

REDUKCJA LICZBY DEFEKTYW CO₂ W PROCESIE OTRZYMYWANIA POWIETRZA ODDECHOWEGO NA HIPERBARYCZNE WARUNKI TLENOWE

Arkadiusz Woźniak

Katedra Technologii Prac Podwodnych Akademii Marynarki Wojennej

STRESZCZENIE

Utrzymanie stabilnej zawartości ditlenku węgla w procesie otrzymywania powietrza oddechowego ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa wykonywania prac podwodnych oraz kosztów strat wynikających z produktu niskiej jakości. W artykule podjęto tematykę związaną z modyfikacją procesu produkcji powietrza oddechowego do celów hiperbarycznych w zakresie eliminacji zanieczyszczeń szkodliwych ditlenku węgla. Przedstawiono efekty dokonanych zmian procesu w celu osiągnięcia minimalizacji udziału wad. Opisano stan procesu przed i po korekcji w zakresie zidentyfikowanych obszarów poprawy prowadzących do osiągnięcia zdefiniowanych wymagań krytycznych procesu. Osiągnięcie celu racjonalizacji procesu produkcji powietrza oddechowego potwierdzono wynikami badań zrealizowanymi w KTHP AMW¹ w oparciu o system zasilania sprężonym powietrzem kompleksu DGKN - 120².

Słowa kluczowe: zdolność procesu, jakość powietrza oddechowego, nurkowe czynniki oddechowe, systemy pomiarowe, zmienność procesu, eliminacja ditlenku węgla, systemy filtracji powietrza oddechowego dla nurków

ARTICLE INFO

PolHypRes 2023 Vol. 82 Issue 1 pp. 7 – 32

ISSN: 1734-7009 eISSN: 2084-0535

DOI: 10.2478/phr-2023-0001

Pages: 26, figures: 27, tables: 8

page **www of the periodical:** www.phr.net.pl

Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

Typ artykułu: oryginalny

Termin nadesłania: 14.09.2022 r.

Termin zatwierdzenia do druku: 27.11.2022 r.



WSTĘP

Zastosowanie w badaniach systemów pomiarowych o potwierdzonej skuteczności, pozwoliło na wnioskowanie o stanie procesu produkcji powietrza oddechowego do celów hiperbarycznych [1]. Potwierdzono, że skumulowana liczba niezgodności przy pomiarach kontrolnych, normowanych zanieczyszczeń ditlenku węgla (CO_2)³ na wyjściu procesu przekraczała znacznie przyjęte założenia zdefiniowanych wymagań CTQ ⁴ tj. oczekiwanego udziału wad produktu na poziomie $C_{CO_2} \leq 5\%$. Taki stan procesu wymagał identyfikacji i kompensacji przyczyn jego zakłóceń oraz oceny wpływu parametrów kontrolowanych w celu osiągnięcia minimum funkcji celu rozumianej jako: Y_1 zawartość normowana CO_2 w granicach tolerancji $C_{CO_2} \in [0 \div 500]$ ppm, gdzie $\exists_{x_1 \dots x_i} C_{CO_2} \leq C_{CO_2}^{\max}$ oraz Y_2 postrzeganą jako spełnienie wymagania dla czasu ochronnego działania zestawu systemu i filtracji $t_p \in [50 \div 100]$ godzin.

Wyniki oceny zdolności procesu przed racjonalizacją, nie będą tutaj przedstawiane, gdyż zostały już szczegółowo wcześniej opisane [2]. Analiza serii danych pomiarowych rozłożonych w czasie względem zdefiniowanego poziomu krytycznego udziału niezgodności $\bar{Y}_1 \leq 5\%$ wskazała na występowanie średnio w próbie aż 17,74%(2,43 σ)⁵ wad produktu w zakresie przekroczenia dozwolonej normowanej granicy zawartości ditlenku węgla tj. $C_{CO_2} \gg 500$ ppm dla kl.II wg. NO-07-A005:2020 oraz PN-EN 12021:2014-8 [4]. Odpowiada to poziomowi wskaźników zdolności procesu: $C_p, C_{pk} = [0,86, 0,51] < 1$ oraz $P_p, P_{pk} = [0,63; 0,37] \min < 1^6$ [2].

Świadczy to zatem, że proces uzdatniania powietrza oddechowego realizowany przez badany zestaw systemu sprężania i filtracji jest niestabilny i niezdolny [5]. Zdefiniowany minimalny czas bezawaryjnej pracy systemu sprężania i filtracji rozumiany jako czas przebiccia wkładu filtracyjnego powinien wynosić minimum $Y_2 = [t_p \geq 3\text{msc}, t_p \geq 50 \div 100 \text{godz}]^7$ [3].

Obserwowany czas ochronnego działania złoża do pierwszego przebiccia nie spełnia wymagań krytycznych CTQ ⁸ i wynosił $Y_2 = 19,30\text{godz} \ll 50 \text{godzin}$ a przebiccie wtórne złoża występowało średnio po około $\bar{t}_p \approx 102$ min pracy urządzenia od ponownego uruchomienia [5]. Ze względu na skalę problemu eliminacja negatywnej jakości produktu dla spełnienia wymagań CTQ , nie będzie możliwa bez modyfikacji obecnie stosowanej technologii⁹ eliminacji ditlenku węgla¹⁰ [5]. Przyjęto, że odzyskanie kontroli procesu i minimalizacja udziału defektów CO_2 wymaga identyfikacji obszarów poprawy, weryfikacji wpływu parametrów kontrolowanych na odpowiedź procesu i wdrożenia zmian korygujących¹¹. Brak zdolności procesu wskazuje, że zastosowane nowoczesne i redundantne systemy filtracji¹² nie posiadają wystarczającej odporności i (krzepkości)¹³ na zmiany parametrów środowiskowych i nie zapewniają produktu o wymaganej jakości.

Wstępnie założono, że utrata zdolności procesu następuje szczególnie wtedy, gdy normowana zawartość zanieczyszczeń CO_2 w atmosferze przekracza zdefiniowane wymagania krytyczne określone w NO-07-A005:2020 tj. $C_{CO_2} > 500$ ppm¹⁴. Zidentyfikowan eograniczenia powodowały niedotrzymanie deklarowanych parametrów nominalnych systemu zarówno w zakresie czasu ochronnego działania jak i obserwowanej ilości wad procesu produkcji¹⁵.

CEL PRACY

Celem pracy jest spełnienie zdefiniowanych wymagań krytycznych CTQ procesu w zakresie redukcji liczby defektów¹⁶ CO_2 w procesie otrzymywania powietrza oddechowego na hiperbaryczne warunki tlenowe z obserwowanego poziomu 17,74%(2,43 σ) do $\leq 5\%$ (3,14 σ) przy jednoczesnym wydłużeniu czasu ochronnego działania zestawu filtracji do $Y_2 = [t_p \geq 3\text{msc}, t_p \geq 50 \div 100 \text{godz.}]$ [5]. Brak zdolności procesu i stabilności w czasie wskazuje na konieczność odzyskania nad nim kontroli i zapewnienie możliwości jego sterowania i poprawy.

BADANIA MATERIAŁ I METODY

W trakcie analizy opracowano i poddano analizie mapę procesu technologicznego identyfikując szereg prawdopodobnych przyczyn przekroczenia wymagań CTQ , które poddano analizie ryzyka $FMEA$ ¹⁷, tab.1. Jako kluczowe zagrożenia dla procesu uznano zassanie trudno usuwalnych zanieczyszczeń, niewiarygodną okresową kontrolę stanu procesu za pomocą prostych systemów wskaźnikowych o niewystarczających właściwościach metrologicznych, utratę zdolności sorpcyjnych złoża filtracyjnego oraz błędy w przestrzeganiu SOP ¹⁸ przez operatora tab.2. Udział wpływu zagrożeń potwierdzono obserwacjami zebranymi w okresie monitorowania procesu produkcyjnego, które ujęto na diagramie $PARETO$, rys.1. Analiza ryzyka $FMEA$ procesu [6], pokazała, że modyfikacja procesu sorpcji i zastosowanie wiarygodnych pomiarów progowych [7] wraz z zastosowaniem systemów alarmowych może prowadzić do zmniejszenia RPN ¹⁹.

W konsekwencji wstępnie określono obszary poprawy procesu w celu osiągnięcia zdefiniowanych wymagań krytycznych CTQ . Uznano, że:

- właściwe szkolenie i zmiana SOP ,
- adekwatny nadzór nad eksploatacją systemów sprężania i filtracji,
- wprowadzenie pomiarów progowych *online* procesu w zakresie oznaczenia zawartości CO_2 w próbkce kontrolnej,
- zmiana technologii procesów sorpcji w celu eliminacji zanieczyszczeń CO_2 , skutecznie obniży zidentyfikowane dla procesu zapewnienia powietrza na warunki hiperbaryczne i tlenowe poziomy ryzyka RPN .

Zmiana aktualnie stosowanej technologii wytwarzania wymagała wykonania badań weryfikacyjnych potwierdzających skuteczność implementowanych zmian, szczególnie w zakresie zmodyfikowanych systemów filtracji. Ocena jakościową wyników procesu wykonano za pomocą zakwalifikowanych wiarygodnych systemów pomiarowych *online*²⁰ oraz laboratoryjnych metod analizy instrumentalnej²¹ pobranych próbek powietrza oddechowego w $KTPP$ AMW oraz niezależnym wojskowym laboratorium fizyko-chemicznym gazów oddechowych WTM 1 $RBlog$ ²².

Tab.1

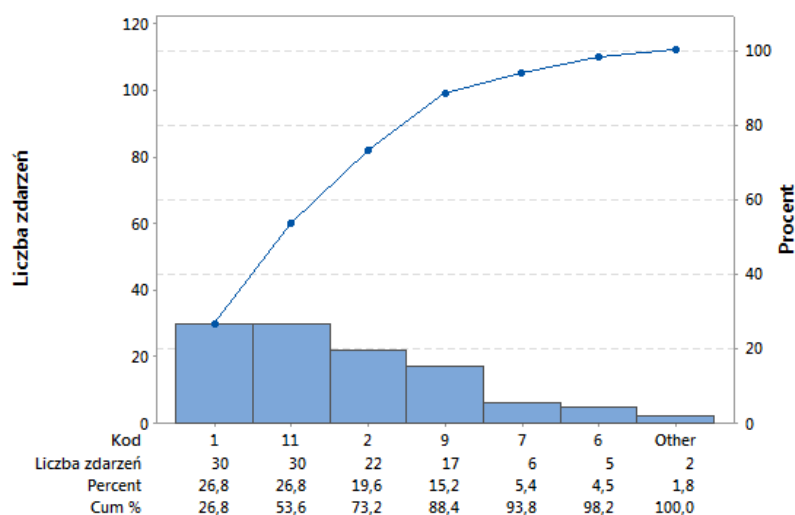
Analiza ryzyka FMEA dla procesu otrzymywania powietrza oddechowego na hiperbaryczne warunki tlenowe.

