

**ZARZĄDZANIE GAZEM SKŁADOWISKOWYM
I ODCIEKAMI Z TERENÓW REKULTYWOWANYCH****4.1. Wstęp**

Odpady często zawierają materię organiczną, której cząsteczki po zdeponowaniu na składowisku są rozkładane przez wyspecjalizowane bakterie. W wyniku tego procesu rozkładu uwalniana jest mieszanina gazowa zwana biogazem lub gazem wysypiskowym (LFG) oraz ciecz, bogata w zanieczyszczenia, pochodzące głównie z wypłukiwania odpadów przez wodę meteorologiczną.

Gaz wysypiskowy powstaje w wyniku chemicznego i biologicznego rozkładu substancji organicznej znajdującej się w samych odpadach. Skład właściwy gazu wysypiskowego zmienia się w sposób ciągły i zależy od wielu czynników wśród których możemy wymienić:

- skład odpadów;
- warunki środowiskowe, w jakich znajdują się odpady;
- czasu i warunki, w jakich odpady są składowane.

Oczywiście różne rodzaje odpadów (organiczne, plastikowe, obojętne itp.) będą miały duży wpływ na rodzaj wytwarzanego gazu składowiskowego. Ogromna obecność materii organicznej będzie skutkowałą wysoką wydajnością, natomiast zawartość materiału obojętnego lub hamujących substancji chemicznych poważnie ją ograniczy.

Rozmiar materiału odgrywa ważną rolę; jeśli zmniejszony rozmiar zwiększa bio-reaktywną powierzchnię materiałów - a w konsekwencji lepsze warunki produktywności gazu składowiskowego - w odwrotnej sytuacji prowadzi również do większego zagęszczenia odpadów, zmniejszenia współczynnika pustki i zwiększenia gęstości masy, co skutkuje zmniejszeniem możliwości rozprzestrzeniania się wilgoci, bakterii i przepuszczalności samego gazu składowiskowego. Na wielkość odpadów duży wpływ mają wszelkie zabiegi wstępne, którym poddawane są odpady przed ich usunięciem; na przykład rozdrabnianie zmniejsza wielkość i mieszanie materiałów.

Odciek to ciecz, która przesiąkła przez odpady stałe na składowisku i w tym procesie wyodrębniła materiały rozpuszczalne lub zawieszone. Składowiska odpadów stałych mogą

powodować poważne skutki dla środowiska, jeśli emisja odcieków i gazów nie jest kontrolowana. Odciek powstający na składowisku odpadów komunalnych zawiera duże ilości zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych, które mogą przesiąkać do gruntu.

W związku z tym, zarządzanie składowiskiem będzie koncentrować się na minimalizacji produkcji odcieku w pierwszej kolejności oraz na systemie zbierania i usuwania odcieku w dalszej kolejności.

Generalnie, przesiąkanie odcieków jest kontrolowane przez bariery mechaniczne o niskiej przepuszczalności współpracujące z systemem drenażu, który usuwa również końcowe produkty biodegradacji. Bariery te wykonane są z warstw zagęszczonego na miejscu gruntu gliniastego. Alternatywnie wymogi przepisów można spełnić poprzez zastosowanie syntetycznych geomembran, które mogą być połączone z gruntem gliniastym lub stosowane jako samodzielne elementy.

4.2 Zarządzanie gazem składowiskowym

4.2.1 Skład gazu wysypiskowego i główne składniki

Wśród czynników środowiskowych, wilgotność odgrywa kluczową rolę; gdy procent wilgotności wzrasta (w pewnych granicach), rejestrowany jest również wzrost produkcji gazu wysypiskowego.

W rzeczywistości, większa dostępność wody ma korzystny wpływ na proces biologicznej degradacji, z wielu powodów:

- zwiększa aktywność mikroorganizmów;
- poprawia interfejs ciało stałe-ciecz i działa jako wektor dla lepszego rozprzestrzeniania się mikroorganizmów i składników odżywczych.

Niska wilgotność (na poziomie 30-40%) nie zapewnia odpowiednich warunków dla reakcji biochemicznych rozkładających materię organiczną, natomiast warunki nasycenia (lub co gorsza "zalanía") utrudniają zarówno produkcję gazu, jak i możliwość jego przemieszczania. Obecność wody w odpadach pochodzi z:

- czynnika endogenicznego (np. obecność wody w odpadach kuchennych i ogrodowych jest bardzo duża);
- perkolacji wody burzowej / odcieków;

- przepływu wód powierzchniowych i podziemnych;
- recyrkulacji oczyszczania odcieków (w razie potrzeby).

Pierwsze stwierdzenie dotyczy składu odpadów i sposobów ich gromadzenia. Zazwyczaj odpady trafiające na składowisko są nienasycone i są w stanie wchłonąć wodę aż do nasycenia kapilarnego, po przekroczeniu którego powstaje odciek.

Na dopływy zewnętrzne duży wpływ mają metody zarządzania składowiskiem, takie jak codzienne przykrywanie odpadów i właściwe usuwanie wód spływu powierzchniowego.

Jak wspomniano powyżej, pierwszym etapem procesu degradacji odpadów na składowisku, jest degradacja biologiczna- rozkład materii organicznej przez mikroorganizmy, takie jak bakterie.

Biodegradacja składa się z trzech etapów:

- etap tlenowy (aerobowy)
- etap beztlenowy kwaśny
- etap beztlenowy metanogenezy.

Etap tlenowy jest fazą początkową i polega na rozkładzie zanieczyszczeń organicznych przez mikroorganizmy przy obecności tlenu; tlen pobierany jest z atmosfery, z powietrza podczas magazynowania, z tego, które przenika po zamknięciu oraz z tego rozpuszczonego w wodzie infiltracyjnej. Proces ten rozpoczyna się już w fazie zbierania odpadów i (ewentualnej) obróbki wstępnej, a w każdym razie przebiega do momentu, gdy dostępny jest tlen.

Jest to ten sam proces wykorzystywany do produkcji kompostu na poziomie gospodarstwa domowego, z odpadów kuchennych i ogrodowych, a na poziomie rolniczym/przemysłowym z odpadów rolniczych lub organicznych. Proces tlenowy charakteryzuje się silnie egzotermiczną reakcją, może osiągnąć nawet 70°C.

Jeśli odpady są składowane i zagęszczane, proces ten może trwać kilka godzin/dni, w przeciwnym razie, jeśli depozyt odpadów jest niekontrolowany, a powietrze stale krąży, ten sam proces może trwać kilka miesięcy. Ten etap utleniania obejmuje odpowiednią produkcję i emisję CO₂.

Etap beztlenowy (kwaśny): występuje, gdy dostępność tlenu jest zmniejszona i proces tlenowy nie jest już możliwy. W tym kontekście mikroorganizmy tlenowe wolą wykorzystywać inne

związki tlenu. Na tym etapie następuje produkcja dwutlenku węgla. W porównaniu z procesem aerobowym występuje mniejsze wytwarzanie energii cieplnej oraz znaczna produkcja częściowo zdegradowanej substancji organicznej. Większość częściowo zdegradowanej substancji organicznej składa się z kwasów organicznych. Kwasy te znajdują się w odcieku. Na tym etapie rejestrowana jest odpowiednia produkcja (emisja) CO₂, która może trwać kilka tygodni lub miesięcy.

Etap beztlenowy metanogenezy: wreszcie faza beztlenowa, jest aktywowana, gdy tlen został całkowicie zużyty i powstają korzystne warunki dla działania bakterii, które pracują w środowisku beztlenowym, tzw. bakterii metanogennych, ponieważ kontynuują one akcję degradacji, przekształcając materię organiczną w metan i CO₂.

Przy spełnieniu odpowiednich warunków udział metanu może wynosić nawet 60% LFG.

Również ten etap charakteryzuje się silnie egzotermiczną reakcją, która jest jednak niższa niż ta zachodząca podczas etapu tlenowego. Ogólnie rzecz biorąc, etap ten rozpoczyna się kilka miesięcy po składowaniu odpadów i może trwać przez dziesiątki lat, z maksymalną produkcją w pierwszych latach i powolnym zmniejszaniem aż do całkowitego rozkładu materii organicznej. Oczywiście, faza ta może trwać do momentu zaistnienia warunków chemiczno-fizycznych, które mogą zagwarantować procesy biochemiczne. Może ona zostać całkowicie zredukowana do zera. Czasami, po wielu latach od składowania odpadów, może się zdarzyć, że odpady są nadal nienaruszone lub mało zdegradowane, na przykład z powodu braku wilgoci.

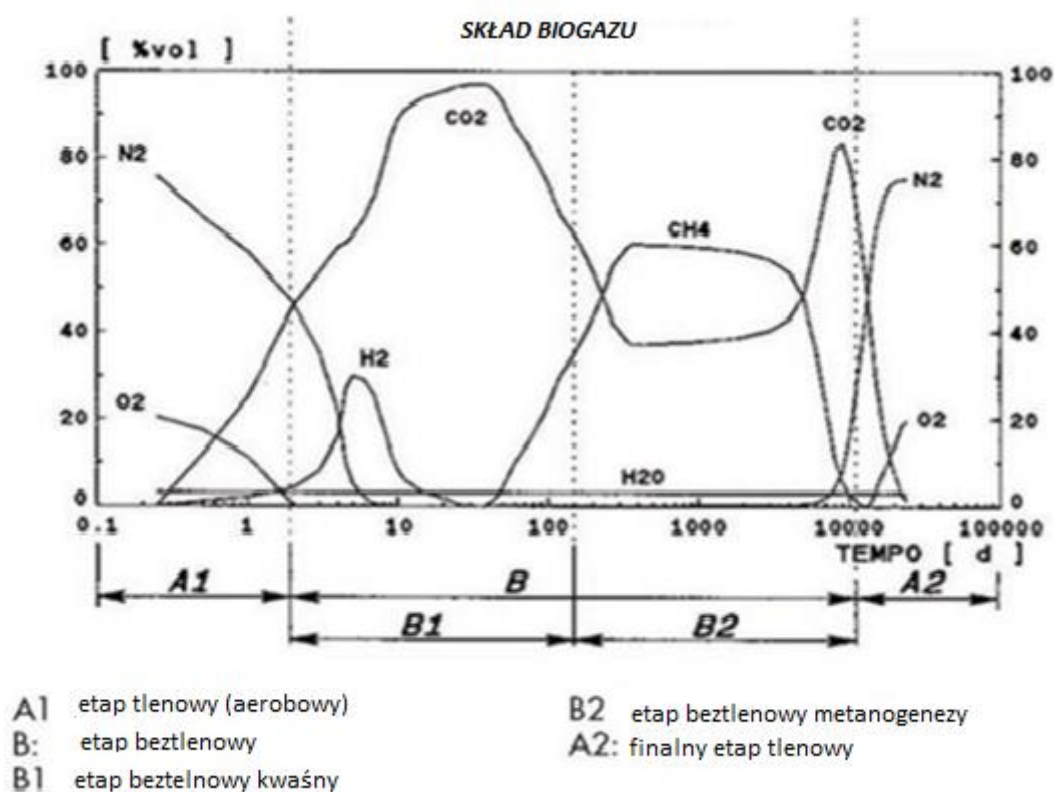
Na rysunku 4.1 można jeszcze rozpoznać papierowy bilet po 30 latach od jego składowania z powodu braku wilgoci.



