

## **ZASTOSOWANIE SYSTEMU POMIAROWEGO DITLENKU WĘGLA DO KONTROLI PROCESU OTRZYMYWANIA POWIETRZA ODDECHOWEGO NA TLENOWE WARUNKI HIPERBARYCZNE**

Arkadiusz Woźniak

Katedra Technologii Prac Podwodnych Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni

### **STRESZCZENIE**

Utrzymanie stabilnej zawartości ditlenku węgla w procesie otrzymywania powietrza oddechowego ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa wykonywania prac podwodnych oraz kosztów strat wynikających z niskiej jakości produktu. W artykule podjęto tematykę związaną z implementacją zabezpieczających systemów pomiarowych do kontroli online procesu produkcji powietrza oddechowego. Na podstawie zakwalifikowanego systemu kontroli dokonano oceny zdolności racjonalizowanego procesu, ujawniono jego aktualny stan oraz potencjał poprawy w zakresie eliminacji wad spowodowanych nadmierną zawartością ditlenku węgla. Ze względów procesowych dokonano oceny skuteczności monitoringu procesu online względem dotychczas stosowanej kontroli okresowej próbek za pomocą laboratoryjnych metod analizy instrumentalnej. Analizę przeprowadzono w KTHP AMW<sup>1</sup> dla systemu zasilania sprężonym powietrzem kompleksu DGKN - 120<sup>2</sup>.

**Słowa kluczowe:** zdolność procesu, jakość powietrza oddechowego, nurkowe czynniki oddechowe, systemy pomiarowe, zmienność procesu, eliminacja ditlenku węgla.

---

### ARTICLE INFO

PolHypRes 2020 Vol. 73 Issue 4 pp. 7 – 26

ISSN: 1734-7009 eISSN: 2084-0535

DOI: 10.2478/phr-2020-0020

Strony: 20, rysunki: 15, tabele: 3

page **www of the periodical:** [www.phr.net.pl](http://www.phr.net.pl)

**Publisher**

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

**Typ artykułu: oryginalny**

**Termin nadesłania: 15.02.2020 r.**

**Termin zatwierdzenia do druku: 27.03.2020 r.**



## WSTĘP

Jakość czynnika oddechowego stanowi fundamentalne znaczenie dla utrzymania bezpieczeństwa wykonywania prac podwodnych i eksploatacji techniki nurkowej. W sposób znaczący oddziałuje również na rozwój technologii dystrybucji, produkcji i kontroli jakości powietrza oddechowego w procesach zasilania obiektów hiperbarycznych. Potrzeba utrzymania wysokiej jakości powietrza oddechowego w SZ RP wynika z postanowień obowiązujących krajowych wymagań normatywnych: NO-07-A005:2020 [1], NO-52-A201:2012 [2] przepisów bezpieczeństwa obowiązujących w SZ RP [3] oraz dokumentów standaryzacyjnych NATO<sup>3</sup>, AdivP-04 [4,5]. Zgodnie z zaleceniami w SZ RP użytkownicy powinni wykonywać badania potwierdzające jakość czynnika oddechowego co 3 miesiące lub 50 godzin pracy systemu sprężania i filtracji.

Analogicznie w środowisku komercyjnych nurków cywilnych wymagania te są regulowane przez przepisy Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 19 maja 2004 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy wykonywaniu prac podwodnych Dz. U 2004.116.1210<sup>4</sup> [6]. W odróżnieniu od przepisów SZ RP przewidują one konieczność wykonywania badań składu fizykochemicznego w celu potwierdzenia ich dalszej przydatności w okresach co 6 miesięcy. Aspekt ten regulują również wymagania PN-W-88503:1998/Az1:2000 [7] oraz PN-EN 12021:2014-08 [8].

Wykazano, że implementacja nawet nowoczesnych redundantnych rozwiązań systemów sprężania i filtracji, nie zapewnia odpowiedniej zdolności procesów produkcyjnych. Stwierdzono, że nawet najnowocześniejsze systemy filtracji nie są odporne na wpływy związane z nieprzestrzeganiem SOP<sup>5</sup> przez operatora, zassanie trudno usuwalnych zanieczyszczeń, utratę właściwości złoża filtracyjnego, itp. [9]. Obecny stan techniki w warunkach eksploatacyjnych bez zastosowania właściwych systemów kontroli nie pozwala na osiągnięcie wyższej niż 3 $\sigma$  zdolności procesu otrzymywania, utrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego przeznaczonego na warunki hiperbaryczne [10].

Konieczność zapewnienia właściwej jakości powietrza dla potrzeb ekspozycji hiperbarycznych, wymaga właściwej kwalifikacji i nadzoru metrologicznego użytkowanych systemów pomiarowych. Z punktu widzenia zagrożenia toksykologicznego i technicznego [11] bezpieczną i efektywną realizację ekspozycji hiperbarycznych determinuje kontrola licznych, dynamicznie zmieniających się parametrów składu atmosfery, w tym udziału zanieczyszczeń szkodliwych. Analiza procesu [9] w ramach której przeprowadzono ocenę ryzyka, pokazała, że dla obecnie stosowanej najlepszej dostępnej technologii otrzymywania, utrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego przeznaczonego na tlenowe warunki hiperbaryczne największy potencjał stanowią systemy zabezpieczające, zarówno w formie prostej<sup>6</sup>, jak i w postaci systemów<sup>7</sup> wyposażonych w wielowymiarowe systemy sensoryczne<sup>8</sup>, ekspertowe i aktuatory<sup>9</sup>. Należy sądzić, że implementacja systemów kontroli *online* pozwoli na ograniczenie ryzyka materializacji wad procesu. Prowadzenie prawidłowego wnioszkowania, kontroli i sterowania procesem produkcji<sup>10</sup> wymaga zastosowania wiarygodnego i użytecznego narzędzia nadzoru o potwierdzonych własnościach metrologicznych, bez których ustanowienie wysokiej zdolności procesów produkcyjnych czynników oddechowych nie jest możliwe. Zastosowanie adekwatnych urządzeń pomiarowych stanowi istotny element wpływający na bezpieczeństwo wykonywania prac podwodnych, minimalizując potencjalne oddziaływanie toksykologiczne występujących zanieczyszczeń na organizm nurka.

Doraźne<sup>11</sup> stosowanie systemów rurek wskaźnikowych lub innych analizatorów przenośnych jest niewystarczające. Ich użycie często prowadzi do błędnego wnioszkowania i niewłaściwej interpretacji uzyskanych wyników pomiarów, a w konsekwencji stanu nadzorowanego procesu. Stosowane przenośne analizatory gazów i automatyczne systemy ostrzegania implementowane w systemach filtracji pozwalają na wykonywanie jedynie niepełnej kontroli. Zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 10012 [12], skuteczny system zarządzania pomiarami powinien zapewnić ich przystosowanie do zamierzonego użycia oraz posiadać istotny wpływ na osiągnięcie celów dotyczących jakości produktu i procesu, a zatem powinien spełnić krytyczne wymagania jakościowe CTQ<sup>12</sup>.

W niniejszym artykule przedstawiono ocenę zdolności racjonalizowanego procesu produkcji powietrza oddechowego za pomocą opracowanego systemu pomiarowego przystosowanego do kontroli procesu w trybie *online*. Wyniki implementacji systemu kontroli zestawiono z rezultatami obowiązującego podejścia wynikającego z prowadzenia obowiązkowej laboratoryjnej kontroli<sup>13</sup>.

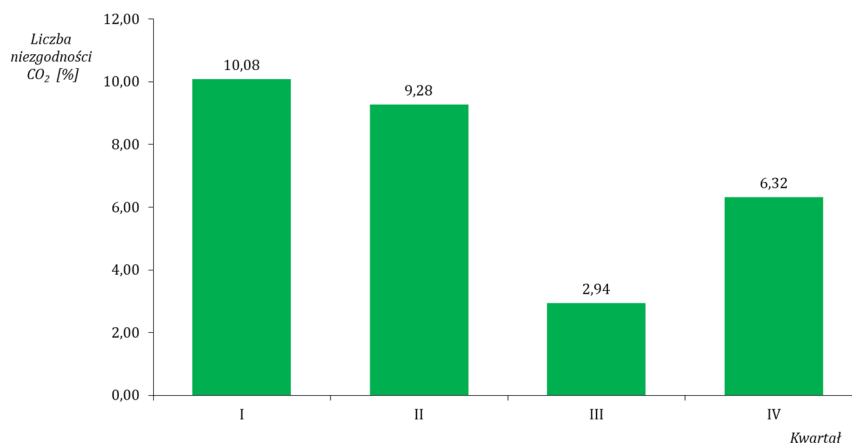
Badania wykonano w Katedrze Technologii Prac Podwodnych (KTPP AMW) dla systemu sprężania i filtracji stosowanego do zasilania Doświadczalnego Głębokowodnego Kompleksu Nurkowego (DGKN – 120)<sup>14</sup>.

