

# Rozpływ biogazu w składowisku odpadów komunalnych, symulacja migracji biogazu w systemie *VentGraph*

WACŁAW DZIURZYŃSKI , ANDRZEJ KRACH , TERESA PAŁKA ,  
PRZEMYSŁAW SKOTNICZNY 

*Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków*

## Streszczenie

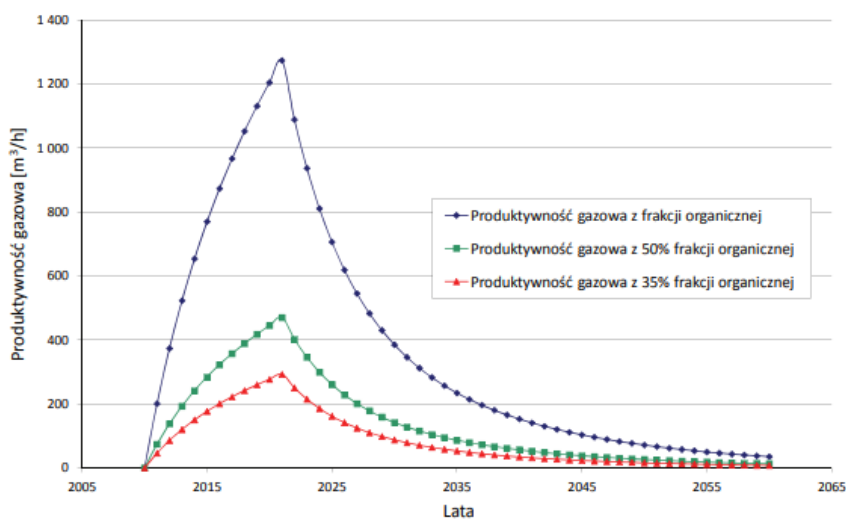
Aktualna polityka energetyczna EU dała asumpt do podjęcie próby zastosowania metod symulacji przepływów gazu i powietrza w ośrodku porowatym jakim jest składowisko odpadów komunalnych. Takie składowisko zawiera materiał organiczny, który ulega rozkładowi połączonemu z wydzielaniem metanu i dwutlenku węgla. Celem obliczeń na modelu numerycznym jest zbadanie efektywności i stabilności ujęcia metanu w zależności od lokalizacji i liczby otworów drenażowych i wartości parametrów pracy ssawy. W artykule przedstawiono opracowany model numeryczny składowiska odpadów komunalnych „X” położonego na terenie jednej z gmin województwa małopolskiego. Zapoznano się z dokumentacją projektową składowiska co pozwoliło na zaprojektowanie modelu numerycznego w systemie *VentGraph*. Do modelu przyjęto układ trzech poziomych warstw ośrodka porowatego, każda warstwa jest połączona elementami pionowymi między sobą, ponadto do modelu wprowadzono otwory drenażowe i rurociągi reprezentowane przez aproksymację przepływu 1D, podłączone do jednej ssawy wymuszającej przepływ mieszaniny w składowisku. Przyjęto rozkłady przepuszczalności dla każdej warstwy oraz wyznaczono opory otworów drenażowych. Założono na obrzeżu i wierzchołku składowiska dopływy powietrza, a do składowiska przyjęto równomierny dopływ metanu i dwutlenku węgla odpowiadający produkcji tych gazów w wyniku beztlenowej fermentacji organicznego materiału składowanego. Opracowany model numeryczny poddano intensywnemu testowaniu, w wyniku którego możliwe jest prowadzenie obliczeń z równoczesnym śledzeniem rozwiązania. Wykonano obliczenia przepływu mieszaniny powietrza i gazów w składowisku i w rurociągu drenażowym. Wyniki pokazano w postaci graficznej.

**Słowa kluczowe:** składowisko odpadów; biogaz; modelowanie migracji gazów; system *VentGraph*

## 1. Wprowadzenie

Prognozowanie przepływu powietrza i gazów takich jak metan, dwutlenek węgla, tlen i azot w złożonych strukturach przewodów i ośrodka porowatym za pomocą komputerowych programów symulacyjnych staje się skuteczną metodą badań, a uzyskiwane dobre wyniki w tym zakresie (Dziurzyński W., Pałka T., Krach A., 2022) pozwalają na pogłębienie stanu wiedzy oraz poprawę bezpieczeństwa i efektywności badania zjawisk przepływowych. W przemyśle górnym z powodzeniem stosuje się metodę prognozowania przepływów mieszaniny gazów w wyrobiskach, zrobach czy rurociągu odmetanowania (Dziurzyński W., Pałka T., Krach A., 2009). W Pracowni Wentylacji Kopalń IMG PAN opracowano system programów symulacyjnych *VentGraph*, który umożliwia analizę zjawisk przepływowych (Dziurzyński W., Pałka T., Krach A. 2021) z równoczesnym wyznaczeniem rozkładów metanu, dwutlenku węgla i tlenu w ośrodku porowatym. Ciekawym zagadnieniem jest podjęcie próby zastosowania programu *VentGraph* do symulacji przepływów gazu i powietrza w ośrodku porowatym jakim jest składowisko odpadów komunalnych. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 26 grudnia 2016 r. (poz.19 z dnia 4 stycznia 2017r.) wprowadza obowiązkową selektywną zbiórkę odpadów ulegających biodegradacji, ze szczególnym uwzględnieniem bioodpadów. Prowadzi to do rozwoju wielu składowisk odpadów komunalnych (Rosik-Dulewska Cz., 2006; Dudek J., Zaleska-Bartosz J., 2010), gdzie w wyniku fermentacji związków pochodzenia organicznego powstaje biogaz. Biogaz składa

się z metanu (od 30 do 70%), dwutlenku węgla (od 10 do 60%) oraz małej ilości składników takich jak azot, wodór, para wodna. Z uwagi na znaczne wymiary składowiska produktywność gazu składowiskowego jest znaczna i według badań autora (Dudek J., 2013) w okresie czasu 2010 do 2055 może wynosić od 290 do 1275 Nm<sup>3</sup>/h, a rozkład produktywności składowiska w latach obrazuje rysunek 1.



Rys. 1. Produktywność składowiska w latach 2005 do 2055

Ze względu na wysoką zawartość metanu w składowisku, prowadzi się jego drenaż przy pomocy sieci połączonych otworów celem odprowadzenia zgromadzonego metanu oraz jego późniejszej utylizacji, na wielu składowiskach zainstalowane są silniki cieplne wraz z generatorami prądu (Zaleska-Bartosz J., 2014), często gaz jest spalany w pochodni (Fot. 2). Według danych podanych w literaturze (Zaleska-Bartosz J., 2014), w 2012 r. czynnych było 430 składowisk odpadów, przy czym 244 nie były wyposażone w instalacje do odgazowania, co najczęściej skutkuje niekontrolowaną emisją biogazu z bryły składowiska (Fot. 1), a w 144 składowiskach gaz był spalany bez odzysku energii. W tym okresie czasu działały w kraju 104 instalacje produkujące energię elektryczną z biogazu składowiskowego.



