

# Chemicznofizyczne aspekty procesu dekontaminacji z wykorzystaniem gazowej postaci nadtlenu wodoru

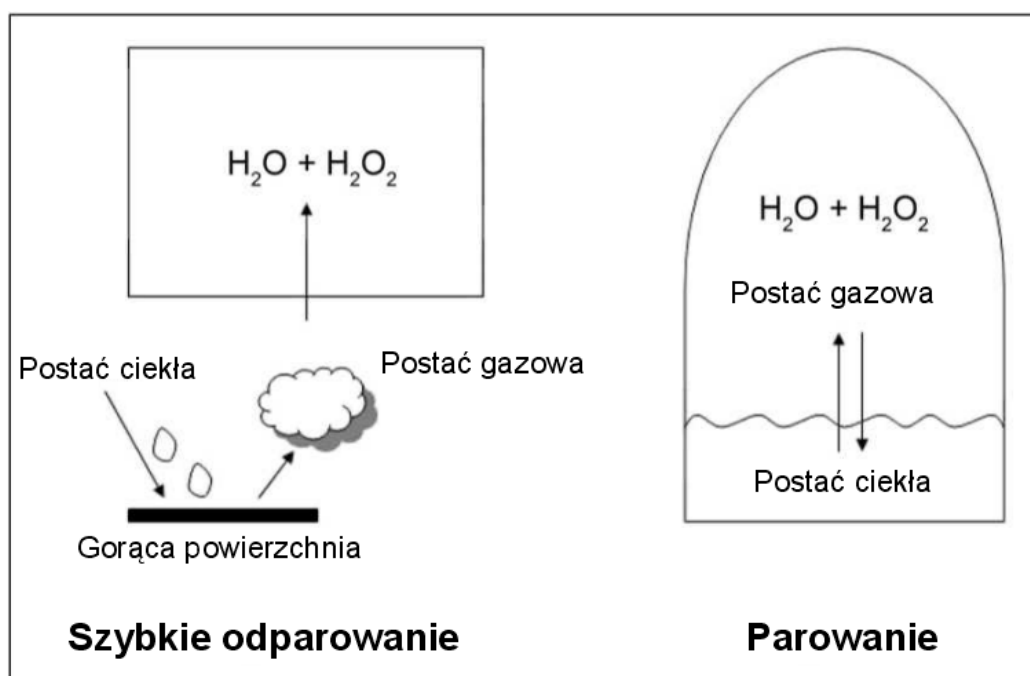
Carl Hultman, Aaron Hill, Gerald McDonnell

**W artykule dokonano opisu chemicznofizycznych aspektów bezpiecznego wytwarzania gazowej postaci nadtlenu wodoru oraz utrzymywania jego stałej koncentracji w przestrzeni zamkniętej. Dokonano również przeglądu obliczeń oraz procedur wykorzystywanych w celu osiągnięcia maksymalnej koncentracji gazowej postaci nadtlenu wodoru bez doprowadzania do kondensacji.**

## Wprowadzenie

Dekontaminacja powierzchni pomieszczeń zamkniętych, skażonych mikroorganizmami stanowi bardzo ważne zagadnienie dotyczące obiektów farmaceutycznych, badawczych i innych. Bezpieczną i wiarygodną metodą dekontaminacji powierzchni twardej (w tym w izolatorach, instalacjach z przepływem laminarnym i w czystych pokojach) jest oddziaływanie na te powierzchnie gazowej postaci nadtlenu wodoru.<sup>1,2,3</sup> Gazowa postać nadtlenu wodoru, o znanych właściwościach szybkiego i szerokiego zakresu antybakteryjnego, może jako element procesu sterowanego, zapewnić powtarzalność procesu dekontaminacji obszarów zamkniętych.

Dodatkowo nadtlenek wodoru w porównaniu z innymi tradycyjnymi metodami fumigacji wykorzystującymi gazową postać formaldehydu, tlenku etylenu lub tlenku propylenu, charakteryzuje się stosunkowo bezpiecznym profilem, zarówno dla użytkownika jak i środowiska. Zapoznanie się z aspektami chemicznofizycznymi procesu dekontaminacji przed rozpoczęciem wykonywania i sterowania procesem dekontaminacji z wykorzystaniem nadtlenu wodoru stanowi ważny element optymalizacji bezpieczeństwa, skuteczności oraz powtarzalności danego procesu dekontaminacyjnego. W niniejszym artykule omówiono chemicznofizyczne aspekty typowego procesu dekontaminacyjnego oraz procedury niezbędne do przeprowadzenia optymalnej dekontaminacji z wykorzystaniem gazowej postaci nadtlenu wodoru.



Rysunek 1. Proces odparowywania nadtlenu wodoru.

