5 mg/m<sup>3</sup>.

Wodociągi w Alton, z uwagi na zbyt wysoką zawartość THM-ów w wodzie uzdatnionej, podjęły badania w celu znalezienia alternatywy dla wstępnego chlorowania. Rezultaty podane w tabeli 2 wskazują, iż najbardziej efektywnym utleniaczem wstępnym, ograniczającym potencjał tworzenia THM-ów, okazał się ozon [16].

Tabela 2. Wpływ utleniaczy na potencjał tworzenia THM-ów [16]

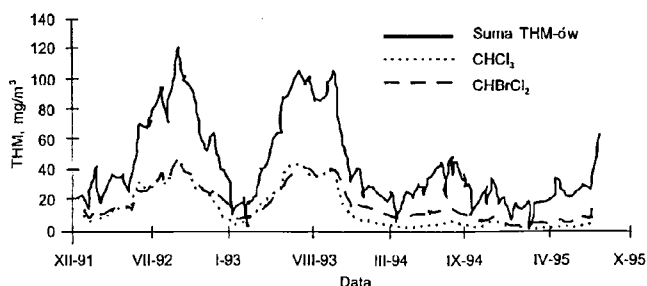
Utleniacz	Potencjał tworzenia THM-ów, mg/m <sup>3</sup>	
	zakres	wartość średnia
Chlor	52+165	101
Chloroamina	52+104	75
Dwutlenek chloru	36+97	55
Ozon	24+75	41

Układ technologiczny wodociągów w Alton, o wydajności 46 tys.m<sup>3</sup>/d, został przystosowany do użycia ozonu jako utleniacza wstępnego, obejmując następujące procesy:

- ozonowanie wstępne,
- koagulacja siarczanem żelaza,
- flotacja,
- filtracja pospieszna,

- ozonowanie końcowe,
- sorpcja na granulowanym węglu aktywnym (czas kontaktu 15 min),
- dezynfekcja chlorem.

Ozon został zastosowany w istniejącym ciągu technologicznym bez dodatkowych zmian. Uzupelnienia dokonano w grudniu 1993 roku, a około 6+9 miesięcy wcześniej zostało zregenerowane złożo węgla aktywnego. Zaobserwowano, że od momentu uruchomienia procesu ozonowania nastąpiło znaczne obniżenie stężenia THM-ów w wodzie wodociągowej (rys.3). Stwierdzono, iż ozon umożliwia obniżenie poziomu THM-ów w wodzie, lecz wymaga częstszej regeneracji złoża węgla aktywnego, niż w przypadku usuwania pestycydów lub substancji wywołujących smak i zapach wody [16].

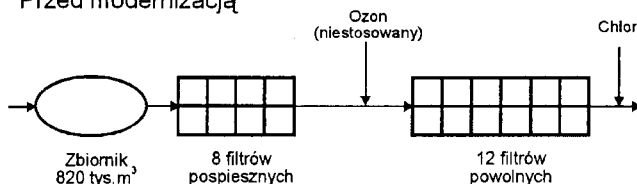


Rys. 3. Występowanie THM-ów w wodzie uzdatnionej w Alton [16]

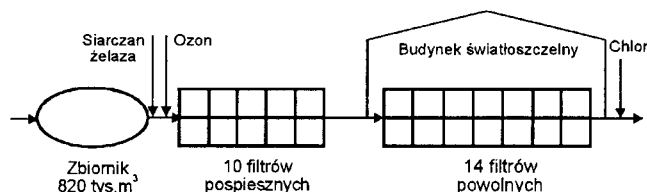
### Yorkshire Water

Na przełomie lat 1993/1994 firma Ozonia Ltd. zaprojektowała i zainstalowała stację ozonowania w Loftsom Bridge (Barmby), zasilaną czystym tlenem. Technologia uzdatniania wody stosowana na wodociągach w Barmby ilustruje skuteczność ozonowania w połączeniu z filtracją powolną. Wcześniej woda surowa była oczyszczana na sitach, a następnie na filtrach pospiesznych i filtrach powolnych, po czym następowała dezynfekcja chlorem [16] (rys.4). Aby rozwiązać problemy związane z kolmatacją filtrów zostały one zmodyfikowane, a do układu technologicznego włączono ozonowanie wstępne [17].