Fot. 1. Wydzielanie metanu na powierzchni składowiska

## 2. Cel i zakres badań

W celu poznania procesu odgazowania składowiska odpadów komunalnych założono możliwość adaptacji modelu matematycznego stosowanego w programie *VentGraph* dostosowanego do warunków

składowiska, a następnie zbudowania modelu numerycznego składowiska odpadów jako ośrodka porowatego, w którym zlokalizowane są otwory drenażowe dla pozyskania metanu (biogazu). Połączenie modelu matematycznego przepływu mieszaniny powietrza i metanu w składowisku oraz w otworach drenażowych połączonych z rurociągiem odbierającym ujęty gaz, pozwoli na rozważenie zagadnień związanych z regulacją w układzie składowisko – otwory drenażowe – rurociąg – kompresor (ssawa) z uwzględnieniem otoczenia składowiska. Celem takich obliczeń jest zbadanie efektywności i stabilności ujęcia metanu w zależności od: lokalizacji i liczby otworów drenażowych, wartości parametrów pracy ssawy i zapewnienia stabilizacji parametrów pobieranego metanu z systemu drenażowego. Opracowanie takiego modelu numerycznego umożliwi przeprowadzenie wielowariantowych symulacji komputerowych prognozy ujęcia metanu z wybranego składowiska.

### 3. Model matematyczny przepływu mieszaniny gazów w układzie składowisko odpadów i rurociąg drenażowy

Aktywne zwalczanie zagrożenia metanowego na drodze wprowadzania nowych technologii związanych z intensyfikacją ujęcia metanu i dwutlenku węgla z składowisk odpadów organicznych wymaga poszukiwania nowych rozwiązań pozwalających na lepsze poznanie procesu ujęcia gazu, a zwłaszcza poprawy jego efektywności. Znane są metody prognozowania procesu przewietrzania wyrobisk górniczych z uwzględnieniem odmetanowania pokładów węgla, co prowadzi do poprawy efektywności procesu ujęcia metanu. W tym zakresie pomocne są badania teoretyczne oraz eksperymentalne, które dostarczają wiele cennych informacji przydatnych dla rozwijania tych metod. Teoretyczne i eksperymentalne badania współpracy otworów i wiązek otworów drenażowych w połączeniu z regulacją sieci odmetanowania pozwoliło na poprawę efektywności odmetanowania. Metody komputerowej symulacji zjawisk zastosowane do rozwiązania omawianego zagadnienia wnoszą skuteczne narzędzie do dalszego rozwoju wiedzy i przyczyniają się do obniżenia zagrożenia metanowego w kopalniach węgla. Wykorzystując zdobytą w powyższym zakresie wiedzę podjęto próbę adaptacji uzyskanych rozwiązań do opisu migracji powietrza i gazów w składowisku odpadów komunalnych.

#### 3.1. Przepływ powietrza i gazów w składowisku i rurociągu drenażowym

Opracowany w IMG PAN program komputerowy *VentGraph* do prognozowania rozptyłu mieszaniny powietrza gazów w kopalnianej sieci wentylacyjnej ze zrobami opiera się na założeniu, że zmiany prędkości powietrza w wyrobiskach zachodzą na tyle wolno, że można pominąć siły bezwładności i obliczać rozptył powietrza w sieci wyrobisk rozwiązując układ równań opisujących przepływ powietrza w elementach tworzących sieć kopalni w stanie ustalonym (Dziurzyński, 1998). Uważamy za możliwe adaptację programu *VentGraph* w celu rozpatrywania wielu scenariuszy przepływu mieszaniny powietrza i gazów generowanych w składowisku odpadów komunalnych. Opracowany program *VentGraph* (Dziurzyński i in., 2021) uwzględnia szerokie spektrum zjawisk, które dobrze oddają warunki przyprływu w składowisku. W dalszym ciągu, dla opisu migracji powietrza i gazów w składowisku przyjmujemy założenia:

- przepływ mieszaniny powietrza i gazów w składowisku, przybliży się przepływem płynu nieściśliwego zgodnym z liniowym prawem Darcy z dopływem gazów,
- składowisko stanowi obszar o znanych wymiarach geometrycznych i kotach niwelacyjnych, zakłada się przybliżenie przepływu gazów w składowisku przez przepływ w przestrzennej sieci wzajemnie prostopadłych odcinków o oporach przepływu obliczonych z równania Darcy.
- dopływ powietrza do składowiska przybliży się jednowymiarowym liniowym przepływem powietrza przez warstwę uszczelniającą powierzchnię składowiska,
- w składowisku zlokalizowane są otwory drenażowe połączone rurociągiem podpiętym do ssawy wytwarzającej podciśnienie,
- zmiana warunków przepływu mieszaniny, poprzez zmianę przepuszczalności składowiska i jego wpływ na przepływ w otworach i rurociągu drenażowym:
  - regulacja zaworami umieszczonych w rurociągu drenażowym,
  - doszczelnianie, rozszczelnianie składowiska,
  - zatrzymanie ujęcia gazów ze składowiska,

- wpływ dopływu wybranego gazu, jak metan, azot lub dwutlenek węgla na rozkład stężenia mieszaniny gazów w elementach składowiska.

Uwzględnienie wymienionych zjawisk w jednym symulacyjnym programie komputerowym, przy obecnym rozwoju sprzętu i narzędzi programowania, jest w większości przypadków możliwe. Komputerowy program *VentGraph* prognozowania rozptyłu mieszaniny gazów w kopalnianej sieci wentylacyjnej opiera się na założeniu, że zmiany prędkości powietrza w wyrobiskach zachodzą na tyle wolno, że można pominąć siły bezwładności i obliczać rozptył powietrza w elementach sieci rozwiązując układ równań opisujących przepływ powietrza w bocznicach sieci w stanie ustalonym (Dziurzyński W., 1998). Następnie oblicza się rozkład stężenia metanu w bocznicach sieci wentylacyjnej i elementach ośrodka porowatego, jakim jest obszar zrobów, z równań transportu masy i bilansu masy w węzłach sieci, przy założeniu, że dopływ gazu jest skupiony w węzłach sieci.

Dla modelowania migracji gazów w składowisku przyjmujemy model o stałych skupionych dla ośrodka porowatego. Składowisko odpadów komunalnych stanowi bryłę geometryczną, w której przepływ gazów odbywa się w trzech kierunkach  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Przepływ powietrza i metanu w ośrodku porowatym, traktowany jako filtracyjny przepływ płynu nieściśliwego z dopływem np. metanu i dwutlenku węgla do składowiska można opisać równaniem Darcy'ego.

$$\bar{v} = -\frac{k}{\mu} \nabla(p - \rho g z) \quad (1)$$

gdzie:

- $\bar{v}$  – wektor prędkości przepływu powietrza, [m/s]
- $k$  – przepuszczalność składowiska, [m<sup>2</sup>]
- $\mu$  – lepkość dynamiczna biogazu [kg/(m·s)].