## SYTUACJA PROBLEMOWA

Dotychczas wykonywane pomiary kontrolne próbek powietrza oddechowego w procesie produkcyjnym wykonywano *post factum*. Laboratoryjne systemy analityczne zorientowano na pomiar istotnych wyjściowych wartości krytycznych parametrów procesowych za systemem filtracji powietrza oddechowego. Badania wykonywano okresowo zgodnie z wymaganiami GLP<sup>15</sup> w laboratorium fizykochemicznym gazów oddechowych z częstotliwością od trzech do sześciu miesięcy<sup>16</sup>. Badania laboratoryjne umożliwiały okresową identyfikację występowania przekroczeń ustalonych wymagań CTQ. Ujawnienie ewentualnych wad pozwalało zleceniodawcy podjąć działania zmierzające do ustalenia przyczyny i podjęcia właściwej reakcji prowadzącej do korekcji nadzorowanego systemu.

Dotychczasowe wyniki badań [13] wskazują, że w odpowiedzialnych i intensywnie eksploatowanych systemach taki sposób nadzoru, ze względu na obserwowaną zmienność procesu, nie pozwala na pełną detekcję wad. Pomimo tego, że ustanowiony przez użytkownika system nadzoru jest zgodny z wymaganiami to nie pozwala on na wiarygodną ocenę jakościową produktu i odpowiednie zarządzanie ryzykiem. Taki system kontroli zapewnia niepełną detekcję wad procesu. Niewłaściwy system zarządzania pomiarami może doprowadzić do materializacji zagrożeń wynikających z doboru nieadekwatnego wyposażenia i wadliwych procesów pomiarowych.

W tym przypadku ich wadliwość należy rozumieć jako zastosowanie odpowiednich, walidowanych systemów pomiarowych w niewłaściwym systemie nadzoru i kontroli<sup>17</sup>.



Rys. 1 Występowanie w 2018÷2019 roku  $C_{CO_2} \geq 500ppm \approx 10,08\%(2,78\sigma) > USL$  wad procesu produkcyjnego dla powietrza oddechowego kl.II wg. NO-07-A005:2010 ujawniona w okresowej analizie laboratoryjnej. Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z Laboratorium Fizyko-Chemicznego WTM Gdynia 1 RBlog.

Ujawnienie w trakcie badań laboratoryjnych około 10%<sup>18</sup> (2,78 $\sigma$ ) wad procesu, ze względu na przekroczenie zawartości CO<sub>2</sub> w próbce kontrolnej, generowało nadmierne straty finansowe<sup>19</sup> oraz cykliczne okresowe wyłączenia systemów sprężania z eksploatacji rys. 1. W związku z powyższym poddano pod rozwagę uzupełnienie 3 miesięcznego laboratoryjnego nadzoru okresowego o wykonywanie badań eksploatacyjnych za pomocą zautomatyzowanych systemów kontroli *online*.

W odróżnieniu od dotychczas wykonywanych pomiarów eksploatacyjnych, z użyciem analizatorów przenośnych lub innych prostych urządzeń wskaźnikowych, mogą one stanowić miarodajną podstawę oceny jakości procesu. Pomiary te, choć nie tak dokładne jak badania laboratoryjne, są wystarczające do prowadzenia wnioskowania na etapie wytwarzania czynnika oddechowego. Ograniczony dostęp do właściwych narzędzi diagnostycznych prowadził w wielu przypadkach do podejmowania błędnych decyzji co do stanu nadzorowanego procesu. Dotychczasowa implementacja prostych<sup>20</sup>, lecz stosunkowo kosztownych wskaźników poziomu zużycia wkładu filtracyjnego nie zapewniała wymaganej precyzji.

Do niedawna ze względu na brak adekwatnych systemów pomiarowych i zabezpieczających sytuacja ta promowała nieświadomą<sup>21</sup> eksploatację niesprawnego systemu produkcyjnego. Wykrycie wadliwego procesu nie było możliwe do czasu wykonania badań okresowych<sup>22</sup> lub fakultatywnego<sup>23</sup> sprawdzenia jakości czynnika oddechowego przez operatora. Zaproponowany sposób wykonywania pomiaru eksploatacyjnego *online* umożliwia poznanie realnej zdolności procesów otrzymywania, utrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego. Podstawową cechą wyróżniającą taki typ monitoringu, jest wiarygodna i użyteczna zdolność do detekcji normowanych zanieczyszczeń gazów oddechowych w połączeniu z implementacją odpowiednich systemów ostrzegania. Zorientowanie pomiaru na ocenę kluczowych parametrów wejściowych i procesowych, umożliwia już na etapie produkcji zapobieganie powstawaniu potencjalnych zagrożeń technicznych i/lub fizjologicznych dla systemów hiperbarycznych i nurków.

## CEL PRACY

Celem pracy jest ocena skuteczności wykonywania kontroli *online* i *offline* wybranych parametrów krytycznych CTQ procesu filtracji powietrza oddechowego. Ocena wymienionych metod kontroli powinna pozwolić na weryfikację potencjału ich wykorzystania do oceny aktualnego stanu zdolności racjonalizowanego procesu. Jako jego racjonalizację należy rozumieć redukcję liczby defektów<sup>23</sup> CO<sub>2</sub> w procesie otrzymywania powietrza oddechowego na hiperbaryczne warunki tlenowe z poziomu 10%(2,78 $\sigma$ ) do < 5%(3,14 $\sigma$ ).

## BADANIA, MATERIAŁ I METODY

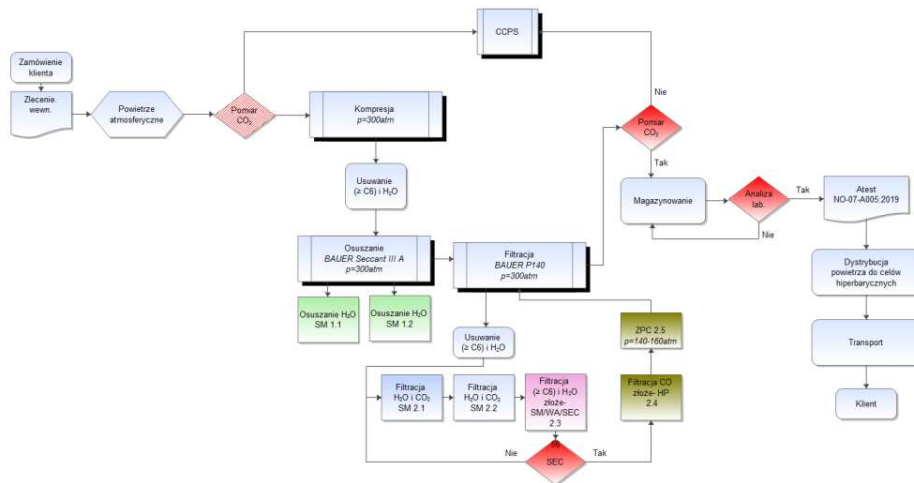
Ocenę zdolności procesu w zakresie kontroli zawartości ditlenku węgla wykonano dla systemu zasilania sprężonym powietrzem kompleksu DGKN – 120 w KTPP AMW rys.1 i 2. Przegląd danych i analiza zmienności procesu w czasie prowadzona była przy wykorzystaniu opartego na uznanych metodach naukowych podejścia *SixSigma*, które jest jednym z wielu systemów projakościowych. Metodę tę wykorzystano do poszukiwania deterministycznych zakłóceń procesu, pozwalających na zdiagnozowanie jak daleko odbiega on od jego naturalnej zmienności.

Zgodnie z DMAIC<sup>25,26</sup> po zdefiniowaniu<sup>27</sup> procesu należy ustalić jego aktualny stan. Po analizie *benchmarkingowej* dostępnych<sup>28</sup> systemów pomiarowych, ze względów ekonomicznych oraz uwarunkowań produkcyjnych<sup>29</sup>, zdecydowano się na opracowanie własnego, wielowymiarowego systemu pomiarowego do kontroli *online* procesu CCS<sup>30</sup>. Walidację systemu, z uwzględnieniem obowiązujących uwarunkowań prawnych i normatywnych, prowadzono w oparciu o badania metrologiczne cech jakościowych oraz ewaluację możliwości wykonywania pomiarów w środowisku hiperbarycznym<sup>31</sup>. Kwalifikacja i analiza systemu pomiarowego do nadzorowania procesu została już opisana [14] i nie będzie tutaj przytaczana. Ocenę systemu prowadzono z wykorzystaniem procedur MSA<sup>32</sup> oraz metod statystycznego sterowania procesem SPC<sup>33</sup>.



Rys.1-2 Konfiguracja zestawu zasilania i uzdatniania powietrza oddechowego DGKN – 120. Źródło: opracowanie własne.

W fazie definiowania opracowano szczegółową mapę procesu rys. 3. Powietrze oddechowe po kompresji poddano wielostopniowemu oczyszczaniu w osuszaczu i zestawie filtracyjnym. Monitoring zawartości CO<sub>2</sub> prowadzono na wejściu i wyjściu procesu. Opracowany system pomiarowy wyposażono we wskaźnikową sygnalizację alarmową<sup>34</sup> przekroczenia ustanowionych granic specyfikacji procesu (*USL*; *LSL*)<sup>35</sup>.



Rys. 3 Mapa procesu. Źródło: opracowanie własne.