Rysunek 4.1. Odpad papierowy po 30 latach składowania. Source: ASET Spa, October 2016

Etapy degradacji odpadów są silnie uzależnione od różnych metod zarządzania; na przykład, gdy ogromna ilość zebranych i nieprzetworzonych odpadów nie jest odpowiednio przykryta na niekontrolowanych wysypiskach śmieci, istnieje ryzyko, że warunki dla kolejnych etapów procesu tlenowego nie będą już spełnione.

Poniższy wykres, zaproponowany w artykule A. Damiani i M. Gandolla w 1992 r., stanowi kamień milowy w opisie (orientacyjnego) trendu składu mieszaniny gazów wytwarzanych podczas różnych etapów "fermentacji" odpadów na zarządzanym i kontrolowanym składowisku.



Rysunek 4.2. Skład biogazu na składowisku odpadów. Source: Damiani L., Gandolla M., 1992, Biogas management in controlled landfills, Istituto per l'Ambiente.

Jak wynika z wykresu, makroskładniki typowego gazu składowiskowego i ich stężenia objętościowe to:

- metan (**CH₄**) 30÷50 proc.
- dwutlenek węgla (**CO₂**) 35÷70 %.
- Tlen (**O₂**) 3÷5 %.
- azot (**N₂**) 10÷15 %.
- para wodna 0÷5 %.

Wszystkie te gazy są bezwonne. Składnikami w mniejszym procencie (które mogą być mierzone w ppm lub mg/m³) są siarkowodór (H₂S) i amoniak (NH₃), które mają wyraźne i specyficzne aspekty zapachowe.

Gaz wysypiskowy jest mieszaniną gazów o różnym udziale procentowym, który zmienia się w zależności od rodzaju zgromadzonych odpadów, zarządzania składem i czasu składowania odpadów. Dla ułatwienia, w przypadku zarządzania składowiskiem, zawsze odnosi się do LFG o zawartości metanu 50% (LFG50).

Liczne inne gazy (w tym VOC, PAH, węglowodory niemietanowe), również obecne w gazie wysypiskowym, powstają w wyniku reakcji biochemicznych zachodzących wewnątrz odpadów lub pochodzą bezpośrednio z substancji syntetycznych zawartych w samych odpadach. Niektóre z tych gazów są toksyczne i dlatego muszą być odpowiednio monitorowane, zarówno ze względu na ochronę personelu pracującego, jak i na ich wpływ na środowisko i zdrowie.

Szczególną uwagę należy zwrócić na metan, który jest gazem łatwopalnym. Ponieważ metan jest paliwem, w obecności utleniacza (tlenu obecnego w powietrzu) i czynnika wyzwalającego, może dojść do spalania. Aby jednak doszło do spalania, muszą istnieć ściśle określone proporcje między gazami w mieszaninie. W przypadku metanu w powietrzu istnieją:

- dolna granica równa 5% LEL (Lower Explosive Limit);
- górna granica równa 15% UEL (Upper Explosive Limit).

"Zakres palności" metanu w powietrzu wynosi od 5 do 15%. Dla stężeń mniejszych niż 5% nie ma wystarczającego paliwa, natomiast dla stężeń większych niż 15% nie ma wystarczającego utleniacza.

Jest oczywiste, że ze względu na efekt rozcieńczenia gazu wysypiskowego (z wysokim % metanu), zawsze będą obszary, które wchodzą w pole palności; należy być bardzo ostrożnym, zwłaszcza tam, gdzie może powstać nagromadzenie gazu wysypiskowego (w pomieszczeniach zamkniętych): w tym przypadku do ryzyka pożaru dochodzi ryzyko wybuchu.

Zakres palności biogazu w powietrzu różni się od zakresu palności czystego metanu, ze względu na obecność gazów obojętnych (takich jak CO₂ i N₂), które mogą nasycić mieszaninę; w rzeczywistości, przy zawartości procentowej gazów obojętnych wyższej niż 20%, produkt wchodzi w zakres niepalności ze względu na nadmiar gazów obojętnych.

Aby lepiej ocenić te aspekty, należy zapoznać się z diagramami palności w podręcznikach dotyczących zarządzania gazami palnymi. (np. G. Zebetakis 1959 US Bureau of min).

4.2.2 Produkcja i ryzyko

Jak zobaczymy w kolejnych punktach, obliczenie (a raczej oszacowanie) ilości gazu składowiskowego, który będzie produkowany w czasie przez same odpady, jest podstawową czynnością przy projektowaniu i wymiarowaniu różnych elementów instalacji. Ma to również zasadnicze znaczenie dla kolejnych etapów zarządzania i monitorowania systemu zbierania i oczyszczania gazu składowiskowego.

Modele obliczeniowe traktują składowisko jako bioreaktor, w którym rozwijają się różne opisane fazy biochemiczne, w szczególności beztlenowa. Uzyskuje się zakładaną krzywą produkcji, sumując efekty wytwarzane w czasie przez każdą pojedynczą tonę odpadów, poprzez nakładanie się poszczególnych wkładów; często proponuje się dwa trendy (najlepszy i najgorszy przypadek), w ramach których można oszacować rzeczywistą krzywą produkcji. Dostępne są różne modele obliczeniowe, od empirycznych po teoretyczne, oparte na biochemicznej dynamice przemian materii organicznej. W każdym przypadku jest oczywiste, że produkcja gazu składowiskowego jest silnie uzależniona od rodzaju zgromadzonych odpadów oraz od warunków chemiczno-fizycznych odpadów wykazywanych w czasie. Jedna tona odpadów kuchennych będzie miała inną produkcję jakościową i ilościową niż tona tekstyliów, szkła i metali. Biorąc pod uwagę, że co najmniej 50% materii organicznej może zostać przekształcone w gaz składowiskowy w warunkach beztlenowych, szacuje się, że z jednej tony materii organicznej może powstać z czasem nawet ponad 200 m³ gazu składowiskowego.

Tak więc, na przykład, średniej wielkości składowisko, które przyjmuje 30 000 ton odpadów komunalnych (z dużą zawartością składników organicznych) w okresie 10 lat, zagospodaruje z czasem co najmniej 50 mln m³ gazu składowiskowego.

Niezależnie od zastosowanego modelu obliczeniowego, aby mieć spójne oszacowanie produkcji gazu składowiskowego w czasie, niezbędna jest znajomość:

- ilość, skład i zmiany w czasie zebranych odpadów (szczególnie w ostatnich 10 latach);
- ewentualną obecność odpadów specjalnych (przemysłowych), które mogą zawierać substancje hamujące reakcje biochemiczne;
- wstępna obróbka odpadów (np. biostabilizacja);

- formy zagospodarowania (lub nie) zakładu w czasie (zagęszczanie, przykrycie, ewentualne sposoby odbioru gazu składowiskowego, zagospodarowanie odcieków itp.);
- konfigurację zbiornika i zewnętrzne dopływy wody (wody gruntowe, opad termiczny itp.) w celu oceny warunków wilgotnościowych w odpadach.

Jak wykazano w opisie jakościowym i ilościowym gazu wysypiskowego, brak kontroli i zarządzania biogazem w czasie, pociąga za sobą szereg zagrożeń i negatywnych skutków, które muszą być uwzględnione. Wśród nich jest z pewnością ryzyko pożaru i eksplozji; silna obecność w biogazie gazu palnego, takiego jak metan, jego szeroki zakres palności i wysoka mobilność (zarówno w powietrzu, jak i w ziemi) może generować wiele poważnych sytuacji zagrożenia, nawet setki metrów od zakładu. W rzeczywistości, zwłaszcza na źle zarządzanych składowiskach, pożary i osuwiska generowane przez eksplozje (w wyniku spalania wewnętrznego lub w obszarach zamkniętych) nie są rzadkością i spowodowały rozległe szkody dla ludzi i mienia.

Wśród oddziaływań gazu wysypiskowego na środowisko i zdrowie można wyróżnić: wpływ emisji odorów i wpływ na jakość powietrza, emisję gazów cieplarnianych oraz fitotoksyczność. Najczęstszym oddziaływaniem na środowisko powodowanym przez składowiska odpadów, jest przykry zapach-odór generowany przez pewne substancje (np. merkaptany, H₂S, aminy, WWA itp.) obecne w gazie składowiskowym, czasem tylko w śladowych ilościach; ale raczej makroskładniki (metan, CO₂, powietrze, para wodna) są bezwonne. Gaz wysypiskowy, oprócz tego, że jest źródłem zapachów, jest również środkiem transportu, kiedy to gaz - powstały w wyniku fermentacji składowanych odpadów - wędruje w górę ku warstwom powierzchniowym, zbierając inne substancje pochodzące z dopiero co zdeponowanych odpadów, a stamtąd na zewnątrz.

Jak wspomniano wyżej, metan jest silnym "gazem cieplarnianym", o potencjale globalnego ocieplenia (tzw. GWP100) 28 razy wyższym niż dwutlenek węgla; brak jego rekultywacji i odzysku w znacznym stopniu przyczynia się do globalnego ocieplenia. Składowiska odpadów są drugim/trzecim co do wielkości (co najmniej 15%) sprawcą niekontrolowanej emisji metanu (pochodzenia antropogenicznego) po przemyśle naftowym i hodowli zwierząt.

Obecność efektywnego systemu zbierania i remediacji gazu składowiskowego, zapobiegającego nadciśnieniu w odpadach i niekontrolowanej emisji z nich, ma fundamentalne znaczenie dla zmniejszenia ryzyka i negatywnego wpływu na bezpieczeństwo ludzi i środowisko.

4.2.3 Gromadzenie i transport

Działalność w zakresie zbierania gazu wysypiskowego polega na opracowywaniu i zarządzaniu narzędziami, które po umieszczeniu w bezpośrednim kontakcie z odpadami są w stanie rozpoznać gaz powstający właśnie w wyniku ich fermentacji.

Elementy te będą oczywiście połączone z systemem poboru oraz z obróbką samego gazu (patrz następne punkty). Bez tych elementów gaz, na skutek nadciśnienia panującego wewnątrz odpadów, w sposób niekontrolowany rozproszyłby się do atmosfery, docierając przez ściany zbiornika (jeśli nie jest odpowiednio uszczelniony) do powierzchni składowiska lub otaczającej go gleby.

System gromadzenia musi być zaprojektowany od początku cyklu życia składowiska, ponieważ, gaz składowiskowy zaczyna być generowany natychmiast, choć o innej charakterystyce niż przy pełnej pojemności. Elementy zbierające są tym bardziej wydajne, im większa jest powierzchnia mająca kontakt z odpadami. Generalnie składają się one z pionowych studni lub poziomych rowów odwadniających.