Przyjęto, że wielkości charakteryzujące składowisko są zależne od położenia w składowisku:

- $m(x, y, z)$  – porowatość,
- $k(x, y, z)$  – przepuszczalność,
- $z(x, y, z)$  – wysokości niwelacyjna składowiska

gdzie:  $x$ ,  $y$ ,  $z$  osie prostokątnego układu współrzędnych [m].

Składowe wektora prędkości dane są w postaci:

$$v_x = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial}{\partial x}(p - \rho g z) \quad v_y = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial}{\partial y}(p - \rho g z) \quad v_z = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial}{\partial z}(p - \rho g z) \quad (2)$$

Przyjmując, że warstwy składowiska są poziome, to mamy:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = 0 \quad \text{i} \quad \frac{\partial z}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Przechodząc na różnice skończone otrzymuje się

$$v_x = -\frac{k}{\mu} \frac{(p_{x2} - p_{x1})}{\Delta x} \quad v_y = -\frac{k}{\mu} \frac{(p_{y2} - p_{y1})}{\Delta y} \quad v_z = -\frac{k}{\mu} \frac{(p_{z2} - p_{z1}) - \rho g (z_2 - z_1)}{\Delta z} \quad (4)$$

Uwzględniając związek między prędkością płynu  $v$  i strumieniem masy  $Q_V$

$$v = \frac{Q_V}{A} \quad (5)$$

$A$  – pole przekroju odcinka elementu składowiska

Objętość ośrodka porowatego składowiska dzieli się na elementarne objętości i otrzymuje się wzory na strumień objętości gazu przepływającego przez element o objętości  $\Delta x \Delta y \Delta z$  w kierunkach  $x$ ,  $y$  i  $z$ , przepływ przez te elementy opisuje się prawem Darcy'ego w postaci:

$$\begin{aligned}
 Q_{xi} &= -\frac{k_i \Delta y_i \Delta z_i}{\mu_i \Delta x_i} (p_{i,x+\Delta x} - p_{i,x}) \\
 Q_{yi} &= -\frac{k_i \Delta x_i \Delta z_i}{\mu_i \Delta y_i} (p_{i,y+\Delta y} - p_{i,y}) \\
 Q_{zi} &= -\frac{k_i \Delta x_i \Delta y_i}{\mu_i \Delta z_i} [(p_{i,z+\Delta z} - p_{i,z}) - \rho g (z_{i,z+\Delta z} - z_{i,z})]
 \end{aligned} \tag{6}$$

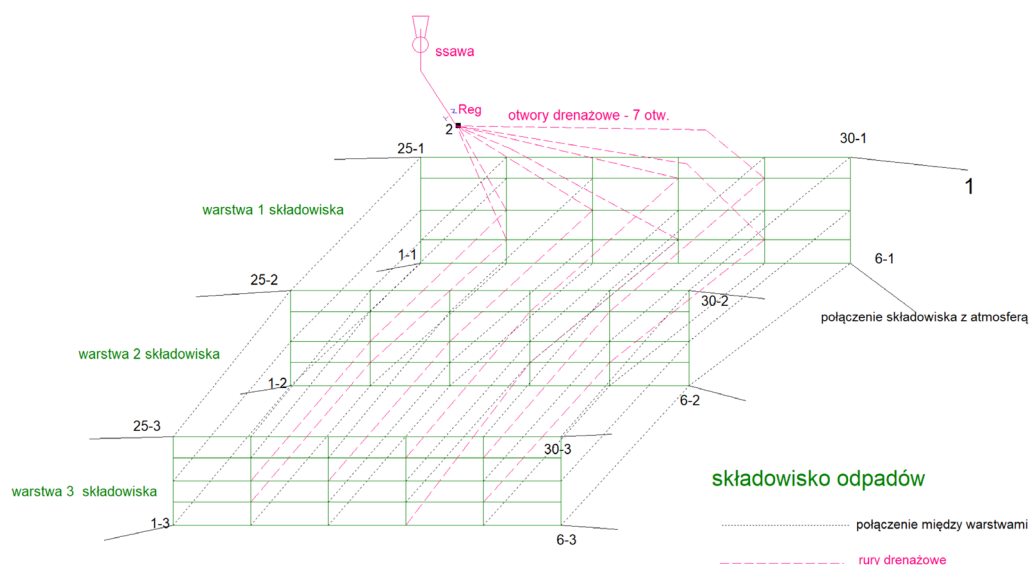
gdzie:  $Q_{xi}$ ,  $Q_{yi}$ ,  $Q_{zi}$  – strumienie objętości przepływające przez element  $i$  objętości w każdym elemencie składowiska, odpowiednio w kierunku osi  $x$ , osi  $y$  i osi  $z$ .

Z zależności 6 wynikają wzory na opór elementu składowiska w kierunkach  $x$ ,  $y$ ,  $z$ :

$$R_{xi} = \frac{\mu_i \Delta x_i}{k_i \Delta y_i \Delta z_i}; \quad R_{yi} = \frac{\mu_i \Delta y_i}{k_i \Delta x_i \Delta z_i}; \quad R_{zi} = \frac{\mu_i \Delta z_i}{k_i \Delta x_i \Delta y_i} \tag{7}$$

gdzie:  $R_{xi}$ ,  $R_{yi}$ ,  $R_{zi}$  – opory  $i$  elemencie składowiska, odpowiednio w kierunku osi  $x$ , osi  $y$  i osi  $z$ .

Do składowiska dopływa powietrze i przyjmuje się filtracyjny dopływ powietrza (6) do składowiska przez powierzchnie boczne i wierzchowinę. Brzegi składowiska są dodatkowo uszczelnione i przepuszczalność brzegu jest znacznie mniejsza od przepuszczalności wewnątrz składowiska. Stąd można przedstawić składowisko jako sieć wzajemnie prostopadłych elementów, tak jak pokazano na rysunku 2.



**Rys. 2.** Schemat elementów i warstw składowiska, linia przerywana rury drenażowe, linie kropkowane połączenia pionowe, linie ciągłe elementy poziome składowiska

Lepkość dynamiczna  $\mu_i$  mieszaniny powietrza i metanu, występująca w wzorach (6) głównie zależy od stężenia metanu i można ją obliczyć z wystarczającą dokładnością ze wzoru:

$$\mu = \mu_p (1 - a C_V), \quad a = \frac{\mu_p - \mu_m}{\mu_p} = 0,42 \tag{8}$$

gdzie:

- $\mu_p, \mu_m$  – lepkość mieszaniny powietrza i biogazu (metan i dwutlenek węgla),
- $\mu_p$  – lepkość powietrza w temperaturze 20°C,  $\mu_p = 15,1 \cdot 10^{-6}$  kg/(m·s)
- $C_V$  – udział objętościowy biogazu w mieszaninie.