## Ciekła i gazowa postać nadtlenu wodoru

Nadtlenek wodoru ( $H_2O_2$ ) znajduje szerokie zastosowanie jako środek antyseptyczny, dezynfekujący oraz sterylizujący.<sup>4</sup> Z uwagi na szeroki zakres aktywności antybakteryjnej, niską toksyczność oraz jego samoistny rozkład w środowisku na wodę oraz tlen, nadtlenek wodoru jest pożądanym biocydem. Na przykład, ciekły nadtlenek wodoru o stężeniu 6% w/v i wyższym stosowany jest bezpośrednio jako środek dezynfekujący naskórka. Czysty nadtlenek wodoru występuje w postaci ciekłej w warunkach temperatury pokojowej ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ ) i normalnego ciśnienia atmosferycznego ( $101,35\text{ kPa}$ ). Większa skuteczność nadtlenu wodoru w zastosowaniach antybakteryjnych obserwowana jest dla jego wyższego stężenia, co jest szczególnie ważne przy osiągnięciu poziomu aktywności przetrwalnikobójczej. Jednakże nadtlenek wodoru przy wyższych stężeniach jest związkiem niestabilnym/reaktywnym i może być przyjąć, w zależności od sposobu jego przemieszczania, właściwości wybuchowe lub samozapłonowe.<sup>5,6</sup> Dlatego też w ciekłych preparatach nadtlenu wodoru stosowane jest niższe stężenie, uzyskiwane poprzez jego rozpuszczenie w wodzie (zasadniczo od 3% do 59% masy) oraz często w preparatach synergicznych z wykorzystaniem innych biocydów (w tym z wykorzystaniem kwasu nadoctowego). Właściwości antybakteryjne nadtlenu wodoru ulegają znacznemu wzrostowi przy oddziaływaniu jego gazowej postaci. Na przykład identyczna skuteczność oddziaływania nadtlenu wodoru na kultury bakterii zachodzi dla stężenia  $1\text{ mg/l}$  dla postaci gazowej oraz  $\sim 400\text{ mg/l}$  dla postaci ciekłej.<sup>5</sup> W celu uzyskania postaci gazowej należy podgrzewać postać ciekłą nadtlenu wodoru, co jest zwykle osiąganego podczas szybkiego odparowania, szczególnie opisanego w dalszej części artykułu. Po uzyskaniu postaci gazowej, nawet dla stosunkowo niskiego stężenia ( $\sim 0,1\text{ mg/l}$ ), właściwości antybakteryjne nadtlenu wodoru ulegają znacznemu wzrostowi i uzyskiwany jest poziom aktywności przetrwalnikobójczej.

Dodatkowo należy brać pod uwagę kompatybilność gazowej oraz ciekłej postaci nadtlenu wodoru. Podczas analizy styczności nadtlenu wodoru z powierzchniami należy brać pod uwagę kompatybilność z materiałami jego gazowej oraz ciekłej postaci, ze szczególnym uwzględnieniem dwóch czynników:

1. Wpływ rodzaju materiału z którego wykonana jest powierzchnia na współczynnik rozkładu nadtlenu wodoru (współczynnik zmniejszenia aktywności nadtlenu wodoru);
2. Oddziaływanie nadtlenu wodoru na materiał, z którego wykonana jest powierzchnia.

Dla nadtlenu wodoru w postaci ciekłej (stężenie masowe około 45% lub większej) istnieje pewne prawdopodobieństwo utworzenia się mieszanin wybuchowych w wyniku reakcji nadtlenu wodoru z substancjami organicznymi. Powszechnie wykorzystywane materiały, na podstawie ich podatności na oddziaływanie ciekłej postaci nadtlenu wodoru o stężeniu masowym co najmniej 90%, zostały podzielone na cztery grupy.<sup>7</sup> Materiały grupy 4: mogą powodować

rozkład nadtlenu wodoru, w szczególności jego stężonej postaci ciekłej, mogą występować uszkodzenia powierzchni materiału oraz tworzyć się mieszaniny wybuchowe. Niektóre z materiałów zaliczonych do grupy 4 zawierają produkty drewniane i polimerowe, takie jak neopren, kauczuk butadienowy, kauczuk silikonowy oraz tygon. Powyższe materiały mogą ulegać degradacji i/lub powodować występowanie spontanicznego samozapłonu. Inne metale grupy 4, w tym miedź, ołów, stopy magnezowe oraz stellite nr 6, działają jako katalizator zwiększający tempo degradacji nadtlenu wodoru oraz mogą przyczyniać się, przy styczności z innymi materiałami, do występowania samozapłonu. Do grupy 4 również są zaliczane środki smarujące takie jak: silikony, parafiny i aroklory. Ciekła postać nadtlenu wodoru o wysokim stężeniu może powodować uszkodzenie niektórych komponentów elektrycznych/elektronicznych lub innych materiałów, czego przykładem jest plastyfikacja przedmiotów wykonanych z PCW, których powierzchnia po długotrwałym oddziaływaniu staje się łamliwa. Dodatkowo, niektóre gatunki stali nierdzewnej, na przykład 304, po poddaniu oddziaływania ciekłej postaci nadtlenu wodoru o stężeniu masowym od 10% do 100% mogą wykazywać nieznaczny korozję lub odbarwienia.