W przypadku rekultywacji składowiska otwartego, system zbierania gazu składowiskowego będzie budowany po jego zakończeniu, według tych samych kryteriów, które stosuje się w przypadku nowych składowisk.

Typowym elementem systemu zbierania gazu jest studnia pionowa, składająca się z kolumny żwirowej i centralnej sondy (rury szczelinowej) (rys. 4.3). Kolumna żwirowa zapewnia powierzchnię odprowadzania gazu, natomiast sonda szczelinowa zapewnia możliwość powierzchniowego połączenia z siecią ujęcia i transportu gazu składowiskowego.

Studnia może być urządzona od podstawy zbiornika, który będzie gromadził odpady (patrz rys. 4.3); w takim przypadku kolumna żwirowa będzie chroniona klatką, składającą się najczęściej z metalowej ramy (często stosuje się spiralne stalowe zbrojenia betonowych pali fundamentowych) i metalowej siatki powstrzymującej. W miarę rozwoju składowiska kolumna żwirowa i sonda centralna będą stopniowo podnoszone do poziomu roboczego; ważne jest, aby zachować ciągłość kolumny drenażowej, nawet jeśli wystąpią pionowe deformacje kolumny.

Części metalowe z czasem ulegają degradacji, ale bez powodowania uszkodzeń, ponieważ sam korpus odpadu będzie teraz zawierał kolumnę żwirową.

Żwir (frakcja: 40/70) powinien składać się z materiałów krzemionkowych lub bazaltowych (zazwyczaj stosuje się tłuczeń bazaltowy dla kolei), unikając stosowania skał wapiennych, które

mają tendencję do atakowania i dezintegracji przez kwasy zawarte w gazie i odciekach. Do wykonania sondy centralnej stosuje się zazwyczaj perforowane rury z polietylenu o wysokiej gęstości (HDPE) (patrz rys. 4.3.).



Rysunek 4.3. Odwodnienie poziome i studnie. Źródło: ASET Spa, April 2019.

Studnie mają średnicę 60/120 cm, natomiast sonda polietylenowa ma średnicę zewnętrzną 20/60 cm (większe sondy umożliwiają obudowę pomp do przepompowywania odcieków). Podobną techniką można również wykonać studnie skośne o przekroju półkolistym (rys. 4.3), od strony zbiorników.

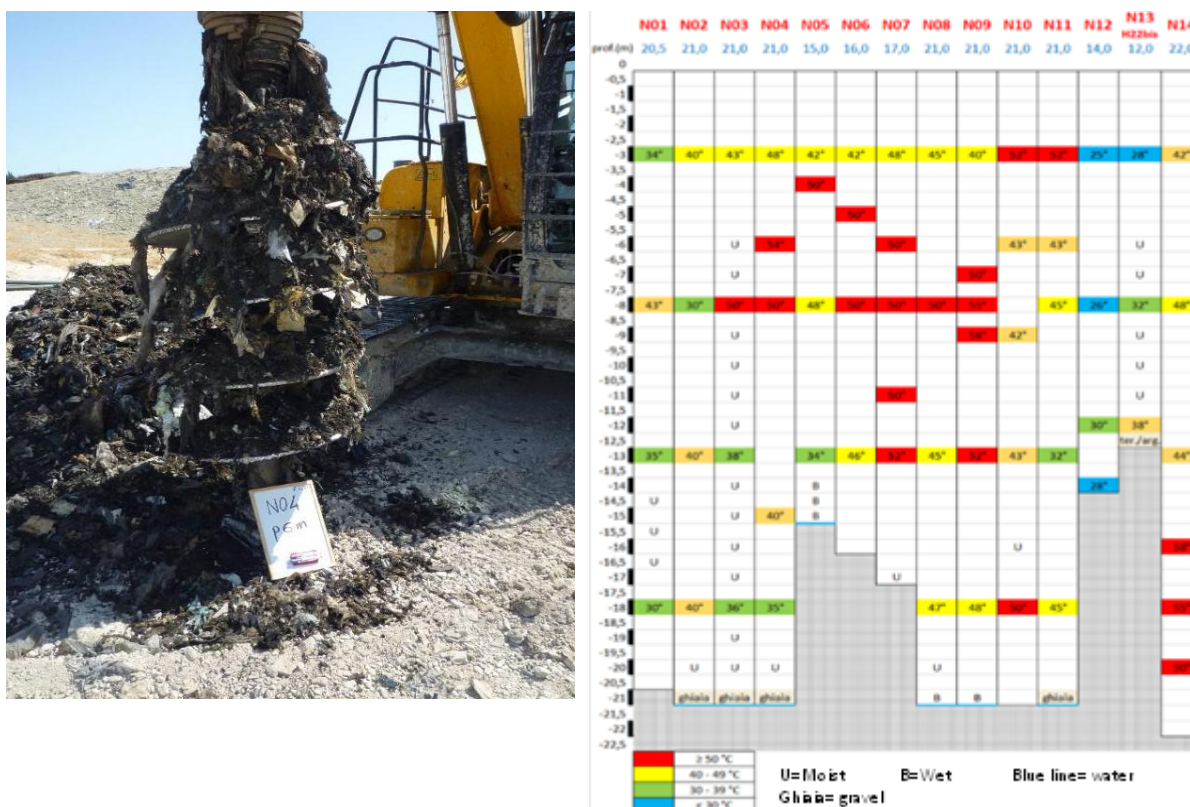
Na składowisku odpadów komunalnych, podobnie jak na otwartych wysypiskach, przyjmuje się, że "promień oddziaływania" studni wynosi 25 m. Dla optymalnego odbioru, na etapie projektowania lub zarządzania, zaleca się odległość około 15-20 m w celu nałożenia się efektów siatki studni.

Studnie, wyrastające z dna składowiska, są szczególnie przydatne, gdyż mogą pełnić podwójną funkcję zbierania gazu składowiskowego w górę i odprowadzania odcieków w dół, gdzie są usuwane z drenażu dna zbiornika.

Istnieje jednak wiele czynników wpływających na ten mechanizm, takich jak:

- mechaniczne działanie środków transportu i zagęszczanie odpadów;
- osiadanie odpadów (materiały wciągane w dół przez tarcie)
- napory różnicowe (w obrębie studni np.);
- degradacja materiałów (na skutek działania kwasów);
- ciśnienia i warunki fizyczne (temperatura w odpadach może sięgać nawet 70°C, co w konsekwencji powoduje "zmiękczenie" polietylenu);
- zapychanie się odpływów; itp.

Wszystkie te działania prowadzą do stopniowej utraty funkcjonalności tych elementów, aż do momentu, gdy stają się one niezdadne do użytku. W cyklu życia składowiska odpadów konieczne jest więc okresowe odnawianie tych elementów technicznych, ponieważ ich konserwacja nie jest możliwa.



Gdy pojawia się potrzeba wprowadzenia nowych elementów zbierania, konieczne jest zaplanowanie budowy nowych studni wierconych w korpusie odpadów (rys. 4.4). Dotyczy to również przypadku rekultywacji otwartego wysypiska.

Operacja ta musi być przeprowadzona przez wyspecjalizowane firmy, ponieważ istnieje szereg zagrożeń w trakcie realizacji: szansa wpadnięcia do otworu wiertniczego, wyziewy gazu składowiskowego z ryzykiem wejścia w stan palny, nieprawidłowe wykonanie kolumny drenażowej itp. Jednak na etapie oceny przed wykonaniem odwiertu możliwe jest zebranie wielu informacji na temat stanu chemiczno-fizycznego bryły odpadu. Na tym etapie można obserwować następujące czynniki: wilgotność, temperaturę, głowicę hydrauliczną, stan mineralizacji odpadów itp.; Można również pobrać reprezentatywne próbki odpadów do badań laboratoryjnych: wskaźnik respirometrii dynamicznej, zawartość węgla resztkowego, ewentualne testy biometanizacji itp. co może również dostarczyć dalszych przydatnych informacji poprzez porównanie danych pomiędzy poszczególnymi odwiertami. (patrz Rys. 4.4)

W fazie kultywacji zawsze przydatne jest utworzenie sub-horyzontalnych drenaży, które działają jako dodatkowe elementy zbierające (patrz Rys. 4.3); tworzy się je na różnych wysokościach poprzez wykopanie prostych rowów, które następnie wypełnia się żwirem; w razie potrzeby można również umieścić rury szczelinowe w celu zwiększenia przepływu gazu. Łącząc te rowy między jednym a drugim odwiertem, można stworzyć podziemną sieć zbierania, która pozwala zlikwidować wszelkie przerwy, jakie mogą powstać; jedynym środkiem ostrożności jest zapewnienie odpowiedniego nachylenia rowów w kierunku odwiertów, aby umożliwić odpływ odcieków i kondensatu, które mogłyby zalać sam rów, w kierunku odwiertów.

Górna część systemu zbierania ma za zadanie połączyć główny element konstrukcji z siecią transportową gazu składowiskowego. Bez tego elementu łączącego gaz zostałby rozproszony w atmosferze, niwecząc wysiłek włożony w realizację i zarządzanie systemem gromadzenia. Głowice studni mogą być wykonane na dwa sposoby:

- sonda wprowadzona do studni może być połączona z rurą ślepą (dla głębokości co najmniej 2/3 metrów) o takiej samej średnicy jak sonda;
- poprzez konstrukcję "dzwonu", który obejmuje całą górną część kolumny drenażowej, generując swego rodzaju komorę, do której można podłączyć rury pobierające i pompujące odcieki; ta metoda jest preferowana.

W każdym razie, aby uniknąć zasysania powietrza z powierzchni składowiska, konieczne jest zapewnienie doskonałego uszczelnienia pomiędzy studnią a samą pokrywą składowiska.

Biorąc pod uwagę, że elementy te często znajdują się w obszarze działania maszyn eksploatacyjnych, konieczne jest również zagwarantowanie ich odpowiedniej ochrony w celu uniknięcia uszkodzeń.

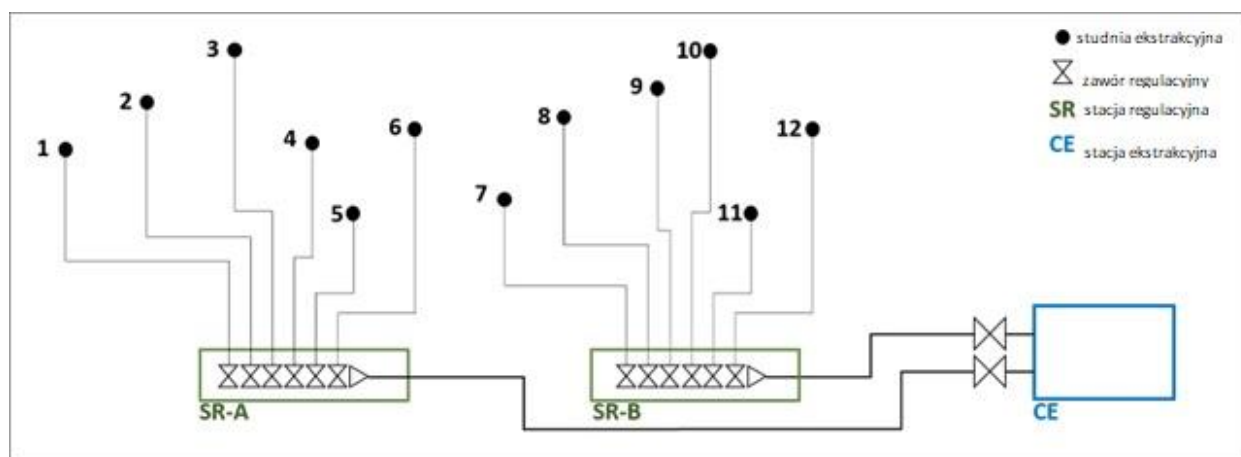
System rur łączących poszczególne elementy zbiorcze z instalacją wydobywczą i oczyszczającą stanowi system transportu gazu składowiskowego.