Krok procesu	Opis procesu	Problem	Skutek/efekt problemu	Przyczyna problemu	Metoda zapobiegania przyczynie problemu	Sposób wykrywania problemu		Rekomendowane akcje	Właściciel akcji	Planowana data realizacji	Rzeczywista data implementacji	Rzeczywista data zakończenia akcji								
Process Step / #	Process Details	Potential Failure Mode	Potential Failure Mode Effect	SEV	Potential Failure Mode Cause	OCU	Prevention of potential Failure Mode Cause	Detection of potential Failure Mode occurrence	DET	RPN	Recommended Improvement / Corrective Actions	Action owner	Target Completion Date	Actual Improvement / Corrective Actions implemented	Actual Completion Date	SEV	OCC	DET	RPN	
Produkcja powietrza oddechowego na hiperbaryczne warunki tlenowe, wg. NC07-A005.2010.	Zarliczyczenia subtratu	Zesanie trudno usuwalnych zarliczyczenia (SiO2 i węgiel)	brak możliwości oczyszczenia	9	błąd operatora	8	szkolenie	Okrasowa weryfikacja znajomości SOP przez operatora co 3 msc.	9	648	Zweryfikować wiedzę operatorów - test.	PS	31.01.2020	10.12.2019	18.01.2020	9	5	2	90	
			brak możliwości oczyszczenia	9	niewłaściwa wentylacja hali	8	zastosowanie pomiarów kontrolnych atmosfery	Pomiar online koncentracji di tlenu węgla w hali. Kontrola przed uruchomieniem systemu sprężania.	9	648	Modyfikacja układu wentylacji hali, implementacja kontroli online CO2 - automatyka wyłączenia sprężarki przy przekroczeniu CTQ	MP	31.01.2020	15.12.2019		9	8	1	72	
			brak możliwości oczyszczenia	9	brak filtracji wstępnej	9	zastosowanie oczyszczania wstępnego	Pomiar online koncentracji di tlenu węgla na wylocie układu filtracji	9	729	Dobór i montaż stnowiska filtracji wstępnej	PS	31.01.2020	Brak możliwości implementacji. RPN wyniku z zastosowania działań eliminacyjnych E: monitoring online - automatyka		9	8	1	72	
	Osuszanie powietrza oddechowego w systemie sprężania	Podwyższenie poziomu kondensatu olejowego	emisja H ₂ O i C ₂ H ₆	brak możliwości oczyszczenia	8	błąd operatora - złe ustawienie częstotliwości zrzutu z każdego stopnia sprężania i separatora	4	wprowadzenie automatyki zrzutu kondensatu, zmiana SOP	Pomiar t _g na osuszaczu. Kontrola ustawienia częstotliwości zrzutu H ₂ O i C ₂ H ₆ , t _g =15minut co 3 msc., weryfikacja 3 zrzutów co 90 godz.	9	160	Zmiana SOP. Sprawdzenie częstotliwości zrzutu oraz parametrów w zakresie eliminacji H ₂ O i C ₂ H ₆	PS	31.01.2020	05.12.2019	05.12.2019	8	2	5	80
				emisja zarliczyczenia	9	niewłaściwe złoża nie przygotowane słity	8	szkolenie	Nadzór nad wymianą złoża. Pomiar parametrów produkcyjnych po wymianie złoża.	9	648	Zweryfikować wiedzę operatorów - test. Weryfikacja wskaźników filtracyjnych, przed montażem. Probka kontrolna do analizy laboratoryjnej.	PS	31.01.2020	18.04.2019	31.05.2020	9	2	4	72
	emisja zarliczyczenia	8	zbyt wysoka temperatura w pomieszczeniu hali produkcyjnej - złoża	8	wprowadzenie pomiaru temperatury i wilgotności atmosfery, złoża filtracyjnego	Pomiar temperatury przed uruchomieniem.	8	512	Wdrożenie systemu wskaźnikowego parametrów pracy złoża CCS.	ZK	31.01.2020	14.12.2019	9	7	1		83			
	emisja zarliczyczenia	9	wyczerpanie złoża	9	modyfikacja procesu sorpcji zastosowanie pomiarów progowych	Pomiar online koncentracji di tlenu węgla na wylocie układu filtracji	9	729	Weryfikacja możliwości modyfikacji procesów sorpcji złoża zestawu filtracji P140	AW	31.05.2020	31.05.2020	9	7	1		83			
	emisja zarliczyczenia	9	niewłaściwa kontrola złoża SECURUS	8	zastosowanie pomiarów progowych	Okrasowa kontrola załączania sygnalizacji alarmowej SECURUS przy nadmiernej koncentracji di tlenu węgla	10	720	Walidacja systemu wskaźnikowego kontroli alarmowej - test - negatywny - zastąpienie przez system wskaźnikowy CCS	AD	31.03.2020	24.12.2019	9	2	3		54			
	emisja zarliczyczenia	9	błąd operatora	6	szkolenie i pomiary progowe	Pomiar online koncentracji di tlenu węgla na wylocie układu filtracji. Kontrola okrasowa operatora.	9	486	I - Szkolenie operatorów. II - wdrożenie systemu wskaźnikowego i sygnalizacji alarmowej CCS +software CCPS	AW	31.03.2020	14-15.12.2019	8	3	1		18			
	Sprężanie powietrza oddechowego do ciśnienia p300atm	Zarliczyczenie powietrza przez sprężarkę	ograniczona możliwość oczyszczenia	6	brak przegądu, awaria	3	zastosowanie pomiarów progowych	Pomiar online oraz okrasowa probka kontrolna co 3msc	9	162	Wdrożenie sygnalizacji alarmowej CCS + kontrola laboratoryjna	ZK	31.03.2020	14-15.12.2019	8	2	1	12		
			ograniczona możliwość oczyszczenia	6	błąd operatora	2	zastosowanie pomiarów progowych	Pomiar online oraz okrasowa probka kontrolna co 3msc	9	108	Wdrożenie sygnalizacji alarmowej i kontroli	AW	31.03.2020	14-15.12.2019	8	2	8	96		
	Oczyszczanie powietrza oddechowego	Nieefektywna praca bloku oczyszczania	ograniczona możliwość oczyszczenia	6	błąd operatora	4	szkolenie	Kontrola czasu pracy wkładów filtracyjnych od wymiany	9	216	Szkolenie operatorów test. Ewidencja czasu pracy wkładów filtracyjnych.	PS	31.03.2020	18.12.2020	18.12.2020	8	1	9	54	
			ograniczona możliwość oczyszczenia	6	błędy w przygotowaniu i obsłudze	6	zastosowanie pomiarów progowych	Zapis parametrów procesu online w czasie procesu produkcji	9	324	Wdrożenie systemu wskaźnikowego sygnalizacji alarmowej CCS +software CCPS	AW	31.03.2020	14-15.12.2019		6	4	1	24	
			ograniczona możliwość oczyszczenia	5	złe ustawienie zaworu podwyższenia ciśnienia	3	szkolenie	Kontrola ustawienia rzr na 3msc	9	135	Wykonanie kontroli ustawienia zaworu podwyższenia ciśnienia	ZK	31.01.2020	05.12.2019		5	2	9	90	



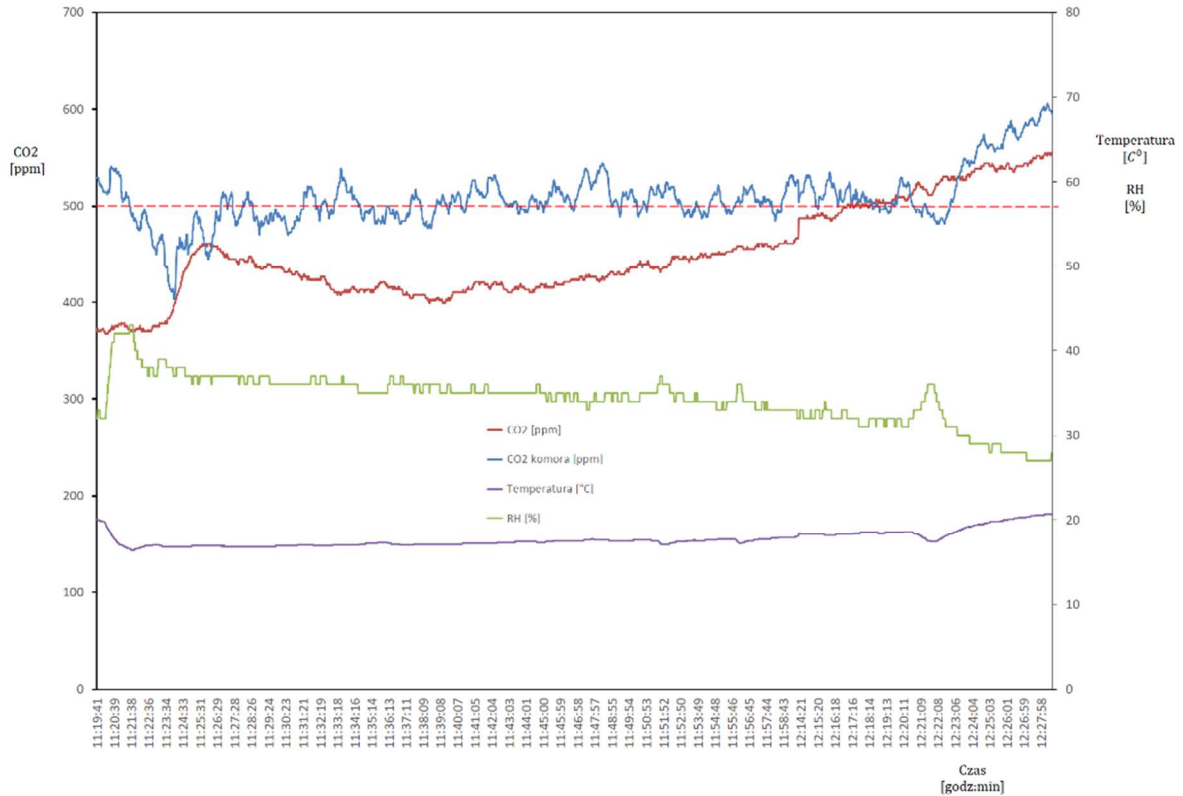
Zestawienie przyczyn i zagrożeń procesu. Źródło: opracowanie własne.

Nr kodu	Zagrożenie procesu
1	Zassanie trudno usuwalnych zanieczyszczeń
2	Utrata zdolności sorpcyjnych złoża filtracyjnego
3	Podwyższony poziom kondensatu
4	Zanieczyszczenie powietrza przez sprężarkę
5	Zanieczyszczenie wtórne od systemów magazynowania
6	Nieprawidłowy pobór próbki
7	Błędy analizy fizykochemicznej
8	Błędne ustawienie zaworu podtrzymania ciśnienia zestawu filtracji
9	Błędy w przestrzeganiu SOP przez operatora
10	Wadliwe wkłady filtracyjne(przeterminowane)
11	Niewiarygodna kontrolę procesu za pomocą prostych systemów wskaźnikowych

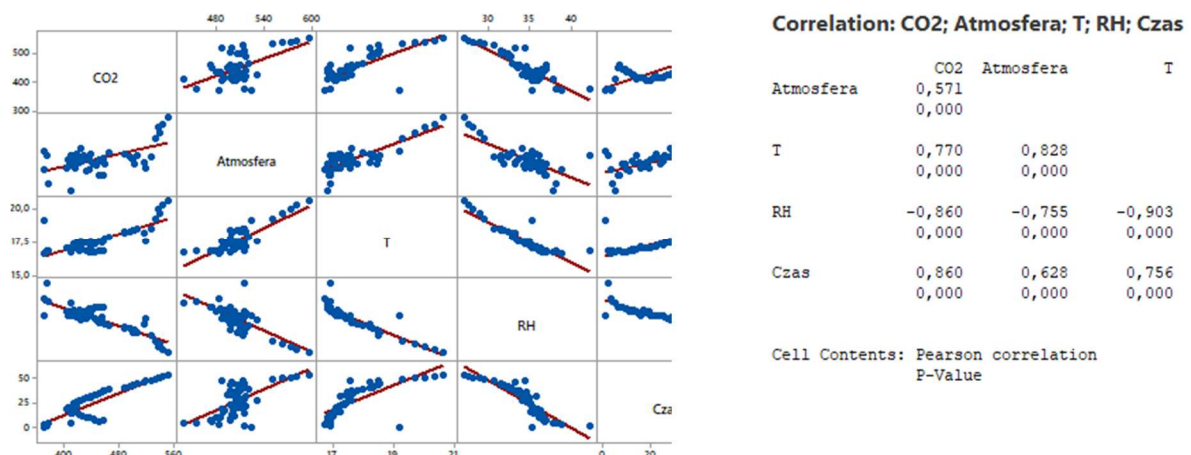


Rys.1. Diagram PARETO dla występowania zagrożeń procesu. Źródło: badania własne.

Ze względu na niezadowalający stan procesu poszukiwano zależności pomiędzy jego parametrami. W ramach prac dokonano klasyfikacji i uporządkowania parametrów wejścia i wyjścia procesu, czynników kontrolowanych i niekontrolowanych, które mogą wpływać na zmienną wyjściową $Y_1 - C_{CO_2}$ (5). Weryfikacji wstępnej parametrów oraz zachodzących zależności dokonano w oparciu o wybrany rozkład empiryczny serii danych pomiarowych uzyskany po analizie zdolności procesu w fazie pomiaru, rys.2. Na rozkładzie widać zmienność obserwowanych parametrów w czasie prowadzącą do utraty właściwości sorpcyjnych złoża filtracyjnego w zakresie skutecznej eliminacji ditlenku węgla z powietrza oddechowego. Na postawie rozkładu ujawniono występowanie istotnych korelacji. pomiędzy kontrolowanymi parametrami, rys.3-4, które pozwoliły na poszukiwanie możliwości utworzenia i weryfikacji prostego modelu regresji wielokrotnej dla ustanowionych CTQ tj. oczekiwanej krytycznej wyjściowej zawartości ditlenku węgla $Y_1 - C_{CO_2} \leq 500ppm$ a w konsekwencji spełnienia wymagań co do czasu ochronnego działania $Y_2 - C_{CO_2} > 50godz$. Decydując się na wybór analizy regresji liniowej sprawdzono, czy istnieje istotny liniowy związek pomiędzy zmiennymi. W celu poprawy aktualnej zdolności procesu po identyfikacji istotnych korelacji określono, które z analizowanych parametrów $(x_1, x_2, x_4, x_7)^{23}$ wpływają na wynik Y_1 . Wybór modelu regresji decyduje o precyzji odwzorowania rzeczywistych relacji pomiędzy zmiennymi w badanym procesie i wiąże się z decyzjami dotyczącymi uwzględnienia istotnych zmiennych objaśniających, liniowych, nieliniowych relacji między zmiennymi oraz zachodzących interakcji²⁴.