Podsumowując, obszar składowiska zastąpiony został strukturą sieciową składającą się z wzajemnie prostopadłych zastępczych elementów (bocznica) składowiska (6) oraz elementu stanowiącego dopływ

powietrza z otoczenia. Dla zastępczej bocznicy oblicza się opór aerodynamiczny dla przepływu liniowego (7), który zależy od przepuszczalności, lepkości dynamicznej oraz wymiarów geometrycznych.

Przepływ mieszaniny powietrza i gazów przez otwory drenażowe zlokalizowane w studniach zwałowiska i rurociąg podpięty do ssawy reprezentowany jest przez aproksymację przepływu 1D. Przyjęto, że opór dopływu do rury drenażowej jest mały w stosunku do oporu przepływu w składowisku. Całkowity strumień masy mieszaniny jest sumą strumienia masy metanu i dwutlenku węgla i strumienia masy powietrza.

$$Q_M = Q_{Mm} + Q_{Mp} \quad (9)$$

gdzie:

$Q_{Mm}$  – strumień masy generowanego w składowisku metanu i dwutlenku węgla,

$Q_{Mp}$  – strumień masy powietrza.

Z powyższych wzorów można obliczyć udział masowy metanu i dwutlenku węgla w mieszaninie wypływającej z wiązki otworów drenażowych. Przyjmując, że w gazie generowanym w składowisku udział masowy metanu i dwutlenku węgla jest równy 1, mamy:

$$C_{Mm} = \frac{Q_{Mm} + C_{Mp}Q_{Mp}}{Q_{Mm} + Q_{Mp}} \quad (10)$$

Przepływ mieszaniny powietrza, metanu i dwutlenku węgla w rurociągu ujęcia gazu na składowisku wywołany jest różnicą ciśnień, konieczną dla pokonania oporów tarcia przepływu płynu przez przewód rurowy i wyraża się wzorem

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho}{2} v^2 \quad (11)$$

gdzie

$\lambda$  – bezwymiarowy współczynnik oporu

$l$  – długość rury,

$d$  – średnica rury,

$\rho$  – gęstość płynu,

$v$  – średnia prędkość płynu.

Wartość współczynnika oporu  $\lambda$  zależy od charakteru przepływu. Dla przepływu laminarnego (liczba Reynoldsa  $Re < 2320$ ) współczynnik oporu wyraża się wzorem

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (12)$$

Liczba Reynoldsa  $Re$  jest równa

$$Re = \frac{vd}{\eta} \quad (13)$$

$$\eta = \frac{\mu}{\rho} \quad (14)$$

gdzie  $\eta$  – lepkość kinematyczna płynu [ $m^2/s$ ].

Podstawiając wzory (12), (13) i (14) do zależności (11) otrzymuje się

$$\Delta p = 32\mu \frac{l}{d^2} v = 128 \frac{\mu l}{\pi d^4} Q_V = 128 \frac{\eta l}{\pi d^4} Q_M \quad (15)$$

gdzie:

$\mu$  – lepkość dynamiczna, [ $kg/ms$ ]

$Q_V$  – strumień objętości płynu,

$Q_M$  – strumień masy płynu.

Opór aerodynamiczny dla strumienia objętości płynu odcinka rury drenażowej o długości  $l$  obliczony zależności (15) jest równy:

$$R = \frac{\Delta p}{Q_V} = 128 \frac{\mu l}{\pi d^4} \quad (16)$$

Migracja mieszaniny powietrza metanu i dwutlenku węgla w składowisku odpadów oraz rurociągu drenażowym odbywa się pod wpływem ciśnienia atmosferycznego, podciśnienia wytwarzanego przez ssawę oraz ciśnienia jakie wywiera dopływ metanu i dwutlenku węgla. W sieci elementów składowiska znajdującej się w stanie ustalonym każda zmiana zachodząca czy to w oporach sieci, czy dodatkowym dopływie metanu lub dwutlenku węgla podczas rozkładu odpadów, powoduje powstanie stanu nieustalonego rozptywu powietrza i dopływających gazów.

W obliczeniach stanów nieustalonych w programie *VentGraph* przyjęto, wykorzystując fakt, że w wentylacyjnej sieci kopalnianej czas ustalania się rozptywu powietrza po zakłóceniu jest znacznie mniejszy niż czas ustalania się rozptywu gazów dodatkowych, takich jak metan i dwutlenek węgla, że rozptyw powietrza można obliczać układem równań stanu ustalonego, natomiast rozptyw gazów w składowisku liczy się rozwiązując układ równań różniczkowych cząstkowych. Układ równań wyprowadza się wychodząc z równań ciągłości masy dla powietrza i dla  $n$ -tego składnika mieszaniny powietrza i gazów dodatkowo dopływających gazów, przyjmując równanie ciągłości dla mieszaniny gazów i wybranego składnika np. metanu, szczegóły tego równania przedstawiono w pracy (Dziurzyński W., Tracz J. i Trutwin W., 1987).

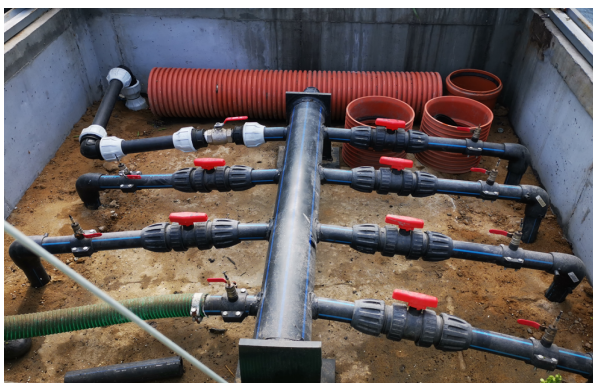
Dla przyjętego modelu przepływu mieszaniny przez składowisko, reprezentowane przez sieć wzajemnie prostopadłych elementów składowiska, uzyskujemy różnicowe równanie opisujące zmiany stężenia masowego np. metanu w składowisku, które sprowadza się do bilansów węzłowych strumieni masy metanu i mieszaniny. Istotne w przyjętym modelu przepływu mieszaniny przez składowisko są rozkłady przepuszczalności, porowatości. Wielkości te decydują o wartościach zastępczych liniowych oporów elementów składowiska, wynikające z równania (7), opisujących przepływ mieszaniny gazów przez składowisko.

W monografii Dziurzyński W., Pałka T., Krach A., (2021) przedstawiono szczegóły obliczania transportu powietrza i składników gazu (metan, dwutlenek węgla) w elementach składowiska używając analogi do bocznic sieci wentylacyjnej.

Powyżej przedstawiono równania i wzory są wzajemnie powiązane przez parametry charakteryzujące przepływ mieszaniny gazów. Większość parametrów modelu jest możliwa do wyznaczenia przez złożone pomiary na składowisku, np. przepuszczalność składowiska w zależności od głębokości. Pozostałe parametry można wyznaczyć na podstawie analizy dostępnej dokumentacji projektowej oraz dokumentacji eksploatacyjnej danego składowiska.