Uwzględniając przyjęte założenie redukcji udziału wad, przekładając zdefiniowane wymagania klienta VOC<sup>36</sup>, zidentyfikowano, zdefiniowano i poddano hierarchizacji krytyczne wymagania jakościowe CTQ rozumiane m.in. jako zawartość CO<sub>2</sub> na wyjściu systemu sprężania i filtracji oraz czas przebiccia złoża filtracyjnego<sup>37</sup>. Określono jednoznacznie, co jest defektem procesu, ustalono mierniki  $Y_{1-2}$ <sup>38</sup> oraz zgodnie z zasadami<sup>39</sup> ustalono cele procesu i limity specyfikacji dla poszczególnych zdefiniowanych CTQ tab. 1. Następnie dla wybranych CTQ opracowano plan zbierania danych, ustanowiono definicje operacyjne i określono wstępne parametry procesu od  $x_1 - x_7$ , wytypowano system pomiarowy, oszacowano wielkość próby, sposób i częstotliwość próbkowania tab. 2.

Definicje operacyjne CTQ dla procesu otrzymywania powietrza oddechowego. Źródło: opracowanie własne.

Definiowanie i ranking CTQ					Wersja.2.1
CTQ	Miara Y	Co jest defektem	Cel	Limit specyfikacji	Dopuszczalny poziom defektów
				[LSL – USL]	Udział
Y <sub>1</sub>	Dopasowanie w 100% C <sub>CO<sub>2</sub></sub> w próbie kontrolnej do wymagań NO – 07 – A005:2010, STANAG 1458 w czasie pracy systemu sprężania i filtracji. Wskaźniki C <sub>p</sub> , C <sub>pk</sub> ≥ 1	C <sub>CO<sub>2</sub></sub> ≥ 500[ppm] w czasie pracy systemu sprężania i filtracji. Wskaźniki C <sub>p</sub> , C <sub>pk</sub> < 1	C <sub>CO<sub>2</sub></sub> ≤ 500[ppm]	C <sub>CO<sub>2</sub></sub> ≤ 500[ppm]	5%
Y <sub>2</sub>	Czas bezawaryjnej pracy systemu sprężania i filtracji rozumiany jako - czas przebiecia złoża filtracyjnego	t <sub>p</sub> ≤ 50godz. t <sub>p</sub> ≤ 3msc.	t <sub>p</sub> ≥ 3msc. t <sub>p</sub> ≥ 50 godz.	t <sub>p</sub> ≥ 3msc. t <sub>p</sub> ∈ 50 ÷ 100 godz.	10%
Y <sub>3</sub>	Liczba defektów systemu pomiarowego/zapewniona poprawność i precyzja	Zmienność systemu pomiarowego GRR ≥ 30 ≤ 2,8σ w czasie t < 5 msc.	[≥ 4σ] Y <sub>FT</sub> = 99,4%	[≥ 3σ] Y <sub>FT</sub> = 93,3%	[≥ 2,8σ] Y <sub>FT</sub> = 90,3%

Tab. 2

Plan zbierania danych dla procesu otrzymywania powietrza oddechowego. Źródło: opracowanie własne.

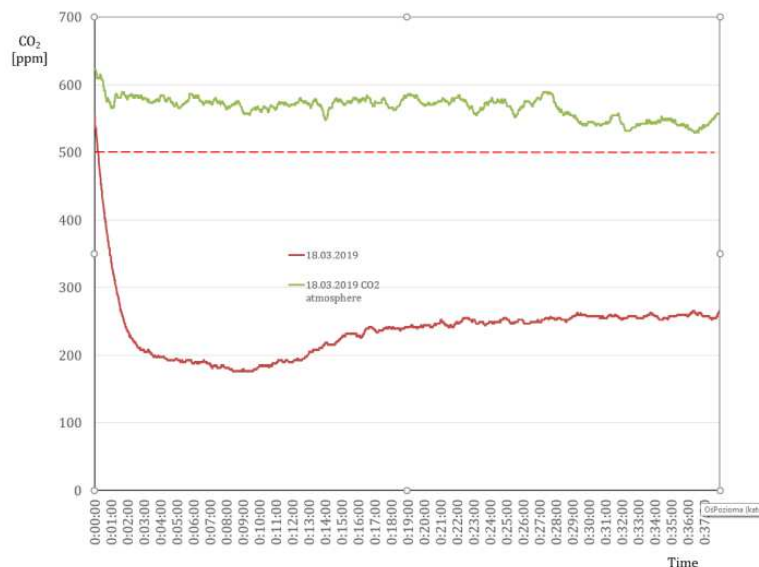
Plan zbierania danych			Wersja.2.1
CTQ	Symbol	Symbol	
miara Y	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	
typ miary	Na wyjściu procesu za systemem filtracji powietrza oddechowego. Kluczowa miara procesu dla produktu	Na wyjściu procesu. Czas t <sub>p</sub> bezawaryjnej pracy systemu filtracji powietrza oddechowego	
typ danych	Dane ciągłe	Dane ciągłe	
definicja operacyjna	Zawartość(stężenie) ditlenku węgla C <sub>CO<sub>2</sub></sub> ≤ 500ppm w próbie kontrolnej sprężonego powietrza oddechowego mierzona w warunkach normobarycznych	Czas od uruchomienia sprężarki w którym wartość ditlenku węgla w próbie kontrolnej sprężonego powietrza oddechowego za zestawem filtracji nie przekracza C <sub>CO<sub>2</sub></sub> ≤ 500ppm	
procedura pomiaru	Pomiar zautomatyzowany online wykonywany na stanowisku produkcyjnym	Pomiar zautomatyzowany online wykonywany na stanowisku produkcyjnym	
system pomiarowy	CCS. ang. Carbon Dioxide Control System	Vaisala CARBOCAP@Carbon Dioxide Module GMM112 system	poddany walidacji, wzorcowanie w czasie t < 5msc
jednostka pomiarowa	[1ppm±1]	[godz./min]	
częstotliwość próbkowania	Zapis automatyczny zawartości CO <sub>2</sub> co. 1, 2 lub 10 s pracy systemu sprężania i filtracji	Zapis automatyczny zawartości CO <sub>2</sub> co.1, 2 lub 10 s pracy systemu sprężania i filtracji	
liczebność próby	Pomiary online systemu sprężania i filtracji min.: [60/min]	Pomiary online systemu sprężania i filtracji min.: [60/min]	
X = x <sub>1</sub> ..x <sub>i</sub>	x <sub>1</sub> – C <sub>CO<sub>2</sub></sub> [ppm] –stężenie ditlenku węgla CO <sub>2</sub> w powietrzu atmosferycznym na dolicie do sprężarki x <sub>2</sub> – T <sub>a</sub> [C°] –temperatura powietrza atmosferycznego na dolicie do sprężarki x <sub>3</sub> – T <sub>z</sub> [C°] – temperatura powietrza atmosferycznego złoża systemu filtracyjnego x <sub>4</sub> – RH[%] –wilgotność względna powietrza atmosferycznego na dolicie do sprężarki x <sub>5</sub> –operator x <sub>6</sub> – m <sub>z</sub> – konfiguracja wypełnienia złoża filtracyjnego x <sub>7</sub> – t <sub>pr</sub> – czas pracy	x <sub>1</sub> – C <sub>CO<sub>2</sub></sub> [ppm] –stężenie ditlenku węgla CO <sub>2</sub> w powietrzu atmosferycznym na dolicie do sprężarki x <sub>2</sub> – T <sub>a</sub> [C°] –temperatura powietrza atmosferycznego na dolicie do sprężarki x <sub>3</sub> – T <sub>z</sub> [C°] – temperatura powietrza atmosferycznego złoża systemu filtracyjnego x <sub>4</sub> – RH[%] –wilgotność względna powietrza atmosferycznego na dolicie do sprężarki x <sub>5</sub> –operator x <sub>6</sub> – m <sub>z</sub> – konfiguracja wypełnienia złoża filtracyjnego x <sub>7</sub> – t <sub>pr</sub> – czas pracy	

Przyjęto do realizacji plan zbierania danych polegający na pobieraniu niejednoczesnej, jednoelementowej próbki kontrolnej z określoną częstotliwością próbkowania. Dane w celu dalszego wnioskowania, gromadzono w bazie danych. Docelowo do nadzorowania procesu i oceny jego stabilności przewidziano wykorzystanie kart kontrolnych [15]. Pozwoli to na monitorowanie procesu oraz identyfikację jego potencjalnych odchyłeń, umożliwiając tym samym predykcję występowania zagrożeń. Metody opracowania i doboru kart do racjonalizowania danego procesu nie będą tu przytaczane, gdyż opisano je już wystarczająco dokładnie [16,17,18]. Zdolność procesu produkcyjnego będzie określana na podstawie wskaźników jego zdolności.

