



# Oznaczanie prop-2-en-1-olu w powietrzu na stanowiskach pracy<sup>1</sup>

## Determination of prop-2-en-1-ol in workplaces air

DOROTA KONDEJ

<https://orcid.org/0000-0001-9033-1273>

e-mail: [dokon@ciop.pl](mailto:dokon@ciop.pl)

PAWEŁ WASILEWSKI

<https://orcid.org/0000-0001-6735-4207>

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Central Institute for Labour Protection – National Research Institute, Warsaw, Poland

Numer CAS 107-18-6

### Streszczenie

Prop-2-en-1-ol to bezbarwna ciecz o ostrym zapachu przypominającym musztardę. Związek sklasyfikowano jako substancję łatwopalną, o toksyczności ostrej przy działaniu na drogę oddechową, drogę pokarmową oraz skórę, drażniącą na oczy oraz skórę, działającą toksycznie na narządy docelowe przy narażeniu jednorazowym oraz stwarzającą zagrożenie dla środowiska wodnego. Celem badań było opracowanie metody oznaczania prop-2-en-1-olu do oceny narażenia zawodowego w zakresie  $1/10 \div 2$  obowiązującej wartości NDS. Metoda polega na adsorpcji prop-2-en-1-olu na węglu aktywnym, desorpcji roztworem propan-2-olu w disiarczku węgla i analizie chromatograficznej (GC-FID) otrzymanego roztworu. Metoda umożliwia oznaczanie propan-2-en-1-olu w powietrzu w zakresie stężeń  $0,2 \div 4 \text{ mg/m}^3$ . Metoda została poddana walidacji zgodnie z normą PN-EN 482. Zakres tematyczny artykułu obejmuje zagadnienia zdrowia oraz bezpieczeństwa i higieny środowiska pracy będące przedmiotem badań z zakresu nauk o zdrowiu i inżynierii środowiska.

**Słowa kluczowe:** prop-2-en-1-ol, alkohol allilowy, chromatografia gazowa, powietrze na stanowiskach pracy, nauki o zdrowiu, inżynieria środowiska.

### Abstract

Prop-2-en-1-ol is a colorless liquid with a pungent mustard-like odor. The compound is classified as a highly flammable liquid and vapour, toxic if inhaled, swallowed and in contact with skin, causes eye, respiratory and skin irritation, toxic to target organs at a single exposure and hazardous to the aquatic environment. The purpose of the study was to develop a method for the determination of prop-2-en-1-ol for the assessment of occupational exposure in the range of  $1/10-2$  of the MAC value. The method involves adsorption of prop-2-en-1-ol on activated carbon, desorption with a solution of propan-2-ol in carbon disulfide and chromatographic analysis (GC-FID) of the resulting solution. The method allows the determination of prop-2-en-1-ol in air in the concentration range from  $0.2$  to  $4 \text{ mg/m}^3$ . The method has been validated in accordance with EN 482. This article discusses the problems of occupational safety and health, which are covered by health sciences and environmental engineering.

**Keywords:** prop-2-en-1-ol, allyl alcohol, gas chromatography, workplace air, health sciences, environmental engineering.

Adres do korespondencji/Contact details: Dorota Kondej, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, 00-701 Warszawa, ul. Czerniakowska 16, e-mail: [dokon@ciop.pl](mailto:dokon@ciop.pl)

<sup>1</sup> Opracowano i wydano na podstawie wyników VI etapu programu wieloletniego pn. „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy”, finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Projekt nr III.PN.03 pt. „Opracowanie 9 znowelizowanych metod oznaczania szkodliwych substancji chemicznych dla potrzeb oceny środowiska pracy”. Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

## WPROWADZENIE

Prop-2-en-1-ol (numer CAS: 107-18-6) jest to substancja, która w literaturze często występuje jako alkohol allilowy. Jest to klarowna i bezbarwna ciecz o ostrym zapachu przypominającym musztardę. Związek jest bardzo toksyczny. Prop-2-en-1-ol jest lżejszy od wody, a jego pary są cięższe od powietrza. Jest wysoce lotny, łatwopalny i tworzy wybuchowe mieszaniny z powietrzem (GESTIS 2024; ILO 2022; PubChem 2024).

Prop-2-en-1-ol na skalę przemysłową otrzymuje się w wyniku reakcji izomeryzacji tlenu propylenu, uzyskanego poprzez epoksydację propylenu oraz w procesie acetoksylacji propylenu (Żółtański, Tic 2014). Znana jest również metoda jego otrzymywania w wyniku hydrolizy chlorku allilu w temperaturze 150°C pod ciśnieniem 1,3 ÷ 1,4 MPa. Produktami ubocznymi są: eter diallilowy, chloropropeny i propionaldehyd. Aby uzyskać komercyjnie zadowalającą wydajność prop-2-en-1-olu, konieczne jest dokładne wymieszanie chlorku allilu z wodnym roztworem alkalicznym, utrzymując stałą wartość pH. Woda jest usuwana z surowego alkoholu allilowego przez destylację azeotropową z eterem diallilowym (PubChem 2024). Prop-2-en-1-ol można również otrzymać przez katalityczne uwodornienie akroleiny w fazie gazowej. Zastosowanie katalizatorów kadmowo-cynkowych daje wydajność do 70%. Uwodornienie można także przeprowadzić na stopach srebro-kadm na obojętnych nośnikach, takich jak tlenek glinu lub krzemionka, uzyskując taką samą wydajność (PubChem 2024).

Prop-2-en-1-ol jest półproduktem w produkcji polimeryzowalnych eterów i estrów allilowych, zwłaszcza ftalanu diallilu. Większość alkoholu allilowego (produkowanego komercyjnie) jest zużywana do produkcji glicerolu. Stanowi surowiec do przemysłowej produkcji epichlorohydryny. Jest stosowany do produkcji żywic, plastifikatorów i innych chemikaliów organicznych. Był także używany jako wojskowy środek bojowy (PubChem 2024). Stosuje się go jako insektycyd, herbicyd, środek przeciwbakteryjny i fungicyd (PubChem 2024). Alkohol allilowy może być uwalniany do środowiska podczas produkcji lub stosowania jako rozpuszczalnik przemysłowy, jako surowiec/półprodukt w wytwarzaniu

farmaceutyków, polimerów, chemikaliów organicznych, w produkcji glicerolu i akroleiny oraz przy produkcji środków owadobójczych i herbicydów (Sawant i in. 2014).