#### 4. Model numeryczny składowiska odpadów i rurociągu drenażowego

Dla celów symulacji przepływu gazów w składowisku odpadów przyjęto model numeryczny składowiska w postaci siatki prostopadłych jego elementów i dopływu powietrza. Przyjęto trzy poziome warstwy składowiska o długości: wzdłuż osi  $x$  250 m, wzdłuż osi  $y$  o długości 200 m, grubość każdej warstwy ( $\Delta z_i$ )



Fot. 2. Zbiórny rurociąg drenażu składowiska odpadów



Fot. 3. Flara do awaryjnego spalania gazu ujętego na składowisku

przyjęto 10 m. Dla każdej warstwy wyznaczono koty niwelacyjne od 210 m do 180 m. Warstwy są połączone między sobą elementami składowiska pionowo usytuowanymi i łączącymi się w odpowiadających sobie węzłach siatki elementów składowiska (Rys. 2).

W składowisku zamodelowano otwory drenażowe, przechodzące przez kolejne warstwy składowiska o różnych przepuszczalnościach. Otwory drenażowe stanowią kolejne elementy modelu składowiska przechodzące przez węzły siatki. Otwory drenażowe połączone są z rurociągiem zbiorczym odcinkami rurociągu z zainstalowanymi zaworami regulacyjnymi. Rurociąg zbiorczy (Fot. 2) zakończony jest ssawą, którą modeluje źródło podciśnienia. W dalszym ciągu przedstawimy kolejne kroki projektowania i konstrukcji modelu numerycznego układu elementów składowiska, otwory drenażowe i zbiorczy rurociąg podpięty do ssawy. Ujęty gaz składowiskowy może być wykorzystany do produkcji energii elektrycznej (Zaleska-Bartosz J., 2014; Kołodziejak G., Zaleska-Bartosz J., 2014) albo spalany za pomocą flary na składowisku (Fot. 3).

### Przygotowanie struktury i wprowadzenie danych

Budowę modelu numerycznego programem *VentGraph* do symulacji migracji biogazu w składowisku odpadów komunalnych rozpoczyna się od wprowadzenia danych odnośnie struktury elementów sieci składowiska, czyli od wpisania dla każdej z przyjętych trzech warstw składowiska jego wymiarów, grubości warstwy ( $\Delta z_i$ ), kot niwelacyjnych węzłów sieci i ilości podziałów każdej warstwy w kierunku x i y. Istotnymi parametrami charakteryzującymi składowisko jest przepuszczalność, porowatość i lepkość dynamiczna. Z badań zamieszczonych w literaturze (Niemczewska J., 2013) wynika, że znany jest współczynnik filtracji składowiska dla medium jakim jest woda, przyjmuje się że jest nie większy niż  $1,0 \times 10^{-8}$  m/s. Składowiska mają bariery uszczelniające podłoże i ściany boczne oraz wierzchowinę (Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach), których współczynnik filtracji jest nie większy niż  $1,0 \times 10^{-9}$  m/s.

Dla celów symulacji aby wyznaczyć opory elementów składowiska trzeba przyjąć wartość przepuszczalności dla biogazu. Z wstępnych przeliczeń wynika, że wartości te są mniejsze od współczynnika filtracji o co najmniej 7 rzędów czyli np.  $k = 1,0 \times 10^{-16}$  m<sup>2</sup>. Należy zauważyć, że brak w literaturze wyników badań eksperymentalnych wyznaczenia współczynnika przepuszczalności gazów dla obszarów składowiska odpadów komunalnych. Przyjęte dane pozwolą na utworzenia siatki elementów każdej warstwy modelujących składowisko. Następnie wprowadzamy do edytora *EDTXXT* elementy dopływu powietrza oraz pionowego połączenia między węzłami warstw modelujących składowisko. Wprowadza się również wartości potrzebne (7) do obliczenia oporów elementów, długości i pola przekroju poprzecznego każdego elementu oraz ciśnień aerostatycznych, związanych z różnicą wysokości elementów warstwy składowiska. Składowisko stanowi bryłę która otoczona jest powietrzem atmosferycznym i dla uwzględnienia dopływu powietrza z atmosfery do składowiska wprowadza się dane których wymaga równanie (7) dla składowych x, y, z, są to długości elementów siatki  $\Delta z_i, \Delta x_i, \Delta y_i$ , lepkość dynamiczna i wartości przepuszczalność brzegu.

Otwory drenażowe to perforowana rura o średnicy 120 mm usytuowana pionowo w tzw. studni składowiska, w modelu numerycznym modelowana jest w postaci elementów dodatkowych, przechodzących przez węzły siatki modelującej warstwy składowiska, tak jak to pokazano na rysunku 2. Otwory te połączone są z rurociągiem zbiorczym o średnicy 120 mm, modelowanym przez odcinki bocznic z ssawą usytuowanym na końcu ostatniego elementu. W danych wejściowych wprowadza się wartości wielkości potrzebnych do obliczenia oporów odcinków otworów drenażowych i rurociągu zbiorczego, tj. średnice, długości odcinków i lepkości mieszaniny powietrzno-metanowej oraz gęstości i współczynniki oporu. Na podstawie tych danych program nadaje numery węzłom siatki modelującej elementy składowiska, oblicza opory przepływu i ciśnienia aerostatyczne i następnie rysuje schemat przestrzenny składowiska i otworami drenażowymi przecinającymi kolejne warstwy.

### Obliczenia stanu początkowego – wyznaczenie rozplywu powietrza i gazów

Pierwszym etapem obliczeń jest wyznaczenie stanu początkowego. Program komputerowy realizuje to powtarzając wielokrotnie pętlę iteracyjną, w której obliczane są kolejno:

- rozplyw powietrza w elementach składowiska (metodą Crossa),
- ciśnienia i potencjały w węzłach sieci elementów,
- stężenia metanu i dwutlenku węgla (wewnętrzna pętla iteracyjna),
- gęstości i ciśnienia aerostatyczne.

### Obliczenia w pętli czasowej – zmiana warunków migracji gazów

W tym etapie obliczeniowym program wykonuje następującą sekwencję obliczeń dla każdego kroku czasowego:

1. obliczenie ciśnień w węzłach,
  - wejście do wewnętrznej pętli iteracyjnej, która wykonuje:
    - obliczenia rozptywu powietrza w bocznicach (Cross),
    - obliczenie ciśnień w węzłach,
  - wyjście z pętli po spełnieniu warunku ustalenia się wartości ciśnień,
2. obliczenia stężeń gazów w elementach składowiska z równań transportu i bilansów gazów w węzłach,
3. obliczenie gęstości powietrza, oporów i ciśnień aerostatycznych,
4. zakończenie sekwencji obliczeń dla kroku czasowego.