Rys. 2 Wybrany do analizy korelacji rozkład parametrów procesu otrzymywania powietrza oddechowego z dnia 02.12.2020 roku. Źródło: badania własne.



Rys. 3-4 Współczynniki korelacji dla parametrów procesu otrzymywania powietrza oddechowego wyznaczone na podstawie rozkładu pomiarów w dniu 02.12.2020. Źródło: badania własne.

Z uwagi na fakt, że na wielkość zmiennej zależnej Y_1 wpływa kilka zmiennych objaśniających $Y_1 = f(x_1, x_2, x_4, x_7)$ podjęto próbę utworzenia modelu z czterema zmiennymi objaśniającymi [5]. Ilościowe ujęcie związku pomiędzy wieloma zmiennymi kontrolowanymi a zmienną zależną Y_1 opisano za pomocą modelu regresji wielokrotnej w ogólnej postaci $Y = a + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + \dots + b_n \cdot X_n$ dla wybranych 53 grup i $n = 60$ serii danych pomiarowych. Ze względu na uzyskaną wartość współczynnika determinacji $R^2 = 66\%$ i niejednorodność rozkładu reszt rozpatrywaną pierwotnie postać modelu z czterema zmiennymi objaśniającymi: $Y_1 = 609 - 0,398 X_1 + 12,92 \cdot X_2 - 6,56 \cdot X_4 + 1,458 \cdot X_7$ uznano za nie wystarczającą do predykcji. Przy takim błędzie estymacji nie należy wykluczyć, że na Y_1 wpływają także inne nie uwzględnione w modelu czynniki niekontrolowane²⁵. Dla danych empirycznych wykonano analizę reszt rozkładu, która wykazała, na istotne rozbieżności między wartością oczekiwaną wyznaczoną na podstawie równania a faktycznym wynikiem pomiaru. Zidentyfikowano $n = 5$ obserwacji kwalifikując je jako możliwe przypadki spowodowane nieznanymi przyczynami specjalnymi. Dokonano redukcji modelu regresji polegającej na odrzuceniu $n = 5$ pomiarów, uzyskując dobroć dopasowania $R^2 = 85\%$ wystarczającą do wstępnego prognozowania. W porównaniu z wcześniejszą postacią uzyskano wyższą o 19,25% wartość współczynnika determinacji R^2 , poprawiając tym samym poziom predykcji dla zmiennej wyjściowej Y_1 . Postać modelu definiowano sugerując się najmniejszą wartością współczynnika dopasowania *Mallowsa*²⁶ oraz najwyższą R^2 . Po oszacowaniu parametrów modelu, zdefiniowaniu jego ostatecznej postaci, weryfikacji poprawności²⁷ wykorzystano go do



prognozowania zmian istotnych parametrów procesu w zakresie nastaw. $x_1 - C_{CO_2 a}$, $x_2 - T_a$, $x_7 - t_{pr}$. Dla analizowanych danych empirycznych wpływ wilgotności względnej x_4 , okazał się nie istotny, zatem nie ujęto go w końcowej postaci modelu prognostycznego opisanego formułą: $Y_1 = 18,7 - 0,418 X_1 + 33,67 \cdot X_2 + 1,686 \cdot X_7$, tab.3. Uznano, że jest on zdolny do przewidywania wstępnej wartości nastaw parametrów, które umożliwią uzyskanie pożądanej wartości $Y_1 < 500 ppm = f(x_1, x_2, x_7)$ a zatem i sterowania procesem w fazie jego doskonalenia. Poszczególne etapy procesu wnioskowania prowadzące do opracowania i weryfikacji modelu statystycznego nie będą tutaj szczegółowo przytaczane, gdyż zostaną odrębnie opisane.

Sformułowane na podstawie danych empirycznych wnioski co do istotności wpływu każdego z parametrów modelu, tab. 3 zdecydowano się potwierdzić w ramach eksperymentu biernego na podstawie alternatywnej próby rozkładów serii danych historycznych [8]. Ze względu na brak możliwości wymuszenia oczekiwanych wartości nastaw parametrów procesu ujętych w modelu²⁸, zmiany nie dokonywano w sposób kontrolowany, tym samym nie korzystano z klasycznego podejścia do projektowania eksperymentów *DOE*²⁹ w ramach pełnego³⁰ lub ułamkowego eksperymentu czynnikowego. Do wnioskowania wykorzystano zgromadzone rozkłady serii danych historycznych, gdzie w celu potwierdzenia przyczyn występowania różnic zmiennej wyjściowej analizowano związek między zdefiniowanymi *CTQ* procesu Y_1, Y_2 a poziomem obserwowanego parametrów modelu $Y_1 = f(x_1, x_2, x_4, x_7)$, w dwu ustalonych stanach procesu tj.: „dobrym”³¹ i „złym”³², tab. 4. Arbitralnie przyjęto, że poziom badanych parametrów w stanie tzw. „dobrym” jest korzystny dla procesu i odpowiada wymaganiom *CTQ*, tym samym jest możliwy do zaakceptowania. Dane dla $x_1 - C_{CO_2 a}$, $x_2 - T_a$, $x_4 - RH$, $x_7 - t_{pr} = f(m_s)$ porównano parami dla wybranych parametrów modelu odpowiednio dla produktu „dobrego” i „złego”.

Tab.3

Zestawienie wyników predykcji i optymalizacji modelu regresji z trzema zmiennymi objaśniającymi na podstawie wybranego rozkładu danych pomiarowych z dnia 02.12.2020. Źródło: badania własne.

Nr	Parametr	Wynik	Wnioski
1	$x_1 - C_{CO_2 a}$ [ppm]	pozytywny	istotny wpływ parametr ujęty w modelu
2	$x_2 - T_a$ [C°]	pozytywny	istotny wpływ parametr ujęty w modelu
3	$x_4 - RH$ [%]	negatywny	nieistotny wpływ -parametr odrzucony
4	$x_7 - t_{pr} = f(m_s)$	pozytywny	istotny wpływ parametr ujęty w modelu

Zmienne wyrażono jako średnią \bar{x} i odchylenie standardowe rozkładów σ . Uznano, że weryfikacja hipotez statystycznych dotyczących wpływu analizowanych parametrów na jakość procesu oraz ocenę istotności obserwowanych różnic dla $n = 62$ rozkładów będzie wystarczająco wiarygodna dla potwierdzenia wniosków wypływających z opracowanego modelu statystycznego

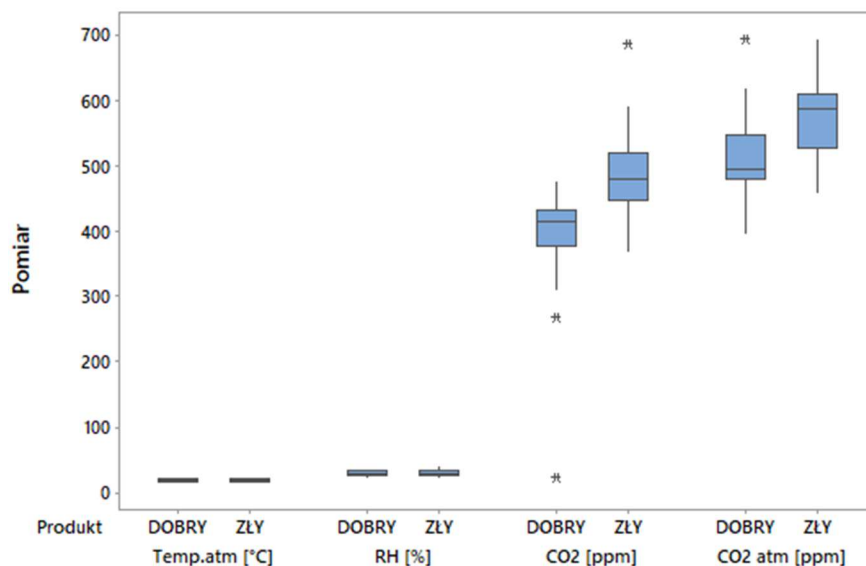
Tab.4

Zestawienie parametrów poddanych analizie w eksperymencie biernym. Źródło: badania własne.

Proces „Dobry” dla Y_1	Proces „Zły” dla Y_1
x_{1D}, x_{2D}, x_{4D}	x_{1Z}, x_{2Z}, x_{4Z}
gdzie: x_s –operator i $x_6 - m_s = \text{const}$	
Testowana hipoteza	
H_0 : wyniki pomiarów wskazanych parametrów w procesie dobrym i wadliwym nie różnią się istotnie tzn. nie mają wpływu na Y_1 .	
H_1 : wyniki pomiarów wskazanych parametrów w procesie dobrym i wadliwym różnią się istotnie tzn. mają wpływu na Y_1 .	
$H_0: \bar{x}_{Di} = \bar{x}_{Zi}$ $H_1: \bar{x}_{Di} \neq \bar{x}_{Zi}$	
Metoda:	
Test parametryczny <i>t</i> – <i>Studenta</i> dla porównania wartości średnich \bar{x} .	
Test <i>F</i> homogeniczności wariancji	
Test nieparametryczny <i>Mann Whitney</i> dla porównania wartości <i>Me</i> .	

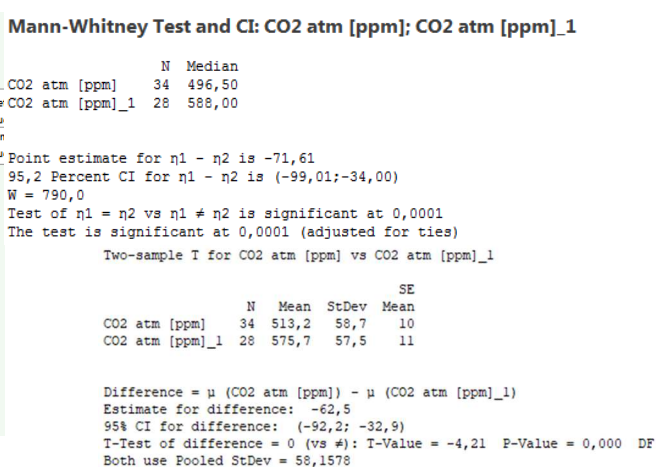
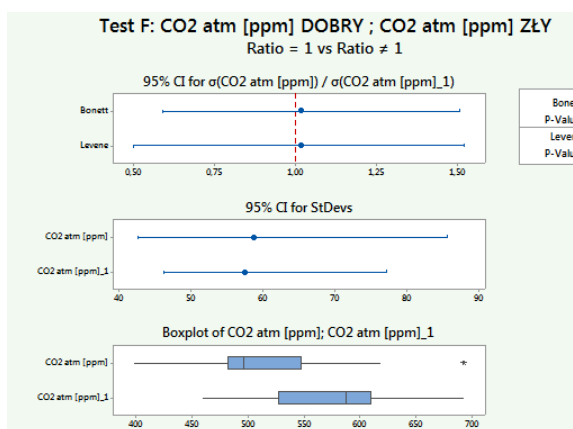
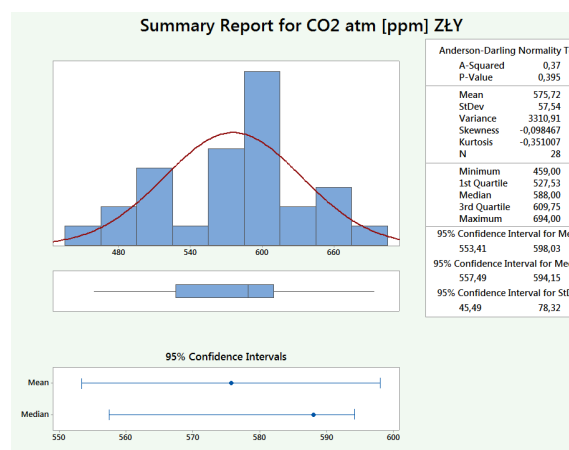
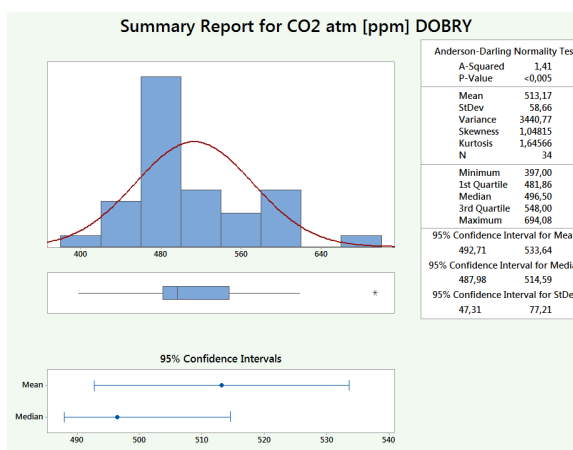
Uzyskane serie danych empirycznych poszczególnych parametrów odpowiednio dla produktu „dobrego” i „złego” porównano parami, rys.5.