#### Przed modernizacją



#### Po modernizacji



Rys. 4. Schemat procesu uzdatniania wody w Barmby [16,17]

Po zrealizowaniu tych zmian w styczniu 1995 r. średnia wydajność dobową zakładu wzrosła w lecie tego samego roku z 46,5 do 84 tys.m<sup>3</sup>/d. Efektywność uzdatniania wody po modernizacji zakładu była następująca:

– barwa: zastosowanie ozonowania wstępnego dawką  $1,5+2,0 \text{ gO}_3/\text{m}^3$  spowodowało istotne polepszenie barwy wody,

– mętność: zastosowanie ozonowania wstępnego oraz dawkowanie siarczanu żelaza spowodowało bardzo dobre klarowanie wody na filtrach pospiesznych, co z kolei poprawiło skuteczność filtrów powolnych,

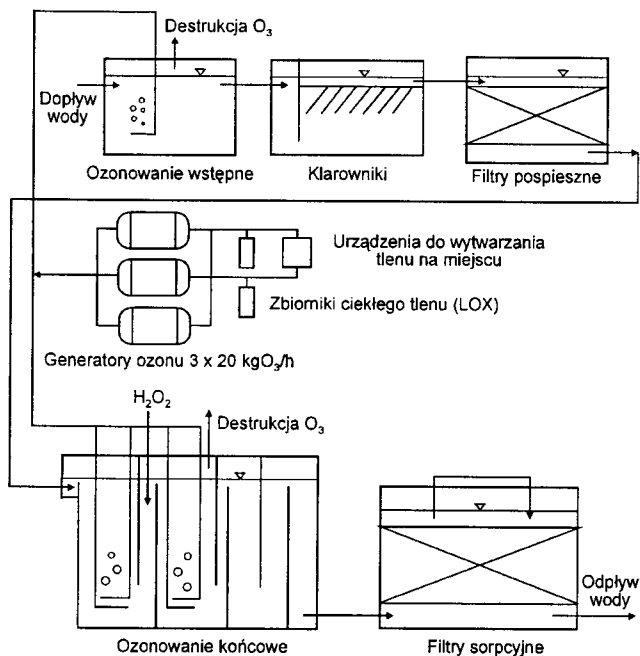
– glony: po zastosowaniu ozonowania wstępnego i dawkowania siarczanu żelaza usuwanie okrzemek *Stephanodiscus spp.* wzrosło z 55 do 95%,

– pestycydy: zastosowanie samego ozonu zmniejszyło zawartość isoproturonu w wodzie poniżej poziomu zalecanego przez normy europejskie (EEC MAC).

### Bristol Water

Woda uzdatniana na wodociągach Littleton i Purton ujmowana jest z kanału Gloucester oraz Sharpness w Purton. Proces ozonowania i sorpcji na granulowanym węglu aktywnym wprowadzono na wodociąg w Littleton w 1989 roku, po stwierdzeniu sporadycznie występującego smaku i zapachu wody.

Pobierając wodę z tego samego źródła, stacja w Littleton ( $68 \text{ tys.m}^3/\text{d}$ ) stała się dużą stacją pilotową dla wodociągu w Purton ( $110 \text{ tys.m}^3/\text{d}$ ), umożliwiając ocenę zmian, jakie należy wprowadzić w warunkach rzeczywistych [17]. Na rysunku 5 przedstawiono główne etapy procesu uzdatniania wody w Purton.