Pomiędzy kolejnymi sekwencjami obliczeń możliwe jest dokonanie zmiany wartości ciśnień i oporów na brzegach obszaru modelującego warstwy składowiska, zmiany podciśnień wytwarzanych przez ssawę rurociągu drenażowego. Można też ustawić w rurociągu zawory regulacyjne (Fot. 2), które są zlokalizowane w końcowych odcinkach rurociągu drenażowego.

### Dokumentowanie i zapis wyników symulacji

W wybranych miejscach elementów sieci składowiska można ustawić czujniki wirtualnego systemu monitoringu pracy rurociągu drenażowego. Pozwoli to na udokumentowanie wykonywanych obliczeń, zwłaszcza w aspekcie regulacji przepływu w rurociągu. Możliwa jest obserwacja w czasie obliczeń następujących parametrów fizycznych mieszaniny powietrza i metanu:

- strumienia objętości mieszaniny powietrza, metanu i dwutlenku węgla, w  $\text{m}^3/\text{godz}$ .
- stężenia tlenu, azotu, dwutlenku węgla i metanu, w %,
- prędkości przepływu mieszaniny powietrza i biogazu, w  $\text{m/s}$ .

Możliwe jest ustawianie zakresów pomiarowych czujników i czasu próbkowania dla rejestracji, które można pokazać w postaci wykresów na ekranie monitora. Wartości wszystkich rejestrowanych wielkości w każdym kroku czasowym są zapisywane w zbiorach, co pozwala na dalsze przetwarzanie tych danych za pomocą programów zewnętrznych, np. Graphera lub Excela.

#### 4.1. Symulacja migracji gazów w składowisku i rurociągu drenażowym

Opracowany model numeryczny dla programu komputerowy *VentGraph* na obecnym etapie badań, wymaga intensywnego testowania, co pozwoli na sprawdzenie poprawności i możliwości prowadzenia symulacji. Pewną trudnością w uruchomieniu obliczeń w procedurze testowania jest brak zweryfikowanych danych pomiarowych dla utworzenia bazy komputerowej dla warunków składowiska odpadów.

Dla omawianego przykładu przyjęto stały dopływ metanu i dwutlenku węgla odpowiednio:

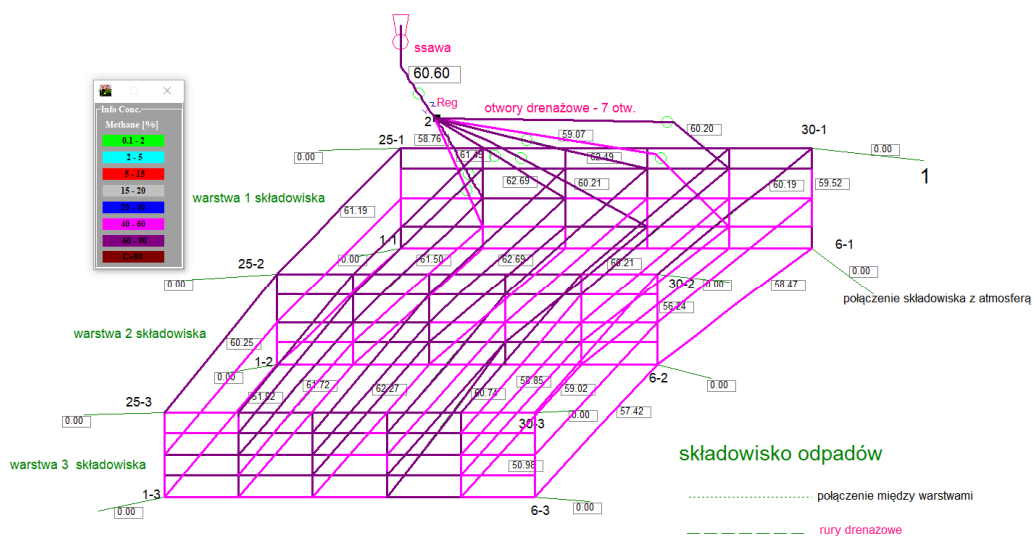
- dla warstwy 1  $q_{\text{metan}} = 0,2 \text{ m}^3/\text{min}$ ,  $q_{\text{CO}_2} = 0,1 \text{ m}^3/\text{min}$
- dla warstwy 2  $q_{\text{metan}} = 0,4 \text{ m}^3/\text{min}$ ,  $q_{\text{CO}_2} = 0,2 \text{ m}^3/\text{min}$
- dla warstwy 3  $q_{\text{metan}} = 0,4 \text{ m}^3/\text{min}$ ,  $q_{\text{CO}_2} = 0,2 \text{ m}^3/\text{min}$

Dla każdej warstwy składowiska wprowadzono wartości przepuszczalności i tak dla warstwy 1 przyjęto  $k = 2 \times 10^{-11} [\text{m}^2]$ , dla warstwy 2 przyjęto  $k = 5 \times 10^{-11} [\text{m}^2]$ , a dla warstwy 3 przyjęto  $k = 3 \times 10^{-12} [\text{m}^2]$ , przepuszczalność dla brzegu przyjęto  $k = 2 \times 10^{-14} [\text{m}^2]$ .

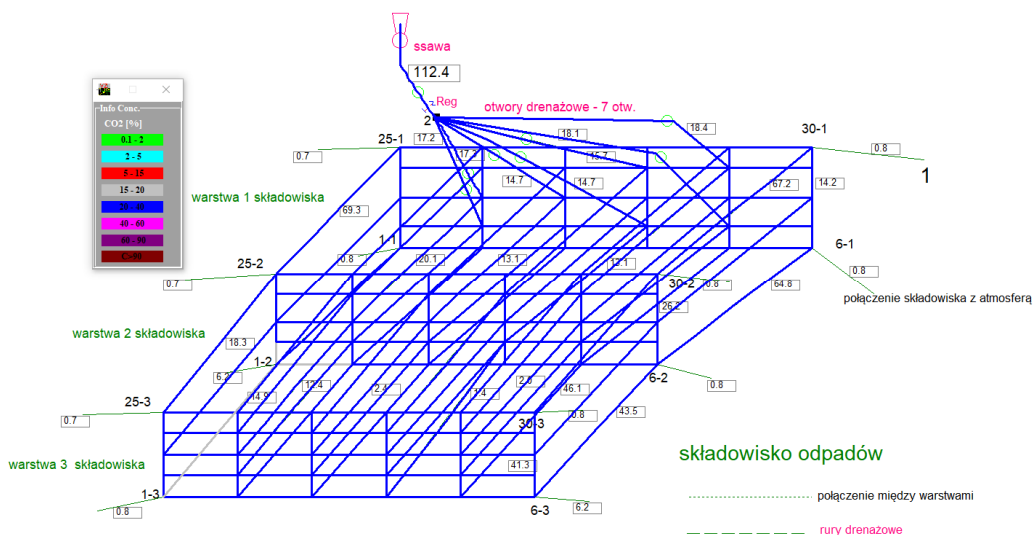
Utworzono złożoną strukturę połączeń pozwalającą na wyznaczenie rozptywu powietrza, metanu i dwutlenku węgla w elementach sieci składowiska w tym również w rurociągu drenażowym. Zaprojektowany model numeryczny składowiska został uruchomiony w programie *VentGraph*, a uzyskany wynik obliczeń rozptywu powietrza i gazów oraz wyznaczonego rozkład stężenia gazów i wydatku ujęcia metanu przedstawiono na kolejnych rysunkach. Na rysunku 3 przedstawiono schemat elementów składowiska „X” obejmujący rozważaną strukturę połączeń oraz rozkład stężenia metanu wg. skali barw pokazanej w lewym rogu rysunku. Ilość ujmowanej mieszaniny powietrza metanu i dwutlenku węgla łącznie przez 7 otworów drenażowych wynosi  $132,5 \text{ m}^3/\text{h}$ , stężenie metanu wynosi 52,54%, a stężenie dwutlenku węgla wynosi 20,11%. Na rysunku 4 i 5 odpowiednio pokazano uzyskane wyniki obliczeń.