Ze względu na swoją elastyczność, lekkość, odporność na agresję chemiczną oraz funkcjonalność zarządzania, system transportowy wykonany jest najczęściej z rur z polietylenu wysokiej gęstości (HDPE) o różnych średnicach.

Przy kilkudziesięciu studniach, w celu zapewnienia właściwej regulacji, konieczne jest zebranie ciągów poszczególnych studni, doprowadzając do ich zbiegu w stacjach pośrednich; w tych punktach umieszcza się również urządzenia do regulacji i kontroli odbioru; nazywane są one również Stacjami Kontroli.

Układ transportowy można podzielić na:

- przewody pierwotne (zwykle o średnicach 180/250 mm), które łączą Stacje Kontrolne ze Stacją Ekstrakcyjną;
- przewody pomocnicze (na ogół sugeruje się, aby nie schodziły poniżej 90 mm średnicy), które łączą poszczególne studnie ze Stacjami Regulacyjnymi.



Rysunek 4.5. Schemat systemu transportu gazu składowiskowego. Źródło: Magnano E., ed. 2010, Landfill Biogas, EPC.

Na rysunku 4.5 przedstawiono system transportu gazu wysypiskowego z wyróżnionymi dwoma rodzajami przewodów (przewody główne pogrubione). Gaz przemieszcza się wewnątrz rur z dwóch powodów: ciśnienia (naturalnego) wywieranego wewnątrz ciała odpadowego (w wyniku

jego fermentacji) oraz depresji (sztucznej) systemu wlotowego; efekty tych dwóch działań współlistnieją i sumują się, ale działanie wlotowe jest najbardziej dominujące i ma tę zaletę, że można je regulować.

Należy zauważyć, że system transportu gazu wysypiskowego jest depresyjny; ponieważ jest to gaz palny, aspekt ten przemawia za bezpieczeństwem, gdyż w przypadku pęknięć następuje co najwyżej wlot powietrza do sieci, a nie niekontrolowane uwolnienie biogazu.

Ponieważ gaz wysypiskowy jest gorącym i często nasyconym parą wodną płynem, jednym z głównych problemów zarządzania liniami transportowymi gazu wysypiskowego jest powstawanie kondensacji wewnątrz rur, w związku ze zmianą temperatury (ochłodzeniem), która może wystąpić wzdłuż linii biegnących zewnętrznie (szczególnie w okresach zimnych).

Skropliny ograniczają lub blokują przepływ gazu wysypiskowego wewnątrz rur; ponieważ jednak nie można uniknąć ich powstawania, konieczne jest zapewnienie rozwiązania dla ich odmulania; depresje zastosowane na linii nie są na ogół w stanie zasysać wszystkich zebranych płynów.

Kondensat usuwany jest grawitacyjnie, przy czym należy zwrócić uwagę na to, aby linie zawsze miały profile nachylone w kierunku studni lub Stacji Regulacyjnych; tam, gdzie nie jest to możliwe, należy przewidzieć specjalne spusty kondensatu, aby zagwarantować ciągłość zagłębienia (patrz Rys. 4.6).

Rury, które zazwyczaj biegną po powierzchni składowiska, napotykać na ciągłe przemieszczenia spowodowane osiadaniem odpadów, rozszerzalnością termiczną rur itp. przewody mogą więc stracić nachylenie niezbędne do zapewnienia odprowadzania kondensatu. Kontrola spadku i integralność rur może być zoptymalizowana poprzez ustawienie ich na rusztowaniu z regulowanymi przegubami.



Rysunek 4.6. Linie wtórnego gazu składowiskowego ułożone na podporach z rur metalowych - na pierwszym planie zrzutnia kondensatu - w tle Stacja Regulacji. Source: ASET Spa, Nov.2020.

Jak wspomniano w poprzednich punktach, gaz składowiskowy w studni podlega ciągłym zmianom jakościowym i ilościowym, uwarunkowanym wieloma czynnikami: charakterystyką odpadów, warunkami chemicznymi i fizycznymi (na które wpływają opady atmosferyczne i ciśnienie atmosferyczne), uszczelnieniem, interakcją z innymi studniami itp.

Sprawny odbiór musi uwzględniać te zmiany (występujące kilkakrotnie w ciągu doby) i musi wprowadzić system regulacji szybkości poboru - zasysania; czynność ta jest zwykle wykonywana ręcznie.

Sposoby regulacji zależą również od celów, które mają być osiągnięte: jeśli dąży się do maksymalizacji odzysku energii lub chce się zebrać jak najwięcej gazu wysypiskowego, oczywiste jest, że takie działania są dość skomplikowane w realizacji; tam, gdzie to możliwe, lepiej powierzyć je nowoczesnym automatycznym systemom regulacji (patrz Studium przypadku

4.2.4 Odzysk gazu wysypiskowego/remediacja

Jak podkreślono w poprzednich punktach, zebrany biogaz nie może być uwalniany do atmosfery, musi być poddany obróbce w celu maksymalnego ograniczenia jego negatywnego wpływu na środowisko.

Generalnie, działania związane z odzyskiem/remediacją gazu składowiskowego występują w jednym miejscu, tzw. Centralnym Wydobywaniu.



Rysunek 4.7. Instalacja do ekstrakcji i odzyskiwania energii z gazu wysypiskowego. Source: ASET Spa, 2005.

Transport gazu wysypiskowego jest gwarantowany przez system poboru i sprężania, który ma podwójną funkcję: zapewnienia wystarczającego podciśnienia w całej sieci wychwytywania i transportu oraz sprężania gazu w kierunku organów oczyszczania (patrz poniżej).



Rysunek 4.8 Dmuchawa turbo - Wentylatory odśrodkowe. Źródło: ASWM Srl, 2020.

Praca ta jest wykonywana przez maszyny, wentylatory odśrodkowe lub dmuchawy odśrodkowe, które pobierają gaz i przekazują zasysany gaz do systemów oczyszczania.

Ze względu na dynamikę płynów, urządzenia te muszą gwarantować (stosunkowo) niskie ciśnienie wentylacyjne, ale o dużej wydajności; muszą być odpowiednio zwymiarowane, biorąc pod uwagę szczyty produkcyjne.

W stopniu zasysania konieczne jest zagwarantowanie podciśnienia co najmniej 10÷20 mbar do najdalszego kolektora, natomiast w stopniu sprężania konieczne jest utrzymanie ciągu około 1 bar. Jeśli chodzi o natężenie przepływu, to należy rozważyć maszyny zdolne do poboru/sprężania od kilkuset do kilku tysięcy Nm³/h gazu wysypiskowego. Maszyny te są siłą napędową całego systemu, pracują w sposób ciągły (24h 365 dni/rok). Z tego powodu ważne jest, aby prawidłowo je zwymiarować, aby sprostać potrzebom projektu oraz uwzględnić czas i jego ewentualne zmiany, które występują w trakcie eksploatacji składowiska.

Ogólnie rzecz biorąc, preferuje się wyposażenie zakładu w większą liczbę urządzeń (być może o niższym natężeniu przepływu niż szczytowe), które mogą pracować jednocześnie, aby zapewnić

zmienność natężenia przepływu i zagwarantować działanie systemu nawet w przypadku konserwacji jednego z nich. Biorąc pod uwagę, że wentylatory odśrodkowe są bardzo energochłonne i pracują 24 godziny, możliwe jest zastosowanie maszyn wyposażonych w falowniki, które gwarantują zmniejszenie zużycia energii elektrycznej.

Na rynku dostępna jest szeroka gama maszyn o różnej charakterystyce (w ostatnich latach również z zabezpieczeniem Atex), pozwalająca pokryć wszystkie potrzeby projektowe.

Oczyszczanie gazu wysypiskowego zależy w większości przypadków od jakości i natężenia przepływu samego biogazu.

Gdy zawartość metanu jest większa niż 25-30 %, możliwe jest przeprowadzenie obróbki termicznej poprzez spalanie; raczej niższa zawartość metanu nie może zagwarantować odpowiedniej wartości grzewczej/termicznej dla spalania.

Wyższe poziomy metanu pozwalają na bardziej zaawansowane i wydajne możliwości obróbki, aby zapewnić odzysk energii, natomiast w przypadku gazu wysypiskowego o niskim procencie metanu, biofiltracja jest jedyną możliwą obróbką.

Można zastosować następujące sposoby oczyszczania gazu składowiskowego, wymienione w kolejności rosnącej procentowej zawartości metanu:

- (0÷25%) biofiltracja;
- (> 25%) palniki statyczne lub płomieniowe;
- (> 30%) palniki wysokotemperaturowe;
- (> 35%) mikroturbiny;
- (> 35÷40 %) silniki spalinowe.

W przypadku:

- otwartych składowisk z nie szeroko zagęszczonymi i/lub odkrytymi odpadami, gdzie w związku z tym faza beztlenowa nie jest aktywowana w samych odpadach;
- w pierwszych etapach zagospodarowania składowiska;
- lub na składowiskach zamkniętych od wielu lat;

"jakość" gazu wysypiskowego nie może gwarantować obróbki spalania.

W takich przypadkach przydatne może być wyposażenie instalacji w biofiltry, które mogą utleniać i biodegradować wiele substancji organicznych i nieorganicznych zawartych w gazie składowiskowym.



Rysunek 4.9. Przykłady biofiltrów kontenerowych z materiałem organicznym. Źródło: ASWM Srl, 2021.

Biofiltry to pojemniki w kształcie zbiorników wypełnione materiałem organicznym (najczęściej korą drzewną) o dużej porowatości (rys. 4.9). Mogą być statyczne lub mobilne (biofiltry modułowe).

W masie organicznej aktywuje się szeroka gama mikroorganizmów (bakterie, grzyby itp.), zdolnych do rozkładu wielu substancji poprzez szereg reakcji biologicznych.

Substancje zawarte w gazie wysypiskowym (metan, siarkowodór, amoniak, merkaptany, węglowodory, tlenek węgla itp.) są w dużej mierze adsorbowane przez biofiltr, a następnie metabolizowane przez mikroorganizmy.

