

# Metody generowania energii

Ewa Klugmann-Radziemska, Katarzyna Januszewicz

## Wprowadzenie

Generowanie energii stanowi podstawę funkcjonowania społeczeństw i rozwoju gospodarki światowej. W różnych krajach kluczowe technologie, na których opiera się energetyka, są inne, co zależy zarówno od historycznych podstaw rozwoju tego sektora, postępu technicznego, jak i uwarunkowań politycznych, a co za tym idzie – legislacyjnych.

W krajach Unii Europejskiej od wielu lat dominuje trend rozwoju energetyki opartej na źródłach odnawialnych. Jest to często trudne do pogodzenia z istniejącymi rozwiązaniami, gdy – tak jak w naszym kraju – przeważa energetyka oparta na węglu. W krajach wysoko rozwiniętych świadoma polityka państw zaowocowała rozwojem energetyki wiatrowej, słonecznej czy jądrowej. W bilansie niektórych krajów zagospodarowanie energetyczne odpadów stanowi nie tylko uzupełnienie niedoborów paliwowych, lecz także skuteczny sposób pozbycia się tego niewygodnego problemu. Wszystkie omówione w rozdziale technologie pozyskiwania energii elektrycznej i ciepła należy rozważać w ścisłym powiązaniu z polityką zrównoważonego rozwoju i ochroną środowiska, stanowi on więc niejako wprowadzenie do kolejnych rozdziałów.

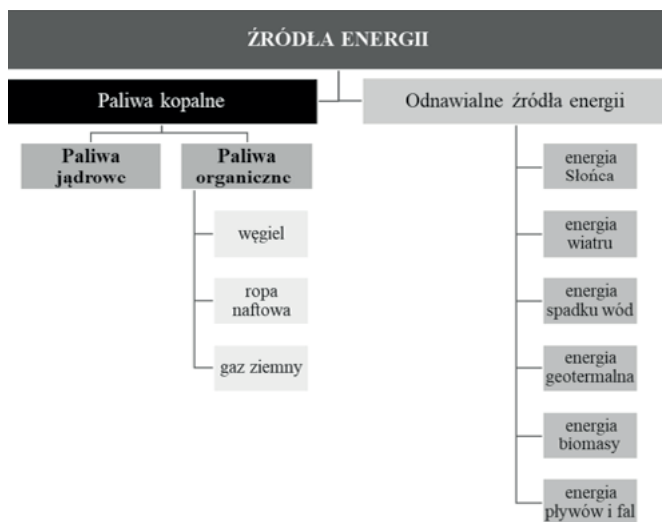
Nośniki energii można podzielić na (rysunek 2.1):

### odnawialne, do których zaliczamy:

- promieniowanie elektromagnetyczne Słońca,
- energię wiatru,
- energię spadku wód,
- energię geotermalną,
- energię biomasy,
- energię pływów i fal,

### nieodnawialne (paliwa), takie jak:

- paliwa pierwotne organiczne (węgiel, ropa naftowa, gaz ziemny, drewno),
- paliwa wtórne (benzyna, olej napędowy i opałowy, propan-butan),
- paliwa jądrowe (uran, tor).



Rysunek 2.1. Podział źródeł energii na paliwa kopalne i odnawialne źródła energii

## 2.1. Konwencjonalne źródła energii

Negatywnymi skutkami eksploatacji źródeł kopalnych są gwałtowny wzrost koncentracji zanieczyszczeń w atmosferze ziemskiej oraz globalne zmiany klimatu, przedstawione w postaci wyników badań, analiz i dyskusji, ujęte w ramach ONZ-owskiej konwencji zmian klimatycznych, podpisanej w 1997 roku jako protokół z Kyoto. Najbardziej szkodliwe dla środowiska naturalnego są tlenki siarki i azotu, dwutlenek węgla, węglowodory oraz pyły, pochodzące z elektrowni ciepłych, transportu i przemysłu. Wzrost cen paliw konwencjonalnych oraz troska o ochronę środowiska naturalnego przyczyniły się do zintensyfikowania prac nad wykorzystaniem energii ze źródeł odnawialnych.

Energetyka w Polsce opiera się na wykorzystaniu węgla kamiennego i brunatnego, ropy naftowej i gazu ziemnego. Węgiel i ropa naftowa powstały kilkaset milionów lat temu ze szczątków organizmów żywych, drewna i innej materii organicznej osadzonej na dnie mórz i jezior. Pod wpływem energii słonecznej (temperatury i ciśnienia) zostały one przetworzone w paliwo stałe – węgiel kamienny i płynne – ropę naftową oraz w gaz naturalny, o średnich wartościach opałowych: 30 MJ/kg, 42 MJ/kg i 35 MJ/m<sup>3</sup> [1].