W dalszym etapie, testowania opracowanego modelu numerycznego dla programu *VenGraph* wykonano zmianę w warunkach przepływu (migracji) mieszaniny w składowisku poprzez obniżenie podciśnienia ssawy z wartości 20 kPa do wartości 10 kPa. Taki manewr spowodował obliczenia w pętli czasowej programu z krokiem  $dt = 10$  sek,  $dx = 1$  m, z uwagi na bardzo małe przepływy rzędu mm/s, obliczenia prowadzono 1540 godzin, uzyskane wyniki pokazano na kolejnych rysunkach. Na rysunku 6 obejmujący rozważaną strukturę połączeń zamieszczono rozkład stężenia metanu wg skali barw pokazanej w lewym rogu rysunku. Ilość ujmowanej mieszaniny powietrza metanu i dwutlenku węgla łącznie przez 7 otworów drenażowych uległa obniżeniu, wynosi  $112,4 \text{ m}^3/\text{h}$  (Rys. 7), stężenie metanu wzrosło do wartości 60,6% (Rys. 6), a stężenie dwutlenku węgla wynosi 23,2% (Rys. 8).

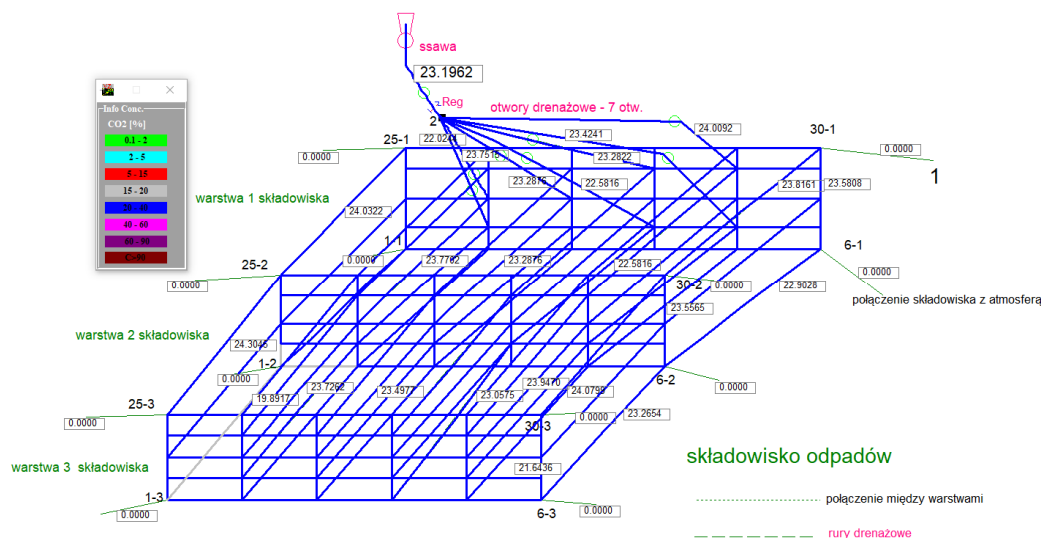


**Rys. 6.** Schemat połączeń elementów składowiska, rozkład stężenia metanu wg skali barw – w prostokątach stężenie metanu [%]. Stan po upływie 1540 godzin,  $h_{ssawa} = 10$  kPa

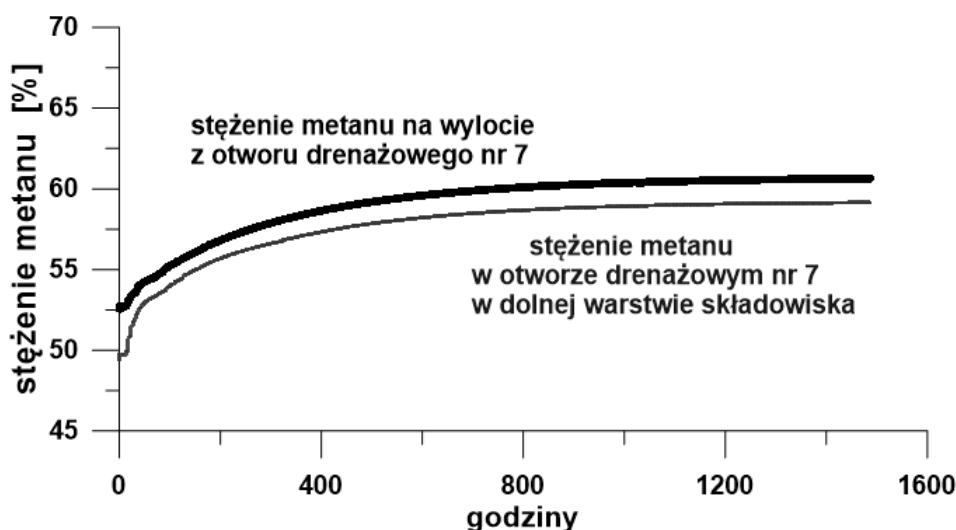


**Rys. 7.** Schemat połączeń elementów składowiska, rozkład stężenia  $\text{CO}_2$  wg skali barw – w prostokątach ilość mieszaniny [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]. Stan po upływie 1540 godzin,  $h_{ssawa} = 10$  kPa

Na rysunku nr 9 pokazano czasową zmianę stężenia metanu na wylocie z rurociągu drenażowego nr 7, którą oznaczona grubą linią, a cienką linią pokazano zmiany stężenia metanu w przedostatnim odcinku wybranego otworu drenażowego nr 7.