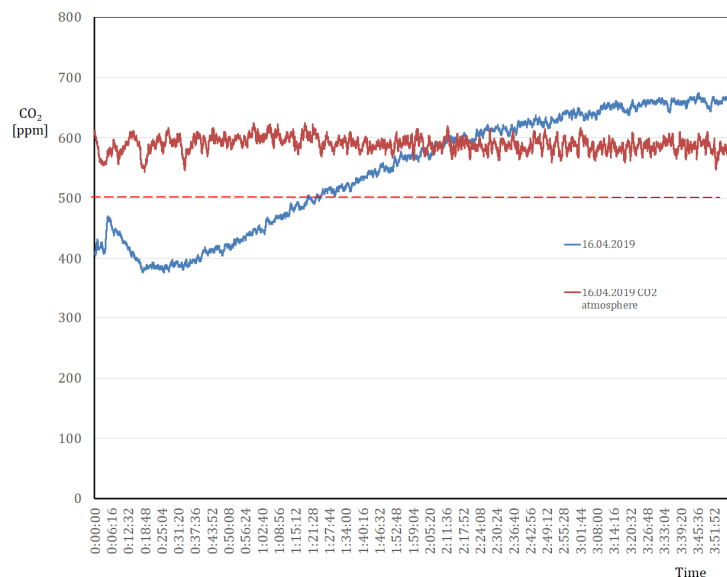
Ten zaś będzie uregulowany, tj. stabilny, wycentrowany i pod kontrolą, jeśli spełnione zostaną krytyczne wymagania jakościowe CTQ Y<sub>1</sub> = C<sub>CO<sub>2</sub></sub> ≤ 500[ppm] oraz Y<sub>2</sub> = t<sub>p</sub> ≥ 3msc. Obecny stan dostępnej technologii, którą można zastosować do otrzymywania znacznych ilości powietrza zdatnego na hiperbaryczne warunki tlenowe, nie pozwala na ustanowienie wyższych krytycznych wymagań jakościowych CTQ dla zdolności procesu. Jak wskazuje macierz analizy ryzyka FMEA<sup>40</sup>, jedynie zastosowanie progowych wskaźników analitycznych powodujące podniesienie detekcji z poziomu niepełnej 98% > D<sub>%</sub> ≥ 90% do idealnej D<sub>%</sub> ≈ 100% wywołuje spadek względnej liczbowej oceny prawdopodobieństwa detekcji z D = 9 do D = 1.

Pociąga to za sobą obniżenie wartości względnej liczby ryzyka do akceptowalnego poziomu RPN = 72 [9]. Wykorzystując do kontroli procesu wiarygodny system pomiarowy CCS dokonano analizy danych empirycznych zawartości ditlenku węgla, które zebrano w ramach codziennej eksploatacji systemu sprężania i filtracji. Uzyskane, za pomocą zakwalifikowanego systemu dane, stanowiły podstawę do oceny zdolności i stabilności analizowanego procesu. Kierując się kryterium najlepszych i najgorszych okoliczności, dokonano wyboru dwu rozkładów serii danych pomiarowych.





Rys. 2 Rozkład danych empirycznych procesu dla ( $n \gg 30, LSL = 0, USL = 500 \text{ ppm}$ ) po wymianie  $C_{CO_2} > USL$  wkładów filtracyjnych w dniu 18.03.2019. Źródło: badania własne.



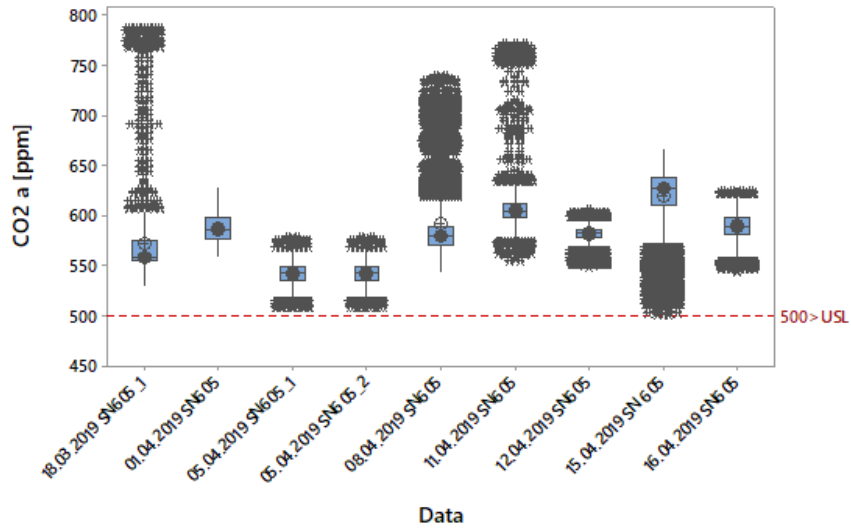
Rys. 3 Rozkład danych empirycznych procesu dla ( $n \gg 30, LSL = 0, USL = 500 \text{ ppm}$ ) po pierwszym przebiegu  $C_{CO_2} > USL$  wkładów filtracyjnych w dniu 16.04.2019. Źródło: badania własne.

Jeden z nich, stanowiący względny rozkład odniesienia, uzyskano bezpośrednio po wymianie wkładu filtracyjnego na nowy po pierwszym uruchomieniu systemu filtracji rys. 2. Rozkład porównawczy stanowiły dane pozyskane w dniu przekroczenia ustalonej granicy tolerancji procesu w czasie  $\tau \approx 20 \text{ min}$  od uruchomienia systemu sprężania i filtracji rys. 3.

W obu przypadkach obserwowano zawartość  $C_{CO_2}$  w atmosferze czepni systemu sprężania<sup>41</sup>, które odpowiednio dla rozkładu odniesienia wynosił  $\bar{x}_{CO_2,1} = 571 \text{ ppm}$ ,  $Me = 558 \text{ ppm}$  rys. 2 i dla rozkładu porównawczego  $\bar{x}_{CO_2,2} = 589 \text{ ppm}$ ,  $Me = 589 \text{ ppm}$  rys. 3.

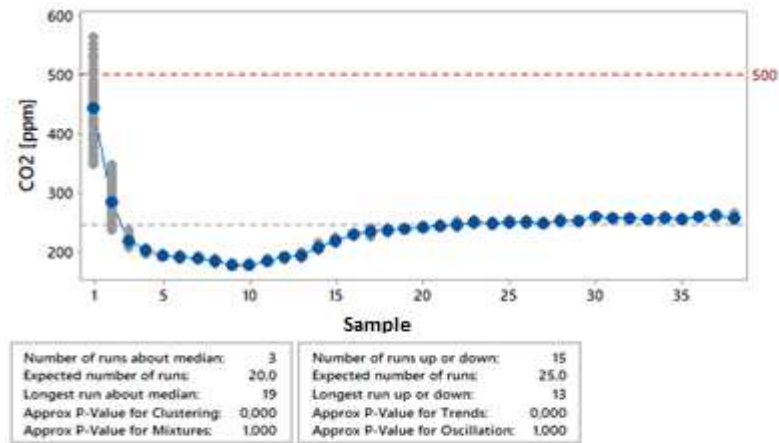
W obu przypadkach zidentyfikowano przekroczenie wejściowej, normowanej zawartości  $C_{CO_2}$  w powietrzu atmosferycznym, ponieważ  $\bar{x}_{CO_2,1}, \bar{x}_{CO_2,2} > C_{CO_2}^{max} = 500 \text{ ppm}$ .

Obserwacje jednostkowe<sup>42</sup> zostały potwierdzone dla każdego rozkładu w analizowanym okresie eksploatacji rys. 4. Analiza wskazuje, że przekroczenia normowanej granicy stężeń  $C_{CO_2}$  w powietrzu atmosferycznym mają charakter trwałe. W obszarach przemysłowych nie budzi to zdziwienia, gdyż od lat obserwuje się narastającą zawartość  $C_{CO_2}$  w powietrzu atmosferycznym<sup>43</sup>. Podobne zjawiska zwiększonej koncentracji lokalnej obserwowano przy braku zapewnienia właściwej wentylacji hal produkcyjnych, niekontrolowanej emisji zanieczyszczeń i/lub spalin w okolicach czepni systemów sprężania.

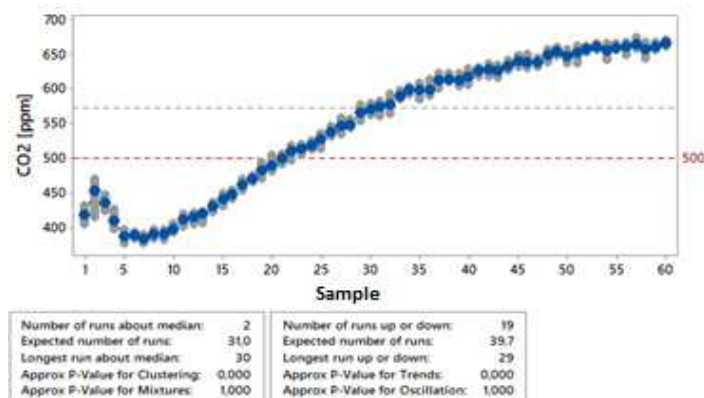


Rys. 4 Zmienność zawartości  $CO_2$  w atmosferze czerpni w analizowanym okresie produkcji powietrza oddechowego. Źródło: badania własne.

Uzyskane rozkłady naniesiono na tzw. *run charts* rys. 5-6, gdzie na podstawie wykonanych testów wykazano istotność występowania klastrów i trendów<sup>44</sup>.