Prop-2-en-1-ol został zarejestrowany zgodnie z rozporządzeniem REACH i jest produkowany i/lub importowany do Europejskiego Obszaru Gospodarczego w ilości  $\geq 100 \div <1000$  ton rocznie (ECHA 2024). Na koniec sierpnia 2024 r. prop-2-en-1-ol miał w ramach REACH 25 aktywnych rejestracji z następujących państw: Irlandii, Francji, Holandii, Niemiec, Belgii i Włoch (ECHA 2024).

W Unii Europejskiej prop-2-en-1-ol sklasyfikowano jako substancję ciekłą łatwopalną (kat. 2), o toksyczności ostrej przy działaniu na drogę oddechową (kat. 3), drogę pokarmową (kat. 3) oraz skórę (kat. 3), drażniącą na oczy (kat. 2), drażniącą na skórę (kat. 2), działającą toksycznie na narządy docelowe przy narażeniu jednorazowym (kat. 3) oraz stwarzającą zagrożenie dla środowiska wodnego (kat. 1). Substancji tej przypisano następujące zwroty określające rodzaj zagrożenia (Rozporządzenie... 2008):

- H225: Wysoce łatwopalna ciecz i pary
- H331: Działa toksycznie w następstwie wdychania
- H311: Działa toksycznie w kontakcie ze skórą
- H301: Działa toksycznie po połknięciu
- H319: Działa drażniąco na oczy
- H335: Może powodować podrażnienie dróg oddechowych
- H315: Działa drażniąco na skórę
- H400: Działa bardzo toksycznie na organizmy wodne.

Obowiązująca w Polsce wartość najwyższego dopuszczalnego stężenia (NDS) dla prop-2-en-1-olu w powietrzu na stanowiskach pracy wynosi 2 mg/m<sup>3</sup>, natomiast wartość najwyższego dopuszczalnego stężenia chwilowego (NDSch) – 10 mg/m<sup>3</sup> (Rozporządzenie... 2018).

W literaturze światowej do oznaczania prop-2-en-1-olu zgodnie ze wskazaniem National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) oraz Occupational Safety and Health Administration (OSHA) zaleca się stosowanie metod, które polegają na: przepuszczaniu powietrza przez rurkę

zawierającą węgiel aktywny, desorpcji związku roztworem propan-2-olu w disiarczku węgla i analizie tak uzyskanego roztworu z zastosowaniem chromatografu gazowego z detektorem płomieniowo-jonizacyjnym (GC-FID), (NIOSH 1994; 2003; OSHA 2004).

W Polsce do oznaczania zawartości prop-2-en-1-olu w powietrzu na stanowiskach pracy stosowano metodę opisaną w „Pracach Centralnego Instytutu Ochrony Pracy” (Kacpura 1983) oraz przedstawioną w wycofanej już normie PN-Z-04012-01:1983. Metoda polegała na adsorpcji prop-2-en-1-olu na węglu aktywnym, desorpcji związku roztworem propan-2-olu w disiarczku węgla i analizie otrzymanego roztworu metodą chromatografii gazowej (GC-FID). Zgodnie z normą PN-Z-04012-01:1983 najmniejsze stężenie prop-2-en-1-olu, jakie można oznaczyć tą metodą, wynosi  $1 \text{ mg/m}^3$ . Nie spełnia to wymogów zawartych w normie PN-EN 482 odnośnie do oznaczalności metody od 1/10 obowiązującej wartości NDS ( $0,2 \text{ mg/m}^3$ ).

Celem pracy była nowelizacja normy PN-Z-04012-01:1983 w celu umożliwienia oznaczania prop-2-en-1-olu w powietrzu na stanowiskach pracy w zakresie stężeń  $1/10 \div 2$  wartości obowiązującego najwyższego dopuszczalnego stężenia, czyli  $0,2 \div 4 \text{ mg/m}^3$ , zgodnie z wymaganiami dotyczącymi procedur oznaczania czynników chemicznych w powietrzu na stanowiskach pracy zawartymi w normie europejskiej PN-EN 482.

Zakres tematyczny artykułu obejmuje zagadnienia zdrowia oraz bezpieczeństwa i higieny środowiska pracy będące przedmiotem badań z zakresu nauk o zdrowiu oraz inżynierii środowiska.

## WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

### Aparatura

W badaniach zastosowano chromatograf gazowy model HP 6890 z detektorem płomieniowo-jonizacyjnym (FID) oraz z oprogramowaniem HP ChemStation A.06.03 (509), (Agilent Technologies Inc., USA). Do oznaczania substancji zastosowano kolumnę kapilarną STABILWAX GC o długości 60 m i średnicy wewnętrznej 0,32 mm z glikolem polietylenowym, o grubości filmu 0,50  $\mu\text{m}$  (Restek, USA). Do pobierania

próbek powietrza stosowano pompy ssące Gilian LFS-113DC (Sensidyne, USA) o zakresie pracy  $1 \div 350 \text{ ml/min}$  ( $0,06 \div 21 \text{ l/h}$ ). Do przeprowadzenia ekstrakcji analitu z sorbentów stosowano wytrząsarkę mechaniczną WL-2000 (JWElectronic, Polska). Wzorzec odważano na wadze analitycznej Sartorius TE214S (Sartorius Corporation, USA).

### Odczynniki i materiały

W badaniach wykorzystano następujące odczynniki o czystości co najmniej cz.d.a.: alkohol allilowy (Sigma-Aldrich, Niemcy), disiarczek węgla (Honeywell, Wielka Brytania), propan-2-ol (BDH, Anglia), 2,2-dichloropropan (Aldrich-Chemie, Niemcy), 1,1-dichloropropan (Aldrich-Chemie, Niemcy), 1,2-dichloropropan (Riedel-de Haën, Niemcy), epichlorohydryna (Merck-Schuchardt, Niemcy), *N,N*-dimetyloformamid (POCH, Polska). Stosowano również rurki szklane Anasorb CSC wypełnione węglem aktywnym ( $100 \text{ mg}/50 \text{ mg}$ ), (SKC, USA), szkło laboratoryjne oraz strzykawki do cieczy.

### Ustalenie parametrów oznaczania chromatograficznego

W wyniku przeprowadzonych badań ustalono następujące parametry oznaczania chromatograficznego prop-2-en-1-olu:

- kolumna kapilarna STABILWAX GC o długości 60 m, średnicy wewnętrznej 0,32 mm z glikolem polietylenowym i grubości filmu 0,50  $\mu\text{m}$
- temperatura kolumny programowana:
  - temperatura początkowa  $80^\circ\text{C}$  (11 min)
  - przyrost temperatury  $20^\circ\text{C}/\text{min}$
  - temperatura końcowa  $240^\circ\text{C}$  (2 min)
- temperatura dozownika  $200^\circ\text{C}$
- temperatura detektora  $260^\circ\text{C}$
- strumień objętości gazu nośnego (azot)  $25 \text{ ml/min}$
- strumień objętości wodoru  $40 \text{ ml/min}$
- strumień objętości powietrza  $300 \text{ ml/min}$
- stosunek dzielenia próbki 5: 1
- objętość próbki  $2 \mu\text{l}$ .

