

Małgorzata Schmagier, Krzysztof Łuszczek, Jan Schmagier

Ocena zależności pomiędzy jakością wody surowej i uzdatnionej na przykładzie ZUW "Rudawa"

ZUW "Rudawa" został zaprojektowany w latach 50. do uzdatniania wód nieznacznie zanieczyszczonych, o okresowej wysokiej mętności. Od tego czasu właściwości wody uległy znacznemu pogorszeniu [1]. W analizowanym okresie (1989+1991) Rudawa prowadziła wody wyraźnie zanieczyszczone związkami azotu (azot azotanowy i organiczny), fosforanami, substancjami ekstrahującymi się eterem naftowym oraz o podwyższonej mętności (ok. 30+40 g/m³). Wskaźnikami dyskwalifikującymi rzekę (zanieczyszczenie ponadnormatywne) były właściwości biologiczne – miano *coli* i masowy rozwój glonów (zawartość chlorofilu "a"). Badania przeprowadzone przez IGPiK Oddział w Poznaniu [2] wykazały, że wody Rudawy zawierały prekursor trihalometanów oraz wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne.

Charakterystyka obiektu badań

Schemat technologiczny ZUW "Rudawa" przedstawiono na rysunku 1. Woda z ujęcia typu brzegowego (powyżej jazu w Mydlnikach) dwoma rurociągami wprowadzana jest do osadników wstępnych (piaskowników), a następnie do studni zbiorczej. Poprzez pompownię wodę kieruje się na filtry pospieszne lub do ko-

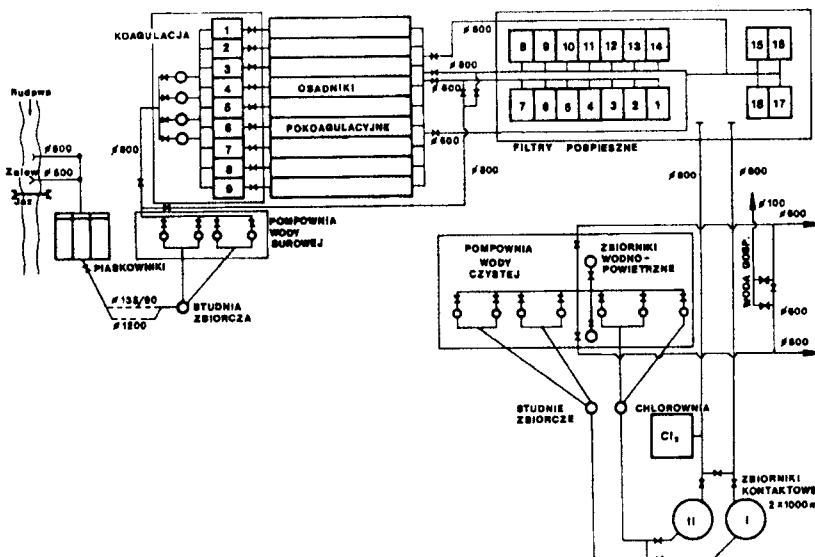
mór koagulacji. Dotychczas stosowana średnia dawka siarczany glinu wynosiła 22,5 g/m³. Wodę o tzw. normalnej mętności pompowano ze studni zbiorczej bezpośrednio na filtry pospieszne otwarte. Z reguły pracowało jednocześnie 14 filtrów piaskowych z prędkością średnią 5+6 m/h, płukanych raz na dobę. Następnie woda jest dezynfekowana chlorem gazowym (średnia dawka 2+3 gCl₂/m³) i poprzez dwa zbiorniki (czas kontaktu wody z chlorem ok. 1 godz.) oraz studnie zbiorcze tłoczona do miejskiej sieci wodociągowej.

Obecnie prowadzone są badania i prace przygotowawcze związane z gruntowną modernizacją zakładu, polegające na usprawnieniu procesu koagulacji oraz zastosowaniu ozonowania i filtrów z węglem aktywnym.