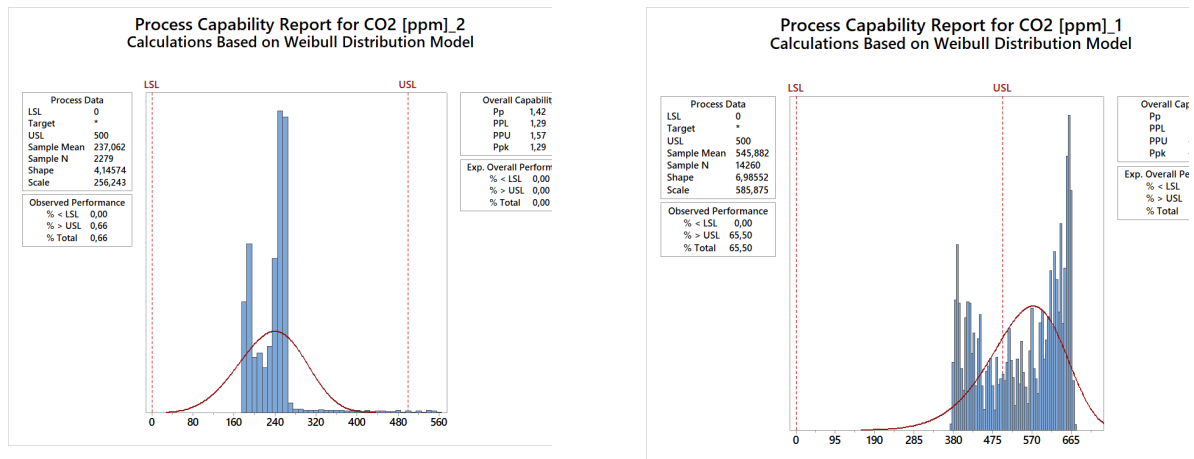


Rys. 5 Run – chart dla próbek powietrza oddechowego za zestawem filtracyjnym po wymianie wkładów filtracyjnych w dniu 18.03.2019 wraz z naniesionymi liniami kontrolnymi dla Me oraz USL. Źródło: badania własne.



Rys. 6 Run – chart dla próbek powietrza oddechowego za zestawem filtracyjnym w dniu przebiccia wkładu filtracyjnego w dniu 16.04.2019 wraz z naniesionymi liniami kontrolnymi dla Me oraz USL. Źródło: badania własne.

Uzyskane dane pomiarowe przedstawiono na histogramach rys. 7 i 8. W odróżnieniu od rozkładu odniesienia pozwoliło to na identyfikację dla  $Y_1 = C_{CO_2} \leq 500$  [ppm] około 65,5% ( $1,11\sigma$ ) występujących wad procesu w krytycznym rozkładzie porównawczym rys. 8.

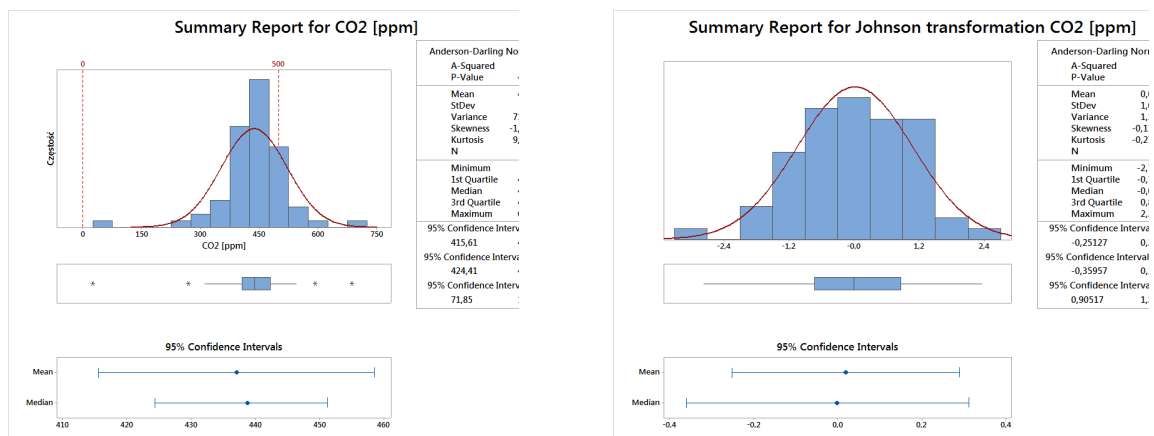


Rys. 7–8 Analiza zdolności procesu na podstawie rozkładów uzyskanych po wymianie i przebiegu wkładów filtracyjnych w dniach (18.03.2019 v. 16.04.2019). Źródło: badania własne.

Ocenę procesu w dwu zdefiniowanych stanach, zgodnie z przyjętym założeniem, opisano odpowiednimi wskaźnikami zdolności procesu  $C_p$ ;  $C_{pk}$  i/lub  $P_p$ ;  $P_{pk}$ <sup>45</sup>. Rozkład odniesienia można uznać za zdolny, ale niestabilny w czasie. Przekroczenia granicy specyfikacji  $USL$  w fazie uruchomienia systemu sprężania i filtracji, powodują 0,66% ( $3,98\sigma$ ) wad procesu co odpowiada:  $P_p$ ,  $P_{pk} = [1,42; 1,29]_{min} > 1$  rys. 7. Odpowiednio rozkład porównawczy ujawnia, aż 65,5% wad, gdzie:  $P_p$ ,  $P_{pk} = [0,93; -0,26]_{min} < 1$  rys. 8.

Prowadzi to do potwierdzenia wniosku, że zastosowane nowoczesne redundantne systemy filtracji<sup>46</sup> nie posiadają wystarczającej odporności (krzepkości)<sup>47</sup> na zmiany parametrów środowiskowych. Z powyższych względów na etapie *analizy*<sup>48</sup> koniecznym będzie przeprowadzenie pogłębionej oceny ryzyka procesu. Pozwoli to na identyfikację czynników specjalnych<sup>49</sup> i weryfikację ich wpływu na odpowiedź procesu.

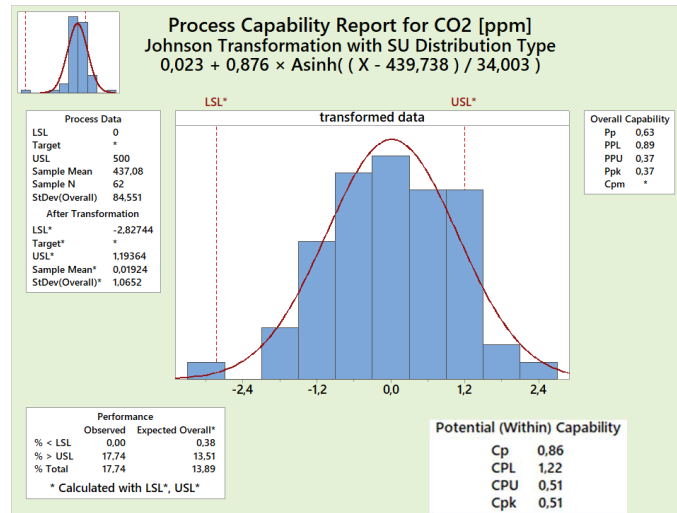
W celu potwierdzenia uzyskanych obserwacji, dalsze wnioskowanie prowadzono w oparciu o większą próbę składającą się z  $n = 62$  kolejnych rozkładów danych historycznych, które naniesiono na histogram rys. 9.



Rys. 9–10 Dopasowanie zestawu danych  $Y_1 = \bar{x}_{CO_2}$  do rozkładu i transformacja rozkładu  $\bar{x}_{CO_2}$  metodą *Johnsona*. Rozkład danych przed i po transformacji o przebiegu zbliżonym do rozkładu normalnego  $p - value = 0,902 > 0,05$ ,  $AD = 0,19$ . Źródło: badania własne.

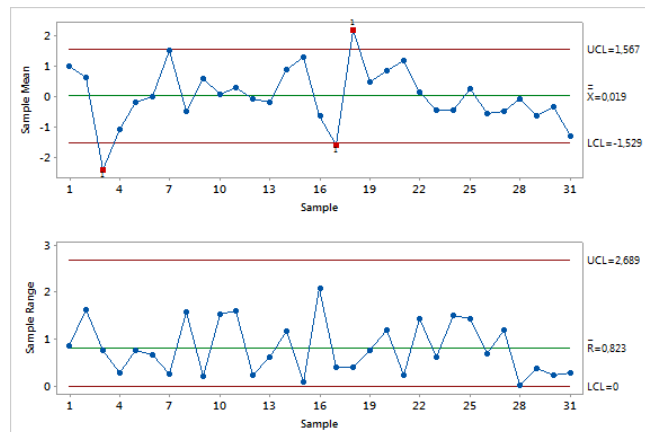
Po dopasowaniu rozkładu, dane poddano transformacji uzyskując rozkład stanowiący bazę rys. 10 do oceny zdolności procesu dla wymagania krytycznego  $Y_1 = C_{CO_2} \leq 500$  [ppm]. Analiza serii danych pomiarowych rozłożonych w czasie wskazała, przy zastosowaniu zautomatyzowanego systemu detekcji *online*, na występowanie średnio w próbie 17,74% ( $2,43\sigma$ ) wad produktu, potwierdzając tym samym brak zdolności rys. 11 i stabilności procesu w czasie rys. 12. W konsekwencji 17,74% zidentyfikowanych wad procesu dla  $n = 62$  rozkładów odpowiada:  $C_p$ ,  $C_{pk} = [0,86, 0,51]_{min} < 1$  oraz wartości  $P_p$ ,  $P_{pk} = [0,63; 0,37]_{min} < 1$ .