## Parowanie i kondensacja nadtlenu wodoru

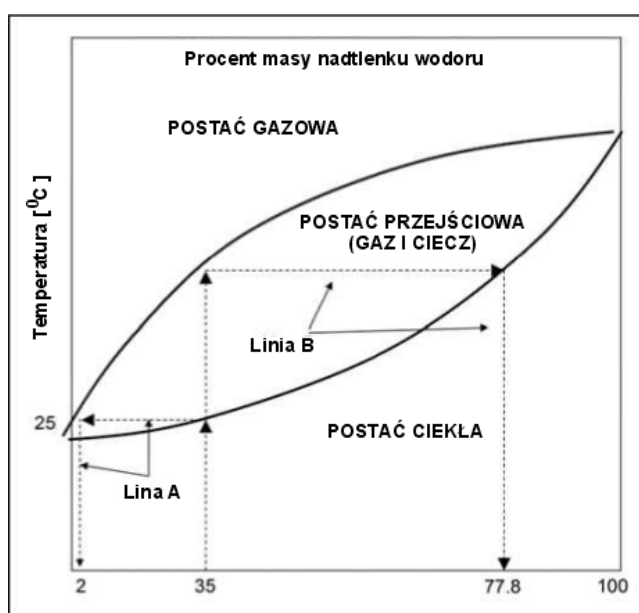
Postać gazowa nadtlenu wodoru może być łatwo uzyskana z jego ciekłej postaci lub z roztworu z wodą w dwóch różnorodnych procesach: parowania i szybkiego odparowania – *Rysunek 1*. Należy zauważyć, iż w każdym z powyższych procesów będą uzyskiwane różne stężenia nadtlenu wodoru w danej objętości ( $w/v$ ). Podczas odparowania ciekłej postaci nadtlenu wodoru do suchego i zamkniętego pomieszczenia stężenie fazy gazowej jest znacznie mniejsze niż stężenie fazy ciekłej – *Rysunek 2*. Powyższe występuje, ponieważ cząsteczki wody ulatniają się z roztworu znacznie szybciej niż cząsteczki nadtlenu wodoru. Na przykład, jeżeli do suchego i zamkniętego pomieszczenia w temperaturze  $25\text{ }^\circ\text{C}$  zostanie odparowanych 35% (stężenie masowe) nadtlenu wodoru i 65% wody w roztworze, to atmosfera pomieszczenia będzie zawierała 2,15% nadtlenu wodoru (stężenie masowe) oraz 97,85% nasyconej pary wodnej. Nasycenie oznacza takie warunki atmosfery w pomieszczeniu, przy zachowaniu których nie jest ona w stanie wchłonąć większych ilości nadtlenu wodoru i wody bez występowania kondensacji. Stan atmosfery, przy którym będzie występować kondensacja (*punkt rosy*) może być wyznaczony na podstawie wielkości stężeń oraz temperatury – *Rysunek 2*. Szczegółowy opis zjawiska został przedstawiony w literaturze.<sup>5</sup>

Szybkość odparowywania może być zwiększona poprzez doprowadzenie energii z zewnątrz – na przykład poprzez doprowadzenie do wrzenia roztworu wody i nadtlenu wodoru. Ponieważ temperatura wrzenia wody jest niższa od temperatury wrzenia nadtlenu wodoru, woda jest odparowywana intensywniej, co spowoduje większe stężenie pary wodnej w fazie gazowej i zapewni zwiększenie stężenia nadtlenu wodoru w fazie ciekłej (roztworze). Zwiększanie stężenia ciekłej postaci nadtlenu wodoru może okazać się nieko-

rzystne dla materiałów pozostających w styczności z postacią ciekłą i może powodować występowanie stanu zagrożenia bezpieczeństwa.

Masa nadtlenu wodoru ( % w/v ) t = 25 °C	
Postać gazowa	Postać ciekła
1,87	32,1
8,0	55,7
24,1	73,9
35,0	77,8
56,4	88,3

Tabela A. Zrównoważone stężenie nadtlenu wodoru w postaci gazowej nad powierzchnią postaci ciekłej (zobacz Rysunek 1, Parowanie).



Rysunek 2. Wykres faz wody i nadtlenu wodoru. Górna krzywa ciąga stanowi granicę fazy gazowej (zwrócić uwagę na wyższą wartość stężenia dla wyższej wartości temperatury). Dolna krzywa ciąga stanowi granicę fazy ciekłej. Krzywa A przedstawia przejście 35% roztworu nadtlenu wodoru w wodzie, przy temperaturze 25 °C, w fazę gazową z 2% stężeniem nadtlenu wodoru. Krzywa B przedstawia przemianę 35% mieszaniny nadtlenu wodoru i wody w 78% kondensat.

Wartość zrównoważonego stężenia nadtlenu wodoru w postaci gazowej, mierzone nad powierzchnią postaci ciekłej jest zawsze mniejsze od stężenia w postaci ciekłej – zobacz Tabela A, zawierająca wartości stężeń nadtlenu wodoru w postaci gazowej dla temperatury 25 °C, wyznaczonych dla różnych stężeń roztworu nadtlenu wodoru. Wartość zrównoważonego stężenia nadtlenu wodoru w postaci gazowej jest zawsze mniejsze, ponieważ szybkość odparowywania cząsteczek wody jest większa od szybkości odparowywania cząsteczek nadtlenu wodoru. Odwrotne założenie jest również prawdziwe podczas kondensacji postaci gazowej nadtlenu wodoru i pary wodnej. Zgodnie z wartościami zawartymi w Tabeli A, zrównoważone stężenie jest osiągnięte dla stężenia wagowego około 35% dla fazy gazowej oraz stężenia około 77,8% dla fazy ciekłej. Powyższe zachodzi, ponieważ nadtlenek wodoru w fazie gazowej ma większą,

w porównaniu z parą wodną, skłonność przejścia w stan fazy ciekłej. Dlatego też szybkość kondensacji nadtlenu wodoru jest większa od szybkości kondensacji pary wodnej, a tym samym następuje wzrost stężenia nadtlenu wodoru w kondensacie.