Narastający z roku na rok problem zanieczyszczeń stanowi ogromne zagrożenie. Wpływ zanieczyszczeń związanych z eksploatacją paliw stałych, ciekłych i gazowych na zdrowie i środowisko zależy głównie od stężenia produktów spalania znajdujących się w atmosferze, w wodzie i w ziemi. Największym zagrożeniem dla środowiska nie jest perspektywa wyczerpania się naturalnych zasobów paliw konwencjonalnych, lecz globalne skażenie środowiska naturalnego produktami ich spalania: pyłami, tlenkami siarki, azotu i węgla. W wyniku spalania paliw naturalnych, oprócz ciepła, powstają również gazy spalinowe oraz – w przypadku paliw stałych – popioły i żużle. Skład spalin jest różny w zależności od rodzaju paliwa i samego procesu spalania, który wbrew pozorom jest skomplikowany, zależy od temperatury, stosunku ilości powietrza do ilości paliwa, rodzaju palnika lub paleniska i wielu innych czynników.

Najważniejsze negatywne skutki oddziaływania produktów spalania paliw nieodnawialnych, głównie węgla kamiennego i brunatnego, to:

- pogłębienie się efektu cieplarnianego,
- powiększanie się stref występowania smogu,
- zakwaszenie atmosfery tlenkami siarki i azotu, wskutek czego giną lasy, zamiera życie w rzekach i jeziorach,
- brak tlenu w środowisku morskim, co jest następstwem emisji tlenków azotu, zaburza równowagę pokarmową w morzu ze szkodą dla żyjących w nim organizmów roślinnych i zwierzęcych,
- zanieczyszczenie wód zaskórnych metalami ciężkimi wymywanymi z nieprawidłowo składowanych popiołów i żużli, a także produktami ubocznymi powstającymi podczas oczyszczania spalin metodami mokrymi i suchymi,

- szkody górnicze, zasolenie rzek wodami z kopalń, skutki transportu paliw (węgiel ze Śląska do elektrowni, gaz i ropy rurociągami) i inne.

Działania zmierzające do sprostania wymogom ochrony środowiska w zakresie emisji substancji szkodliwych w energetyce opartej na węglu można podzielić na trzy rodzaje:

- wzbogacanie paliw energetycznych bądź zastąpienie ich czystszyimi ekologicznie:
  - górnicze zakłady wzbogacania i głębokiego odsiarczania węgla kamiennego,
  - instalacje dwupaliwowe (węgiel, gaz), przejście na paliwa płynne niskosiarkowe bądź gaz (ziemny, koksowniczy),
- modernizacja urządzeń wytwórczych, przejście na skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła:
  - poprawa sprawności wytwarzania energii z zachowaniem dotychczasowej technologii spalania w przypadku korzystania z paliw uszlachetnionych,
  - modernizacja układu spalania i komory paleniskowej,
  - wprowadzenie lub zwiększenie istniejącego współczynnika skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła,
- modernizacja, wymiana bądź budowa urządzeń ochronnych (elektrofiltry, instalacje odsiarczania, wtórne metody odazotowania).

W XXI wieku energetyka na świecie jest połączeniem wykorzystania różnych odnawialnych źródeł energii z zastosowaniem znacznie czystszych niż w poprzednich latach urządzeń na paliwa konwencjonalne, a wszystko to w celu ochrony coraz bardziej zdegradowanego środowiska naturalnego.

Warto poświęcić uwagę energetyce jądrowej. Ten temat jest od wielu lat stale obecny w Polsce, nie doczekał się jednak do tej pory realizacji, budząc wiele kontrowersji. Za energetyką jądrową przemawiają przede wszystkim względy ochrony środowiska (brak emisji  $\text{SO}_2$  i  $\text{NO}_x$ ) oraz szybsza budowa elektrowni jądrowej: w 5 lat w porównaniu do konwencjonalnej w 6 do 7 lat i tańszy transport paliwa. Problemami są zapewnienie bezpieczeństwa i likwidacja odpadów radioaktywnych, chociaż narażenie zdrowia ludności żyjącej w otoczeniu elektrowni węglowej jest dwu- lub trzykrotnie większe niż w przypadku elektrowni jądrowej (bez awarii), a wydobycie i transport węgla kosztują nieraz utratę życia i zdrowia wielu ludzi.