Wstępna obserwacja rozkładów potwierdziła, że środowiskowe przekroczenia zawartości ditlenku węgla w substracie i produkcie przekraczają przyjęte założenia do projektowania systemów filtracyjnych. Intuicyjne wnioski potwierdzono testując hipotezę $H_0: \eta_1 = \eta_2$, względem alternatywnej: $H_1: \eta_1 \neq \eta_2$, dla $\alpha = 0,05$ o równości median obserwowanej zawartości ditlenku węgla w powietrzu atmosferycznym. Założenie normalności rozkładu danych empirycznych nie było spełnione w praktyce implikując konieczność wyboru nieparametrycznego testu statystycznego *U Manna – Whitneya*^{33,34}. Test ten nie wymaga równoliczności grup, rozkładu normalnego czy też homogeniczności wariancji, zatem może być on szeroko stosowany. W odróżnieniu od testów parametrycznych jego wadą jest fakt, że nie uwzględnia on wyników wariancji w badanych grupach³⁵.



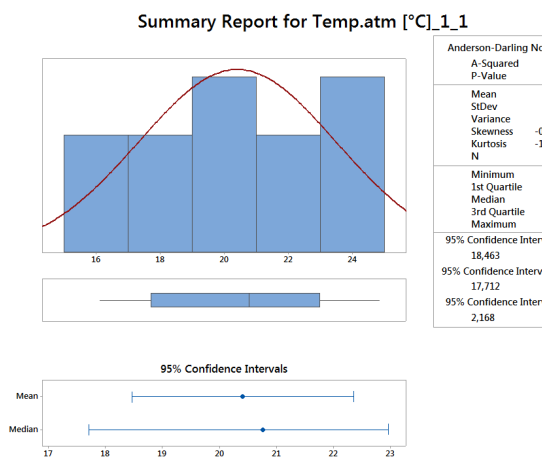
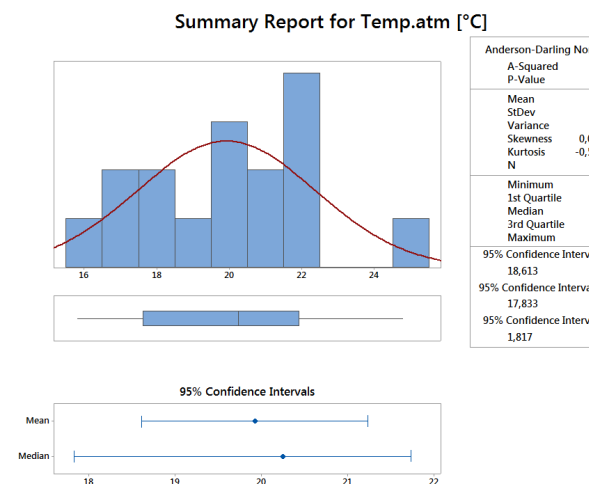
Rys. 5 Wykres *Boxplot* Y_1 oraz zidentyfikowanych parametrów $x_1 \dots x_i$ procesu otrzymywania powietrza oddechowego dla $n = 62$ obserwacji serii danych pomiarowych. Źródło: badania własne

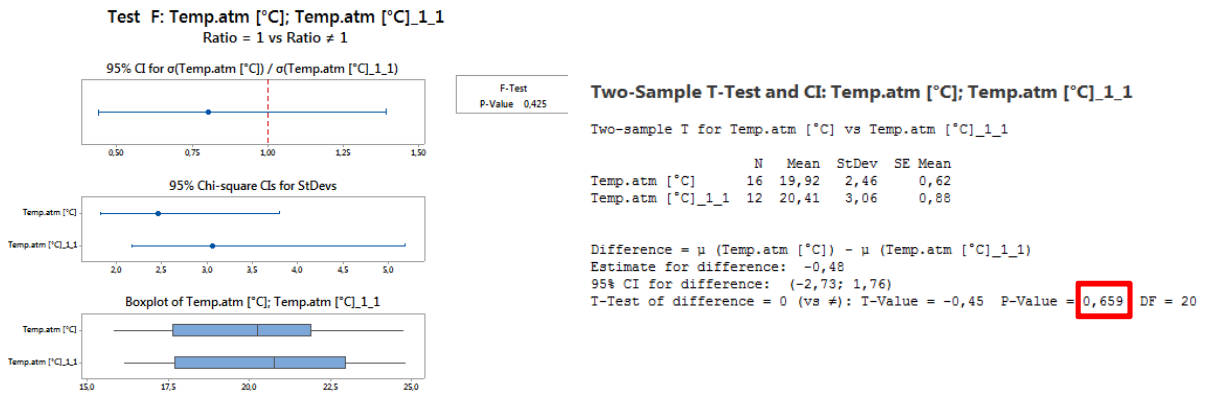
Wynik testu *U Manna – Whitneya* potwierdził istniejącą różnicę analizowanych grup dla produktu „dobrego” $\eta_1 = 496,5ppm$ i „złego” $\eta_2 = 588ppm$. Obliczona statystyka testowa $W = 790$ przy wartości $p - value = 0 < 0,05$ sugeruje odrzucenie H_0 i przyjęcie hipotezy alternatywnej $H_1: \eta_1 \neq \eta_2$ potwierdzającej istotną różnicę median analizowanych grup produktu. Potwierdza to wpływ analizowanego parametru na rozpatrywany proces, rys. 6-9. Test *U Manna – Whitneya* jest słabszy niż test $t - Studenta$ należy zatem zachować większą ostrożność w interpretowaniu uzyskanych wyników. Na etapie weryfikacji założeń stosowalności testów dokonano sprawdzenia homogeniczności (jednorodności) wariancji³⁶ weryfikując hipotezę $H_0: \sigma_1 = \sigma_2$ względem alternatywnej $H_1: \sigma_1 \neq \sigma_2$ przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Dla testu *Levene'a*³⁷ wartość $p - value = 0,744$ wskazuje na wynik nie istotny statystycznie i brak podstaw do odrzucenia H_0 a zatem przyjęcie założenia o homogeniczności analizowanych wariancji. Pomimo braku normalności analizowanych rozkładów³⁸ wnioski wypływające z testu *U Manna – Whitneya* potwierdzono alternatywnie testem $t - Studenta$ dla $n = 2$ grup niezależnych szacując moc wnioskowania na poziomie $1 - \beta = 0,994$ dla próby $n = 28$ i zidentyfikowanej różnicy wartości średnich $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 62,5ppm$. Weryfikowano hipotezę: $H_0: \bar{x}_1 = \bar{x}_2$, względem alternatywnej: $H_1: \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$ dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$. Obliczona wartość statystyki testowej $t = -4,21$. Ze względu na obliczoną wartość $p - value = 0 < 0,05$ testowaną hipotezę H_0 należy odrzucić na rzecz alternatywnej H_1 przyjmując, że wartości średnie są istotnie różne od siebie.



Rys.6-9 Sprawdzenie normalności rozkładów serii danych empirycznych dla dwóch grup produktów *Dobry* v. *Zły* CO₂ wraz z testem na homogeniczność wariancji oraz parametrycznym – *Studenta* i nieparametrycznym *U Manna – Whitneya*. Źródło: badania własne.

W konsekwencji testem *t – Studenta* dla kolejnego parametru weryfikowano różnicę obserwowanych wartości średnich rozkładów temperatur $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 20,41 - 19,92 = 0,49^{\circ}C$ w obu stanach procesu, testując hipotezę: $H_0: \bar{x}_1 = \bar{x}_2$, względem alternatywnej: $H_1: \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$. Dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$, otrzymana wartość *p – value* = 0,659 > 0,05 sugeruje przyjęcie testowanej hipotezy H_0 i odrzucenie hipotezy alternatywnej H_1 . Wynika zatem, że nie ma wystarczających przesłanek wskazujących na istotną statystycznie różnicę analizowanego parametru dla produktu dobrego i złego. Można więc uznać, że temperatura nie wpływa na odpowiedź procesu. Do wniosków tych należy podchodzić z dużą ostrożnością ze względu na małą liczebność próby oraz zmienność obserwowanej temperatury³⁹ w porównywanych rozkładach serii danych empirycznych. Ze względu na brak możliwości wymuszenia większych różnic nastaw temperatur, parametr ten pozostawiono do dalszej obserwacji. W celu uzyskania jednoznacznej odpowiedzi wnioskowanie należy kontynuować po pozyskaniu zróżnicowanych danych uzupełniających analizowanego parametru rys.10-13.

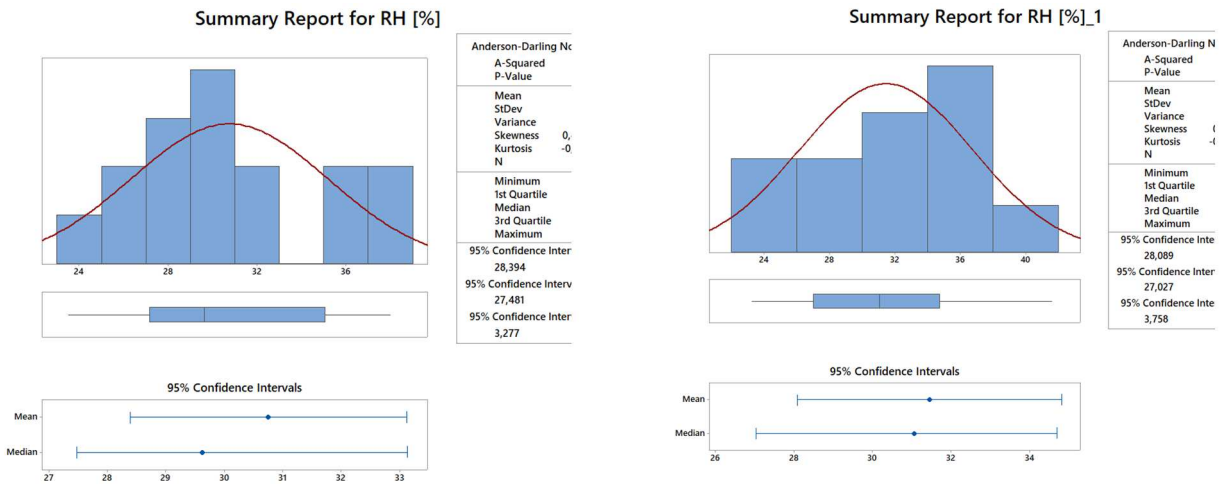


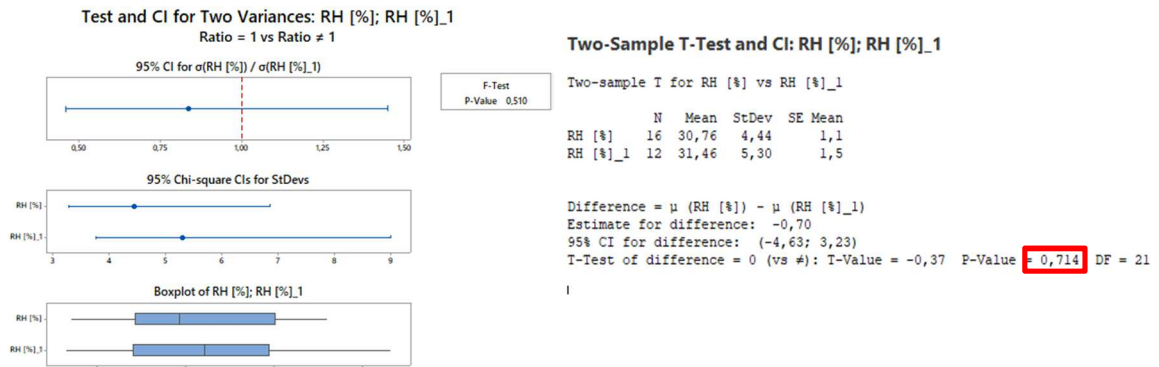


Rys. 10-13 Sprawdzenie normalności rozkładów danych empirycznych dla dwóch grup temperatur dla produktów *Dobry* v. *Zły* wraz z testem *F* na homogeniczność wariancji oraz porównaniem wartości średnich rozkładów \bar{x} temperatury *T* za pomocą testu *t – Studenta*. Źródło: badania własne.