Skuteczność redukcji tych substancji jest na ogół bardzo wysoka, w przypadku utleniania metanu może przekraczać 80%.

Technologia ta od wielu lat jest z powodzeniem stosowana do oczyszczania terenów zniszczonych przez kompostownie oraz do oczyszczania ścieków.

Reakcje mogą zachodzić tylko wtedy, gdy istnieją określone warunki chemiczne i fizyczne (temperatura, wilgotność, pH, czas kontaktu z gazem itp.); można je jednak łatwo kontrolować. Należy zwrócić uwagę, gdy mieszanina metanu z tlenem wchodzi w zakres wybuchowy (5÷15 % metanu w powietrzu). Natężenie przepływu mieszaniny gazów zapewni wymiarowanie zbiorników, które charakteryzują się dużą modułowścią; również koszty i czynności zarządcze są bardzo ograniczone i obejmują: utrzymanie warunków chemicznych i fizycznych materiału roślinnego, jego wymianę (trwającą zwykle latami) oraz kontrolę dopływających gazów i emisji. Dlatego poprzez prosty i ekonomiczny system można skutecznie oczyszczać nawet duże ilości gazu wysypiskowego o niskiej zawartości energii.

Gdy metan jest obecny w gazie wysypiskowym z procentem wyższym niż 25%, najbardziej odpowiednią obróbką staje się spalanie: metan i inne substancje (np. H₂S) są utleniane, produkując dwutlenek węgla, który ma zmniejszone oddziaływanie (patrz paragraf 1).

Spalanie (bez odzysku energii) odbywa się zwykle w palniku, gdzie metan, obecny w gazie wysypiskowym, pełni rolę paliwa, a tlen, obecny w powietrzu, rolę utleniacza (podczas gdy obojętny azot pozostaje niezmienny); główne reakcje to:



Jeśli gaz wysypiskowy zawiera związki fluorowe, chlorowe lub siarkowe, nieuchronnie powstaje również kwas fluorowodorowy (HF), kwas solny (HCl) i dwutlenek siarki (SO₂).

Obecność azotu prowadzi oczywiście również do intensywnego wytwarzania tlenków azotu (NO_x), zwłaszcza przy wysokich temperaturach spalania (> 1.200 °C).

Niskie temperatury spalania, "niski czas przebywania w płomieniach" i złe mieszanie gazów prowadzą do powstawania niebezpiecznych związków, takich jak dioksyny i furany.

Kontrola warunków spalania ma ogromny wpływ na reakcje chemiczne i decyduje o jakości spalin.

W celu zagwarantowania efektywnego spalania niezbędne są następujące elementy i działania:

- temperatury spalania pomiędzy 850 a 1.100 °C;
- czas zatrzymania gazu > 0,3 sek;
- odpowiednie wymieszanie gazów;
- unikanie nagłego schłodzenia płomienia.

Najprostszymi urządzeniami są palniki statyczne lub z otwartym płomieniem.

Są one zazwyczaj zasilane bezpośrednio przez nadciśnienie gazu powstającego w wyniku fermentacji materii organicznej zawartej w odpadach; często składają się z jednej lub kilku paplników ustawionych bezpośrednio na elementach zbierających w samych odpadach.

Stanowi to ekonomiczne rozwiązanie odzyskiwania gazu wysypiskowego; należy jednak zwrócić uwagę na 2 główne negatywne aspekty, a mianowicie łatwopalne warunki stwarzane przez odpady oraz brak możliwości zapewnienia właściwego spalania i kontroli spalin.

Palniki wysokotemperaturowe są mechanizmami o dużej wydajności, ponieważ utrzymują ciepło płomienia wewnątrz.

Obecność komór spalania, powłoki ogniotrwałe i inne urządzenia, zapewniają optymalne warunki spalania spełniając wymagania związane z limitami emisji gazów w wielu krajach.

Konieczne jest odniesienie się do maksymalnych wskaźników produkcji gazu wysypiskowego, który ma być przetwarzany, zarówno jeśli odzysk biogazu wysypiskowego jest generowany wyłącznie poprzez spalanie w palniku, jak i wtedy, gdy jest ona używana tylko wtedy, gdy urządzenie wykorzystujące energię (patrz poniżej) jest w konserwacji.

Jednakże, jak wspomniano w poprzednich akapitach, produkcja gazu wysypiskowego zmienia się znacznie w czasie eksploatacji wysypiska; dlatego ważne jest również uwzględnienie minimalnego poziomu produkcji gazu wysypiskowego, zapewniając, że palnik może obsługiwać niższe natężenia przepływu. Wielkość palnika musi uwzględniać zakres prac, w których będzie ona pracować.



Rysunek 4.10. Palnik wysokotemperaturowy. Source: CONVECO Srl,2021. All rights reserved.

Jeśli pojedyncze urządzenie nie jest w stanie pokryć tego zakresu, warto zaopatrzyć się w dwa elementy - uruchamiane pojedynczo lub parami - w zależności od możliwości systemu.

Kiedy procent metanu w gazie wysypiskowym jest dalej zwiększany (co najmniej 35%), można rozważyć jego odzysk energetyczny; w tym przypadku będą dwie korzyści dla środowiska: redukcja emisji metanu i brak emisji CO₂ do atmosfery, który w przeciwnym razie zostałby wygenerowany przez użycie paliw kopalnych do wyprodukowania tej samej ilości energii. Z tego powodu odzyskiwanie energii z biogazu ze składowiska odpadów można uznać za źródło odnawialne.

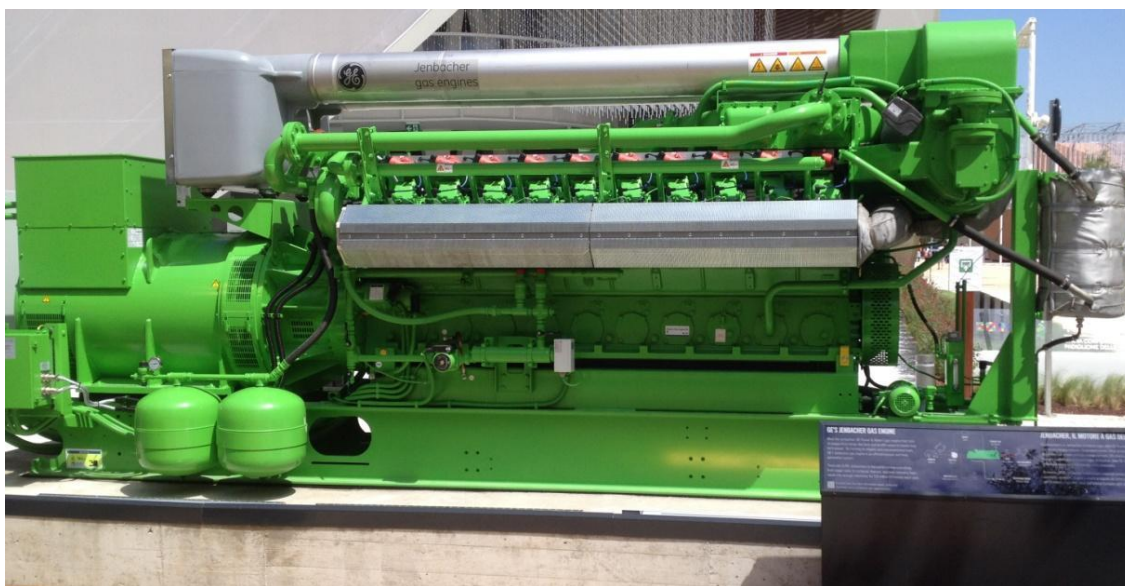
Potencjalna energia chemiczna obecna w gazie wysypiskowym może być łatwo przekształcona w energię cieplną (wydajność do 90%), natomiast wydajność dla energii elektrycznej może osiągnąć maksymalnie 40%, ale wymaga to dodatkowej pracy mechanicznej (silniki i alternatory). Jednak w przypadku braku użytkownika energii cieplnej w pobliżu zakładu (np. szklarni), produkcja energii elektrycznej, łatwej do transportu i możliwej do wykorzystania nawet przez odległych użytkowników, jest najwłaściwszym sposobem rozwiązania problemu. Jeśli z energii elektrycznej odzyskuje się energię cieplną, to ma miejsce proces kogeneracji (takie sekwencyjne wytwarzanie dwóch różnych form energii użytecznej z jednego źródła

energii pierwotnej, zwykle energii mechanicznej i energii cieplnej). Rozwiązaniem do produkcji energii elektrycznej są mikroturbiny gazowe, które charakteryzują się niewielkimi rozmiarami i modułowością (pozwalającą na wprowadzenie do użytku większej ilości małych urządzeń), ale także wysokim początkowym kosztem inwestycyjnym.

Najpopularniejszą metodą zapewniającą produkcję energii elektrycznej z gazu wysypiskowego jest zastosowanie silnika endotermicznego połączonego z generatorem prądu. Przetwarzanie gazu wysypiskowego na energię elektryczną przez zespół prądotwórczy jest znacznie bardziej praktyczne niż inne metody.

Gaz wysypiskowy jest stosowany jako paliwo w silnikach, które wspierają stosowanie paliwa niskometanowego ($> 35\%$) oraz obecność gazów obojętnych (N_2 i CO_2). Wielkości silników wahają się od minimum 100 do maksimum 1.500 kW_e. Silniki te muszą być dobrane pod względem wielkości do ilości gazu wysypiskowego, który ma być poddany obróbce oraz zawartości metanu w mieszaninie. Sprawność jest różna, w zależności od paliwa i obciążenia pracą urządzenia (w zakresie $30\div 40\%$).

Ciśnienia zasilania są kompatybilne z ciśnieniami generowanymi przez turbo dmuchawę używaną do zasysania gazu wysypiskowego, dlatego nie ma potrzeby stosowania dodatkowych sprężarek. Istnieje możliwość modyfikacji i dostosowania gaźnika silnika w celu kontroli emisji, która musi być zgodna z limitami, w zależności od konkretnych przepisów krajowych; jeśli nie jest to możliwe, konieczne jest połączenie dopalacza, który dodatkowo utlenia tlenek węgla i niespalone węglowodory.