Rys. 11 Wstępna analiza zdolności procesu otrzymywania powietrza oddechowego na hiperbaryczne warunki tlenowe dla  $Y_1 = \bar{x}_{CO_2}$  i  $n = 62$  serii obserwacji w zakresie eliminacji zanieczyszczeń CO<sub>2</sub> po transformacji danych metodą Johnsona. Źródło: badania własne.

Uzyskane dane naniesiono na opracowaną kartę kontrolną wartości średnich i rozstępu  $\bar{x} - R$  rys. 12. Na karcie  $\bar{x}$  wartości średnich pojawiają się punkty znajdujące się poza ustalonymi liniami kontrolnymi LCL<sup>50</sup> i UCL<sup>51</sup>. Występujące trendy wskazują na okresowe przesunięcie procesu oraz jego zmianę w położeniu i rozrzucie względem linii centralnej. Proces jest niestabilny, niewycelowany i nie znajduje się pod kontrolą statystyczną a wpływy wynikające z czynników deterministycznych powodują jego nadmierną zmienność<sup>52</sup>.

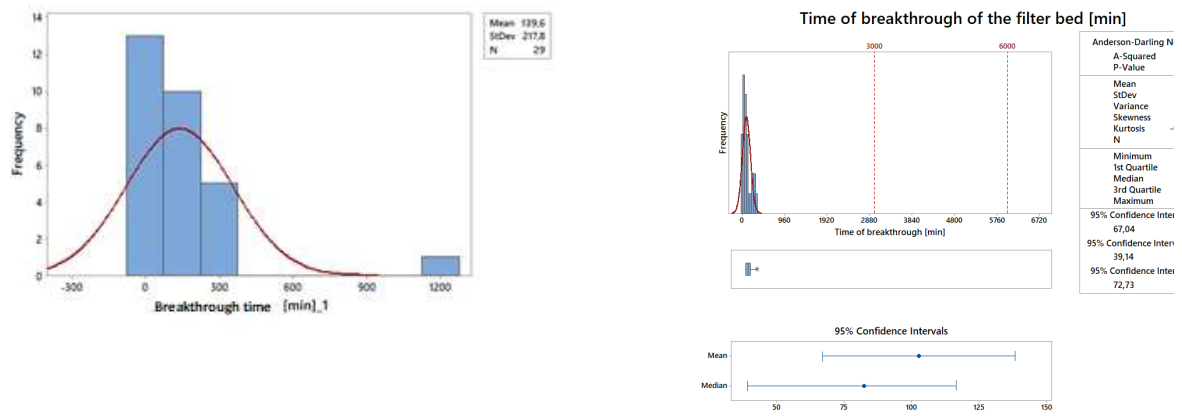


Rys. 12 Karta kontrolna  $\bar{X} - R$  dla rozkładu danych dla  $Y_1 = \bar{x}_{CO_2}$  i  $n = 62$  serii obserwacji w zakresie eliminacji zanieczyszczeń CO<sub>2</sub> po transformacji danych metodą Johnsona dla  $n = 2$ . Źródło: badania własne.

Na podstawie rozkładów historycznych dokonano oceny czasu przebicia filtra dla kolejnego wymagania jakościowego CTQ,  $Y_2 = t_p \geq 3msc$  i/lub 50godzin.

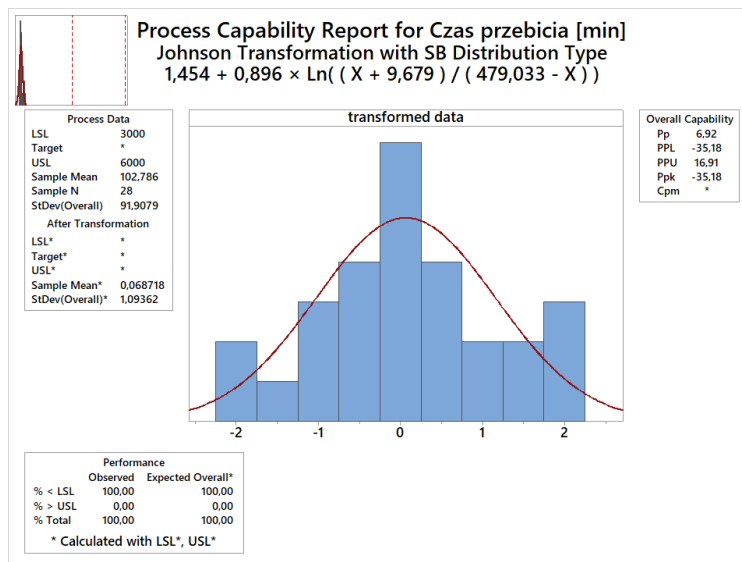
Uzyskane wyniki były zaskakujące. Okazało się, że w żadnym przypadku czas ochronnego działania nie zbliżył się do dolnej granicy specyfikacji. W 100% przypadków proces znajdował się poza granicą ustalonej tolerancji. Pierwotne przebicie nastąpiło po  $t_p = 1170min$  pracy od wymiany wkładu filtracyjnego na nowy tj. około  $t_p = 19,5\text{ godz.}$  <  $Y_2 = 50\text{godz.}$  rys. 13.

Przebicie wtórne<sup>53</sup> występowało średnio po około  $\bar{t} = 102\text{ min}$  pracy urządzenia, od momentu każdego następnego uruchomienia. Po eliminacji pomiaru odstającego, dane na tle ustalonego przedziału tolerancji, przedstawiono na histogramie rozkładu wtórnego czasu przebicia  $Y_2$  złoża filtracyjnego dla  $n = 28$  serii pomiarów rys. 14.



Rys.13–14 Histogram rozkładu pierwotnego i wtórnego czasu przebicia  $Y_2$  złoża filtracyjnego dla  $n = 28$  serii pomiarów na tle ustalonego przedziału tolerancji procesu ( $LSL = 50godz$ ,  $USL = 100godz$ ). Źródło: badania własne.

Po transformacji otrzymanego rozkładu dane naniesiono na rys. 15, który wskazuje zdolność procesu ze względu na czas przebicia  $t_p = Y_2$  złoża filtracyjnego dla  $C_{CO_2} \geq 0,05\%$ , i  $n = 28$  serii pomiarów na tle przedziału tolerancji. Proces znajduje się poza zakresem specyfikacji  $P_p = 6,92$ ,  $P_{pk} = -35,18 \ll 1^{54}$ . Dla wypełnienia krytycznych wymagań jakościowych  $CTQ$  rzeczywiste wskaźniki powinny być większe  $C_p, C_{pk} \geq 1^{55}$ . Znaczna rozbieżność wartości  $P_p, P_{pk}$  wskazuje na potencjał poprawy procesu po korekcji i przesunięciu jego położenia względem granic specyfikacji.



Rys. 15 Analiza zdolności procesu ze względu na czas przebicia  $C_{CO_2} \geq 0,05\%$ , złoża filtracyjnego  $t_{pr} = Y_2$  dla  $n = 28$  serii pomiarów na tle przedziału tolerancji ( $LSL = 50godz$ ,  $USL = 100godz$ ). Źródło: badania własne.

W rozpatrywanym przypadku należy dążyć do identyfikacji czynników, które powodują przekroczenia wymagań  $CTQ$  i przesunięcie procesu względem  $LSL = 50godz$ ,  $USL = 100godz$ .

W konsekwencji pozwoli to na opracowanie planu poprawy, jego implementację i racjonalizację procesu oraz odzyskanie kontroli i oczekiwanej przez użytkownika zdolności. Podsumowując, zidentyfikowaną zdolność procesu przed korekcją przedstawiono w tab. 3.

Zestawienie tabelaryczne oceny zdolności procesu produkcyjnego przed racjonalizacją wykonanej w fazie pomiaru. Źródło: badania własne.

Składowa	CTQ	Cel	Pomiar	Wnioski
Zdolność procesu	$Y_1 = C_{CO_2} \leq 500 [ppm]$	$5\% > USL$ $C_p, C_{pk} \geq 1$	$17,74\% > USL$ $C_p, C_{pk} \cong \min[0,86; 0,51]$ $P_p, P_{pk} \cong \min[0,63; 0,37]$	Proces niestabilny i niezdolny dla ( $n = 62$ )
	$Y_1' = C_{CO_2} \leq 500 [ppm]$	$5\% > USL$ $C_p, C_{pk} \geq 1$	$0,66\% > USL$ $P_p, P_{pk} \cong \min[1,42; 1,29]$	Proces spełnia wymaganie CTQ dla rozkładu odniesienia dla ( $n = 1$ )
	$Y_2 - t_p \geq 3 msc.$ $t_p \geq 50 \text{ godz.}$	$10\% < LSL$ $C_p, C_{pk} \geq 1$	$100\% < USL$ $P_p, P_{pk} \cong \min[6,92; -35,18]$	Proces niestabilny i niezdolny znajduje się poza granicami tolerancji dla ( $n = 28$ )

Skumulowana liczba niezgodności przy pomiarach kontrolnych, normowanych zanieczyszczeń ditlenku węgla w powietrzu hiperbarycznym na wyjściu procesu  $Y_1$  dla  $n = 62$  rozkładów, przekracza znacznie przyjęte założenia oraz wymagania CTQ tj. udziału wad na poziomie  $C_{CO_2} < 5\%$ . Taki stan wymaga wdrożenia racjonalnych działań naprawczych po identyfikacji i kompensacji przyczyn zakłóceń procesu oraz oceny wpływu parametrów kontrolowanych ( $x_1 \dots x_7$ ) tab. 2 w celu osiągnięcia minimum funkcji celu rozumianej jako:

- $Y_1$  zawartość normowana ditlenku węgla w granicach tolerancji  $C_{CO_2} \in [0 \div 500] ppm$ , gdzie  $\exists_{x_1, x_i} C_{CO_2} \leq C_{CO_2}^{max}$  gdzie  $f \rightarrow \min = 0$
- $Y_2$  postrzeganą jako spełnienie wymagania dla czasu ochronnego działania zestawu systemu i filtracji  $t_p \in [50 \div 100] \text{ godzin}$ .