## Chemiofizyka

Ciśnienie oparów mierzonych nad powierzchnią ciekłego roztworu różnorodnych składników może być obliczone na podstawie układu równań:<sup>5,8,9</sup>

$$P_{p(\text{gas})} = X_{p(\text{liq})} Y_p P_p^0 \quad (1)$$

$$P_{w(\text{gas})} = X_{w(\text{liq})} Y_w P_w^0 \quad (2)$$

$$Y_{w(\text{liquid})} = \frac{\exp\left[\frac{(1 - X_w)^2}{RT}\right] \{B_0 + B_1(1 - 4X_w)\} + B_2(1 - 2X_w)(1 - 6X_w)}{\quad} \quad (3)$$

$$Y_{p(\text{liquid})} = \frac{\exp\left[\frac{X_w^2}{RT}\right] \{B_0 + B_1(3 - 4X_w)\} + B_2(1 - 2X_w)(5 - 6X_w)}{\quad} \quad (4)$$

gdzie:

- $P_{p(\text{gas})}$  wartość ciśnienia fazy gazowej nadtlenu wodoru w atmosferze
- $P_{w(\text{gas})}$  wartość ciśnienia fazy gazowej wody w atmosferze
- $X_p$  oraz  $X_w$  ułamki molowe odpowiednio nadtlenu wodoru oraz wody w roztworze
- $Y_p$  oraz  $Y_w$  wartości współczynników aktywności odpowiednio nadtlenu wodoru oraz wody w roztworze

$P_p^0$  oraz  $P_w^0$  są wartościami ciśnienia równowagi oparów w atmosferze odpowiednio nadtlenu wodoru oraz wody w danej temperaturze. Współczynniki  $B_0$ ,  $B_1$  oraz  $B_2$  są współczynnikami empirycznymi o niżej podanych wartościach:

$$B_0 = -752 + 0,97 * t, \text{ temperatury } [^\circ\text{C}]$$

$$B_1 = 85$$

$$B_2 = 13$$

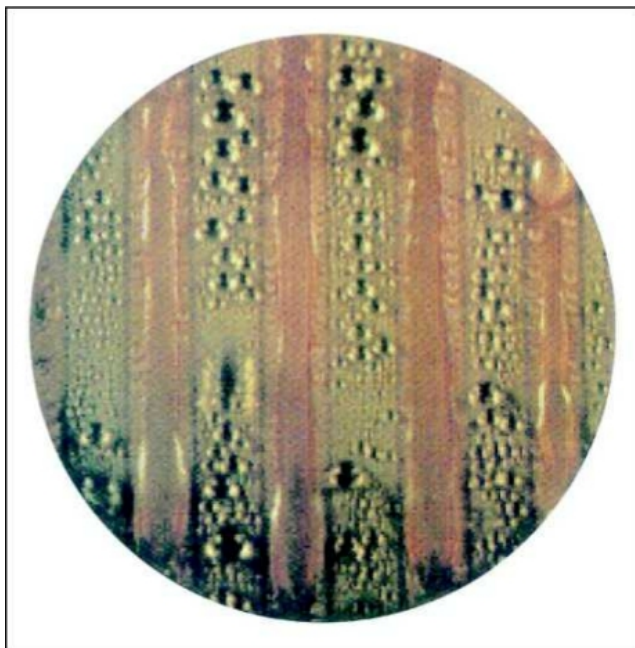
Wartość ciśnienia fazy gazowej może być przeliczona na stężenie [ mg/l ] za pomocą poniższego równania gazu idealnego:

$$[ \text{mg/l} ] = P(\text{Mol Wt}) (1000 \text{ mg/g})/RT \quad (5)$$

Wartość stężenia [ mg / L ] wyliczona na podstawie (5) odpowiada stężeniu dla danej temperatury, podczas której rozpoczyna się zjawisko kondensacji, gdzie  $P$  oznacza wartość ciśnienia atmosferycznego,  $\text{Mol Wt}$  masa molekularna postaci gazowej [ g/mol ],  $T$  temperatura wyrażona w [ °K ].

## Uzyskiwanie optymalnej wartości stężenia nadtlenu wodoru w fazie gazowej

Doprowadzanie gazowej postaci mieszaniny nadtlenu wodoru oraz wody do komory powoduje wzrost ciśnienia oraz stężenia mieszaniny w komorze, które po osiągnięciu wartości maksymalnych dla danej temperatury roboczej końcowo spowodują wystąpienie zjawiska niepożądanego kondensacji. Wartość maksymalnego dopuszczalnego stężenia nadtlenu wodoru, niepowodująca wystąpienia kondensacji może być wyznaczona na podstawie równań od (1) do (2). Jedną z komplikacji powiązanych z kondensacją jest wysokie stężenie nadtlenu wodoru w kondensacie osadzającym się na powierzchniach komory. Dodatkowo kondensat może pokrywać powierzchnie w sposób niejednakowy, co będzie powodowało zróżnicowane warunki dezynfekcji/sterylizacji powierzchni. Zastosowanie gazowej postaci nadtlenu wodoru jest bardziej właściwe, ponieważ:



Rysunek 3. Kropelkowa postać kondensatu na skażonej powierzchni metalowej.

1. Postać gazowa w identyczny sposób styka się ze wszystkimi powierzchniami, co zapewnia identyczne warunki przebiegu procesu dekontaminacji.
2. Postać gazowa w identyczny sposób styka się z powierzchniami o złożonym kształcie, w tym elementami poziomymi i pionowymi, pęknięciami, krzywymi.
3. Postać gazowa może być utrzymywana w komorze w sposób bezpieczny.
4. Postać gazowa może być skutecznie i szybko usunięta z pomieszczenia, co przyczynia się do skrócenia czasu trwania procesu dekontaminacji.