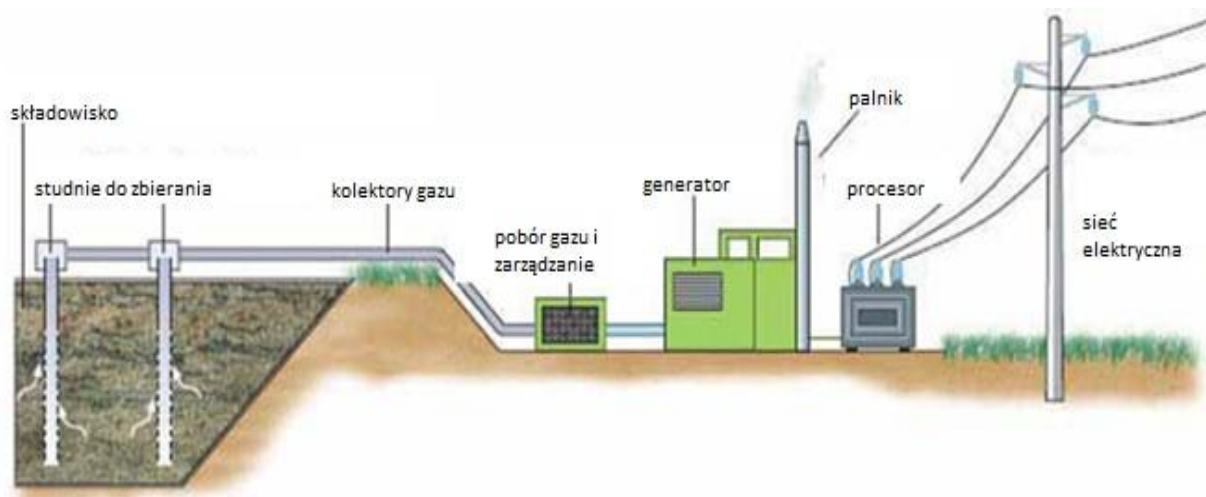


Rysunek 4.11. Silnik gazowy Jenbacher GE, USA Pavilion, Expo 2015, Milan, Italy. Źródło: sbamueller, CC BY-SA 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0>>, via Wikimedia Commons.

Ogólnie rzecz biorąc, należy przewidzieć również pewną obróbkę wstępną gazu wysypiskowego przed wprowadzeniem do silnika. Gaz wysypiskowy dociera często nasycony parą wodną, dlatego musi być osuszony; proces ten może również usunąć inne substancje (np. H_2S), które przechodzą do roztworu.

Jeśli obecność innych kwasów (solnego, fluorowodorowego) lub siloksanów (organicznych związków krzemu) jest silna, konieczne będzie zapewnienie innych form obróbki wstępnej. Generalnie jednak, przy początkowej inwestycji, zastosowanie silników endotermicznych (i związanego z nimi osprzętu) gwarantuje długi okres eksploatacji (nawet powyżej 10 lat lub 100 000 h), a koszty utrzymania stopniowo rosną, ale są rekompensowane przez przychody ze sprzedaży energii elektrycznej; jak wspomniano, w rzeczywistości produkcja ta jest uznawana za źródło odnawialne i często jest sprzedawana według taryf gwarantowanych.

Na tym ostatnim rysunku (4.12) przedstawiono system zbierania, transportu, przetwarzania i produkcji energii elektrycznej z gazu wysypiskowego.



Rysunek 4.12. System zbierania gazu składowiskowego i eksploatacji energetycznej gazu składowiskowego: Źródło: Il Gestore Servizi Energetici (Gse) incontra la Regione Emilia-Romagna, regione.emilia-romagna.it, 2011.

4.3 Gospodarka odciekami ze składowisk odpadów

4.3.1 Charakterystyka odcieku

Jakościowe i ilościowe właściwości odcieku ze składowiska zależą od wielu czynników, z których niektóre są trudne do kontrolowania, takie jak warunki pogodowe, cechy hydrologiczne, skład i wiek odpadów, itp.) Wszystkie te elementy oznaczają krytyczne kwestie związane z zarządzaniem, które doprowadziły do przyjęcia różnego podejścia systemowego, zarówno na poziomie europejskim, jak i krajowym.

Z ilościowego punktu widzenia, wytwarzanie odcieków jest w dużej mierze przypisywane wejściom zewnętrznym (infiltracja wody deszczowej, zarówno powierzchniowa, jak i podziemna) oraz wejściom wewnętrznym, takim jak poziom wilgotności odpadów i bilanse wodne związane z biochemicznymi reakcjami składowania odpadów.

W szczególności wejścia zewnętrzne odnoszą się do:

- Charakterystyki meteorologicznej i hydrogeologicznej na terenie składowiska, w szczególności związanej z opadami deszczu, temperaturami, ekspozycją słoneczną lub wiatrem, infiltracją zbiorników wodnych, zarówno powierzchniową jak i podziemną.
- Model zarządzania składowiskiem: obecność drenażu, system wykładziny pierwotnej lub wtórnej, rozbudowa i pokrycie zbiornika na odpady, ewentualna recyrkulacja odcieków.
- Charakterystyka odpadów: skład odpadów, poziom wilgotności, ewentualne obróbki wstępne, wielkość, stopień zagęszczenia.

Skład i wytrzymałość odcieków jest bardzo zróżnicowany w zależności od składowiska, a nawet w obrębie danego składowiska.

Należy zauważyć, że nawet w przypadku braku zewnętrznych czynników (np. systemu zamknięcia składowiska), beztlenowy rozkład odpadów i produkcja odcieków trwa nawet po zakończeniu cyklu życia składowiska. Oznacza to, że zarządzający składowiskiem muszą utrzymywać działanie instalacji odwadniających i oczyszczających, zapewniając jednocześnie bezpieczeństwo otaczającego środowiska przed zanieczyszczeniem, zgodnie z przepisami prawa krajowego.

Z jakościowego punktu widzenia niemożliwe jest opisanie typowego składu ocieku ze składowiska, ponieważ wpływają na niego różne czynniki, które w szczególny sposób oddziałują na proces biodegradacji odpadów, przyczyniając się do przesączania różnych zanieczyszczeń.

Głównymi czynnikami wpływającymi na postęp biodegradacji są:

- Poziom wilgotności składowanych odpadów.
- Ilość i charakter składników organicznych (szczególnie w przypadku osadów ściekowych, kompostów pozakompostowych)
- Poziom metali i/lub substancji toksycznych pochodzących z baterii, leków, rozpuszczalników itp.
- Poziomy selektywnej zbiórki odpadów w otoczeniu składowiska, które mogą różnicować rodzaj utylizacji odpadów.

Wstępna obróbka odpadów i umieszczenie ich na składowisku to kolejne dwa ważne czynniki, które wpływają na zdolność absorpcji wody przez masę odpadów, co prowadzi do migracji zanieczyszczeń w odciekach.

Badania wykazują, że stężenie zanieczyszczeń w ocieku jest wyższe w pierwszym roku eksploatacji składowiska i stopniowo maleje w kolejnych latach. Tendencja ta dotyczy parametrów organicznych (ChZT, BZT, TOC) oraz głównych soli nieorganicznych (metale ciężkie, siarczany, itp.).

Te parametry organiczne to:

- BOD= biochemiczne zapotrzebowanie na tlen
- ChZT= chemiczne zapotrzebowanie na tlen
- TOC= całkowita zawartość węgla związanego organicznie.

Usuwanie substancji organicznych opartych na COD, BOD i amonach z odcieków jest zwyczajowym warunkiem wstępnym przed odprowadzeniem odcieków do wód naturalnych.

W aspekcie mikrobiologicznym, rozmnażanie się grzybów i bakterii jest hamowane przez powszechne warunki środowiskowe (wysokie temperatury i pH) podczas procesu biodegradacji.

Od lat 70-80-tych zastosowanie modeli matematycznych pomaga przewidzieć charakterystykę odcieków i związane z tym implikacje w odniesieniu do bilansu wodnego składowiska. W rzeczywistości, masa odpadów działa jako nienasycony element w składowisku, które jest pomyślane jako "bioreaktor". Modele te udowodniły już swoją skuteczność i mogą być przydatne w pierwszej fazie procesu projektowania składowiska wraz z analizą danych lokalnych.

4.3.2 Odwadnianie i zbieranie odcieków

Jak wspomniano wcześniej, przesączanie i dyfuzja odcieków na zewnątrz składowiska jest kontrolowana przez warstwę ochronną wraz z systemem zbierania i usuwania odcieków. Oczywiście, w przypadku rekultywacji otwartych składowisk, stosowanie barier dennych i gruntowo-ściennych dla odcieków jest dopuszczalne tylko w przypadku możliwości eksploatacji nowych zbiorników na odpady, budowanych na obrzeżach terenów przeznaczonych do rekultywacji.

System barier inżynierskich skutecznie zatrzymuje odpady, a ich najczęstszy skład to:

- Glina
- Mieszanki piaskowo-bentonitowe
- Mieszanki piaskowo-cementowe
- Membrany geosyntetyczne

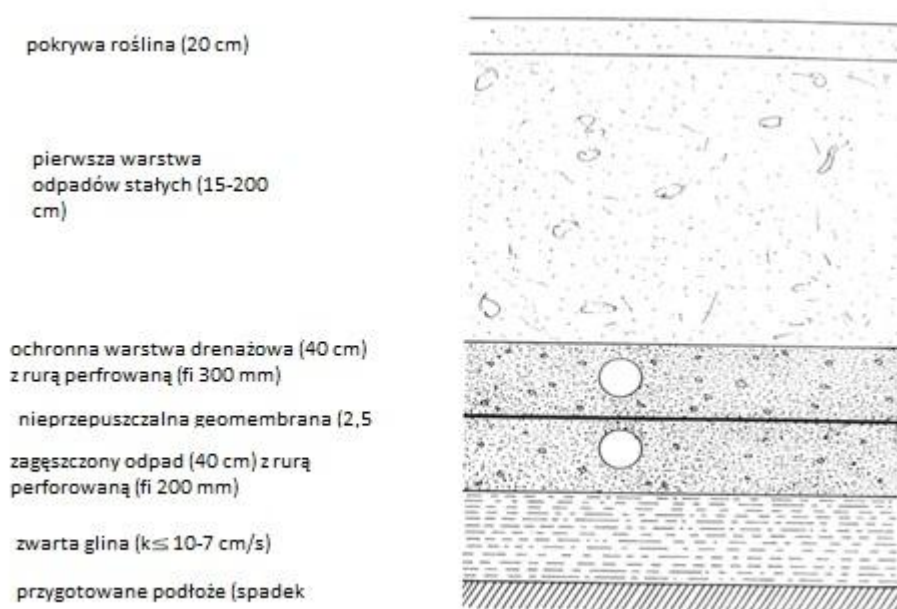
W ciągu ostatnich 20 lat w inżynierii geotechnicznej powszechne stało się stosowanie elementów produkowanych z syntetycznych materiałów polimerowych, zwanych geosyntetykami. Powszechnie stosowane materiały geosyntetyczne w inżynierskich systemach uszczelniających obejmują geomembrany, geotekstylię, geonety i geosyntetyczne wykładziny gliniane. Ostatni postęp technologiczny sprawił, że produkty geosyntetyczne stały się bardziej atrakcyjne dla projektantów składowisk, ponieważ mogą one pełnić różne funkcje w tym samym czasie (nieprzepuszczalność, drenaż, stabilność skarpy, itp.).

Ponadto, membrany te mają pewne zalety w zakresie opłacalności odpowiednich ilości materiału ilastego niezbędnych do osiągnięcia tych samych parametrów technicznych, oprócz tego, że nie zmniejszają pojemności zbiornika do składowania odpadów.