Metodyka opracowania danych analitycznych

Bazę danych stanowiły analizy organoleptyczne, fizyczno-chemiczne i bakteriologiczne wody surowej i uzdatnionej wykonywane w laboratorium ZUW "Rudawa". Utworzono trzy źródłowe zbiory z okresu październik 1989 r. – czerwiec 1991 r., obejmujące:

- analizy pełne wykonywane 3+4 razy w miesiącu (2x 80 analiz),



Rys.1. Schemat technologiczny ZUW "Rudawa"

Dr M.Schmagier: Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej Oddział w Krakowie, pl. Na Stawach 1, 30-107 Kraków

K.Łuszczek: Zakład Uzdatniania Wody "Rudawa" MPWiK, ul. Filtrowa 1, 30-148 Kraków

Dr J.Schmagier: Instytut Zoologii Uniwersytetu Jagiellońskiego, ul. R.Ingardena 6, 30-060 Kraków

– codzienne oznaczenia podstawowych wskaźników jakości wody (2x607 analiz), cegodzinne oznaczenia mętności z 10 wybranych miesięcy (2x5.915 odczytów).

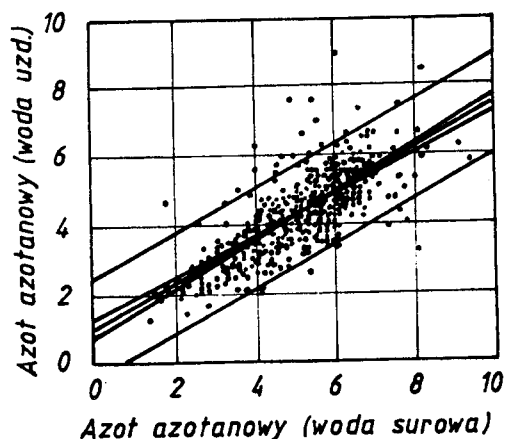
Dla wszystkich badanych codziennie 19 wskaźników jakości wody obliczono następujące podstawowe parametry statystyczne: średnia, mediana, moda, odchylenie standardowe oraz zakres zmienności. Rozkłady testowano metodą graficzną oraz przy pomocy analizy wariancji. Następnie przy pomocy metody "Box and Whiskers" określono wartości skrajne o małym prawdopodobieństwie wystąpienia, odrzucane w dalszej analizie statystycznej. Istotność różnic pomiędzy wielkościami średnimi szacowano testem *t* Studenta. Ostatnim krokiem było obliczenie współczynników korelacji oraz analiza regresji pomiędzy poszczególnymi wskaźnikami jakości wody surowej i ich odpowiednikami w wodzie uzdatnionej. Wykonano również podobne obliczenia dla powiązanych ze sobą zmiennych, np.: mętność wody – dawka koagulantu, stężenia azotu amonowego – azotanowego, dawka chloru – właściwości bakteriologiczne wody, skuteczność dezynfekcji – pH wody.

Wyniki analizy statystycznej

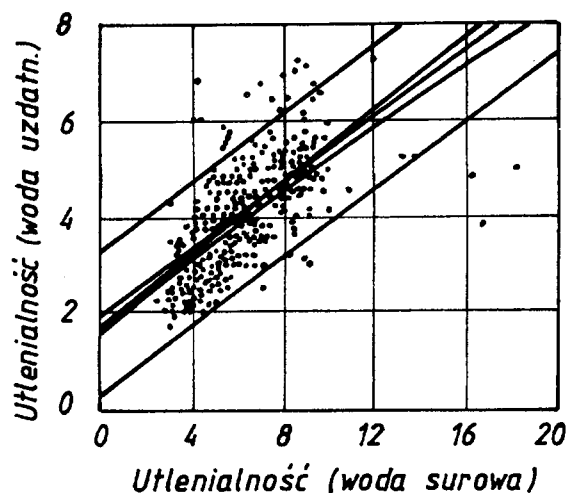
Przeprowadzona analiza statystyczna oraz testy dla wariancji i regresji wykazały, że najlepszym, a także istotnym estymatorem badanych cech był współczynnik korelacji z próby (*r*) obliczony dla par poszczególnych wskaźników jakości w wody ujmowanej (*x*) i uzdatnionej (*y*). W związku z tym dalsze wnioskowanie oparto na wartościach współczynnika korelacji.