Ponieważ skuteczność antybakteryjna zwiększa się wraz ze wzrostem stężenia nadtlenu wodoru, pożądanym jest utrzymywanie stężenia nadtlenu wodoru na maksymalnie wysokim poziomie, który nie powoduje występowania zjawiska kondensacji. Na podstawie układu równań od (1) do (5), przy znanych niższych wartościach, możliwe jest wyliczenie maksymalnego ciśnienia (i/lub stężenia) nadtlenu wodoru w pomieszczeniu zamkniętym, przy wartości którego zainicjowany zostanie proces kondensacji:

1. Stężenie postaci gazowej, doprowadzanej do pomieszczenia zamkniętego;
2. Ciśnienia w pomieszczeniu zamkniętym;
3. Wilgotność nośnika (wilgotność powietrza, będącego medium transportowym gazowej postaci nadtlenu wodoru do pomieszczenia zamkniętego – *Rysunek 4*) oraz wilgotność wewnątrz pomieszczenia zamkniętego;
4. Temperatura wewnątrz pomieszczenia zamkniętego;<sup>5,8,9</sup>

Układ równań rozwiązywany przez mikroprocesorowy zespół sterowania, wyznacza optymalne warunki przeprowadzenia procesu dekontaminacji dla danej kubatury pomieszczenia zamkniętego.<sup>10</sup> W Tabeli B zawarto przykładowe wartości maksymalnego dopuszczalnego stężenia gazowej postaci nadtlenu wodoru w pomieszczeniu zamkniętym bez występowania zjawiska kondensacji dla różnych wartości temperatury, dla dwóch wartości wilgotności względnej medium transportowego. Wyliczeń dokonano dla 35% stężenia preparatu sterylizacyjnego poddawanego szybkiemu odparowaniu. Należy zauważyć, iż wzrost wilgotności względnej medium transportowego zmniejsza wartość dopuszczalnego maksymalnego stężenia nadtlenu wodoru w pomieszczeniu zamkniętym.

## Dlaczego należy unikać kondensacji

Zgodnie z powyżej przedstawionym opisem, nadtlenu wodoru w postaci ciekłej o wysokim stężeniu (jaki występuje podczas kondensacji) ma właściwości antybakteryjne, jednakże stwarza pewne niedogodności. Pierwszą z nich jest kompatybilność z materiałami. Zgodnie z Rysunkiem 2 oraz Tabelą A, kondensacja gazowej postaci nadtlenu wodoru o 35% stężeniu będzie powodowała występowanie kondensatu o stężeniu 78%, wyższym o zalecanego maksymalnego 45% stężenia, wynikającego z dopuszczalnego oddziaływania na materiały. Stężenie nadtlenu wodoru wyższe od maksymalnego dopuszczalnego stężenia może, tak jak to opisano wcześniej, powodować nie tylko występowanie samozapłonu, ale także przyspieszać rozpad nadtlenu wodoru, powodować uszkodzenie niekompatybilnych materiałów (co w szczególności może dotyczyć powłok lakierniczych oraz komponentów elektrycznych i elektronicznych), a także powodować skrócenie czasu użytkowania materiałów, z których wykonane są elastyczne ściany izolatorów. W przypadku wystąpienia kondensacji w pomieszczeniu zamkniętym należy zapewnić warunki do odparowania kondensatu poprzez wydmuch powietrza z pomieszczenia, podobnie jak

podczas usuwania postaci gazowej nadtlenu wodoru po zakończeniu procesu dekontaminacji. Zbyt wolne odparowanie kondensatu może powodować występowanie stężeń nadtlenu wodoru większych od maksymalnych dopuszczalnych zapewniających bezpieczeństwo oraz utrzymanie właściwości materiałów.

Temperatura [ °C ]	Maksymalne stężenie nadtlenu wodoru bez występowania kondensacji [ mg/l ]	
	wilgotność względna medium transportowego	
	0%	10%
0	0,35	0,28
10	0,77	0,63
20	1,56	1,28
30	3,01	2,50
40	5,49	4,60
50	9,60	8,11
60	16,13	13,68

Tabela B. Wartości maksymalnego stężenia gazowej postaci nadtlenu wodoru bez występowania zjawiska kondensacji, dla różnych wartości temperatur.

Powtarzalność procesu dekontaminacji zostanie omówiona w dalszej części artykułu. Po wystąpieniu kondensacji, w zależności od jej przebiegu, powierzchnie wewnętrzne pomieszczenia zamkniętego będą poddawane dekontaminacji w sposób nierównomierny. Kondensacja może występować w postaci kropelkowej lub warstwowej, co uwarunkowane jest rodzajem powierzchni styczności materiału z nadtlakiem wodoru. Parametrem rozgraniczającym przebieg kondensacji jest wartość napięcia powierzchniowego materiału. Ogólnie kondensacja warstwowa występuje, jeżeli wartość napięcia powierzchniowego materiału jest większa o wartość co najmniej 10 dyn/cm\* od wartości napięcia powierzchniowego kondensatu. Wartość napięcia powierzchniowego wodnego roztworu nadtlenu wodoru zawiera się w przedziale od 73 dyn/cm (czysta woda) do około 80 dyn/cm (czysty nadtlenek wodoru). Wartość napięcia powierzchniowego roztworu nadtlenu wodoru o stężeniu masowym 78% wynosi około 78 dyn/cm, co oznacza iż kondensacja w postaci kropelkowej gazowej postaci nadtlenu wodoru o stężeniu 35% na powierzchni materiału wystąpi dla materiałów o wartości napięcia powierzchniowego mniejszej niż 88 dyn/cm. Należy pamiętać iż 35% stężenie postaci gazowej odpowiada 78% stężeniu postaci ciekłej. Typowa wartość napięcia powierzchniowego polimerów zawiera się w przedziale od 20 dyn/cm do 45 dyn/cm. Dlatego też kondensacja w postaci kropelkowej występuje na większości powierzchni wykonanych z polimerów. Wartość napięcia powierzchniowego metali i szkła jest większa od 200 dyn/cm. Skażenie mikrobiologiczne powierzchni wykonanych z metalu lub szkła może spowodować gwałtowne zmniejszenie wartości