Ich głównymi zaletami są:

- Elastyczność
- Trwałość, w przeciwieństwie do barier wykonanych z materiałów naturalnych
- Wysoka odporność na trakcję oraz ataki chemiczne i biologiczne
- Ekonomiczność: kosztują mniej niż ich naturalne odpowiedniki.

Łączne stosowanie różnych typów produktów (naturalnych i syntetycznych) staje się coraz bardziej powszechne, a jego głównym celem jest optymalizacja osobliwości wybranego materiału.

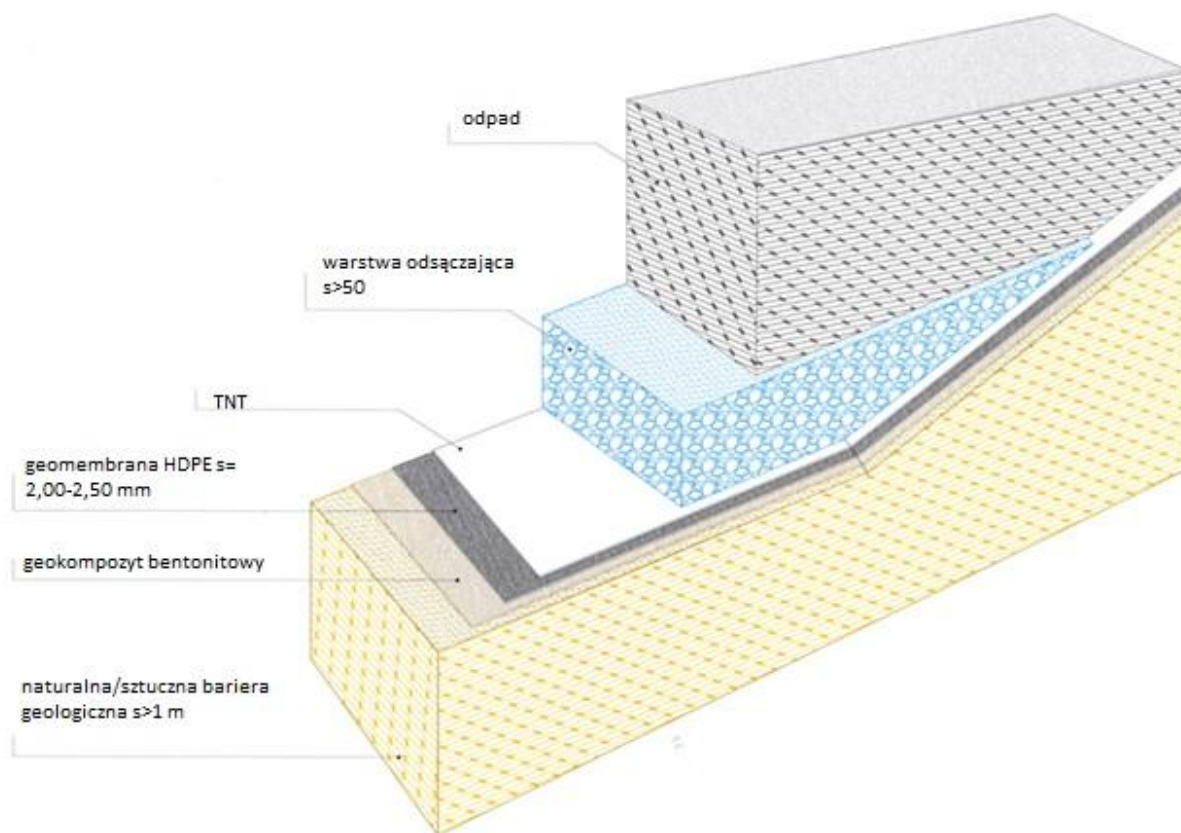


Rysunek 4.13. Przekrój tradycyjnego składowiska odpadów stałych. Source: Gervasoni S., ed 2000, The controlled landfills, HOEPLI

Rysunek 4.13 przedstawia tradycyjny przekrój projektowy Miejskiego Składowiska Odpadów Stałych dla miejsc charakteryzujących się naturalnym gruntem gliniastym ($K \leq 10^{-7}$ cm/s) lub rodzajem podłoża przed utworzeniem bariery.

Z czasem stopniowo zrezygnowano z tworzenia warstw drenażowych pod wodoszczelną geomembraną, ze względu na ich tendencję do nasycania się, co prowadziło do powstania hydraulicznej głowicy odcieku w bezpośrednim kontakcie z barierą mineralną, zwiastującej ewentualne rozproszenie w podłożu. Ponadto detekcja wycieków przez rury nie pozwoliłaby na ich wykrycie, gdy składowanie odpadów jest już w końcowej fazie realizacji.

Obecnie wśród geomembran coraz powszechniej stosowane są geosyntetyki bentonitowe. Właściwości chemiczne bentonitu sodowego sprawiają, że w kontakcie z odciekami zwiększa on swoją objętość nawet kilkunastokrotnie. W ten sposób jest w stanie zabezpieczyć system przed ewentualnymi przeciekami (rys. 4.14) i jest kompatybilny z leżącą pod nim barierą mineralną.

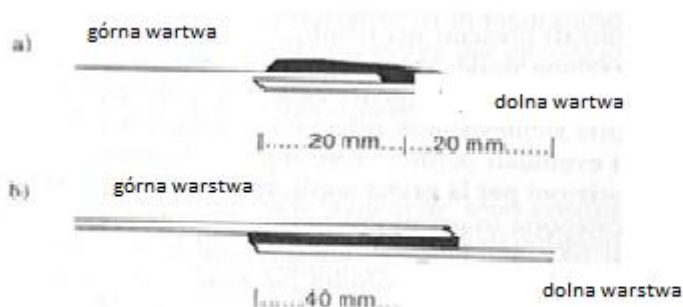


Rysunek 4.14. Przykład różnych rozwiązań geomembran z geowłókniną. Źródło: ASET Spa, 2022.

Najczęściej stosowanym materiałem w produkcji wykładzin syntetycznych jest geomembrana HDPE o grubości 2,0-2,5 mm. Geomembrany HDPE dostarczane są w postaci rolek arkuszy, obecnie dostępnych w różnych grubościach, a także wykończeniach powierzchni, co ma na celu poprawę zdolności przylegania i utrudnienie wślizgiwania się brzegu.

Montaż arkuszy HDPE, dostarczanych zwykle w dużych rolkach (np. 10x200 m) odbywa się poprzez ułożenie ich obok siebie z odpowiednim zakładem (minimum 200 mm) i zgrzanie termiczne krawędzi, których powierzchnie powinny być wcześniej wyszlifowane lub podgrzane. Do ich montażu służy specjalny automat spawalniczy, zapewniający równomierność zgrzewów (rys. 4.15). Szwy i krawędzie są krytycznym punktem odrywania się arkuszy i mogą powodować przerwanie ciągłości bariery wodoodpornej. Istnieją dwa sposoby sprawdzania integralności systemów okładzin geomembranowych, mianowicie poprzez badania nieniszczące i niszczące.

Pierwsze z nich wykonuje się na wszystkich wzdłuż spoin ekstruzyjnych, natomiast drugie poprzez wycięcie próbek spoin.



Rysunek 4.15. Typ geomembrany HDPE zgrzewanej na budowie: a) złącza zakładkowe (ręcznie), b) złącza przekładane (automatycznie). Źródło: Gervasoni S., ed 2000, The controlled landfills, HOEPLI

Odbiór odcieków powierza się sieci mikroszczelinowych rur umieszczonych w warstwie drenażowej nad barierą wodoszczelną w dnie; cała sieć zbiorcza charakteryzuje się spadkami zdolnymi skierować odcieki do punktu położonego na niższej wysokości geodezyjnej, tak aby spływały grawitacyjnie (rys. 4.16). Następnie zostanie on przepompowany do zbiorczych/wyrównawczych zbiorników wodnych i ostatecznie oczyszczony.



Rysunek 4.16. Typowy schemat odprowadzania odcieków. Źródło: The controlled landfills, Gervasoni S., ed 2000, HOEPLI

Jak już wspomniano, w przypadku rekultywacji otwartych wysypisk bez możliwości przeniesienia odpadów do nowych szczelnych niecek, odbiór odcieków można powierzyć

specjalnym studniom wierconym w masie już zamkniętej. Do tego celu można również zaadaptować przedstawione wcześniej pionowe studnie do gromadzenia biogazu (patrz rys. 4.3). Kolumna żwirowa gwarantuje odprowadzenie odcieku, który - zbierany przez sondę szczelinową i opadający grawitacyjnie na dno studni - może być zasysany przez specjalne pompy osiowe przystosowane do montażu w obrębie rurociągu.

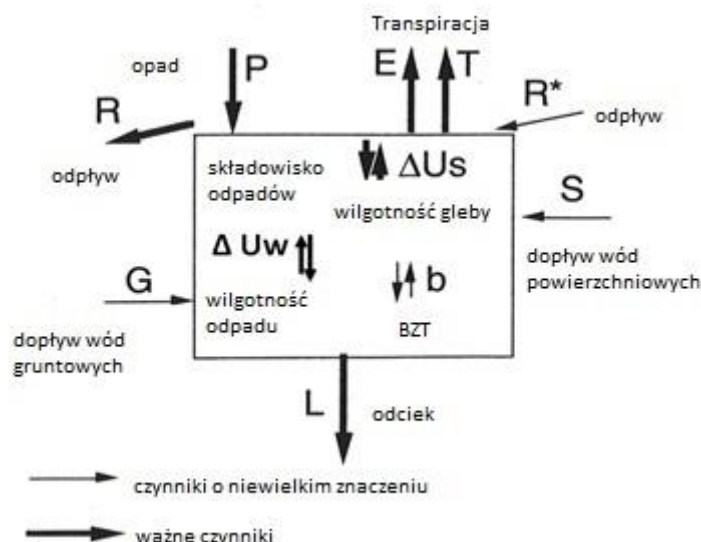
4.3.3 Minimalizacja powstawania odcieków

Wytwarzanie odcieków jest w dużej mierze przypisywane wpływom zewnętrznym (infiltracja wody deszczowej, powierzchniowej i/lub gruntowej), a w pozostałej części wpływom wewnętrznym/konsumpcji, takim jak zawartość wilgoci i bilans wodny związany z reakcjami biochemicznymi zachodzącymi w cieple odpadu. Dlatego też niezwykle ważne jest - zwłaszcza w przypadku rekultywacji otwartych składowisk - staranne zaplanowanie wszystkich działań mających na celu zminimalizowanie wytwarzania odcieków w czasie. Następnie, właściwe procesy ekstrakcji, oczyszczania i recyrkulacji odcieków stanowią istotny wkład w zrównoważone składowanie odpadów, poprzez kontrolę procesów biodegradacji i usuwanie rozpuszczalnych zanieczyszczeń w celu osiągnięcia, w czasie jednego pokolenia, stanu geologicznego składowania substancji nieorganicznych i nie ulegających degradacji odpadów organicznych na składowisku.