Rys. 5. Schemat procesu uzdatniania wody w Purton [17,18]

Obejmuje on ozonowanie wstępne i końcowe, połączone z dawkowaniem nadtlenku wodoru. Firma Bristol Water przeprowadziła szczegółową analizę różnych alternatywnych urządzeń stacji, analizując 18 różnych wariantów, zanim podjęła konkretną decyzję [18]. Stacja ozonowania na wodociągu w Littleton zasilana jest powietrzem, natomiast w Purton – tlenem, który jest wytwarzany na miejscu za pomocą instalacji PSA, co zapewnia jego następującą jakość:

– wysoki stopień czystości,  
– brak takich zanieczyszczeń, jak pyły, oleje, węglowodory i wodór,

– wysoki stopień osuszenia,  
– niska temperatura,  
– ciśnienie wymagane dla prawidłowego funkcjonowania procesów generacji ozonu i adsorpcji.

### Wnioski

♦ Problemy związane z zapachem wody mogą występować w każdej wodzie surowej, np. w wyniku rozwoju glonów lub obecności zanieczyszczeń przemysłowych, przy czym substancje charakteryzujące się słabym zapachem mogą przekształcić się pod wpływem chloru w substancje o podwyższonej intensywności zapachu.

♦ Ozon jest bardzo skutecznym utleniaczem, umożliwiającym rozwiązanie problemów związanych z zapachem wody. Pozwala on na znaczne obniżenie stężenia prekursorów THM-ów obecnych w wodzie surowej. Obecne lub powstające w wodzie THM-y mogą być częściowo usuwane przez ozonowanie i sorpcję na granulowanym węglu aktywnym, szczególnie w fazie ustabilizowania procesu. Z uwagi na wysoki potencjał utleniający ozonu możliwe jest zmniejszenie czasów kontaktu, z wyjątkiem przypadków, gdy wymagane jest poprawienie skuteczności procesów biologicznych przebiegających na węglu aktywnym.

♦ Połączenie ozonowania z sorpcją na granulowanym węglu aktywnym jest najbardziej efektywnym sposobem pozwalającym na usuwanie substancji organicznych z wody (ok. 30% rozpuszczonego węgla organicznego), co pozwala na poprawę jej właściwości genotoksycznych. Bardzo znaczna część adsorbowanego węgla organicznego zostaje usunięta szczególnie wówczas, gdy filtry sorpcyjne pracują jako aktywne filtry biologiczne.

♦ Połączenie ozonowania z sorpcją na granulowanym węglu aktywnym zmniejsza zapotrzebowanie na inne utleniacze w końcowym etapie uzdatniania wody oraz zwiększa efekt mikroflokulacji, co powoduje polepszenie wydajności węgla aktywnego. W ten sposób można bardzo znacznie wydłużyć cykl pracy filtrów sorpcyjnych, a w niektórych przypadkach regeneracja węgla okazuje się zbędna, co obniża koszty eksploatacyjne.

♦ Ryzyko wtórnego rozwoju bakterii w sieci wodociągowej w przypadku ozonowania wody jest zminimalizowane. Jednocześnie niektóre organizmy, np. *Cryptosporidium parvum*, mogą być niszczone wyłącznie ozonem.

### LITERATURA

1. P. MOUCHET, B. CAPON, A. POISSON: Ozone in the evolution of potable water treatment technology. 1996, pp. 1–18.
2. C. HUBELE, R. KAULBACH: Ozone installations in potable water treatment using high ozone concentrations. In: Proceedings of the First Australasian Conference of the International Ozone Association Down Under '96, [G. Landers & G. Peters, Eds.], IOA Australasian Chapter and Sydney University Chemical Engineering Association, Sydney 1996, 185–199.
3. J. AEPPLI, P. DYER-SMITH: Ozonation and granular activated carbon filtration: The solution to many problems. In: Proceedings of the First Australasian Conference of the International Ozone Association Down Under '96 [G. Landers & G. Peters, Eds.], IOA Australasian Chapter and Sydney University Chemical Engineering Association, Sydney 1996, 145–156.