Sprawdzono, że prop-2-en-1-ol może być oznaczony w ustalonych wyżej warunkach w obecności: propan-2-olu, 2,2-dichloropropanu, 1,1-dichloropropanu, 1,2-dichloropropanu, epichlorohydryny oraz *N,N*-dimetyloformamidu (ryc. 1).

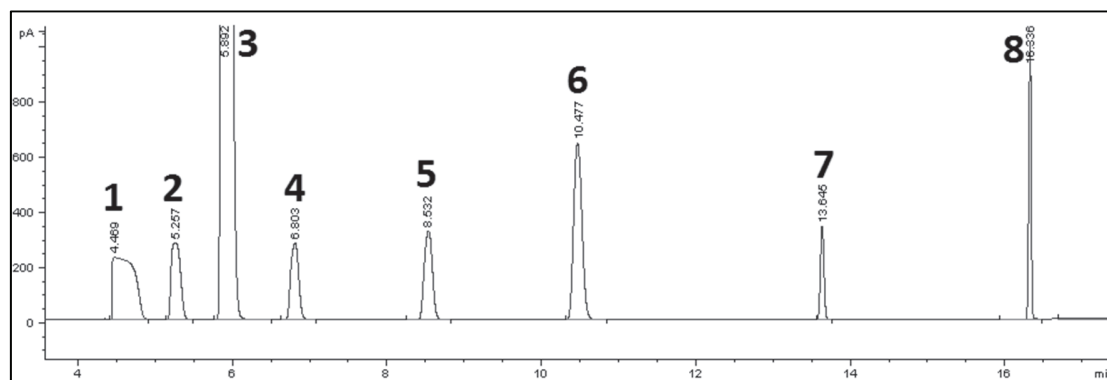
## Pobieranie próbek powietrza

W celu wykonania badań pochłaniania par prop-2-en-1-olu z powietrza zestawiono układ składający się z rurki pochłaniającej zawierającej dwie warstwy (100 mg i 50 mg) węgla aktywnego oddzielone i ograniczone od strony wlotu powietrza włóknem szklanym oraz pompy ssącej o regulowanym i kontrolowanym za pomocą rotametu strumieniu objętości. Do rurek wypełnionych węglem aktywnym wprowadzono za pomocą mikrostrzykawki kolejno po 20  $\mu$ l i 40  $\mu$ l roztworu o stężeniu 0,6 mg/ml. Przez rurki przepuszczano 6 l powietrza ze stałym strumieniem

objętości 2 l/h. Po zakończeniu pochłaniania przeprowadzono desorpcję z dłuższej warstwy węgla (I warstwa) i oddzielnie z krótszej warstwy kontrolnej (II warstwa). Do desorpcji stosowano 0,5 ml roztworu propan-2-olu w disiarczku węgla (5: 95, v/v) jako rozpuszczalnik. Po 30 min desorpcji (z użyciem wytrząsarki) przeprowadzono oznaczanie prop-2-en-1-olu. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 1.

Uzyskane wyniki wskazują, że prop-2-en-1-ol zatrzymuje się w pierwszej warstwie węgla aktywnego. W drugiej zabezpieczającej warstwie węgla nie stwierdzono obecności prop-2-en-1-olu w ilości powyżej 10% w stosunku do warstwy pierwszej.

Przy pobieraniu próbek długookresowych w miejscu pobierania próbek przez rurkę pochłaniającą należy przepuścić do 6 l badanego powietrza ze stałym strumieniem objętości nie większym niż 2 l/h. Przy pobieraniu próbek krótkookresowych (chwilowych) należy pobierać próbkę powietrza



**Rycina 1.** Chromatogram roztworu prop-2-en-1-olu i substancji współwystępujących. GC-FID, kolumna STABILWAX GC  
Objaśnienia: 1) propan-2-ol (4,47 min), 2) 2,2-dichloropropan (5,26 min), 3) disiarczek węgla (5,89 min), 4) 1,1-dichloropropan (6,80 min), 5) 1,2-dichloropropan (8,53 min), 6) prop-2-en-1-ol (10,48 min), 7) epichlorohydryna (13,65 min), 8) *N,N*-dimetyloformamid (16,35 min)

**Figure 1.** Chromatogram of a standard solution of prop-2-en-1-ol and co-occurring substances. GC-FID, STABILWAX GC column  
Explanations: 1) propan-2-ol (4.47 min), 2) 2,2-dichloropropane (5.26 min), 3) carbon disulphide (5.89 min), 4) 1,1-dichloropropane (6.80 min), 5) 1,2-dichloropropane (8.53 min), 6) prop-2-en-1-ol (10.48 min), 7) epichlorohydrin (13.65 min), 8) *N,N*-dimethylformamide (16.35 min)

**Tabela 1.** Wyniki adsorpcji prop-2-en-1-olu na węglu aktywnym. Detektor FID, kolumna STABILWAX GC

**Table 1.** Results of adsorption of prop-2-en-1-ol on activated carbon. FID detector, STABILWAX GC column

Numer rurki	Strumień objętości powietrza, l/h	Czas, h	Przybliżone stężenie substancji, mg/m <sup>3</sup>	Powierzchnia pików prop-2-en-1-olu w roztworach po desorpcji		Zawartość substancji w II warstwie węgla (% ilości oznaczonej w pierwszej warstwie węgla)
				I warstwa	II warstwa	
1a	2	3	2	47,8	0,0	0,0
1b				48,8	1,6	3,3
1c				45,0	0,0	0,0
2a	2	3	4	90,9	3,5	3,9
2b				94,1	5,1	5,4
2c				96,8	6,1	6,3

z takim samym stałym strumieniem objętości, lecz przez 15 min. W ten sposób zostanie pobrane 0,5 l badanego powietrza.