Najsilniejszą współzależność ($r > 0,95$) stwierdzono pomiędzy mętnością wody surowej i uzdatnionej obliczoną z codziennych odczytów. W tym przypadku dysponowano bardzo dużym zbiorem danych (2×5.915 wyników), pozwalającym ponadto na przesłedzenie efektów oczyszczenia tej samej wody. Analogiczne obliczenia wykonane dla zbioru podstawowego (1 analiza w ciągu doby) sugerowały, że nie ma zależności pomiędzy mętnością wody ujmowanej i uzdatnionej ($r = 0,15$). Należy zatem brać pod uwagę, że faktyczne współzależności pomiędzy pozostałymi parametrami wód mogą być znacznie wyższe od przedstawionych w dalszej części pracy. Silny związek ($r > 0,70$) pomiędzy jakością wody ujmowanej i uzdatnionej w ZUW "Rudawa" stwierdzono dla następujących wskaźników: chlorki, pH, azot organiczny i azotanowy oraz fosforany. Regresję liniową dla oznaczeń silnie skorelowanych przedstawia przykładowo rysunek 2.

Wyraźną współzależność ($0,5 < r < 0,70$) wykazywały utlenialność (rys.3), fosfor ogólny oraz zasadowość.



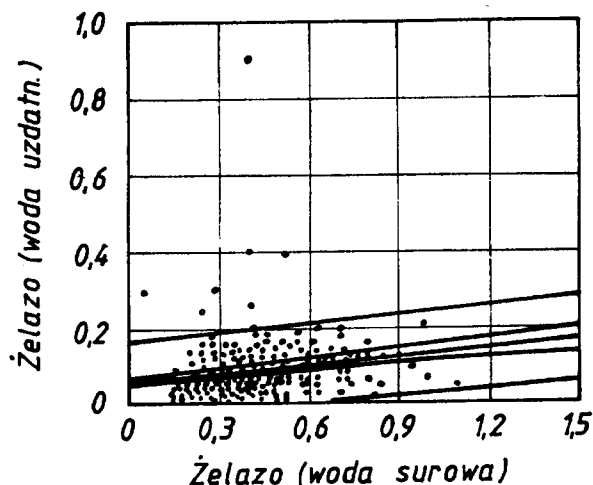
Rys.2. Wykres regresji ($y = 1,0 + 0,65x$; $r = 0,73$) dla azotu azotanowego (gN/m^3)



Rys.3. Wykres regresji ($y = 1,81 + 0,35x$; $r = 0,68$) dla utlenialności

Słaby związek ($0,25 < r < 0,50$) pomiędzy parametrami wody ujmowanej i uzdatnionej obserwowano w przypadku barwy (rys.4) i azotu amonowego.

Nie stwierdzono współzależności ($r < 0,25$) pomiędzy następującymi wskaźnikami wody surowej i uzdatnionej: stężenie żelaza (rys.5), azotu azotanowego, glinu oraz dla wszystkich badanych grup bakterii.



Rys.5. Wykres regresji ($y = 0,06 + 0,08x$; $r = 0,20$) dla żelaza ogólnego (gFe/m^3)

Ocena efektywności uzdatniania wody

Analiza statystyczna tylko w ograniczonym zakresie informuje o rezultatach procesu uzdatniania i dlatego obliczono również średnie stopnie usuwania zanieczyszczeń. Kierując się tym kryterium badane wskaźniki jakości wody podzielono na trzy grupy: 1 – wzrost stężeń zanieczyszczeń pod uzdatnieniu, 2 – niska efektywność usuwania (mniejsza od 50 %), 3 – wysoka efektywność usuwania zanieczyszczeń (większa od 50 %).

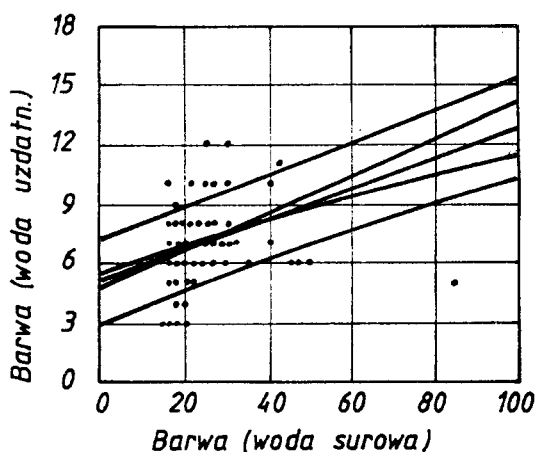
Grupa 1 – w wodzie uzdatnionej nieco większe były stężenia chlorków i glinu. Zwiększenie zawartości chlorków (o ok. $1,1 \text{ gCl}^-/\text{m}^3$) było nieistotne zarówno pod względem statystycznym jak i jakościowym, natomiast zawartość glinu w wodzie pitnej