4. D. J. SMITH, C. R. MOSS: The development of ozone for potable water treatment within the United Kingdom. In: Proceedings of the Eleventh Ozone World Congress, San Francisco 1993, IOA, New York, Vol. 1, S-1-27-45.
5. J. P. DUGUET, A. BRUCHET, J. MALLEVIALLE: New advances in oxidation processes: The use of ozone/hydrogen peroxide combination for micropollutant removal in drinking water. *Water Supply*, 1989, 7(4), pp. 115-124.
6. P. MOUCHET: Recherches bibliographiques sur les gots et les odeurs d'origine biologique dans les eaux potables. Identification des organismes et de leurs métabolites, remdes possibles. *TSM-L'Eau*, 1978, 73(3), pp. 145-153.
7. T. BARKER, P. DYER-SMITH, J. BOERE: Optimising ozone and GAC in potable water treatment. IWSA, Hong Kong 1996
8. Y. RICHARD: Principe d'utilisation de l'ozone en traitement d'eau destinée à la consommation humaine. Degrémont, 1994.
9. T. A. BELLAR, J. J. LICHTENBERG, R. C. KRONER: The occurrence of organohalides in chlorinated drinking water. *Journal AWWA*, 1974, 66(12), pp. 703-706.
10. J. J. ROOK: Formation of haloforms during chlorination of natural waters. *Water Treatment and Examination*, 1974, 23, pp. 234-243.
11. A. MONTIEL et al.: Elimination de l'atrazine: traitements physicochimiques et/ou traitements biologiques. *Wat. Supply*, 1989, 7(4), pp. 213-223.
12. Y. RICHARD, J.-P. DUGUET, C. HUBELE: Pesticides et eau potable. *L'Eau, l'Industrie, les Nuisances*, 1991, 144, pp. 44-46.
13. M. J. BAUER, J. S. COLBOURNE, D. M. FOSTER, N. V. GOODMAN, A. J. RACHWAL: GAC enhanced slow sand filtration (GAC Sandwich<sup>TM</sup>). In: *Advances in Slow Sand and Alternative Biological Filtration* [N. Graham & R. Collins, Eds.], John Wiley & Sons, Chichester 1996, pp. 223-232.
14. Ozonia: Grimsbury AWTW Thames Water Utilities Ozone Plant, Ozonia brochure, 1994.
15. Degrémont: Grafham Water Treatment Works. Degrémont brochure.
16. B. T. CROLL, C. J. FEATHERSTONE, B. J. HOLDER, E. W. J. MURRER: The minimisation of bromate and THM formation potential during water treatment using ozone. In: *Proceedings of the First Australasian Conference of the International Ozone Association Down Under '96* [G. Landers & G. Peters, Eds.]. IOA Australasian Chapter and Sydney University Chemical Engineering Association, Sydney 1996, 185-199.
17. D. WILSON: Uprating Barmby water treatment works. In: *Advances in Slow Sand and Alternative Biological Filtration* [N. Graham & R. Collins, Eds.]. John Wiley & Sons, Chichester 1996, 438-448.
18. R. J. HORN, J. B. STROUGHTON, P. DYER-SMITH, D. R. LEWIS: Criteria for the selection of the feed gas for ozone generation. IWSA, Hong Kong 1996.

### Ozone in Potable Water Treatment in the UK

*The use of ozone in potable water treatment has become increasingly common throughout the UK. This is an advanced treatment option which can be optimised to meet specific requirements. The theory behind the application of ozone and some of the different treatment options available are discussed with reference to case studies where possible. There have been significant recent advances in ozone generation technology including improved economics and higher ozone concentra-*

*tions. These have enabled ozone to become a more viable option for potable water treatment. Today, the major application for ozone within the UK is pesticide removal in order to achieve the standard of 0.1 g/m<sup>3</sup> required by the EC Drinking Water Directive for organic micropollutants. However, more extensive use of ozone has given a broad base of practical information regarding other benefits such as improvement in taste and odour, colour removal, algae control, minimisation of THMs, etc.*