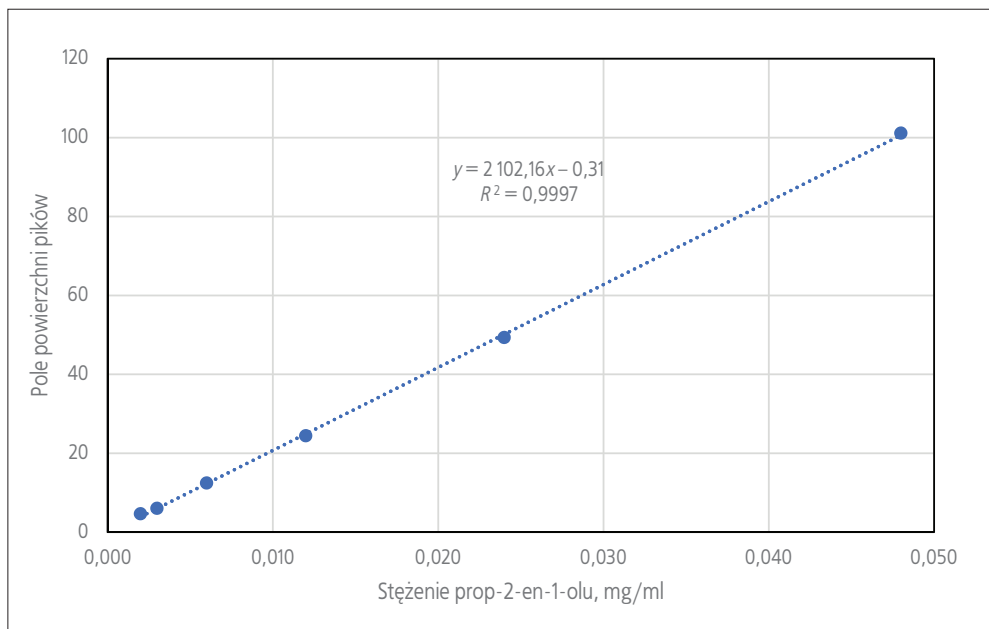
## Kalibracja

Oznaczanie kalibracyjne wykonywano, stosując roztwory wzorcowe prop-2-en-1-olu w rozpuszczalniku (propan-2-ol i disiarczek węgla; 5: 95, v/v). Stężenie tych roztworów ustalono na podstawie następujących założeń:

- zakres pomiarowy 0,2 ÷ 4 mg/m<sup>3</sup>
- objętość powietrza przepuszczonego przez próbnik 6 l
- objętość rozpuszczalnika stosowanego do desorpcji 0,5 ml.

Przygotowano po trzy serie roztworów kalibracyjnych, które poddano analizie chromatograficznej. Do chromatografu wprowadzono po 2 µl roztworów wzorcowych o wzrastających stężeniach w zakresie 2 ÷ 48 µg/ml. Dla każdego stężenia wykonano po dwa oznaczenia. Następnie odczytano powierzchnie pików i sporządzono wykres zależności powierzchni pików prop-2-en-1-olu od jego stężeń w roztworach wzorcowych (ryc. 2). Wyniki oznaczeń kalibracyjnych dla prop-2-en-1-olu przedstawiono w tabeli 2.

Współczynnik nachylenia  $b$  krzywej kalibracji (ryc. 2) o równaniu  $y = bx + a$ , charakteryzujący czułość metody, wynosi 2102,16. Współczynnik korelacji  $r$  charakteryzujący liniowość krzywej wzorcowej wynosi 0,9999.



**Rycina 2.** Wykres zależności powierzchni pików od stężenia prop-2-en-1-olu w roztworach wzorcowych. GC-FID, kolumna STABILWAX GC  
**Figure 2.** Plot of peak area dependence of prop-2-en-1-ol concentration in standard solutions. GC-FID, STABILWAX GC column

**Tabela 2.** Wyniki oznaczeń kalibracyjnych prop-2-en-1-olu

**Table 2.** Results of prop-2-en-1-ol calibration determinations

Stężenie prop-2-en-1-olu, mg/ml	Średnia powierzchnia pików ( $y_{\bar{S}}$ )			Średnia powierzchnia z serii I-III ( $y_{\bar{S}(I-III)}$ )	Odchylenie standardowe, $S$	Współczynnik zmienności, $V$ , %	Współczynnik kalibracji, $b$
	I seria	II seria	III seria				
0,002	4,25	4,75	4,85	4,617	0,321	6,96	2308,50
0,003	5,65	6,15	6,20	6,000	0,304	5,07	2000,00
0,006	11,75	12,70	12,85	12,433	0,597	4,80	2072,17
0,012	23,20	25,15	24,90	24,417	1,061	4,35	2034,75
0,024	46,75	50,60	50,55	49,300	2,209	4,48	2054,17
0,048	97,25	103,30	102,75	101,100	3,346	3,31	2106,25

cd. tab. 2

Stężenie prop-2-en-1-olu, mg/ml	Średnia powierzchnia pików ( $y_{si}$ )			Średnia powierzchnia z serii I-III ( $y_{\text{Śr.I-III}}$ )	Odchylenie standardowe, $S$	Współczynnik zmienności, $V$ , %	Współczynnik kalibracji, $b$
	I seria	II seria	III seria				
Krzywa kalibracji $y = bx + a$	$y = 2023,3x - 0,56$	$y = 2148,17x - 0,24$	$y = 2135,02x - 0,12$	$y = 2102,16x - 0,31$			
Współczynnik korelacji, $r$	0,9998	0,9999	0,9999	0,9999			
Średnia wartość współczynnika kalibracji							2095,97
Odchylenie standardowe współczynnika kalibracji, $S_b$							110,04
Współczynnik zmienności współczynnika kalibracji, $n_{\text{kal}}$ , %							5,25

Krzywa kalibracyjna przy tak dobranych stężeniach ma również zastosowanie do oznaczania próbek chwilowych, dla których NDSCh wynosi  $10 \text{ mg/m}^3$ . Zakres pomiarowy  $0,5 \div 2$  NDSCh odpowiada zakresowi stężeń w roztworach  $2,5 \div 10 \text{ } \mu\text{g/ml}$ .

## Precyzja

W celu oceny precyzji oznaczeń kalibracyjnych przygotowano roztwór podstawowy prop-2-en-1-olu o stężeniu  $0,6 \text{ mg/ml}$ . Wykonano z niego trzy serie po osiem roztworów roboczych przez odmierzenie do kolb miarowych o pojemności  $5 \text{ ml}$  po:  $20 \text{ } \mu\text{l}$  (I seria),  $200 \text{ } \mu\text{l}$  (II seria),  $400 \text{ } \mu\text{l}$  (III seria) roztworu

podstawowego i dopełnienie rozpuszczalnikiem do kreski. W  $1 \text{ ml}$  tak przygotowanych roztworów zawierało się kolejno:  $2 \text{ } \mu\text{g}$ ,  $24 \text{ } \mu\text{g}$  i  $48 \text{ } \mu\text{g}$  prop-2-en-1-olu. Wykonano pomiary chromatograficzne po dwa z każdego roztworu w identycznych warunkach jak przy wykonaniu oznaczeń kalibracyjnych. Na podstawie odczytanych powierzchni pików uzyskanych na chromatogramach obliczono odchylenie standardowe i współczynnik zmienności. Wartości charakteryzujące precyzję oznaczeń kalibracyjnych zestawiono w tabeli 3.