Modele generowania odcieków są niezbędne do zdefiniowania, zaprojektowania i zwymiarowania prac, które są związane ze wszystkimi wyżej wymienionymi aspektami.

Traktując składowisko jako zamknięty i planimetrycznie zdefiniowany zbiornik wodny, na ilość odcieków wpływa bilans masowy zewnętrznych i wewnętrznych przepływów wody otaczających składowisko, jak również akumulacji i wewnętrznej produkcji/zużycia.

Poniższy schemat (rys. 4.17) podsumowuje główne składniki bilansu wodnego składowiska:



Rysunek 4.17. Simplified diagram of MSW landfills water balance. Source: Collivignarelli C., ed.1996, Leachate management from Urban Solid Waste Landfill, C.I.P.A

Z wykresu wynika, że:

$$L_c = L - L_i$$

Gdzie L_c (ilość zebranych odcieków) jest równa całkowitej wyprodukowanej ilości (L) minus część potencjalnie utracona w wyniku infiltracji (L_i) na granicy (miejmy nadzieję, że równa jest 0)

Nie wszystkie elementy mają takie samo znaczenie w równaniu. Dominującym czynnikiem są opady atmosferyczne (P), podczas gdy czynnik BZT (b) jest nieistotny. W związku z tym, a w szczególności w przypadku rekultywacji otwartych wysypisk, minimalizacja powstawania odcieków musi skupić się na czynnikach, które mają istotny wpływ na ten proces.

Elementami, które można wyeliminować poprzez zabiegi odwadniania i usuwania odpadów są:

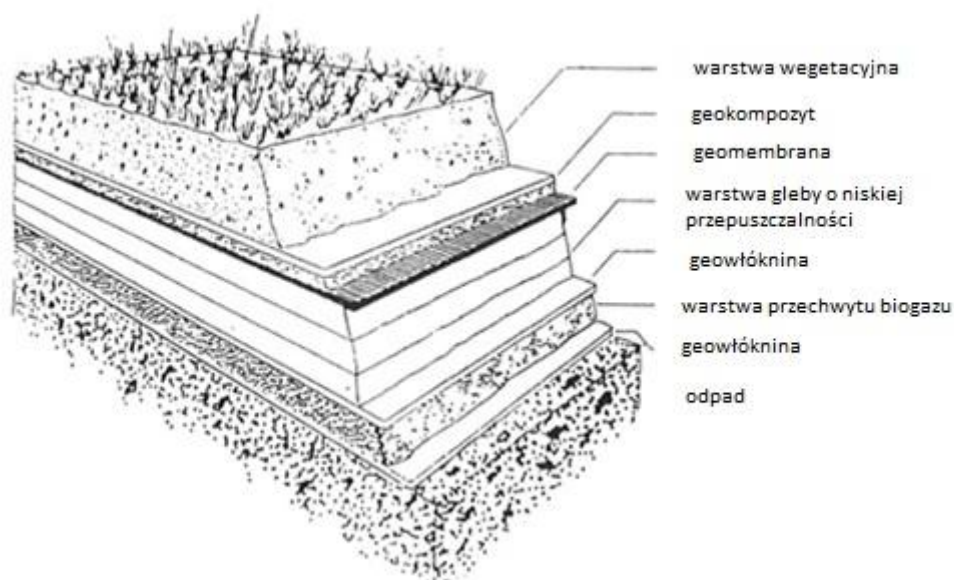
- spływ powierzchniowy
- infiltracja powierzchniowych zbiorników wodnych
- infiltracja warstw wodonośnych wód gruntowych.

Inne elementy mogą być kontrolowane tylko poprzez efektywne operacje techniczne:

- materiał przykrywający
- nachylenie powierzchni pokrycia
- stopień zagęszczenia

- metody gospodarki wodnej
- ewentualna recyrkulacja odcieków.

Jeśli chodzi o możliwe do kontrolowania czynniki minimalizujące powstawanie odcieków, to szczególnej uwagi wymaga system zamknięcia składowiska. Zamknięcie jest technologią hermetyzacji, która tworzy barierę pomiędzy zanieczyszczoną masą odpadów a powierzchnią, chroniąc w ten sposób ludzi i środowisko przed szkodliwym działaniem ich zawartości poprzez ograniczenie ich migracji. Czapa musi ograniczać infiltrację wód powierzchniowych do zanieczyszczonego podłoża, aby zmniejszyć możliwość wymywania zanieczyszczeń z terenu. Operacja ta ma zarówno wartość środowiskową, jak i ekonomiczną ze względu na wysokie koszty oczyszczania i usuwania odcieków.



Rysunek 4.18 Przykładowy system zamknięcia składowiska. Źródło: Gospodarka odciekami z Miejskich Składowisk Odpadów Stałych, Collivignarelli C., C.I.P.A.

Poza minimalizacją powstawania odcieków, system zamykania izoluje i zapobiega rozprzestrzenianiu się zanieczyszczeń na kilka sposobów poprzez:

- Zapobieganie wywiewaniu przez wiatr skażonego materiału poza teren zakładu.
- Kontrolowanie uwalniania gazu z odpadów zawierających lub wytwarzających "lotne" substancje chemiczne.
- Zapobieganie kontaktowi ludzi i dzikich zwierząt z materiałem niebezpiecznym i przenoszeniu zanieczyszczeń poza teren zakładu.
- Uprawa roślinności

Bariery o niskiej przepuszczalności (LPB) - mające na celu ograniczenie infiltracji wody meteorycznej wewnątrz masy odpadów - są równie ważne jak system wykładziny dennej i dlatego zasługują na szczególną uwagę projektantów i zarządców składowisk.

Obecnie najczęściej stosowanym rozwiązaniem dla LPB jest mieszanie barier naturalnych i syntetycznych, czyli arkuszy HDPE i zagęszczonego gruntu gliniastego. Szczególnie bariery kapilarne są skutecznym rodzajem systemu uszczelniającego, który może być stosowany jako pokrywa końcowa na składowiskach i terenach rekultywacji. System ten składa się z dwóch nachylonych warstw, gdzie w warstwie kapilarnej zastosowano drobnoziarnisty piasek, który pokrywa warstwę gruboziarnistą (blok kapilarny). Wykorzystuje to fakt, że warstwa drobnego piasku staje się bardzo nasycona wodą z góry, uniemożliwiając jej przesiąkanie w dół do bloku kapilarnego. Zamiast tego woda jest zatrzymywana tuż nad granicą styku obu warstw i spływa z boku do rowu zawierającego odpływ u podnóża zbocza. Podejście inżynierskie ma fundamentalne znaczenie również w tej fazie, ponieważ mimo że stanowi ona koniec cyklu życia składowiska, ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia skuteczności pokrywy w zakresie minimalizacji infiltracji w czasie.

Inne możliwe do kontrolowania czynniki mające na celu minimalizację powstawania odcieków związane są ze zwykłymi czynnościami związanymi z zarządzaniem składowiskiem, którymi są:

- Ograniczenie rozbudowy zbiornika na odpady; może to zmniejszyć ryzyko infiltracji wód meteorycznych
- Materiał stosowany do przykrywania musi mieć zdolność absorpcyjną, a nie być całkowicie nieprzepuszczalny. Biodegradację zapewnia obecność wody, która utrzymuje określony poziom wilgotności w odpadach. Przykładem może być arkusz półprzepuszczalny lub inny, który również pomaga w emisji zapachów.
- Recyrkulacja ocieku wewnątrz ciała odpadu poprzez odpowiednie systemy dyfuzyjne może znacznie zmniejszyć ilość ocieku, zwłaszcza tam, gdzie charakterystyka składowiska pozwala na wyższy poziom ewapotranspiracji (tj. szczególne warunki pogodowe i gleba wegetatywna).

4.3.4 Oczyszczanie odcieków

Ze względu na różnice w ilości i jakości odcieków, niemożliwe jest podanie ogólnego schematu oczyszczania obowiązującego dla wszystkich typów składowisk. W rzeczywistości istnieją różne podejścia do oczyszczania odcieków, od chemiczno-fizycznych do biologicznych, zarówno tlenowych jak i beztlenowych. W zależności od obowiązujących przepisów, zarządzający

składowiskiem mogą zdecydować się na wdrożenie jednego lub kombinacji wyżej wymienionych rodzajów oczyszczania, zgodnie z możliwościami dostępnymi na miejscu.

- Utylizacja w zbiornikach wód powierzchniowych
- Miejskie zakłady oczyszczania odcieków

Jednym z najbardziej powszechnych, ale nie będących rozwiązaniem, jest zbieranie, gromadzenie i oczyszczanie odcieków poprzez zbiorniki, ponieważ są one traktowane jako "odpady płynne". Wynika to z różnych interpretacji prawnych właściwych organów na terenie Włoch.

Podobnie, ramy prawne regulujące recyrkulację odcieków na zbiorniku odpadów zależą od kontekstu terytorialnego. Na przykład nie może być ona przeprowadzona tam, gdzie odciek ze składowiska jest uważany za specjalny rodzaj odpadu, różny od ciała odpadowego, które go wytworzyło. Uniemożliwia to jego ponowną alokację na składowisku, na którym został wyodbrębniony.

References

Arecco F., ed. 2012, *Biogas Energy*. Edizioni Ambiente Publisher (Energia da biogas)

ASWM Srl, <http://www.aswmsrl.com/>

Collivignarelli C., ed.1996, *Leachate management from Urban Solid Waste Landfill*, C.I.P.A. Publisher (*Il trattamento del percolato da discarica RSU*)

CONVECO Srl, <https://www.conveco.com/en/home.html>

Cossu, R., Grossule, V., Lavagnolo, M.C., 2020. *Sustainable Landfill: Role in the Circular Economy and Regulatory Proposals*. CISA publisher (*La Discarica Sostenibile*)

Damiani L., Gandolla M., 1992, *Biogas management in controlled landfills*, Istituto per l'Ambiente Publisher (*Gestione del biogas da discariche controllate*)

Gervasoni S., ed 2000, *The controlled landfills*, HOEPLI Publisher (*Le discariche controllare*)

Il Gestore Servizi Energetici (Gse) incontra la Regione Emilia-Romagna (2011, November, 8th), [regione.emilia-romagna.it](https://energia.regione.emilia-romagna.it/leggi-atti-bandi-1/documenti-e-pubblicazioni/eventi/2010/il-gestore-servizi-energetici-gse-incontra-la-regione-emilia-romagna/CREMONA_GSE.pdf). Retrieved 11:57, March 28th, 2022 from https://energia.regione.emilia-romagna.it/leggi-atti-bandi-1/documenti-e-pubblicazioni/eventi/2010/il-gestore-servizi-energetici-gse-incontra-la-regione-emilia-romagna/CREMONA_GSE.pdf.

Magnano E., ed. 2010, *Landfill Biogas*, EPC Publisher (*Biogas da Discarica*)

Vismara R., Malpei F., Centemero M., ed. 2008, *Biogas from Urban Solid Waste*, Dario Flaccovio Publisher (*Biogas da rifiuti solidi urbani*)