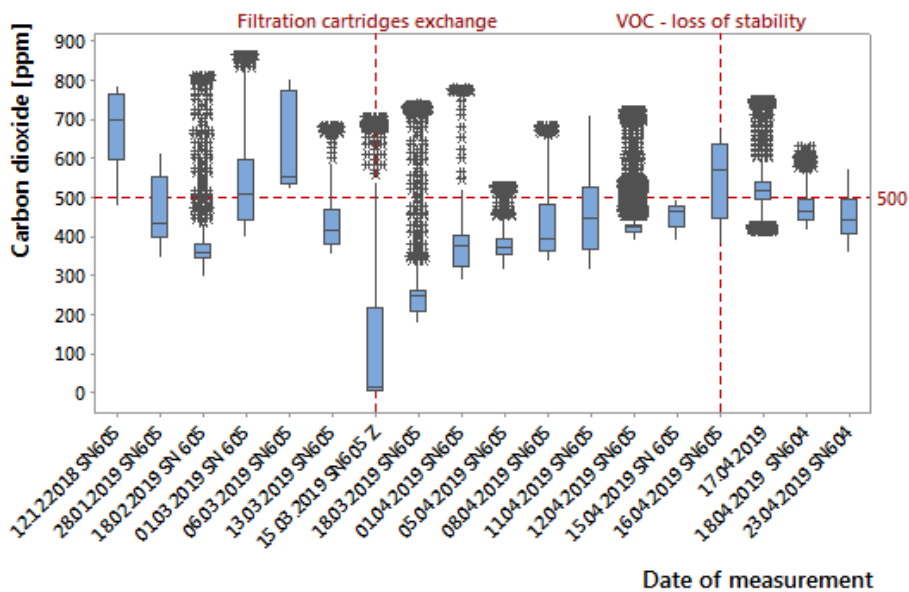
W kolejnym kroku wykonano analogiczne testowanie hipotez dla zidentyfikowanych różnic wartości średnich wilgotności względnej powietrza atmosferycznego rys.14-16. Porównano homogeniczność wariancji weryfikując hipotezę $H_0: \sigma_1 = \sigma_2$ względem alternatywnej $H_1: \sigma_1 \neq \sigma_2$ przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Wartość *p – value* = 0,510 dla testu *F* wskazuje na brak podstaw do odrzucenia H_0 a zatem wariancje są sobie równe. Za pomocą testu *t – Studenta* porównano wartości średnie rozkładów wilgotności $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 31,46 - 30,76 = 0,7\%$ dla obu stanów procesu, które poddano weryfikacji testując hipotezę: $H_0: \bar{x}_1 = \bar{x}_2$, względem alternatywnej: $H_1: \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$. Otrzymana wartość *p – value* = 0,714 wskazuje na akceptację H_0 dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$. Zatem dla produktu „dobrego” i „złego” nie można bezspornie stwierdzić różnic wartości średnich a rozpatrywany parametr nie wpływa na odpowiedź procesu. Analogicznie jak wcześniej do wniosków tych należy podchodzić z ostrożnością. Za wyjątkiem istotnego wpływu stężenia ditlenku węgla w atmosferze $x_1 - C_{CO_2,a}$ nie potwierdzono wpływu $x_4 - RH[\%]$ oraz zmian temperatury $x_2 - T_a$ na odpowiedź procesu.

Testowanie hipotez statystycznych, uzupełniono analizą istotności korelacji pomiędzy czasem pracy t_{pr} a zawartością ditlenku węgla C_{CO_2} za systemem filtracji rys.17-18. Z wykresu wynika, że utrata właściwości sorpcyjnych następuje dość szybko w funkcji czasu pracy złoża. Obliczony współczynnik korelacji liniowej *Pearsona* $r = 0,707$, *p – value* = 0,033 gdzie $r^2 = 0,499 \approx 0,5$. Obliczona wartość statystyki testowej $t = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \approx 2,64$ jest większa od wartości krytycznej dla testu dwustronnego $t_{kr} = 2,36$ dla $\alpha = 0,05$ i $n = 9 - 2 = 7$ stopniach swobody [9]. W konsekwencji należy odrzucić testowaną hipotezę zerową $H_0: \rho = 0$ (brak korelacji liniowej pomiędzy czasem pracy złoża i zawartością ditlenku węgla w substracie) na korzyść alternatywnej $H_1: \rho \neq 0$ (istnieje istotna korelacja pomiędzy zmiennymi) [10].

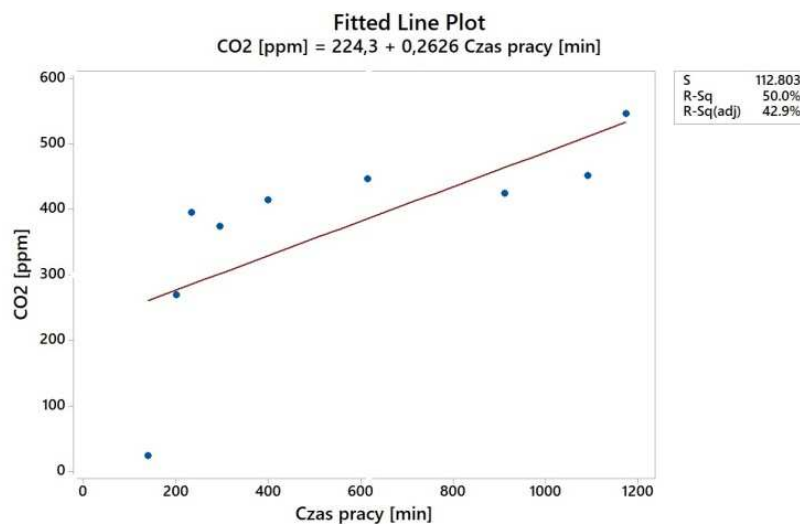




Rys. 14-16 Sprawdzenie normalności rozkładów grup produktów wraz z testem *F* homogeniczności wariancji oraz porównanie wartości średnich rozkładów \bar{x} wilgotności względnej za pomocą testu *t-Studenta* dla grup produktów *Dobry v. Zły*. Źródło: badania własne.



Rys. 17 Zmienność pomiarów CO_2 w czasie dla procesu produkcji powietrza oddechowego. Źródło: badania własne.



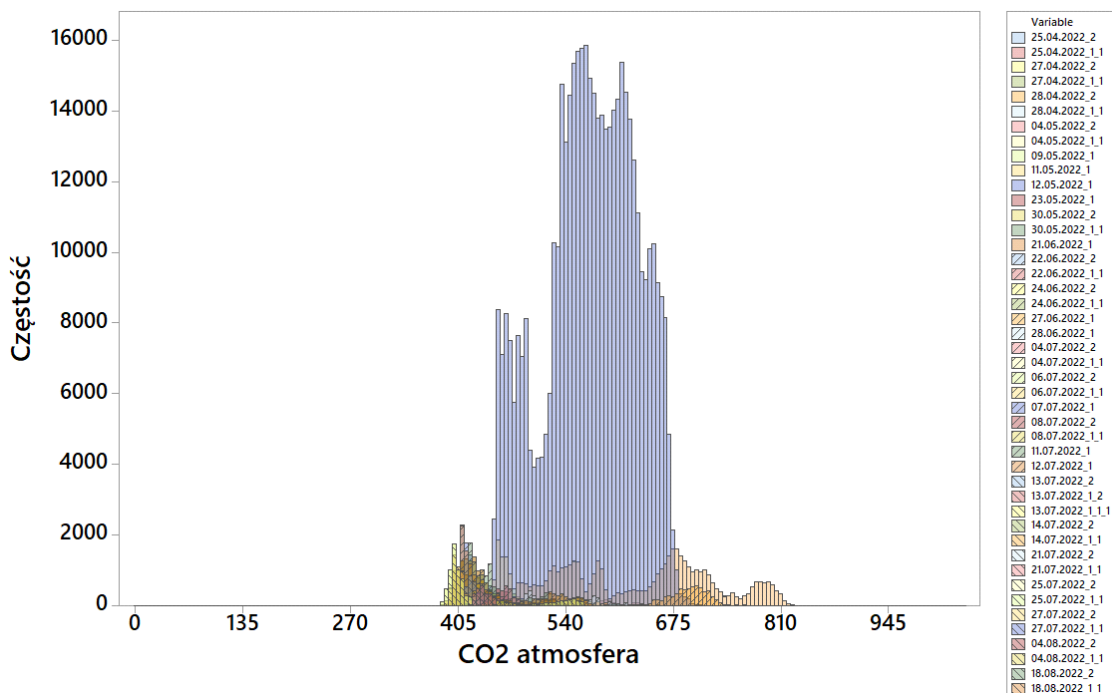
Rys. 18 Wykres korelacji zawartości CO_2 w produkcie względem czasu pracy systemu filtracji po wymianie wkładu filtracyjnego od 15.03.2019.do 16.04.2019. Źródło: badania własne.

Analiza porównawcza rozkładów serii danych potwierdziła, że środowiskowe przekroczenia zawartości ditlenku węgla $x_1 - C_{\text{CO}_2 a}$ w substracie, mają istotny wpływ na zdefiniowane $CTQ (Y_1, Y_2)$ tab.5.

Zestawienie wyników wnioskowania w zakresie kluczowych parametrów procesu. Źródło: badania własne.

Nr	Parametr	Hipoteza	p-value	Wynik	Wnioski
1	$x_1 - C_{CO_2,a}$ [ppm]		0,0001	negatywny	Przy $\alpha = 0,05$, $C_{CO_2,a}$ ma wpływ Y_1
2	$x_2 - T_a$ [C°]	$H_0: \bar{x}_{Dj} = \bar{x}_{Zi}$ $H_1: \bar{x}_{Dj} \neq \bar{x}_{Zi}$	0,659	pozytywny	Przy $\alpha = 0,05$, T_a nie ma wpływu na Y_2 . Inaczej niż wynika to z rozważań teoretycznych - mały współczynnik zmienności $V_{1-2} = \frac{1}{3} \cdot 3,08$ i $4,33 < 10\%$ dla $n < 15$
3	$x_4 - RH$ [%]		0,714	pozytywny	Przy $\alpha = 0,05$, RH nie ma wpływu na Y_1 Mały współczynnik zmienności $V < 10\%$ dla $n < 15$
4	$x_7 - t_{pr} = f(m_2)$	$H_0 = 0$ $H_1 \neq 0$	0,033	negatywny	Przy $\alpha = 0,05$ Występuje silna istotna statystycznie korelacja pomiędzy parametrami. Przyrost t_{pr} powoduje wzrost parametru wyjściowego $Y_1 = C_{CO_2}$

Na podstawie uzyskanych serii danych empirycznych bezspornie potwierdzono, że m.in. nadmierna zawartość CO_2 w substracie wpływa na czas przebicia złoża a zatem udział obserwowanych wad procesu produkcyjnego. W trakcie badań obserwowane stężenie ditlenku węgla w atmosferze czerpni wynosiło $C_{CO_2,a} \in [382 \div 1042]$ ppm., rys. 19.



Rys.19 Rozkład danych empirycznych koncentracji ditlenku węgla w atmosferze czerpni systemu sprężania i filtracji. Źródło: badania własne.

Wyniki badań⁴⁰ pozwoliły na identyfikację istotnego wpływu parametrów⁴¹ na odpowiedź procesu. Potwierdziły, że Y_1, Y_2 po eliminacji nieistotnych parametrów modelu są skorelowane z więcej niż jednym czynnikiem. W konsekwencji odpowiedź procesu $Y_1 < 500ppm = f(x_1, x_2, x_7)$. W wyniku badań potwierdzono istotny wpływ: zanieczyszczeń substratu x_1 na zdolności puryfikacji analizowanego systemu uzdatniania powietrza oddechowego i czasu jego pracy x_7 . Gdzie bezspornie konfiguracja zastosowanego złoża filtracyjnego x_6 oraz operator x_5 ma wpływ na czas pracy systemu x_7 . Ostatecznie można zapisać $Y_1 = f(x_1, x_2, x_5, x_6)$. Po ustaleniu adekwatnych nastaw procesu uściślono wstępnie zdefiniowane na podstawie analizy FMEA obszary poprawy (tzw. Focus Area) tab.5 i podjęto decyzję o wdrożeniu zmian korygujących [5].