Współczynniki zmienności dla kolejnych poziomów stężenia wynoszą odpowiednio:  $1,90\%$ ;  $2,26\%$ ;  $0,84\%$ .

**Tabela 3.** Precyzja oznaczeń kalibracyjnych prop-2-en-1-olu  
**Table 3.** Precision of prop-2-en-1-ol calibration determinations

Powierzchnia pików wg wskazań analitycznej stacji komputerowej	Średnia z powierzchni	Powierzchnia pików wg wskazań analitycznej stacji komputerowej	Średnia z powierzchni	Powierzchnia pików wg wskazań analitycznej stacji komputerowej	Średnia z powierzchni
roztwór o stężeniu $2 \text{ } \mu\text{g/ml}$		roztwór o stężeniu $24 \text{ } \mu\text{g/ml}$		roztwór o stężeniu $48 \text{ } \mu\text{g/ml}$	
I seria		II seria		III seria	
4,4	4,6	48,5	49,0	102,8	103,3
4,7		49,4		103,8	
4,6	4,6	50,9	50,5	104,5	104,0
4,5		50,1		103,5	
4,5	4,6	51,5	51,7	102,9	103,3
4,6		51,9		103,7	
4,6	4,6	51,4	51,5	101,8	101,7
4,6		51,5		101,6	
4,5	4,6	52,1	52,1	104,4	104,4
4,6		52,1		104,4	
4,6	4,6	51,9	52,0	104,1	104,2
4,6		52,0		104,3	

cd. tab. 3

Powierzchnia pików wg wskazań analitycznej stacji komputerowej	Średnia z powierzchni	Powierzchnia pików wg wskazań analitycznej stacji komputerowej	Średnia z powierzchni	Powierzchnia pików wg wskazań analitycznej stacji komputerowej	Średnia z powierzchni
roztwór o stężeniu 2 µg/ml		roztwór o stężeniu 24 µg/ml		roztwór o stężeniu 48 µg/ml	
I seria		II seria		III seria	
4,8	4,8	52,0	52,0	103,1	103,0
4,7		51,9		102,9	
4,8	4,8	52,8	52,6	103,0	103,0
4,7		52,4		102,9	
Średnia powierzchnia pików	4,6	średnia powierzchnia pików	51,4	średnia powierzchnia pików	103,4
Odchylenie standardowe, <i>S</i>	0,09	odchylenie standardowe, <i>S</i>	1,16	odchylenie standardowe, <i>S</i>	0,87
Współczynnik zmienności, <i>v</i> <sub>1</sub> , %	1,90	współczynnik zmienności, <i>v</i> <sub>2</sub> , %	2,26	współczynnik zmienności, <i>v</i> <sub>3</sub> , %	0,84
Średnia precyzja średni współczynnik zmienności dla zakresu <i>v</i> <sub>zakresu</sub> , %				1,8	
Całkowita precyzja badania średni współczynnik zmienności <i>v</i> <sub>c</sub> , %				5,3	

## Badanie stopnia desorpcji

Badanie stopnia desorpcji prop-2-en-1-olu z węgla aktywnego przeprowadzono w następujący sposób: przygotowano po trzy serie sześciu rurek adsorpcyjnych, do każdej serii rurek nanoszono podczas pobierania próbek powietrza po: 2 µl ; 10 µl; 30 µl roztworu prop-2-en-1-olu o stężeniu 0,6 mg/ml, co odpowiadało kolejno: 1,2 µg; 6,0 µg; 18 µg prop-2-en-1-olu. Przez rurki przepuszczono 6 l powietrza

ze strumieniem objętości 2 l/h. Następnie desorbowano prop-2-en-1-ol z użyciem 0,5 ml rozpuszczalnika (propan-2-ol i disiarczek węgla; 5: 95, v/v). Po 30-minutowym wytrząsaniu uzyskane roztwory oznaczano chromatograficznie. Wykonano także oznaczenie prop-2-en-1-olu w roztworach porównawczych wykonanych w identyczny sposób, ale bez węgla aktywnego. Średni współczynnik desorpcji dla trzech poziomów stężeń wynosił 1,0. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 4.

**Tabela 4.** Wydajność desorpcji prop-2-en-1-olu z węgla aktywnego  
**Table 4.** Desorption efficiency of prop-2-en-1-ol from activated carbon

Numer próbki	Średnia powierzchnia pików z roztworów po desorpcji		Współczynnik desorpcji	Średni współczynnik desorpcji	Średnia powierzchnia pików z roztworów po desorpcji		Współczynnik desorpcji	Średni współczynnik desorpcji	Średnia powierzchnia pików z roztworów po desorpcji		Współczynnik desorpcji	Średni współczynnik desorpcji
	Średnia powierzchnia pików z roztworów porównawczych	Średnia powierzchnia pików z roztworów porównawczych			Średnia powierzchnia pików z roztworów porównawczych	Średnia powierzchnia pików z roztworów porównawczych			Średnia powierzchnia pików z roztworów porównawczych	Średnia powierzchnia pików z roztworów porównawczych		
1,2 µg prop-2-en-1-olu												
6 µg prop-2-en-1-olu												
18 µg prop-2-en-1-olu												
1	5,55	5,55	1,00	1,02	25,40	25,82	0,98	0,96	71,40	69,10	1,04	1,05
2	5,60		1,01		24,65		0,95		75,40		1,09	
3	5,80		1,05		25,45		0,99		74,60		1,08	
4	5,60		1,01		23,75		0,92		71,45		1,03	
5	5,55		1,00		23,96		0,93		71,65		1,04	
6	5,70		1,03		25,75		1,00		71,65		1,04	
Średnia powierzchnia pików			5,6	średnia powierzchnia pików			24,8	średnia powierzchnia pików			36,358	
Odchylenie standardowe, <i>S</i>			0,098	odchylenie standardowe, <i>S</i>			0,840	odchylenie standardowe, <i>S</i>			1,788	
Współczynnik zmienności, <i>v</i> , %			1,74	współczynnik zmienności, <i>v</i> , %			3,38	współczynnik zmienności, <i>v</i> , %			4,92	

## Trwałość próbek i roztworów

Pobrane próbki powietrza oraz roztwory przechowywano w chłodziarce i analizowano po 1, 3 i 7 dniach przechowywania. Wyniki badań przedstawiono w tabelach 5 i 6.

Uzyskane wyniki wskazują, że próbki prop-2-en-1-olu przechowywane w chłodziarce są trwałe przez 1 dzień (tab. 5). Badanie trwałości roztworów prop-2-en-1-olu wykazało, że roztwory przechowywane w chłodziarce są trwałe przez 7 dni (tab. 6).