Tabela 1. Średnie wartości wskaźników jakości wody o niskiej efektywności usuwania (grupa 2)

Wskaźnik	Woda		Stopień usuwania %
	surowa	uzdatniona	
Zasadowość, val/m ³	4,53	4,41	2,6
pH	7,89	7,63	3,3
Azot azotanowy, gN/m ³	5,00	4,25	15,0
Fosfor ogólny, gP/m ³	0,62	0,49	20,6
Azot organiczny, gN/m ³	1,98	1,44	27,3
Fosforany, gPO ₄ /m ³	0,57	0,40	29,8
Utlenialność, gO ₂ /m ³	6,11	3,85	37,0

wzrastała istotnie, szczególnie w okresie prowadzenia stałej koagulacji.

Grupa 2 – należące tutaj wskaźniki jakości wody podano w tabeli 1. W Rudawie obserwowano stały wzrost pH wody, przy czym wartości maksymalne osiągały górny zakres dopuszczalny dla wody pitnej (pH=8,5). Podczas uzdatniania zasadowość i pH ulegały nieznacznemu obniżeniu, a woda pitna posiadała skłonność do wytrącania węglanów. Uznano zatem, że pH wody powinno być korygowane w trakcie procesów uzdatniania.

Rys.4. Wykres regresji ($y=5,13+0,08x$; $r=0,35$) dla barwy wody (gPt/m³)

Z powodu braku konsekwentnej ochrony zlewni Rudawy ujmowana woda zawierała duże ilości związków azotu i fosforu. Pierwiastki te były słabo usuwane podczas procesów uzdatniania. Największe zaniepokojenie budzą stężenia azotu azotanowego, którego zawartość w wodzie pitnej zbliża się do wartości uznawanych za szkodliwe oraz zagrażające życiu niemowląt. Ponadto zasilanie sieci wodociągowej wodą zawierającą znaczne ilości związków biogenych należy uznać za zjawisko niepożądane, gdyż sprzyja tworzeniu obrostów biologicznych oraz pogarsza właściwości organoleptyczne wody w sieci wodociągowej [3]. Około 75 % oznaczeń utlenialności przekraczało wartości zalecane dla wody pitnej, tj. 3 gO₂/m³. Średni stopień usuwania utlenialności wynosił tylko 37 % i w związku z tym rzadko uzyskiwano zadowalającą utlenialność wody pitnej. Przedstawione w tabeli 1 wyniki badań wskazują, że zarówno związki azotu i fosforu jak i utlenialność powinny być efektywniej usuwane podczas procesów uzdatniania.

Grupa 3 – wyraźne usuwanie zanieczyszczeń obserwowano w zakresie wskaźników jakości wody podanych w tabeli 2. Wymienione wskaźniki jakości wody były z reguły zadowalająco eli-

Tabela 2. Średnie wartości wskaźników jakości wody o wysokiej efektywności usuwania (grupa 3)

Wskaźnik	Woda		Stopień usuwania %
	surowa	uzdatniona	
Barwa, gPt/m ³	19,80	6,66	66,4
Żelazo ogólne, gFe/m ³	0,37	0,08	77,3
Azot amonowy, gN/m ³	0,29	0,01	96,6
Azot azotanowy, gN/m ³	0,03	0,00	96,7
Mętność, g/m ³	36,5	2,4	93,4
– bez koagulacji	58,3	1,6	97,3
– z koagulacją			

minowane w trakcie uzdatniania, a przekroczenia norm dopuszczalnych dla wody pitnej stwierdzano sporadycznie.