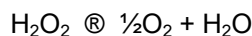
napięcia powierzchniowego, co spowoduje wystąpienie warunków do rozpoczęcia kondensacji w postaci kropelkowej. Na Rysunku 3 przedstawiono skażoną powierzchnię metalową, co zapewniło warunki do wystąpienia kondensacji w postaci kropelkowej, uniemożliwiającej zapewnienie jednorodnej i właściwej ekspozycji powierzchni na oddziaływanie nadtlenu wodoru. Podczas kondensacji w postaci warstwowej mogą wystąpić również warunki uniemożliwiające zapewnienie jednorodnej i właściwej ekspozycji powierzchni, a wynikające z miejscowego ściekania kondensatu, spowodowanego dużym nachyleniem powierzchni.

Dodatkowym utrudnieniem wynikającym z występowania kondensatu jest konieczność zapewnienia dodatkowego czasu, umożliwiającego pełne usunięcie nadtlenu wodoru z pomieszczenia zamkniętego poddawanego procesowi dekontaminacji. Nadtlenek wodoru w postaci gazowej może być usunięty z pomieszczenia zamkniętego w szybki sposób poprzez napełnienie/przedmuchiwanie pomieszczenia gazem obojętnym (np. powietrzem). Dodatkowy czas wymagany do usunięcia ciekłej postaci nadtlenu wodoru wynika z konieczności zapewnienia warunków do pełnego odparowania kondensatu ze wszystkich powierzchni pomieszczenia zamkniętego. Jeżeli materiał ma właściwości przepuszczające wodę i/lub nadtlenek wodoru, to będzie wymagany dodatkowy czas na umożliwienie odparowania kondensatu z powierzchni wykonanych z materiałów stałych. Przykładami takich materiałów są materiały porowate i niektóre z polimerów, posiadające właściwości przepuszczalne ciekłych postaci wody i/lub nadtlenu wodoru.

Dodatkowo należy mieć na uwadze, iż kondensat nadtlenu wodoru o dużym stężeniu może wchodzić w niepożądane, a czasami nawet w gwałtowne reakcje z niektórymi materiałami znajdującymi się w pomieszczeniu poddawanym dekontaminacji. Należy zachować specjalne środki ostrożności podczas postępowania z lokalnymi plamami/jeziorkami kondensatu, które mogą gwałtownie reagować i spowodować wystąpienie poważnych oparzeń chemicznych.

## Rozkład nadtlenu wodoru

Nadtlenek wodoru w postaci gazowej lub roztworu wodnego jest związkiem małostabilnym, w szczególności spontanicznie rozkłada się na tlen i wodę, zgodnie z poniższym zapisem:



Dlatego też, wielkość stężenia nadtlenu wodoru w postaci gazowej znajdującej się w pomieszczeniu zamkniętym powoli zmniejsza się wraz z upływem czasu w stopniu uzależnionym od kubatury pomieszczenia zamkniętego, materiału z którego pomieszczenie zamknięte jest wykonane, przedmiotów/wyrobów znajdujących się w pomieszczeniu itp. Najprostszym sposobem utrzymywania stężenia nadtlenu wodoru na stałym poziomie jest zapewnienie ciągłego dopływu do pomieszczenia zamkniętego powietrza zawierającego gazową postać nadtlenu wodoru, przepływającego przez zespół odparowywania, zgodnie ze schematem przedstawionym na Rysunku 4. Przedstawiony schemat został zaimplementowany w systemach dekontaminacji pomiesz-

\* [przyp. tłum. 1 [dyn/cm] = 1 \* 10<sup>-7</sup> [N/m]