## Walidacja metody

Walidację metody przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 482. Granicę wykrywalności (LOD) i granicę oznaczalności (LOQ) wyznaczono na podstawie wyników analiz (dziesięć niezależnych pomiarów powierzchni pików o czasie

retencji prop-2-en-1-olu) uzyskanych z trzech niezależnie przygotowanych ślepych prób. Dokładne dane przedstawiono w tabeli 7.

Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano następujące dane walidacyjne:

- zakres pomiarowy  $2 \div 48 \mu\text{g/ml}$   
( $0,2 \div 4 \text{ mg/m}^3$ )  
dla próbki powietrza 6 l
- granica wykrywalności, LOD  $0,022 \mu\text{g/ml}$
- granica oznaczalności, LOQ  $0,065 \mu\text{g/ml}$
- całkowita precyzja badania,  $V_C$   $5,3\%$
- względna niepewność całkowita,  $U_T$   $11,4\%$
- niepewność rozszerzona,  $U$   $22,9\%$ .

**Tabela 5.** Trwałość próbek prop-2-en-1-olu w chłodziarce

**Table 5.** Persistence of prop-2-en-1-ol samples in the refrigerator

Numer próbki	Czas przechowywania, liczba dni	Średnie pola powierzchni pików	Średnia	Zmiana powierzchni pików, %
1	0	23,8	24,17	0,00
2		24,1		
3		24,7		
1	1	22,8	23,00	4,83
2		23,6		
3		22,5		
1	3	21,2	21,93	9,24
2		22,9		
3		21,7		
1	7	22,3	21,77	9,93
2		22,6		
3		21,9		

**Tabela 6.** Trwałość roztworów prop-2-en-1-olu w chłodziarce

**Table 6.** Persistence of prop-2-en-1-ol solutions in the refrigerator

Numer próbki	Czas przechowywania, liczba dni	Średnie pola powierzchni pików	Średnia	Zmiana powierzchni pików, %
1	0	23,8	50,43	0,00
2		24,1		
3		24,7		
1	1	22,8	50,92	0,96
2		23,6		
3		22,6		
1	3	21,2	48,30	4,23
2		22,9		
3		21,7		
1	7	22,3	48,72	3,40
2		22,6		
3		20,4		



**Tabela 7.** Wyznaczenie granicy wykrywalności i oznaczalności prop-2-en-1-olu  
**Table 7.** Determination of the limit of detection and quantification of prop-2-en-1-ol

Ślepe próby		
1	2	3
Odpowiedź detektora wg wskazań analitycznej stacji komputerowej Powierzchnia piku chromatograficznego o czasie retencji prop-2-en-1-olu		
0,054	0,086	0,063
0,085	0,058	0,055
0,097	0,078	0,052
0,084	0,053	0,053
0,071	0,057	0,052
0,052	0,050	0,051
0,087	0,069	0,071
0,051	0,056	0,054
0,053	0,050	0,052
0,052	0,060	0,053
Odchylenie standardowe wyników uzyskanych dla serii próbek ślepych, $S_0$		
0,018	0,012	0,006
Odchylenie standardowe wyników uzyskanych dla serii próbek ślepych, $S_0$		0,014
Równanie krzywej kalibracji: $y = bx + a$		$y = 2102,16x - 0,31$
Współczynnik kierunkowy krzywej kalibracji, $b$		2102,16
Granica wykrywalności LOD, $\mu\text{g}/\text{ml}$		0,022
Granica oznaczalności LOQ, $\mu\text{g}/\text{ml}$		0,065

## PODSUMOWANIE

Metoda oznaczania prop-2-en-1-olu w powietrzu na stanowiskach pracy polega na adsorpcji prop-2-en-1-olu na węglu aktywnym, desorpcji roztworem propan-2-olu w disiarczku węgla i analizie chromatograficznej (GC-FID) otrzymanego roztworu. Zastosowanie do analizy kolumny STABILWAX GC pozwoliło na selektywne oznaczenie prop-2-en-1-olu w obecności: propan-2-olu, 2,2-dichloropropanu, 1,1-dichloropropanu, 1,2-dichloropropanu, epichlorohydryny oraz *N,N*-dimetyloformamidu. Metoda umożliwia oznaczanie prop-2-en-1-olu

w zakresie stężeń  $0,2 \div 4 \text{ mg}/\text{m}^3$ , tj.  $1/10 \div 2$  obowiązującej wartości najwyższego dopuszczalnego stężenia, jak i dla wartości najwyższego dopuszczalnego stężenia chwilowego, dla próbki pobieranej przez 15 min. W tym zakresie stężeń metoda została poddana walidacji zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie PN-EN 482. Wyznaczono takie parametry walidacyjne, jak: granica wykrywalności, granica oznaczalności, całkowita precyzja badania, względna niepewność całkowita i niepewność rozszerzona. Procedurę oznaczania prop-2-en-1-olu w powietrzu na stanowiskach pracy zamieszczono w załączniku.

## PIŚMIENNICTWO

ECHA, European Chemicals Agency (2024). Allyl alcohol, <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.003.156> [dostęp: 21.08.2024].

GESTIS, Substance Database (2024). 2-Propen-1-ol, <https://gestis-database.dguv.de/data?name=024570> [dostęp: 21.08.2024].

ILO, International Labour Organisation (2022). Allyl alcohol, [https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_card\\_id=0095](https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=0095) [dostęp: 21.08.2024].

Kacpura B. (1983). Oznaczanie stężenia alkoholu allilowego w powietrzu metodą chromatografii gazowej. Prace CIOP 117, 111–120.

NIOSH, National Institute for Occupational Safety and Health (1994). Method No. 1402. Alcohols III. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), Fourth Edition.

NIOSH, National Institute for Occupational Safety and Health (2003). Method No. 1405. Alcohols combined. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), Fourth Edition.

OSHA, Occupational Safety and Health Administration (2004). Method No. PV2140. Allyl alcohol. Organic Service Branch I, OSHA Salt Lake Technical Center, Salt Lake City, Utah.

PN-EN 482:2021 Narażenie na stanowiskach pracy – Procedury oznaczania stężenia czynników chemicznych – Podstawowe wymagania dotyczące parametrów procedur.

PN-Z-04012-01:1983 Ochrona czystości powietrza – Badania zawartości alkoholu allilowego – Oznaczanie alkoholu allilowego na stanowiskach pracy metodą chromatografii gazowej z wzbogacaniem próbki.