Rys. 8. Schemat połączeń elementów składowiska, rozkład stężenia  $\text{CO}_2$  wg skali barw – w prostokątach stężenie  $\text{CO}_2$  [%]. Stan po upływie 1540 godzin,  $h_{\text{ssawa}} = 10 \text{ kPa}$



Rys. 9. Zmiany stężenia metanu rejestrowane na wirtualnym czujniku,  
– krzywa gruba – na wylocie z rurociągu drenażowego nr 7;  
– krzywa cienka ostatni element rurociągu w otworze drenażowym nr 7

## 5. Podsumowanie

Wykonane obliczenia symulacji przepływu (migracji) mieszaniny powietrza i dopływającego metanu i dwutlenku węgla w składowisku (Rys. 2) pozwoliły na uzyskanie rozwiązań w zakresie rozptyłu mieszaniny gazów oraz rozkładu stężenia metanu i dwutlenku węgla w poszczególnych elementach składowiska oraz w rurociągu drenażowym.

- Przedstawione wyniki rozptyłu biogazu oraz zawartych w nim metanu ( $52\% \text{CH}_4$ ) i dwutlenku węgla ( $20,1\% \text{CO}_2$ ) pokazują zbliżone do rzeczywistości wartości stężeń gazów i wartości ujęcia gazu na poziomie  $132 \text{ m}^3/\text{h}$ , ujętego przez siedem otworów drenażowych.
- Zmniejszenie podciśnienia na ssawie drenażu pokazało niższe ujęcie biogazu do wartości  $112,4 \text{ m}^3/\text{h}$ , przy równoczesnym wzroście stężenia metanu ( $60,6\% \text{CH}_4$ ) i dwutlenku węgla ( $23,1\% \text{CO}_2$ ). Obserwuje się również zmniejszenie dopływu powietrza z atmosfery do wnętrza składowiska, co może prowadzić do niekontrolowanego wypływu metanu ze składowiska.

Przeprowadzone obliczenia na modelu numerycznym wykazały podobieństwo uzyskanych wyników do danych literaturowych odnośnie poziomu kształtowania się stężeń gazów w składowisku lub wydatków

ujmowanego gazu. Niewątpliwie potrzebna jest pogłębiona analiza możliwych rozwiązań i podjęcie próby weryfikacji uzyskanych wyników symulacji migracji gazu na składowisku. Przydatne będzie rozpoczęcie badań laboratoryjnych w zakresie wyznaczenia współczynników przepuszczalności dla powietrza i biogazu dla materiału pobranego ze składowiska. Również koniecznym jest rozbudowanie programu do obliczeń o możliwości zadania złożonej geometrii składowiska oraz wprowadzania elementów rurociągu drenażowego, prace będą kontynuowane.

### Literatura

- [1] Dudek J., Zaleska-Bartosz J., 2010: *Pozyskiwanie i wykorzystanie do celów energetycznych*. Problemy Ekologii, vol. 14, nr 1, styczeń-luty 2010.
- [2] Dudek J., Kołodziejek G., 2012: *Badanie wydajności gazowej składowiska odpadów w Przemysłu*. JEcolHealth, vol. 16, nr 1, 2012.
- [3] Dudek J., 2013: *Wpływ odpadów biodegradowalnych na potencjał energetyczny składowiska*. Nafta-Gaz, Rok LXIX, Nr 12 / 2013.
- [4] Dziurzyński W., Tracz J. Trutwin W., 1987: *On mathematical models of the flow of air and outburst gases in the mine ventilation network*. Archives of Mining Sci., Vol. 32, Issue 1.
- [5] Dziurzyński W., 1998: *Prognozowanie procesu przewietrzania kopalni głębinowej w warunkach pożaru podziemnego*. Studia Rozprawy Monografie, Vol. 56, IGSMiE PAN.
- [6] Dziurzyński W., Pałka T., Krach A., 2009: *Method of regulating elements of the demethanisation network using computer simulation*. Archives of Mining Sciences, Vol. 54, no 2, 2009.
- [7] Dziurzyński W., Pałka T., Krach A., 2021: *Modele matematyczne programu VentGraph Plus*. Monografia, wydawnictwo Instytut Mechaniki Górniczej PAN, 2021.
- [8] Dziurzyński W., Pałka T., Krach A., 2022: *Podręcznik użytkownika programu VentGraph Plus z przykładami*. Monografia, wydawnictwo Instytut Mechaniki Górniczej PAN, 2022.
- [9] Hebda K., Kołodziejek G., 2021: *Monitoring studni do produkcji biogazu na składowisku odpadów (Monitoring of biogas production wells in a landfill)*. Nafta-Gaz 2021, nr 10, s. 683-691.  
DOI: <https://doi.org/10.18668/NG.2021.10.06>
- [10] Rosik-Dulewska Cz., 2006: *Podstawy gospodarki odpadami*. Wyd. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006.
- [11] Kołodziejek G., Zaleska-Bartosz J., 2014: *Ocena możliwości zastosowania parametru wilgotności gazu składowiskowego do określania produktywności gazowej składowiska odpadów*. Nafta-Gaz, Rok LXX, nr 12/2014.
- [12] Niemczewska J., 2013: *Metodyka pomiarów emisji gazów ze składowisk odpadów komunalnych*. Nafta-Gaz, Rok LXIX, Nr 8 / 2013.
- [13] Zaleska-Bartosz J., 2014: *Gaz składowiskowy jako źródło energii*. Nafta-Gaz, Rok LXX, nr 12/2014.
- [14] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. z 2013 r. Nr 0, poz. 21).

## **Biogas flow in a municipal waste landfill, simulation of biogas migration in the VentGraph system**

### **Abstract**

The current EU energy policy has given rise to an attempt to apply methods of simulating gas and air flows in a porous medium such as a municipal waste landfill. Such a landfill contains organic material that decomposes combined with the release of methane and carbon dioxide. The aim of the calculations on the numerical model is to examine the efficiency and stability of methane capture depending on: the location and number of drainage holes, the values of the suction nozzle operating parameters. The article presents the development of a numerical model of the municipal waste landfill "X" located in one of the communes of the Małopolska province. The design documentation of the landfill was reviewed, which allowed for the design of a numerical model in the VentGraph system. The model adopted a system of three horizontal layers of a porous medium, each layer is connected to each other by a vertical element, and in addition, drainage holes and pipelines represented by a 1D flow approximation were introduced to the model, connected to one suction nozzle forcing the flow of the mixture in the landfill. Permeability distributions for each layer were assumed and the resistance of drainage holes was determined. Air inflows were assumed on the edge

and top of the landfill, and a uniform inflow of methane and carbon dioxide to the landfill was assumed, corresponding to the production of these gases as a result of anaerobic fermentation of the organic material stored. The developed numerical model was subjected to intensive testing, as a result of which it is possible to conduct calculations with simultaneous tracking of the solution. Calculations of the air and gas mixture flow in the landfill and in the drainage pipeline were performed. The results were presented in graphical form. Further work will allow for multi-variant computer simulations of the forecast of methane extraction from the selected landfill.

**Keywords:** waste landfill, biogas, gas migration modeling, VentGraph system