Analizując wyniki aktualnej oceny zdolności procesu tab. 3, osiągnięcie spełnienia wymagań CTQ bez modyfikacji technologii wydaje się trudne lub wręcz niemożliwe. Odpowiedź co do skali podjętych działań korekcyjnych i/lub modyfikacji aktualnej technologii może zostać poznana po przeprowadzeniu badań<sup>56</sup> pozwalających na identyfikację wpływu parametrów<sup>57</sup> na odpowiedź procesu lub czynników wchodzących z nimi w interakcję.

## WNIOSKI

Zastosowanie w badaniach eksploatacyjnych, zakwalifikowanych, wiarygodnych i użytecznych systemów analitycznych o potwierdzonej skuteczności, pozwala na pełną kontrolę procesu produkcji czynnika oddechowego. Wdrażanie nowych systemów pomiarowych<sup>58</sup> należy poprzedzać realizacją badań weryfikacyjnych<sup>59</sup>, pod kątem spełnienia deklarowanych parametrów metrologicznych [19]. Porównanie wyników oceny zdolności procesu uzyskanych za pomocą zautomatyzowanych systemów pomiarowych, z rozkładami danych historycznych badań laboratoryjnych w latach 2018÷2019, wskazuje na korzyści wynikające z ich zastosowania.

W analizowanej próbie badań laboratoryjnych dla kontrolowanej normowanej zawartości ditlenku węgla ujawniono występowanie tylko  $C_{CO_2} \geq 500 ppm = Y_1 \approx 10\% = C_{CO_2 \text{ offline}}$  wad procesu produkcyjnego dla kl. II wg. NO-07-A005:2020. Analogicznie system zautomatyzowany ujawnił występowanie  $Y_1 \approx 17,74\% = C_{CO_2 \text{ online}}$ <sup>60</sup> wad procesu.

Tym samym stosując dotychczasowy system kontroli laboratoryjnej nie ujawniono  $\Delta = Y_1 = C_{CO_2 \text{ online}} - C_{CO_2 \text{ offline}} = 17,74 - 10 = 7,74\%$  wad, które zidentyfikowano w trakcie badań eksploatacyjnych.

Obecny stan techniki, w warunkach eksploatacyjnych dla analizowanego obiektu badań, nie pozwolił na ustanowienie wyższej niż  $2,43\sigma$  zdolności procesu. Wydaje się, że osiągnięcie założonego celu w granicach  $> 3,14\sigma$  jest możliwe. Prowadzi to do wniosku, że wymagany dotychczas obligatoryjnie plan zbierania danych polegający na pobieraniu niejednoczesnej, jednoelementowej próbki kontrolnej z każdego eksploatowanego źródła zasilania co trzy miesiące lub po przepracowaniu 50 godzin jest niewystarczający. Taki sposób nadzoru nie pozwala na prowadzenie pełnej kontroli i sterowanie procesem prowadząc często do błędnej oceny i wnioskowania w zakresie aktualnego stanu systemów sprężania i filtracji [20]. Obserwowana w trakcie badań zmienność procesu wskazuje, że w przypadku pracy ciągłej systemu sprężania w czasie  $t \in (2 - 6) \text{ godzin}$  częstotliwość pobierania próbki powinna przyjmować interwał nie dłuższy niż kilka minut. Zastosowanie tradycyjnej okresowej kontroli laboratoryjnej nie odzwierciedla realnego stanu procesu. W celu obserwacji i bieżącej kontroli procesów najlepszym rozwiązaniem jest implementacja niedocenianych i stosunkowo tanich<sup>61</sup>, zautomatyzowanych systemów kontroli wskaźnikowej, przy jednoczesnym utrzymaniu nadrzędnej kontroli laboratoryjnej. Paradoksalnie, zaawansowane metody laboratoryjnej analizy jakościowo-ilościowej<sup>62</sup> pomimo wysokiej precyzji i poprawności wykonywania pomiarów nie zapewniają możliwości właściwej reakcji na dynamiczne zmiany stanu procesu. Taki sposób kontroli ze względu na wysoki koszt analiz laboratoryjnych, małą częstotliwość badań oraz ich ograniczoną dostępność<sup>63</sup> jest niewystarczający.

Proces jest niestabilny i niezdolny, a obserwowana skala braku odporności systemów filtracji na występujące zakłócenia procesu jest zaskakująca. Czas ochronnego działania złoża do pierwszego przebicia nie spełnił wymagań CTQ i wynosił  $Y_2 < 50 \text{ godzin}$ . Można intuicyjnie wnioskować, że jest to spowodowane m.in. obserwowaną wysoką zawartością



zanieczyszczeń w atmosferze czepni systemu sprężania  $C_{CO_2} > 500ppm$ <sup>64</sup>. Identyfikacja kluczowych przyczyn przekroczenia wymagań *CTQ* oraz zagrożeń procesu będzie przedmiotem dalszej analizy<sup>65</sup>. Ze względu na skalę problemu eliminacja negatywnej jakości dla spełnienia wymagań *CTQ*, nie będzie możliwa bez modyfikacji obecnie stosowanej technologii<sup>66</sup> eliminacji ditlenku węgla<sup>67</sup>. Odzyskanie kontroli procesu i minimalizacja udziału defektów  $CO_2$  doprowadzi do zwiększenia poziomu bezpieczeństwa wykonywania prac podwodnych przy jednoczesnej redukcji kosztów niskiej jakości<sup>68</sup>.

## BIBLIOGRAFIA

1. NO-07-A005:2020. Nurkowanie w celach militarnych. Czynniki oddechowe Klasyfikacja, wymagania i badania. Warszawa: WCNJK;
2. NO-52-A201:2012. Nurkowanie w celach militarnych Przyrządy pomiarowe Klasyfikacja i wymagania. Warszawa: WCNJK;
3. Dz.U. 2018, poz.2112. Obwieszczenie MON z dnia 4.10.2018 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia MON w sprawie warunków bezpieczeństwa wykonywania prac podwodnych w jednostkach organizacyjnych podległych lub nadzorowanych przez MON. 2018;
4. ADivP-04 (A)(1):2013. Diving Gas Quality (STANAG 1458). Brussels : Nato Standarization Office;
5. US Navy Diving Manual. Praca zbiorowa (revision 7). The Direction of Commander: Naval Sea Systems Command, 2011. SS521-AG-PRO-010 0910-LP-115-1921;
6. Dz.U. 2004 nr 116 poz.1210, . Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 19 maja 2004 roku w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy wykonywaniu prac. Warszawa: brak nazwiska, 2004;
7. PN-W-88503:1998/Az1:2000. Technologia prac podwodnych -- Powietrze dla nurków. Warszawa: PKN, 2000;
8. PN-EN-12021:2014-08. Sprzęt do oddychania Sprężone gazy do aparatów oddechowych. Warszawa: brak nazwiska, 2014;
9. Woźniak A. Analiza procesu otrzymywania powietrza oddechowego do celów hiperbarycznych. Gdynia: PTMITH, 2017. ISBN 978-83-938-322-4-8;
10. —. Analiza procesu otrzymywania powietrza do celów hiperbarycznych. Polish Hyperbaric Research. 1, 2018, Tom 62, strony 7-32;
11. —. Evaluation of the impact of breathing air contamination on safe performance of hyperbatic exposure. IV. Gdynia: Zeszyty Naukowe AMW, 2016. strony 101-111. ISSN 0860-889X;
12. PN-EN ISO 10012:2004 Wymagania dotyczące procesów pomiarowych i wyposażenia pomiarowego;
13. Woźniak A. Analiza procesu otrzymywania powietrza oddechowego do celów hiperbarycznych. 2018, Tom Vol.62, Issue 1(62)2018, strony pp.7-32;
14. Woźniak A. Kwalifikacja systemu pomiarowego ditlenku węgla do nadzorowania i doskonalenia procesu otrzymywania powietrza oddechowego przeznaczonego na tlenowe warunki hiperbaryczne. Polish Hyperbaric Research. 4, 2019, Tom 69, ISSN: 1734-7009, strony 7-32.
15. PN-ISO 8258 +AC1:1993 Karty kontrolne Shewharta;
16. Salaciński T. SPC. Statystyczne sterowanie procesami produkcji. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016;
17. Burdick R.K. Borrow C.M., Montgomery D.C. Design and Analysis of Gauge R&R Studies: Making Decisions with Confidence Intervals in Random and Mixed ANOVA Models. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005. ISBN 0-89871-588-1;
18. Automotive Industry ActionGroup. Measurement System Analysis Reference Manual 4th Edition. brak miejsca: Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, and General Motors, 2010;
19. Namieśnik J. Konieczka P., Zygmunt B., Bulska E. Ocena i kontrola jakości wyników pomiarów analitycznych. Warszawa: WNT, 2017. ISBN 978-83-01-19444-4;
20. Gerber A. Statystyczne sterowanie procesami-doskonalenie jakosci z pakietem Statistica. Kraków : Stat Soft, 2000. ISBN 83-912346-2-2.