Ze względu na ograniczone możliwości wpływu na sterowanie zawartością ditlenku węgla w substracie⁴² podjęto próbę modyfikacji procesów sorpcji w celu zwiększenia odporności systemów filtracji na oddziaływanie czynników



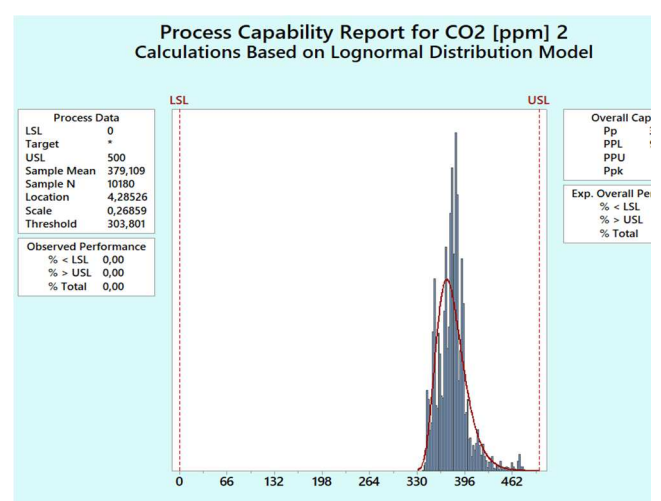
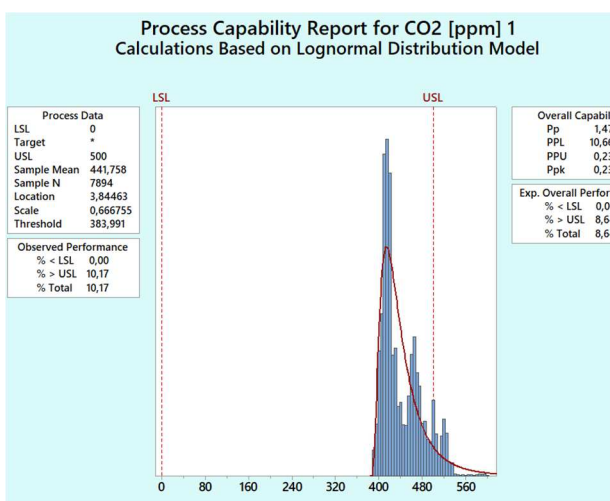
zakłócających i zmniejszenie wartości Y_1 . Poszukiwano możliwości zastosowania nowego rodzaju złoża filtracyjnego x_6 . Wymagało to wykonania skoku technologicznego i zrealizowania odrębnego zadania projektowego polegającego na zaprojektowaniu nowego produktu⁴³ dla istniejącego już procesu w ramach podejścia *DFSS*⁴⁴. Pokonanie barier technologicznych było konieczne ze względu na osiągnięcie pułapu możliwości pierwotnie analizowanego procesu filtracji w oparciu o standardowo konfekcjonowane przez producentów złoża sorbentów. Modyfikacji złoża wkładu systemu filtracji w procesie otrzymywania, utrzymywania i dystrybucji powietrza oddechowego przeznaczonych na tlenowe warunki hiperbaryczne dla *DGKN* – 120 dokonano w *KTPP AMW*. Uznano, że skumulowany efekt działań w wyspecyfikowanych obszarach poprawy nr 1 – 4 może spowodować osiągnięcie minimalizacji udziału obserwowanych wad procesu do zdefiniowanego poziomu $\bar{Y}_1 \leq 5\%$, tab. 6.

Tab. 6

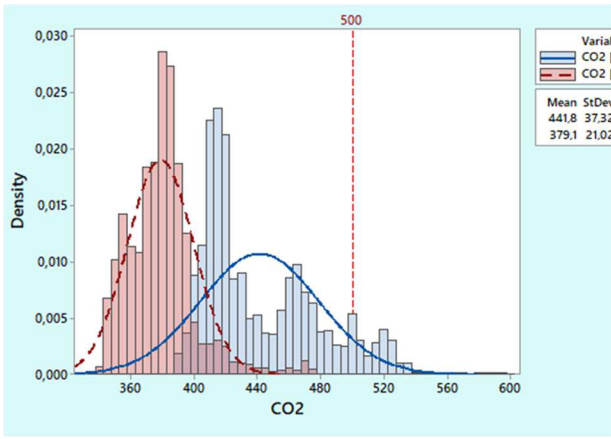
Focus Area dla procesu racjonalizacji procesu otrzymywania powietrza oddechowego. Źródło: opracowanie własne.

Nr	CTQ	Parametr	Zmiana procesu
1	$Y_1 = C_{CO_2} \leq 500 [ppm]$	x_5 – operator	szkolenie i zmiana SOP
2	$V_2 - t_p \geq 3 \text{msc.}$	$x_1 - C_{CO_2} [ppm]$	$C_{CO_2} < 500 ppm$ w powietrzu atmosferycznym na dolocie do sprężarki
3	$t_p \geq 50 \text{godz.}$	$x_2 - T_a [C^\circ]$	$T_a \in [15 - 25]^\circ C$ temperatura powietrza atmosferycznego na dolocie do sprężarki
4		$x_6 - m_a$ – konfiguracja wypełnienia złoża filtracyjnego	zmiana technologii – modyfikacja procesów sorpcji dla czasu bezawaryjnej pracy systemu sprężania i filtracji polegającego na spełnieniu Y_1, Y_2 .

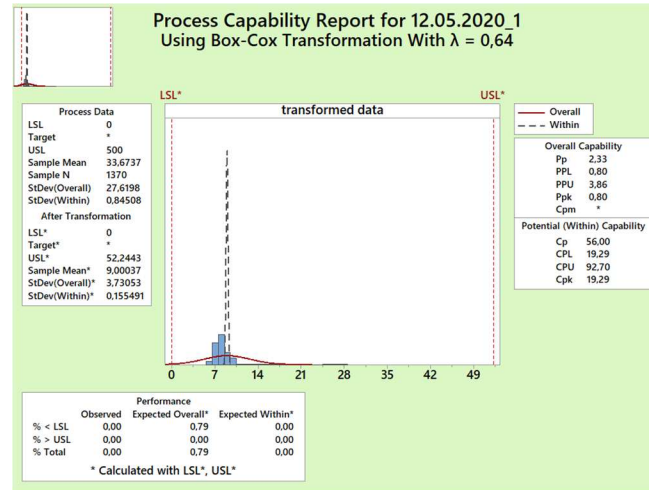
W pierwszej fazie działań dokonano implementacji najprostszyc zmian polegających na zmianie *SOP* i szkoleniu operatorów x_5 w połączeniu z wdrożeniem kontroli jakości produktu *online* oraz zapewnieniem możliwego obniżenia zawartości ditlenku węgla w substracie x_1 . Wymienione działania spowodowały zmniejszenie udziału obserwowanych wad w rozkładzie serii danych empirycznych z $\bar{Y}_1 \approx 10,17\%$, rys. 20 do $\bar{Y}_1 \approx 0\%$, rys. 21 i 22. Uzyskana zmiana położenia procesu nie była w pełni satysfakcjonująca, położenie rozkładu serii danych pomiarowych zawartości ditlenku węgla w produkcji znajdowało się w pobliżu *USL*⁴⁵. Kolejnym etapem działań było wdrożenie zmian technologii w zakresie procesów chemisorpcji x_6 , istota rozwiązania nie będzie tu przedstawiana, gdyż zostanie odrębnie opisana. W efekcie uzyskano poziom zbliżony do pułapu oczekiwanych możliwości oddalając się o $Z = \frac{x_{USL} - \bar{x}}{\sigma}$ gdzie: x_{USL} – górna granica specyfikacji; \bar{x} – średnia arytmetyczna σ – odchylenie standardowe: $Z_{bench USL} = 11,59$ od ustalonej granicy specyfikacji $USL = 500 ppm$ zbliżając się trwale z poziomu wstępnie obserwowanego: $\bar{x}_{1-1} = 441 ppm$ ($x_{CO_2, max} = 588 ppm$), $\sigma = 37,32 ppm$ rys. 20, poprzez $\bar{x}_{1-2} = 379 ppm$ ($x_{CO_2, max} = 499 ppm$) i $\sigma = 21,02 ppm$ rys. 21⁴⁷ do średniej wartości $\bar{x}_{1-3} \approx 33 ppm$ przy $\sigma = 0,84 ppm$ ⁴⁸, rys. 23. Obserwowana zmiana parametrów rozkładu wskazuje na kluczowy wpływ modyfikacji złoża filtracyjnego i uzyskanie istotnej poprawy procesu⁴⁹, zarówno co do jego położenia względem granic tolerancji jak i obserwowanej zmienności. Całkowita eliminacja występowania wad, znaczne odsunięcie rozkładu od górnej granicy tolerancji oraz mała zmienność świadczy o odzyskaniu kontroli nad procesem oraz możliwości jego sterowania. W konsekwencji zmian technologii eliminacji ditlenku węgla uzyskano istotną poprawę zdolności⁵⁰ oraz stabilności procesu w czasie, który jest m.in. funkcją modyfikacji złoża i zawartości wejściowej ditlenku węgla w powietrzu atmosferycznym. Zmiana jakościowa złoża spowodowała obniżenie parametru wyjściowego $Y_1 \ll 500 ppm$ oraz wydłużyła czas ochronnego działania systemu filtracji do czasu łącznego $Y_2 (t_p) = 123,30 \text{ godz} \gg LSL = 50 \text{ godz}$ tj. 2,5-krotnie dłuższym niż wymagany normatywnie minimalny czas bezawaryjnej pracy sytemu sprężania. Modyfikacja procesu filtracji w porównaniu z pierwotnie stosowanym rozwiązaniem technicznym umożliwiła wykorzystanie nowego złoża *ALFA*₀₁ w czasie $t_{p-2} = 123,30 \text{ godz}$, rys. 24 oraz odpowiednio złoża *ALFA*₀₂ w czasie $t_{p-2} = 158 \text{ godz}$, rys. 27.



Rys. 20-21 Zmienność pomiarów CO_2 w czasie dla procesu produkcji powietrza oddechowego: przed 25.11.2019 i po zmianie procesu 31.02.2020 polegającej na modyfikacji parametru x_1 – obniżenie ditlenku węgla w substracie w granicach temperatur x_2 i szkoleniu *SOP* operatorów x_5 . Źródło: badania własne.

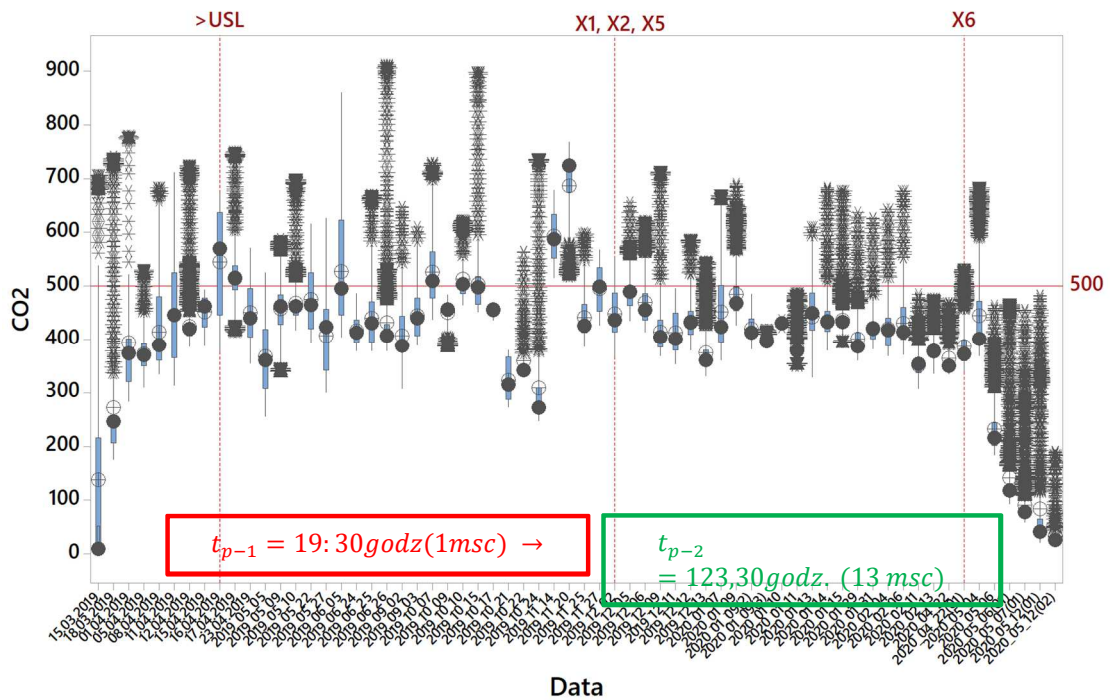


Rys. 22 Rozkład pomiarów CO_2 przed i po zmianie procesu w zakresie modyfikacji x_1 – obniżenie ditlenku węgla w substracie w granicach temperatur x_2 i szkoleniu SOP operatorów x_5 . Źródło: badania własne.