# Metody dekontaminacji

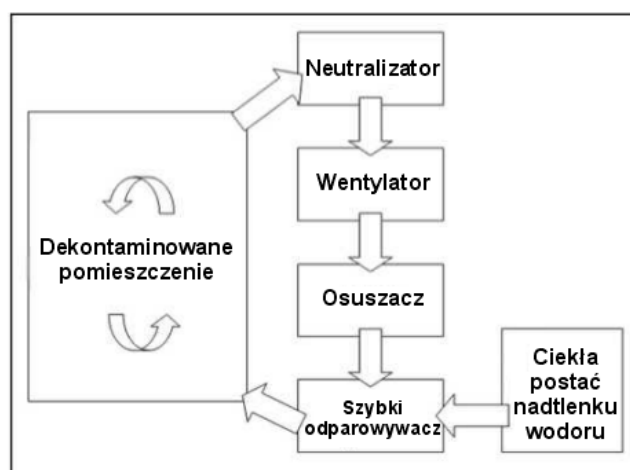
czeń zamkniętych gazową postacią nadtlenu wodoru. Gazowa postać nadtlenu wodoru, wytwarzana w zespole szybkiego odparowania, jest doprowadzana do pomieszczenia zamkniętego, co zapewnia utrzymywanie stałego poziomu stężenia nadtlenu wodoru. Powietrze odprowadzane z pomieszczenia, a zawierające pozostałość nadtlenu wodoru, jest doprowadzane do zespołu neutralizatora, zapewniającego rozkład nadtlenu wodoru na tlen oraz wodę, absorbowaną w zespole osuszacza. Osuszanie strumienia powietrza, będącego nośnikiem gazowej postaci nadtlenu wodoru ma szczególne znaczenie z uwagi na wpływ na wartość warunków umożliwiających wystąpienie zjawiska kondensacji (Tabela B). Przykładowo, dla temperatury 25 °C wzrost wilgotności względnej powietrza wewnątrz pomieszczenia zamkniętego z wartości 0% do wartości 10% spowoduje zmniejszenie maksymalnych dopuszczalnych stężeń gazowej postaci nadtlenu wodoru z 2,184 mg/l do 1,805 mg/l, co oznacza iż do pomieszczenia zamkniętego zostanie doprowadzony nadtlenu wodoru w ilości o 17,4% mniejszej w porównaniu z maksymalną ilością dopuszczalną.

## Pomiar i sterowanie stężeniem gazowej postaci nadtlenu wodoru

Zgodnie z powyższym opisem układ równań od (1) do (5) może być wykorzystany do obliczenia maksymalnego poziomu stężenia nadtlenu wodoru, który może być uzyskany w przestrzeni zamkniętej bez występowania zjawiska kondensacji. Znajomość wartości maksymalnego poziomu stężenia nadtlenu wodoru umożliwia opracowanie cyklu sterylizacji z wykorzystaniem maksymalnego stężenia nadtlenu wodoru bez występowania zjawiska kondensacji. Parametrami cyklu podlegającymi sterowaniu podczas cyklu sterylizacji są: przepływ powietrza (wykorzystywanego jako nośnik gazowej postaci nadtlenu wodoru), ilość ciekłej postaci nadtlenu wodoru doprowadzanej do zespołu odparowywacza, stężenie odparowywanego roztworu oraz temperatura, kubatura oraz wilgotność względna przestrzeni zamkniętej. Wielkość stężeń nadtlenu wodoru oraz wody podczas wykonywania cyklu dekontaminacyjnego może być monitorowana poprzez wykorzystanie spektroskopii w zakresie podczerwieni lub metod elektrochemicznych.<sup>10,11</sup> Pożądanym jest utrzymywanie wartości stężenia nadtlenu wodoru na maksymalnie dopuszczalnym poziomie przy jednoczesnej minimalizacji ryzyka wystąpienia zjawiska kondensacji (praktycznie utrzymywana jest wilgotność o wartości około 90% poziomu nasycenia). Należy zauważyć, iż czujniki pomiarowe zespołu sterowania mogą być wykorzystywane tylko do monitorowania stężenia postaci gazowej, a wystąpienie kondensacji będzie powodowało wystąpienie błędnych odczytów lub też uszkodzenie czujników. Uogólniając: wykorzystanie wyższych wartości stężenia gazowej postaci nadtlenu wodoru zapewnia uzyskanie większych zdolności antybakteryjnych oraz skrócenie czasu trwania cyklu dekontaminacyjnego, jednakże wartość stężenia winna być dobrana tak, by możliwość wystąpienia zjawiska kondensacji został zminimalizowana. Po określeniu parametrów cyklu, właściwych dla danej kubatury i temperatury pomieszczenia zamkniętego nie występuje konieczność monitorowania stężeń

wody i nadtlenu wodoru przy utrzymywaniu stałych wartości przepływu powietrza (medium transportowego gazowej postaci nadtlenu wodoru) oraz ilości preparatu sterylizacyjnego doprowadzanego do zespołu odparowywacza.

Wniosek końcowy: gazowa postać nadtlenu wodoru zapewnia efektywne, sterowalne, szybkie oraz bezpieczne przeprowadzenie dekontaminacji powierzchni wewnątrz pomieszczenia zamkniętego o dowolnie dużej kubaturze. Właściwe sterowanie procesem dekontaminacyjnym ma zasadnicze znaczenie dla zapewnienia optymalnego i bezpiecznego przebiegu procesów dekontaminacyjnych podczas ich walidacji oraz uzyskania powtarzalności podczas ich praktycznych zastosowań.



Rysunek 4. Schemat typowego systemu dekontaminacyjnego wykorzystującego gazową postać nadtlenu wodoru (VHP, Vaporized Hydrogen Peroxide). Postać gazowa nadtlenu wodoru jest wytwarzana poprzez szybkie odparowanie preparatu sterylizacyjnego (wodnego roztworu nadtlenu wodoru), która jest następnie wdmuchiwana do przestrzeni zamkniętej poddawanej dekontaminacji. Stężenie gazowej postaci nadtlenu wodoru jest utrzymywane na stałym poziomie poprzez zapewnienie stałego przepływu powietrza przez zespół neutralizatora.