PubChem (2024). Allyl alcohol. Compound Summary. National Center for Biotechnology Information, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/7858#section=Use-and-Manufacturing> [dostęp: 21.08.2024].

Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU 2018, poz. 1286 ze zm.

Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1272/2008 w sprawie klasyfikacji, oznakowania i pakowania substancji i mieszanin, zmieniające i uchylające dyrektywy 67/548/EWG i 1999/45/WE oraz zmieniające rozporządzenie (WE) nr 1907/2006. Dz. Urz. UE L 353 z 31.12.2008 ze zm.

Sawant S.P., Parihar H.S., Mehendale H.M. (2014). Allyl Alcohol. Encyclopedia of Toxicology. Elsevier Inc. 146–148, <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/allyl-alcohol> [dostęp: 21.08.2024].

Żółtański A., Tic W.J. (2014). Otrzymywanie i zastosowanie alkoholu allilowego w przemysłowej syntezie organicznej. Przemysł chemiczny 11(93), 1937–1941.

## PROCEDURA ANALITYCZNA OZNACZANIA PROP-2-EN-1-OLU W POWIETRZU NA STANOWISKACH PRACY

### 1. Zakres procedury

W niniejszej procedurze podano metodę oznaczania zawartości prop-2-en-1-olu (numer CAS: 107-18-6) w powietrzu na stanowiskach pracy z zastosowaniem chromatografu gazowego z detektorem płomieniowo-jonizacyjnym. Metodę stosuje się podczas kontroli warunków sanitarnohigienicznych.

Najmniejsze stężenie prop-2-en-1-olu, jakie można oznaczyć w warunkach pobierania próbek powietrza i wykonania oznaczania opisanych w procedurze, wynosi  $0,2 \text{ mg/m}^3$  (dla próbki powietrza o objętości 6 l).

### 2. Powołania normatywne

PN-Z-04008-7 Ochrona czystości powietrza – Pobieranie próbek – Zasady pobierania próbek powietrza w środowisku pracy i interpretacji wyników.

### 3. Zasada metody

Metoda polega na adsorpcji zawartego w badanym powietrzu prop-2-en-1-olu na węglu aktywnym, desorpcji roztworem propan-2-olu w disiarczku węgla i analizie chromatograficznej otrzymanego roztworu.

### 4. Postanowienia ogólne

#### 4.1. Dokładność ważenia

O ile nie zaznaczono inaczej, substancje stosowane w analizie należy ważyć z dokładnością do  $0,0002 \text{ g}$ .

#### 4.2. Postępowanie z substancjami niebezpiecznymi

Czynności, podczas których używa się rozpuszczalników organicznych, należy wykonywać z użyciem środków ochrony indywidualnej pod sprawnie działającym wyciągiem laboratoryjnym. Pozostałe po analizie roztwory odczynników i wzorców należy gromadzić w przeznaczonych do tego celu pojemnikach i przekazywać do utylizacji w uprawnionych instytucjach.

### 5. Odczynniki, roztwory i materiały

Podczas analizy, o ile nie zaznaczono inaczej, należy stosować substancje o stopniu czystości co najmniej cz.d.a.

#### 5.1. Prop-2-en-1-ol

#### 5.2. Propan-2-ol

#### 5.3. Disiarczek węgla

#### 5.4. Roztwór propan-2-olu w disiarczku węgla

Stosować roztwór propan-2-olu wg punktu 5.2 w disiarczku węgla wg punktu 5.3 w stosunku objętościowym 5: 95, v/v.

#### 5.5. Roztwór wzorcowy podstawowy prop-2-en-1-olu

Do zważonej kolby miarowej o pojemności 50 ml odmierzyć 35  $\mu\text{l}$  (ok. 30 mg) prop-2-en-1-olu wg punktu 5.1, kolbę zważyć, uzupełnić do kreski roztworem propan-2-olu w disiarczku węgla wg punktu 5.4 i dokładnie wymieszać. Obliczyć dokładne stężenie prop-2-en-1-olu w roztworze. Stężenie prop-2-en-1-olu w tak przygotowanym roztworze wynosi ok.  $0,6 \text{ mg/ml}$ .

Roztwór przechowywany w chłodziarce jest trwały przez 7 dni.

#### 5.6. Roztwory wzorcowe robocze prop-2-en-1-olu

Do sześciu kolb miarowych o pojemności 10 ml odmierzyć kolejno: 40  $\mu\text{l}$ ; 50  $\mu\text{l}$ ; 100  $\mu\text{l}$ ; 200  $\mu\text{l}$ ; 400  $\mu\text{l}$  i 800  $\mu\text{l}$  roztworu wzorcowego podstawowego wg punktu 5.5, uzupełnić do kreski roztworem propan-2-olu w disiarczku węgla wg punktu 5.4 i wymieszać. Zawartość prop-2-en-1-olu w 1 ml tak przygotowanych roztworów wynosi odpowiednio: 0,002 mg; 0,003 mg; 0,005 mg; 0,012 mg; 0,024 mg i 0,048 mg.

Roztwory przechowywane w chłodziarce są trwałe przez 7 dni.

#### 5.7. Gazy sprężone do chromatografu

Azot jako gaz nośny, wodór i powietrze do detektora o czystości wg instrukcji do chromatografu.

## 6. Przyrządy pomiarowe i sprzęt pomocniczy

Stosować typowy sprzęt laboratoryjny oraz następujący:

### 6.1. Chromatograf gazowy

Chromatograf gazowy z detektorem płomienio-jonizacyjnym i dozownikiem umożliwiającym dzielenie próbki.

### 6.2. Kolumna chromatograficzna

Kolumna chromatograficzna umożliwiająca rozdzielanie prop-2-en-1-olu od innych substancji występujących jednocześnie w badanym powietrzu, np. kolumna kapilarna STABILWAX GC o długości 60 m, średnicy wewnętrznej 0,32 mm i grubości filmu 0,5  $\mu\text{m}$ .

### 6.3. Pompa ssąca

Pompa ssąca umożliwiająca pobieranie próbek powietrza ze stałym strumieniem objętości wg rozdziału 7.

### 6.4. Naczynka do desorpcji

Naczynka szklane do desorpcji o pojemności ok. 3 ml z nakrętkami wyposażonymi w zawory i uszczelki silikonowe, co umożliwia pobieranie roztworu bez otwierania naczynek.

### 6.5. Rurki pochłaniające

Gotowe rurki szklane, wypełnione dwiema warstwami węgla aktywnego (100 mg i 50 mg), rozdzielone i ograniczone włóknem szklanym.

### 6.6. Strzykawki do cieczy

Strzykawki do cieczy o pojemności 5  $\mu\text{l}$  ÷ 1 ml.