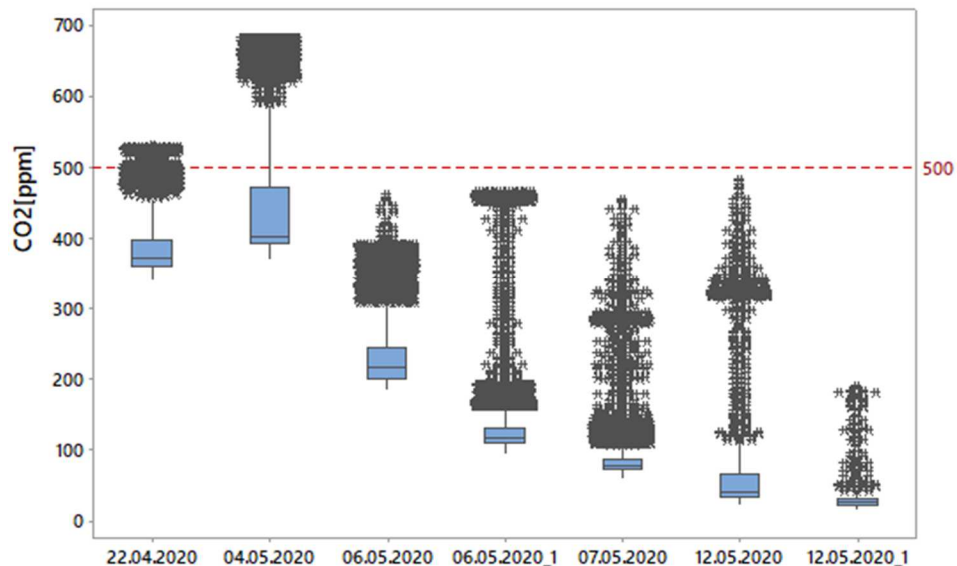
Rys. 23 Zmienność pomiarów CO_2 w czasie dla procesu produkcji powietrza oddechowego: przed 31.02.2020 i po zmianie procesu 12.05.2020 polegającej na modyfikacji złoża filtracyjnego x_6 . Źródło: badania własne.

W warunkach krytycznych prowadzenia prac podwodnych⁵¹ w środowisku atmosferycznym czerpni systemów sprężania i filtracji zanieczyszczonych nadmierną ilością ditlenku węgla pozwala to na zmniejszenie jego zawartości za systemem filtracji nawet do $C_{CO_2} \leq 10ppm$. Zgodnie z dotychczas stosowaną procedurą eksploatacyjną po utracie własności sorpcyjnych cały zestaw wkładów filtrujących powinien zostać poddany wymianie a zużyte elementy zutylizowane tj. jak obserwowano już po $Y_2 = 19,30godz$. Rozkłady zmian koncentracji ditlenku węgla za systemem filtracji po implementacji zmian procesu i modyfikacji wkładu filtracyjnego w czasie przedstawiono na rys.24-25.

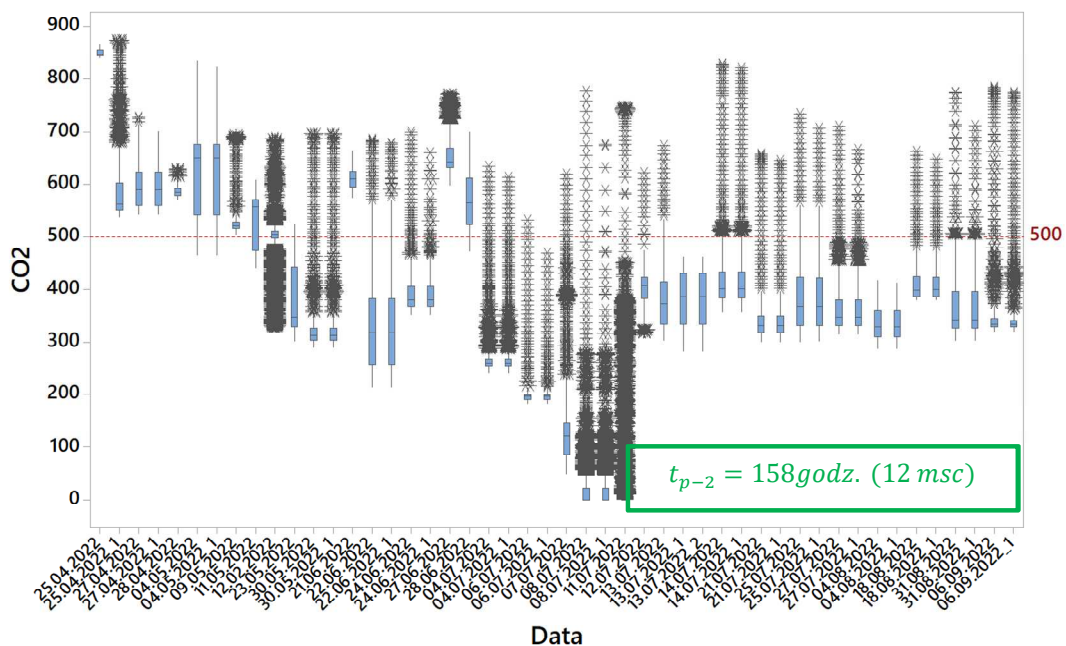


Rys. 24 Zmienność pomiarów CO_2 w czasie dla procesu produkcji powietrza oddechowego po implementacji zmian procesu dla złoża filtracyjnego $ALFA_{01}$. Źródło: badania własne.





Rys. 26 Zmienność pomiarów CO_2 w czasie dla wybranego rozkładu z dnia 06.05.2020 roku po implementacji zmian procesu i modyfikacji złoża filtracyjnego $ALFA_{01}$. Źródło: badania własne.



Rys. 27 Zawartość CO_2 w powietrzu oddechowym za systemem filtracji: S&SWP4341, SECCANT IIIIA, BAUER P140 po implementacji zmian technologii i modyfikacji złoża filtracyjnego x_6 . Czas pracy złoża $Y_2 = 158$ godz. >> 50 godz dla złoża $ALFA_{02}$. Źródło: badania własne.

Na etapie kontroli wszystkie dane w trakcie badań eksploatacyjnych były konsekwentnie monitorowane, rejestrowane i obserwowane. Rozkłady danych empirycznych wykreślono na podstawie indywidualnych serii danych pomiarowych uzyskanych przed i po modyfikacji procesu. Skutki zmian prowadzą do wniosku, że odporność systemu na zmianę warunków środowiskowych uległa istotnej poprawie a racjonalizacja procesu przyniosła oczekiwany skutek. Pomimo wysokiej zawartości ditlenku węgla w powietrzu atmosferycznym (na dolicie do systemu sprężania) wyniki pomiarów kontrolnych potwierdziły minimalną koncentrację zanieczyszczeń CO_2 w partii wyrobu rys. 26. System filtracji powietrza oddechowego a zatem i jego produkt jest dużo mniej wrażliwy na wysoką zawartość CO_2 w substracie⁵². Wysoką jakość powietrza oddechowego po modyfikacji procesu potwierdzają wyniki badań eksploatacyjnych zawartości ditlenku węgla w próbkach kontrolnych uzyskane za pomocą zautomatyzowanego wskaźnikowego systemu pomiarowego do kontroli *online*⁵³ i analitycznych badań laboratoryjnych wykonanych w niezależnym laboratorium fizyko chemicznym gazów oddechowych *WTM1RBlog*, protokół badań nr 118 i 128/2020, tab. 8⁵⁴. W konsekwencji pokonanie ograniczeń środowiskowych i zwiększenie odporności systemu na skutek implementowanych działań w zdefiniowanych obszarach poprawy spowodowało istotną racjonalizację procesu i osiągnięcie zdefiniowanych wymagań *CTQ* tab. 7. W praktyce

efektywny czas aktywnego działania złoża zestawu filtracyjnego pod ciśnieniem $p = 30\text{MPa}$ może się różnić, gdyż zależy m.in.: od masy złoża x_6 , przestrzegania SOP x_5 , zawartości ditlenku węgla w substracie x_1 ⁵⁵ oraz temperatury x_2 ⁵⁶.

Tab. 7

Porównanie obserwowanej zdolności procesu przed i po modyfikacji technologii otrzymywania powietrza oddechowego. Źródło : opracowanie własne.

CTQ	Cel	Zdolność procesu	
		Przed	Po
$Y_1 = C_{CO_2} \leq 500[\text{ppm}]$	$5\% > USL$ $C_p, C_{pk} \geq 1$	$17,74\% > USL$ $C_p, C_{pk} \cong \min[0,86; 0,51]$ $P_p, P_{pk} \cong \min[0,63; 0,37]$	$0\% > USL$ $C_p, C_{pk} \cong \min[56; 19,29]$ $P_p, P_{pk} \cong \min[2,33; 0,80]$
$Y_2 - t_p \geq 3\text{msc.}$ $t_p \geq 50\text{ godz.}$	$10\% < LSL$ $C_p, C_{pk} \geq 1$	$100\% < USL$ $t = 19\text{godz. } 30\text{ min} < 50\text{godz.}$	$100\% > USL$ $t = 123\text{godz. } 30\text{ min} > 50\text{godz.}$

Tab. 8

Wyniki pomiarów badań laboratoryjnych jakości powietrza oddechowego po modyfikacji procesu wg. NO-07-A005:2010. Źródło: opracowanie własne na podstawie protokołów *WTM1RBlog* Nr 118 i 128/2020.

Parametr	Przed	Po modyfikacji
	wg. NO-07-A005:2010 Protokół Nr 118/2020 z dnia 04.05.2020 WP4341 SN112605	wg. NO-07-A005:2010 Protokół Nr 128/2020 z dnia 07.05.20 WP4341 SN112605
$C_{CO_2}[\%]v/v$	0,0327	0,0059
$C_{H_2O}[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$	25,90	20,57
Suma węglowodorów przeliczeniu na CH_4 [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$]	1,06	1,14
$C_{CO}[\text{ppm}]$	0	0
$C_{O_2}[\%]v/v$	20,74	21
$C_{NO_x}[\text{ppm}]$	0,04	0,04

Eliminacji nadmiernej zawartości CO_2 z partii powietrza oddechowego nie towarzyszył wzrost innych normowanych zanieczyszczeń krytycznych powietrza oddechowego.