Po uzdatnieniu i dezynfekcji zanieczyszczonej pod względem bakteriologicznym wody obserwowano bardzo silne obniżenie liczebności wszystkich badanych grup bakterii. Nie stwierdzono korelacji pomiędzy liczbą kolonii bakterii w wodzie ujmowanej i pitnej, ani też związku pomiędzy dawką chloru a efektywnością usuwania bakterii, niezależnie od pH wody. Liczba kolonii bakterii psychrofilnych oraz liczba kolonii bakterii z grupy *coli* rzadko przekraczała wartości dopuszczalne dla wody wodociągowej (tab.3), natomiast liczba kolonii bakterii mezofilnych w wodzie pitnej wskazywała na niezadowalającą ich eliminację. Wartości średnie przekraczały dopuszczalną normę, a maksymalne świadczyły o silnym zanieczyszczeniu wody pitnej (tab.3).

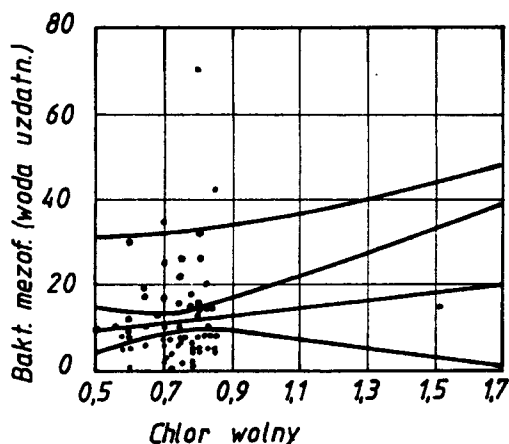
Tabela 3. Właściwości bakteriologiczne wody utlenionej

Liczba kolonii bakterii	Zakres	Moda	Wartość		% przekroczeń
			średnia	dopuszczalna	
Na agarze w 1 cm ³ , 20 °C. 72 h	0 + 152	77	14	50	2,3
Na agarze w 1 cm ³ , 37 °C. 2 4h	0 + 520	8	12	10	35,0
Z grupy <i>coli</i> w 100 cm ³	0 + 3	0	–	0	0,5
Z grupy <i>coli</i> typu kałowego w 100 cm ³	0 + 3	0	–	–	0,5

Obliczenia statystyczne wykazały, że zwiększanie dawek chloru nie ograniczało rozwoju bakterii mezofilnych (rys.6). Uznano zatem, że silne chlorowanie (średnie stężenie 0,8 gCl₂/m³ w wodzie kierowanej do sieci) było nieuzasadnione i szkodliwe, gdyż powodowało wyraźne pogorszenie zapachu i smaku wody pitnej u najbliższych odbiorców.

Koszty uzdatniania wody

W analizie ekonomicznej ZUW "Rudawa" ujęto wyłącznie procesy technologiczne, na których cenę rzutuje jakość ujmowanych wód. Ocenę kosztów uzdatniania oparto na danych z wielolecia (8 lat) przeliczając dawne ceny na obowiązujące w III kwartale 1991 r. Uwzględniono następujące składniki: zużycie reagentów i wody (surowej i uzdatnionej), energię elektryczną, pracochłonność i transport. Obliczono koszty bezpośrednie dla procesów koagulacji, czyszczenia osadników i usuwania osadów oraz dezynfekcji. Zależność pomiędzy kosztami uzdatniania a ja-



Rys.6. Wykres regresji ($y=5,08+8,77x$; $r=0,1$) obrazujący zależność pomiędzy liczbą kolonii bakterii mezofilnych w 1 cm^3 wody a ilością chloru (gCl_2/m^3)

kością ujmowanych wód opracowano na podstawie porównania dwóch wersji:

1. Ujmowanie wody o nieznacznym zanieczyszczeniu – nie wymagające stosowania stałej koagulacji i wysokich dawek chloru:

– koagulacja okresowa (dawka $22,5\text{ g/m}^3$, praca 1.100 h/a)	146.000 tys. zł
– usuwanie osadów (czyszczenie osadników 1 raz w roku)	110.800 tys. zł
– chlorowanie ($1,5\text{ gCl}_2/\text{m}^3$)	111.430 tys. zł
Razem w roku	368.230 tys. zł

Koszt uzdatnienia 1 m^3 wody: około 16 zł.