## 7. Pobieranie próbek powietrza

Próbki powietrza należy pobierać wg normy PN-Z-04008-7. Przy pobieraniu próbek długookresowych w miejscu pobierania próbek przez rurkę pochłaniającą wg punktu 6.5. przepuścić do 6 l badanego powietrza ze stałym strumieniem objętości nie większym niż 2 l/h. Przy pobieraniu próbek krótkookresowych (chwilowych) należy pobierać próbkę powietrza z takim samym stałym strumieniem objętości, lecz przez 15 min. W ten sposób zostanie pobrane 0,5 l badanego powietrza. Pobrane próbki przechowywane w chłodziarce zachowują trwałość przez 1 dzień.

## 8. Warunki pracy chromatografu

Warunki pracy chromatografu należy tak dobrać, aby uzyskać rozdzielanie prop-2-en-1-olu od innych substancji występujących jednocześnie w badanym powietrzu.

W przypadku stosowania kolumny o parametrach wg punktu 6.2 przykładowe warunki wykonania oznaczania są następujące:

- temperatura kolumny programowana:
  - temperatura początkowa 80°C (11 min)
  - przyrost temperatury 20°C/min
  - temperatura końcowa 240°C
- temperatura dozownika 200°C
- temperatura detektora 260°C
- strumień objętości gazu nośnego (azot) 25 ml/min
- strumień objętości wodoru 40 ml/min
- strumień objętości powietrza 300 ml/min
- stosunek dzielenia próbki 5: 1
- objętość próbki 2  $\mu\text{l}$ .

## 9. Sporządzanie krzywej wzorcowej

Do chromatografu wprowadzić po 2  $\mu\text{l}$  roztworów wzorcowych roboczych prop-2-en-1-olu wg punktu 5.6. Z każdego roztworu należy wykonać dwukrotny pomiar. Odczytać powierzchnie pików wg wskazań integratora i obliczyć średnią arytmetyczną. Różnica między wynikami oznaczeń a wartością średnią nie powinna być większa niż 5% wartości średniej. Następnie wykreślić krzywą wzorcową, odkładając na osi odciętych stężenie prop-2-en-1-olu w roztworach wzorcowych, w miligramach na mililitr, a na osi rzędnych – odpowiadające mu średnie pole powierzchni pików.

## 10. Wykonanie oznaczania

Po pobraniu próbki powietrza przesypać oddzielnie każdą warstwę węgla aktywnego z rurki pochłaniającej wg punktu 6.5 do naczynek do desorpcji wg punktu 6.4. Następnie dodać strzykawką wg punktu 6.6 po 0,5 ml roztworu propan-2-olu w disiarczku węgla wg punktu 5.4, naczynka szczelnie zamknąć i wytrząsać 30 min na wytrząsarce. Następnie pobrać po 2  $\mu\text{l}$  roztworu znad dłuższej warstwy węgla aktywnego i badać chromatograficznie w warunkach określonych w rozdziale 8. Z każdego roztworu

należy wykonać dwukrotny pomiar. Odczytać z uzyskanych chromatogramów powierzchnie pików prop-2-en-1-olu wg wskazań integratora i obliczyć średnią arytmetyczną. Różnica między wynikami a wartością średnią nie powinna być większa niż 5% wartości średniej. Z krzywej wzorcowej odczytać stężenie prop-2-en-1-olu w badanym roztworze, w miligramach na mililitr.

W taki sam sposób wykonać oznaczanie prop-2-en-1-olu w roztworze z nad krótszej warstwy węgla aktywnego. Zawartość prop-2-en-1-olu oznaczona w krótszej warstwie węgla aktywnego nie powinna przekraczać 10% zawartości oznaczonej w dłuższej warstwie węgla. W przeciwnym razie wynik należy traktować jako orientacyjny.

### 11. Wyznaczanie współczynnika desorpcji

Do sześciu naczynek do desorpcji wg punktu 6.4 przesypać węgiel aktywny z dłuższej (100 mg) warstwy z rurek pochłaniających wg punktu 6.5. Następnie dodać po 10  $\mu$ l roztworu wg punktu 5.5. W siódmym naczynku przygotować roztwór kontrolny zawierający tylko 100 mg węgla aktywnego. Naczynka szczelnie zamknąć i pozostawić do następnego dnia. Następnie dodać strzykawką wg punktu 6.6 po 0,5 ml roztworu propan-2-olu w disiarczku węgla wg punktu 5.4. Naczynka ponownie zamknąć i przeprowadzić desorpcję (poprzez wytrząsanie) w ciągu 30 min na wytrząsarce. Jednocześnie wykonać oznaczanie prop-2-en-1-olu co najmniej w trzech roztworach porównawczych przygotowanych przez dodanie do 0,5 ml roztworu propan-2-olu w disiarczku węgla wg punktu 5.4 po 10  $\mu$ l roztworu wg punktu 5.5. Tak uzyskane roztwory badać chromatograficznie w warunkach określonych w rozdziale 8.

Współczynnik desorpcji prop-2-en-1-olu ( $d$ ) obliczyć na podstawie wzoru:

$$d = \frac{P_d - P_o}{P_p}$$

w którym:

- $P_d$  – średnia powierzchnia pików prop-2-en-1-olu na chromatogramach roztworów po desorpcji,
- $P_o$  – średnia powierzchnia pików o czasie retencji prop-2-en-1-olu na chromatogramach roztworu kontrolnego,
- $P_p$  – średnia powierzchnia pików prop-2-en-1-olu na chromatogramach roztworów porównawczych.

Następnie obliczyć średnią wartość współczynnika desorpcji prop-2-en-1-olu ( $\bar{d}$ ) jako średnią arytmetyczną otrzymanych wartości ( $d$ ).

Współczynnik desorpcji należy wyznaczać dla każdej nowej partii rurek pochłaniających wg punktu 6.5.

### 12. Obliczanie wyniku oznaczania

Stężenie prop-2-en-1-olu ( $X$ ) w badanym powietrzu obliczyć, w miligramach na metr sześcienny, na podstawie wzoru:

$$X = \frac{(m_1 + m_2)}{V \cdot \bar{d}} \cdot 1000$$

w którym:

- $m_1$  – masa prop-2-en-1-olu w roztworze z nad dłuższej warstwy węgla aktywnego, odczytana z krzywej wzorcowej, w miligramach,
- $m_2$  – masa prop-2-en-1-olu w roztworze z nad krótszej warstwy węgla aktywnego, odczytana z krzywej wzorcowej, w miligramach,
- $V$  – objętość powietrza przepuszczonego przez rurkę pochłaniającą, w litrach,
- $\bar{d}$  – średnia wartość współczynnika desorpcji wyznaczona wg rozdziału 11.