WNIOSKI

Osiągnięcie celu prac w zakresie redukcji liczby defektów spowodowanych nadmierną zawartością CO_2 w procesie otrzymywania powietrza oddechowego na hiperbaryczne warunki tlenowe zrealizowano poprzez racjonalizację procesu polegającą na implementacji działań korygujących w zidentyfikowanych obszarach poprawy. Minimalizacja wad procesu doprowadziła do uzyskania redukcji nakładów finansowych wynikających z ujawnionych kosztów wewnętrznych i zewnętrznych niskiej jakości przy osiągnięciu adekwatnego wskaźnika zwrotu inwestycji ROI ⁵⁷. Obniżeniu nakładów finansowych wynikających z kosztów niskiej jakości procesów zachodzących w odpowiedzialnych systemach dystrybucji powietrza oddechowego do celów hiperbarycznych towarzyszyła znaczna poprawa zdolności⁵⁸ i stabilności procesu produkcyjnego w czasie oraz redukcja nieplanowych wyłączeń eksploatacyjnych systemów sprężania i filtracji (poprawa wskaźnika OEE)⁵⁹. Korekcja procesu pozwoliła na pokonanie ujawnionych wcześniej barier technologicznych systemów filtracji ze względu na osiągnięcie pułapu ich możliwości. Modyfikacja procesu filtracji, szkolenie operatorów i opracowanie nowych $SOP/OCAP$ ⁶⁰ wraz z implementacją zakwalifikowanych wiarygodnych i użytecznych zautomatyzowanych wskaźnikowych systemów pomiarowych⁶¹ (kontroli jakości *online*) spowodowała osiągnięcie minimalizacji udziału obserwowanych wad procesu do poziomu mniejszego niż zdefiniowany cel korekcji tj. $\bar{Y}_1 = 0 \leq 5\%$ [11,12]. W aktualnych warunkach eksploatacji sterowanie procesem produkcji o dużej zmienności nie jest możliwe bez wykonywania wiarygodnych i użytecznych pomiarów a laboratoryjna kontrola okresowa (co 3÷6msc.) nie może być podstawą do pełnej detekcji i prawidłowego wnioskowania o stanie procesu w okresie między kontrolnym. Uzyskane korzyści potwierdziły pozytywny wpływ działań na spełnienie zdefiniowanych wymagań krytycznych CTQ zarówno w zakresie wymaganej zawartości ditlenku węgla w próbce kontrolnej Y_1 jak i czasu pracy złoża Y_2 . Po modyfikacji procesu osiągnięto względem



pierwotnie obserwowanego czasu przebiecia złoza $Y_2 = 19,30\text{godz} \ll 50 \text{godzin} < \text{LSL}$ znaczne przedłużenie czasu pracy systemów sprężania i filtracji, któremu towarzyszyło utrzymanie zawartości CO_2 w produkcie na wymaganym normatywnie poziomie $C_{\text{CO}_2} < 500\text{ppm}$. Zapewniono tym samym prawie 2,5-krotnie dłuższy czas bezawaryjnej pracy $t_{pr} = 123,30 \text{godz.}$, niż wymagany normatywnie $t_{pr} > 50\text{godz.}$, oraz około 6-krotnie dłuższym niż pierwotnie obserwowany przed racjonalizacją $Y_2 = 19,30\text{godz.} \ll 123,30\text{godz.}$ W trakcie badań po zastosowaniu dalszych modyfikacji złoza czas ten przedłużono do $t_{pr} = 158\text{godz.}$

Uzyskano tym samym wydłużenie czasookresów wymiany wkładów filtracyjnych⁶² nawet tam, gdzie nadmiernych⁶³ zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego ditlenkiem węgla nie można skutecznie wyeliminować. Odporność procesu na zakłócenia spowodowane występowaniem przyczyn specjalnych uległa poprawie.

Wnioski z wykonanej analizy zastosowanego rozwiązania technicznego związanego z modyfikacją technologii wytwarzania *SWOT/TOWS*^{64,65} wskazują na dominację silnych stron względem słabych, które wydają się możliwe do kompensacji w ramach podejścia *MGPP*⁶⁶. W ramach dalszej kontynuacji prac istnieje szansa poszukiwania pola optymalnej odpowiedzi procesu⁶⁷ z zastosowaniem klasycznych metod projektowania eksperymentów. W chwili obecnej uzyskana poprawa i odzyskanie kontroli nad procesem przy realizacji właściwego nadzoru pozwala na otrzymywanie dużych partii powietrza oddechowego do celów hiperbarycznych o wysokiej jakości. Zapewnia to zwiększenie bezpieczeństwa nurkowania i wykonywania prac podwodnych poprzez minimalizację zagrożenia toksykologicznego dla nurków szczególnie w warunkach hiperbarycznych.

BIBLIOGRAFIA

1. Woźniak.A. Qualification of the carbon dioxide measurement system to supervise and improve the process of obtaining breathing gas for hyperbaric oxygen conditions. Polish Hyperbaric Research. 4, 2019, Vol. 69, ISSN:1734-7009, pp. 7-32.
2. —. Use of a carbon dioxide measurement system to control the process of obtaining breathing air for hyperbaric oxygen conditions, POLISH HYPERBARIC RESEARCH. PolHypRes, 2020, Vol.73, Issue 4(73)2020, pp.7-26.
3. NO-07-A005 Diving for military purposes. Breathing mixtures. Classification, requirements and testing. Warszawa : WCNJK, 2020.
4. PN-EN-12021:2014-08 . Breathing equipment Compressed gases for breathing apparatuses. Warszawa : PKN, 2014.
5. Woźniak.A. Use of a carbon dioxide measurement system to control the process of obtaining breathing air for hyperbaric oxygen conditions. Polish Hyperbaric Research. Issue 4(73)2020, PolHypRes 2020, Vol.73, pp.7-26 .
6. Woźniak A. Analysis of the breathing air production process for hyperbaric purposes. Gdynia : PTMiTH, 2017. ISBN 978-83-938-322-4-8.
7. Kłos R. Measuring system reliability assessment. Polish Hyperbaric Research. 2015, Vol. 51, 2. <http://dx.doi.org/10.1515/phr-2015-0009> .
8. Hamrol A. Quality management with examples. Warszawa : PWN, 2011. ISBN 978-830-115-3748.
9. Miller J.Miller J. Statistics and chemometrics in analytical chemistry. Warszawa : PWN, 2016. ISBN 978-83-01-18303-5.
10. Namieśnik J. Konieczka P., Zygmunt B., Bulska E. Evaluation and quality control of analytical measurement results. Warszawa : WNT, 2017. ISBN 978-83-01-19444-4.
11. Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, and General Motors, 2010. Measurement System Analysis Reference Manual. Southfield, Michigan: Automotive Industry Action Group (AIAG)., 2010. Vol. 4th Edition. .
12. PN-EN ISO 10012:2004 Requirements for measurement processes and equipment.
13. Woźniak A. Evaluation of the impact of breathing air contamination on safe performance of hyperbatic exposure. IV. Gdynia : Zeszyty Naukowe AMW, 2016. pp. 101-111. ISSN 0860-889X.
14. Gerber A. Statistical process control - quality improvement with the Statistica package. 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

¹ Katedra Technologii Prac Podwodnych AMW

² Doświadczalny Głębokowodny System Hiperbaryczny

³ tlenek węgla (IV)

⁴ ang. CTQ - Critical to Quality

⁵ $n = 62$ kolejnych rozkładów danych historycznych

⁶ dla pojedynczego rozkładu ujawniono dla kryterium najgorszych okoliczności aż 65,5% wad, gdzie: $P_p, P_{pk} = [0,93; -0,26]_{min} < 1$

⁷ deklaracja producenta $t_p \approx 378$ godzin

⁸ ang. Critical to Quality

⁹ np. z wykorzystaniem podejścia *DFSS* – ang. *Design for Six Sigma*. Metoda projektowania nowego produktu lub/i procesu lub przeprojektowania istniejącego, w przypadku, gdy proces uzyskał pułap swoich możliwości

¹⁰ wskaźniki zdolności procesu: $P_p = 6,92, P_{pk} = -35,18 \gg 1,33$

¹¹ wewnętrznych i zewnętrznych

¹² nadmiarowe

¹³ ang. Robust Design

¹⁴ deklarowana przez wybranych producentów adekwatność doboru systemu filtracji jest właściwa dla granic zawartości ditlenku węgla w powietrzu atmosferycznym na poziomie $C_{\text{CO}_2,a} = 0 \div 500\text{ppm}$

¹⁵ zestawy filtracyjne nie posiadają zdolności eliminacji ditlenku węgla powyżej zawartości $C_{\text{CO}_2,a} > 500\text{ppm}$ i systemów sprężania o wydajności $Q > 1000\text{dm}^3/\text{min}$

¹⁶ ujawnionych w okresowej kontroli laboratoryjnej

¹⁷ ang. Failure Mode and Effect Analysis - szczegółowa część opisowa analizy ryzyka procesu nie będzie tutaj przytaczana

¹⁸ ang. Standard Operational Procedures

¹⁹ ang. Risk Priority Number

²⁰ pomiar w trakcie trwania procesu na etapie wytwarzania partii wyrobu

²¹ z wykorzystaniem metod chromatografii gazowej

²² Warsztaty Techniki Morskiej 1 Rejonowej Bazy Logistycznej w Gdyni

²³ x_1 –stężenie ditlenku węgla CO_2 w powietrzu atmosferycznym na dolicie do sprężarki, x_2 –temperatura powietrza atmosferycznego na dolicie do sprężarki, x_3 –wilgotność względna powietrza atmosferycznego na dolicie do sprężarki, x_4 –czas pracy

²⁴ efekt wynikający z zależność jednego czynnika (parametru) od ustawień innego czynnika (czynnika)

²⁵ które wpływają na proces, ale nie można ich kontrolować, np. zachowanie operatora itp.

- ²⁶ statystyka $C(p)$ Mallows'a jest nieobciążonym estymatorem średniego kwadratu błędu przewidywania w populacji
- ²⁷ spełnienia założeń modelu
- ²⁸ np. brak możliwości nastaw zawartości ditlenku węgla w atmosferze czerpni systemu sprężania
- ²⁹ ang. Design of Experiment
- ³⁰ eksperyment, w którym przeprowadzono doświadczenia dla wszystkich możliwych kombinacjach czynników i ich poziomów zmienności
- ³¹ gdy odpowiedź procesu spełniała wymagania CTQ
- ³² $n = 34$ rozkładów „dobrych” względem $n = 28$ rozkładów „złych”
- ³³ nieparametryczny odpowiednik testu $t - Studenta$ dla prób niezależnych
- ³⁴ alternatywnie można zastosować *Mood's Median Test*
- ³⁵ grupy mogą mieć różne wariancje, które mogą nie zostać wykryte
- ³⁶ statystyczną równość wariancji
- ³⁷ nie jest konieczne, aby serie podlegały rozkładowi normalnemu
- ³⁸ jeżeli nie ma silnej asymetrii dla $n > 15$ danych w każdej grupie to warto rozważyć zastosowanie testu $t - Studenta$ gdyż, jest on mocniejszy od testów nieparametrycznych. Mimo tego, że rozkład wyników zmiennej zależnej w każdej z analizowanych grup nie podlega rozkładowi normalnemu, test ten jest dość odporny na złamanie tego założenia
- ³⁹ mały współczynnik zmienności $CV = RSD \cdot 100\% = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\% = 3,08\% < 10\%$
- ⁴⁰ eksperyment bierny
- ⁴¹ kontrolowanych
- ⁴² nie zawsze jest to możliwe w warunkach eksploatacyjnych
- ⁴³ wkładu filtracyjnego
- ⁴⁴ usystematyzowana metodyką wspierającą projektowanie lub przeprojektowanie nowego lub istniejącego produktu, usługi, procesu. Opracowanie nowego wkładu filtracji i systemu pomiarowego do kontroli *online* parametrów procesu otrzymywania powietrza oddechowego na warunki hiperbaryczne
- ⁴⁵ ang. USL – Upper Specification Limit
- ⁴⁶ obserwowana wartość chwilowa za systemem sprężania
- ⁴⁷ po zmianie *SOP* i względnemu zmniejszeniu zawartości ditlenku węgla w substracie
- ⁴⁸ po implementacji nowego złoza filtracyjnego
- ⁴⁹ szczególnie po modyfikacji procesów sorpcji
- ⁵⁰ $C_p, C_{pk} = \min [56; 19,29]$
- ⁵¹ np. działania ratownicze
- ⁵² w atmosferze czerpni systemu sprężania
- ⁵³ rozwiązanie rekomendowane dla systemów sprężania i filtracji pracujących w ciężkich warunkach eksploatacyjnych
- ⁵⁴ badania wykonano po *9godz 41 min* czasu pracy zmodyfikowanego złoza
- ⁵⁵ w przestrzeniach zamkniętych. np. wymagających właściwej wentylacji
- ⁵⁶ pozostawiono do obserwacji
- ⁵⁷ ang. *ROI* – Return of Investment
- ⁵⁸ $C_p, C_{pk} = \min [56; 19,29]$
- ⁵⁹ ang. *OEE* – Overall Equipment Effectiveness – wskaźnik miary efektywności maszyn i urządzeń. Określa stosunek czasu efektywnego wykorzystania maszyny (rezultat) do czasu potencjalnej dyspozycji (nakład)
- ⁶⁰ ang. *OCAP* – Out of Control Action Plan. – plan korygowania procesu w przypadku wystąpienia niezgodności w celu uzyskania odpowiedniej wydajności
- ⁶¹ urządzenie opracowano w *KTPP AMW* i poddano walidacji w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych nadzorowania procesu produkcji powietrza oddechowego zasilającego system *DGKN - 120*
- ⁶² zmniejszając konieczność nadmiarowej wymiany
- ⁶³ $C_{CO_2a} > 500ppm$
- ⁶⁴ ang. *SWOT* – (Strength – Weaknesses – Opportunities – Threats)
- ⁶⁵ nie będzie tutaj przytaczana, gdyż została odrębnie opisana
- ⁶⁶ ang. *MGPP* – Multi Generation Project Planning
- ⁶⁷ w celu opracowania pierwszego egzemplarza produkcji seryjnej nowego systemu filtracji powietrza oddechowego