2. Ujmowanie wód zanieczyszczonych:

– koagulacja stała (dawka 40 g/m^3)	2.000.000 tys. zł
– usuwanie osadów	175.800 tys. zł
– chlorowanie ($2,5\text{ gCl}_2/\text{m}^3$)	185.700 tys. zł
Razem w roku	2.361.500 tys. zł

Koszt uzdatnienia 1 m^3 wody: około 102 zł.

Przedstawione obliczenia wskazują, że wprowadzenie stałej koagulacji, zalecanej dla ZUW "Rudawa" z powodu ujmowania

wód zanieczyszczonych trudno usuwalnymi zawiesinami i bakteriami oraz zawierających duże ilości glonów, zwiększyłoby koszt uzdatniania w skali roku o 12 mld złotych, w zależności od dawki koagulantu. Zastosowanie wyższych stężeń koagulantu, dających gwarancję uzyskania mętności nieprzekraczających 2 g/m^3 , spowodowałoby ponad 6-krotny wzrost kosztów uzdatniania wody.

Podsumowanie

Wyniki wieloetapowej analizy statystycznej wykazały, że pomiędzy większością wskaźników fizyczno-chemicznych wód ujmowanych i ich odpowiednikami w wodach uzdatnionych zachodził istotny związek, a zatem od pobieranego z rzeki "surowca" uzależniona była jakość wody kierowanej do odbiorców. Badania niniejsze dowiodły, że pomimo wzrostu kosztów produkcji wody oraz nie budzącej zastrzeżeń eksploatacji zakładu, najczęściej w Polsce stosowany układ technologiczny (rys.1) nie zapewniał dostatecznego stopnia uzdatnienia zanieczyszczonej wody powierzchniowej. W związku z tym do sieci wodociągowej była kierowana woda o podwyższonym pH (niestabilna), znacznej utlenialności i stężeniach azotu i fosforu, zanieczyszczona bakteriologicznie, zawierająca duże ilości martwych oraz żywych mikroorganizmów, np. glonów, bakterii, grzybów saprofitycznych i mikrofauny [4]. Stosowanie wysokich dawek chloru pogarszało właściwości organoleptyczne wody pitnej i sprzyjało powstawaniu trihalometanów.

Praca została wykonana w ramach Problemu Badawczego PB 6.5. pt. "Nowoczesne techniki jako podstawa racjonalizacji eksploatacji systemów wodociągowych i kanalizacyjnych".

LITERATURA

1. S.A.RYBICKI: Rzeka Rudawa jako źródło wody dla Krakowa. Mat. konf. "Rolnicze zagospodarowanie rzeki Rudawy a jakość jej wód", SITWM, Kraków 1979, ss. 92-101.
2. S.A.RYBICKI: Wodociąg dla Krakowa "Rudawa" - Koncepcja ozonowania i koagulacji. BPBK, Kraków 1990 (praca nie publikowana).
3. M.SCHMAGER, K.MARKIEŁOWSKA: Kompleksowe opracowanie danych literaturowych oraz wyników badań nad wpływem zbiorników sieciowych na jakość wody pitnej. IGPIK, Kraków 1990 (praca nie publikowana).
4. M.SCHMAGER: Metodyka określania skuteczności dezynfekcji oraz dopuszczalnego okresu przetrzymywania wody pitnej w systemach dystrybucji. IGPIK, Kraków 1991 (praca nie publikowana).

WATER QUALITY BEFORE AND AFTER TREATMENT IN THE "RUDAWA" WATER WORK OF CRACOW (INCLUDING COST ANALYSIS)

To assess the relations between corresponding properties of raw and treated water we made use of the results from 607 analyses carried out within an approximately 20-month period. Calculated were the statistical parameters for particular quality indices of the water before and after treatment. The relations of interest were established in terms of ANOVA, regression equations and calculated correlation coefficient values. Analytical-graphical statistical analysis revealed a significant relations-

hip between the organoleptic and chemical properties of raw and treated water. Economic analysis covered total and labour costs concomitant with the intake of polluted water which requires continuous coagulation, high chlorine doses, and removal of sediments. The results of the study have shown that the pollution level in the intake accounts for the noticeably increasing treatment cost and the poor quality of the water supplied to the users.