## Bibliografia

1. Akers, J.E., Agalloco J.P., Kennedy CM., "Experience in the Design and Use of Isolator Systems for Sterility Testing" *PDA J Pharm Sci Technol.*, 1995, 49(3):140-4.
2. KLapes, N.A., and D. Vesley, "Vapor-Phase Hydrogen Peroxide as a Surface Decontaminant and Sterilant," *Appl. Environ. Microbiol.*, 1990, 56: 503-506.
3. Krause, J., G. McDonnell, and H. Riedesel, "Biodecontamination of Animal Rooms and Heat-Sensitive Equipment with Vaporized Hydrogen Peroxide," *Contemp. Topics Lab Anim Sci.*, 2001, 40: 18-21.
4. McDonnell, G., and Russell, A.D., "Antiseptics and Disinfectants: Activity, Action, and Resistance," *Clin. Microbiol. Rev.*, 1999, 12: 147-179.
5. Schumb, W.C., *Hydrogen Peroxide*, monograph series, American Chemical Society, Reinhold Pub. Corp., 1955

6. Block, S.S., 1991. Peroxygen Compounds, p. 167-181. In S.S. Block (ed.). *Disinfection, Sterilization, and Preservation*. 4th ed. Lea and Febiger, Philadelphia, PA.
7. Davis, Jr., N.S. and J. Keefe, Jr., *J. Am. Rocket Society*, p. 63, March-April 1952 Buffalo.
8. Scatchard, G., G. Kavanagh, and L. Ticknor, J., *Am. Chem. Soc*, 74, 3715, 1952.
9. Pitzer, K. and L. Brewer, *Thermodynamics*, McGraw Hill, 1961, Chapter 16 - 20.
10. Day, R. and A. Underwood, *Quantitative Analysis*, McGraw Hill, 1961, chapter 14.
11. Adams, D., G. Brown, C. Fritz, and T. Todd, "Calibration of a Near-Infrared (NIR) H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Vapor Monitor," *Pharmaceutical Engineering*, Vol. 18, No. 4, 1998, p. 66-82.
12. Electrochemical Co., "Engineering Materials for Use with 90% Hydrogen Peroxide," Part 1, 1 December 1950.

## O autorach



**dr. Carl Hultman** uzyskał tytuł magistra chemii na Uniwersytecie Wisconsin oraz stopień doktora nauk chemicznych na Uniwersytecie Stanowym w Pensylwanii. Aktualnie jest profesorem Uniwersytetu Gannon, Erie, Pennsylvania. Dr. Hultman opublikował szereg artykułów oraz uzyskał patent w zakresie chemii powierzchniowej. Prowadzone przez niego prace badawcze dotyczą sublimacji ciał stałych, właściwości elektrochemicznych soli stopionych oraz syntezy nanocząstek tlenków metali. Członek Amerykańskiego Stowarzyszenia Chemików (*American Chemical Society*).  
Dane kontaktowe: telefon: +1-814-825-5144, e-mail: hultman@gannon.edu.

Gannon University, Department of Chemistry,  
University Square, Erie, Pennsylvania 16541, USA.



**Aaron Hill** uzyskał tytuł magistra mechanika na Uniwersytecie Gannon, Erie, Pennsylvania. Aktualnie jest menadżerem ds. inżynierii firmy Steris Corporation w filii w Erie, Pennsylvania. Uzyskał cztery patenty dotyczące sprzętu do odparowywania nadtlenu wodoru. Przez szereg lat pełnił funkcję kierownika projektu nowych systemów dekontaminacyjnych, opartych na technologii gazowej postaci nadtlenu wodoru, wdrażanych w Steris Corporation. Członek Amerykańskiego Stowarzyszenia Inżynierów Mechaników (*American Society of Mechanical Engineers*).  
Dane kontaktowe: telefon: +1-814-870-8109 wew. 8113, e-mail: aaron\_hill@steris.com.

Steris Corporation, 2424 W. 23rd St., Erie,  
Pennsylvania 16506, USA.



**dr. Gerald McDonnell** uzyskał tytuł magistra diagnostyki medycznej na Uniwersytecie w Ulsterze oraz stopień doktora genetyki mikrobiologicznej, Trinity College Dublin. Aktualnie pełni funkcję Naczelnego Dyrektora ds. Technicznych Oddziału Europejskiego firmy Steris Corporation, zlokalizowanego w Basingstoke, UK. Dr. McDonnell opublikował wiele prac dotyczących problematyki dekontaminacji oraz sterylizacji. Prowadzone przez niego prace badawcze dotyczą zapobiegania zakażeniom, mikrobiologii dekontaminacji, nagłych zachorowań oraz uaktywniania i odporności biocydów. Dr. McDonnell jest edytorem Klubu Centralnej Sterylizacji, UK (*Central Sterilisation Club, UK*), członkiem Amerykańskiego Stowarzyszenia Mikrobiologii (*American Society of Microbiology*), Stowarzyszenia Zastosowań Mikrobiologii (*Society for Applied Microbiology*), Rady Doradców ds. Zdrowia (*Council of Healthcare Advisors*), Europejskiego Stowarzyszenia Bezpieczeństwa Biologicznego (*European Biological Safety Association*) oraz Stowarzyszenia Rozwoju Sprzętu Medycznego (*Association for the Advancement of Medical Instrumentation*).

Dane kontaktowe: telefon: +44-1256-866560,  
e-mail: gerry\_mcdonnell@steris.com.

STERIS Limited, STERIS House Jays Close,  
Viables, Basingstoke, Hampshire RG22 4AX, UK