dr inż. Arkadiusz Woźniak  
Katedra Technologii Prac Podwodnych  
Akademii Marynarki Wojennej  
ul. Śmidowicza 69  
81-103 Gdynia  
tel.261262746  
ar.wozniak@amw.gdynia.pl

<sup>1</sup> katedra Technologii Prac Podwodnych AMW,  
<sup>2</sup> doświadczalny głębokowodny system hiperbaryczny,  
<sup>3</sup> ang. NATO - North Atlantic Treaty Organization,  
<sup>4</sup> §11.5 i §11.6 Rozdział 3,  
<sup>5</sup> ang. *SOP* - standard of procedures,  
<sup>6</sup> jak *poka* – *yoke*,  
<sup>7</sup> np. ang. *SCADA* - *Supervisory Control and Data Acquisition*,  
<sup>8</sup> np. zdolne do pomiaru zawartości:  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $VOC$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$  itp. w zależności od wymagań specyfikacji produktu,  
<sup>9</sup> elementy wykonawcze,  
<sup>10</sup> ang. *SPC* - *Statistical Process Control*,  
<sup>11</sup> tzn. kontroli okresowej wykonywanej przez operatora w oparciu o ogólnie dostępne proste systemy pomiarowe,  
<sup>12</sup> ang. *CTQ* - *Critical to Quality*,  
<sup>13</sup> *offline*,  
<sup>14</sup> wykorzystywany m.in. do badań eksperymentalnych nad opracowaniem i wdrażaniem nowych technologii nurkowań,  
<sup>15</sup> ang. *GLP* - *Good Laboratory Practice*,  
<sup>16</sup> odpowiednio w środowisku militarnym lub cywilnym,  
<sup>17</sup> nie dostosowanym do wymagań nadzorowanego procesu,  
<sup>18</sup> wyniki badań uzyskane z laboratorium fizykochemicznego *WTM 1 RBlog*,  
<sup>19</sup> wynikające z wewnętrznych i zewnętrznych kosztów niskiej jakości,  
<sup>20</sup> np. *SECURUS*,  
<sup>21</sup> produkowanie wad procesu,  
<sup>22</sup> zwykle zaniechanych przez użytkownika lub niewiarygodnych  
<sup>23</sup> obciążonego błędem  
<sup>24</sup> ujawnionych w kontroli laboratoryjnej  
<sup>25</sup> ang.: *Define, Measure, Analyse, Improve, Control*,  
<sup>26</sup> przy optymalizacji istniejących procesów,  
<sup>27</sup> określono: cel, zakres, uzasadnienie, zespół oraz potrzeby i wymagania klienta, zidentyfikowano i ustalono ranking wymagań krytycznych,  
<sup>28</sup> jak np. zestaw pomiarowy *ACG Analox*, *DIVEAIR 2 Geotechnical Instruments* (UK) Ltd itp.,  
<sup>29</sup> dostępne systemy pomiarowe nie spełniały wymagań procesu oraz docelowych oczekiwań użytkownika *VOC* ujawnionych na etapie analizy *KANO*.  
W istocie wygenerowano pozytywną jakość w produkcie i racjonalizowanym procesie poprzez opracowanie własnego systemu kontroli *CCS*,  
<sup>30</sup> ang. *CCS* – *Carbon Dioxide Control System*,  
<sup>31</sup> próbka kontrolna rozprężona do warunków normobarycznych,  
<sup>32</sup> ang. *Measurement System Analysis*,  
<sup>33</sup> ang. *Statistical Process Control*,  
<sup>34</sup> wizualną i akustyczną  
<sup>35</sup> ang. *LSL* - Lower Specification Limit; ang. *USL* - Upper Specification Limit,  
<sup>36</sup> ang. *VOC* - *Voice of client*,  
<sup>37</sup> utrata zdolności systemu filtracji do oczyszczania powietrza atmosferycznego w ustanowionych granicach specyfikacji,

- <sup>38</sup>  $Y_3$  analizowano na etapie walidacji systemu pomiarowego CCS. Wyniki pomiarów procesu są satysfakcjonujące, jeśli utrzymują się na poziomie co najmniej  $\geq 3\sigma$ , co odpowiada  $\geq 93,3\%$ ,
- <sup>39</sup> ang. *SMART* - *Specific*(Konkretne), *Measurable*(Mierzalne), *Achievable*(Osiągalne), *Relevant* (odpowiedni z punktu widzenia klienta), *Trackable* (możliwość śledzenia poziomu wyniku),
- <sup>40</sup> szczegółowe wyniki wykonanej analizy ryzyka *FMEA* procesu nie będą tutaj przytaczane,
- <sup>41</sup> pomiar na wejściu procesu,
- <sup>42</sup> rozkładu odniesienia i porównawczego,
- <sup>43</sup> stale obserwowane i potwierdzone przez *Mauna Loa Observatory* na Hawajach w laboratorium (NOAA) National Oceanic Atmospheric Administration gromadzące pomiary zawartości  $CO_2$  w powietrzu atmosferycznym od 1974 roku. Średnia zawartość  $\bar{x}_{CO_2} = 413,54\text{ppm}$  w kwietniu 2019 roku,
- <sup>44</sup> powodującego w konsekwencji utratę kontroli nad procesem,
- <sup>45</sup> krótko i długoterminowe położenia i rozrzutu procesu,
- <sup>46</sup> nadmiarowe,
- <sup>47</sup> ang. *Robust Design*,
- <sup>48</sup> na kolejnym etapie realizacji metodyki wynikającej z podejścia *Six Sigma*
- <sup>49</sup> powodujących utratę zdolności procesu,
- <sup>50</sup> *LCL*- ang. Lower Control Limit,
- <sup>51</sup> *UCL*- ang. Upper Control Limit,
- <sup>52</sup> jeszcze nie ujawnionych,
- <sup>53</sup> występujące w kolejnych uruchomieniach sprężarki po pierwotnym „przebicciu” złoza po czasie  $t_p$ ,
- <sup>54</sup> długoterminowa zmienność uwzględnia wszystkie przyczyny zmienności. Jest więc dobrym wskaźnikiem rzeczywistej zdolności procesu,
- <sup>55</sup> w procesach zaleca się, o ile to możliwe, aby wartość wskaźnika wynosiła  $C_{pk} > 1,33$ . W firmach, dla których jakość produktu jest priorytetowa, przyjmuje się wartość wskaźników zdolności na poziomie co najmniej  $C_p, C_{pk} > 1,67$ ,
- <sup>56</sup> np. z wykorzystaniem metod: *DOE*, *Mixture Design*, *Taguchi* itd.,
- <sup>57</sup> kontrolowanych i niekontrolowanych,
- <sup>58</sup> systemów wskaźnikowych,
- <sup>59</sup> np. w ramach badań laboratoryjnych i eksploatacyjnych pojedynczych egzemplarzy urządzeń,
- <sup>60</sup> zidentyfikowana graniczna zdolność procesu dla pojedynczego rozkładu wyniosła, aż  $Y_1 = 65\%$  ( $1,1\sigma$ ) zidentyfikowanych wad produktu,
- <sup>61</sup> porównując np. z kosztami zewnętrznymi niskiej jakości produktu.,
- <sup>62</sup> z wykorzystaniem chromatografii gazowej wraz ze spektrometrią mas.
- <sup>63</sup> obecnie w środowisku cywilnym problem dostępności do badań laboratoryjnych nie został rozwiązany. W odróżnieniu do intensywnych prac w obszarze militarnym środowisko cywilne pomimo obowiązujących wymagań normatywnych wynikających z postanowień PN – W – 88503:1998 oraz UE: PN EN 12021:2014 – 08 nie podjęło działań systemowych zmierzających do ustanowienia właściwej kontroli i nadzoru specjalistycznego,
- <sup>64</sup> adekwatność doboru systemu filtracji jest właściwa dla granic zawartości ditlenku węgla w powietrzu atmosferycznym na poziomie  $C_{CO_2a} = 0 \div 500\text{ppm}$ ,
- <sup>65</sup> na kolejnych etapach pracy należy ujawnić istotność wpływu analizowanych parametrów na odpowiedź procesu,
- <sup>66</sup> np. z wykorzystaniem podejścia *DFSS* – ang. *Design for Six Sigma*. Metoda projektowania nowego produktu lub/ i procesu lub przeprojektowania istniejącego, o ile proces uzyskał pułap swoich możliwości,
- <sup>67</sup> wskaźniki zdolności procesu:  $P_p = 6,92$ ,  $P_{pk} = -35,18 \gg 1,33$ ,
- <sup>68</sup> wewnętrznych i zewnętrznych.