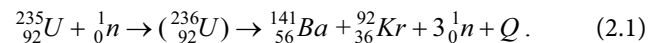
Nowa generacja elektrowni jądrowych, „bezpiecznych”, czyli odpornych na ludzkie błędy, jest najczystsza środowiskowo technologią wytwarzania znaczącej w systemie energetycznym energii. Warunkiem jej stosowania jest jednak przyjęcie rozwiązań bezpiecznych pod względem technicznym i ekonomicznym.

### 2.1.1. Energetyka jądrowa

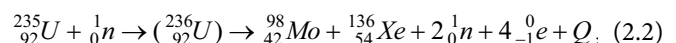
Znaczne ilości energii można uzyskać w egzoenergetycznych reakcjach jądrowych w reaktorach jądrowych na paliwo rozszczepialne, a w przyszłości także w reakcjach syntezy termojądrowej. Wykorzystując różne paliwa jądrowe, spowalnicze neutronów, systemy chłodzenia i sterowania oraz konstrukcje przestrzenne, można budować reaktory jądrowe kilku typów.

#### 2.1.1.1. Proces rozszczepienia

Proces, w którym jądro ciężkie rozpada się na jądra lżejsze o porównywalnej liczbie atomowej, nazywa się rozszczepieniem, na przykład:



Jądro uranu nie musi się rozpaść na dwa ściśle określone pierwiastki, lecz może się rozpaść na dwa dowolne pierwiastki o liczbie atomowej  $Z$ , zmieniającej się od 30 do 63. W czasie rozszczepienia jąder uranu powstaje z różną wydajnością około 170 różnych jąder. Energię  $Q$ , która wydziela się podczas reakcji rozszczepienia, można obliczyć z różnicy mas uranu i produktów rozszczepienia. Na przykład dla reakcji (zilustrowanej na rysunku 2.2):

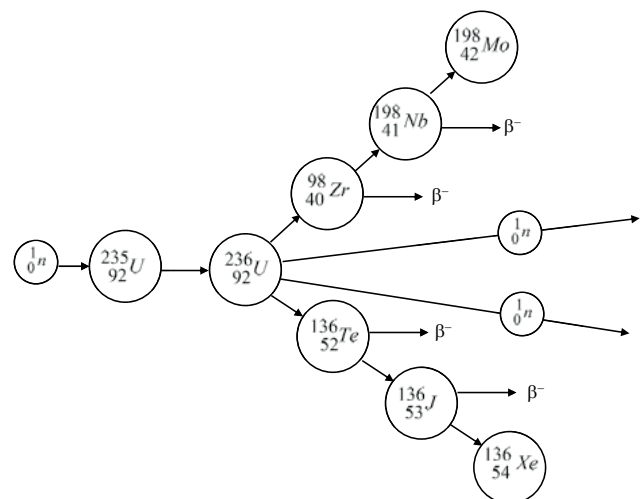


w tym:

masa molibdenu	${}_{42}^{98}\text{Mo}$	97,905510 a.j.m.
masa ksenonu	${}_{54}^{136}\text{Xe}$	135,907221 a.j.m.
masa neutronu	${}_0^1\text{n}$	1,008665 a.j.m.
masa 4 elektronów	$4e^-$	0,002194 a.j.m.
suma mas produktów rozszczepienia		234,823590 a.j.m.
masa uranu	${}_{92}^{235}\text{U}$	235,043933 a.j.m.
- suma mas produktów rozszczepienia		234,823590 a.j.m.

Ze wzoru Einsteina  $E = \Delta m \cdot c^2$ , wynika przy  $E = Q$ :

$$Q = \Delta m \cdot 931,5 \text{ MeV} \approx 205 \text{ MeV} \quad (2.3)$$



Rysunek 2.2. Przebieg reakcji rozszczepienia jądra uranu U-235 za pomocą neutronu termicznego

Podczas rozszczepienia jednego jądra uranu wydziela się więc energia około 200 MeV. Ilość energii uzyskanej z rozszczepienia jąder 1 kg uranu wynosi  $8,2 \cdot 10^{13}$  J, co odpowiada energii otrzymanej ze spalania 2,8 tysięcy ton węgla. W celu porównania wielkości energii rozszczepienia w tabeli 2.1 przedstawiono energie cząstek biorących udział w różnych procesach

fizycznych. Można oszacować trwałość jąder produktu rozszczepienia. Stosunek liczby neutronów  $N$  do liczby protonów

$Z$  wynosi dla uranu:  $\frac{235-92}{92} \cong 1,6$ . Dla pierwiastków trwałych

w przedziale liczb atomowych od 30 do 63 stosunek ten wynosi od 1,3 do 1,5.  $Z$  tych względów produkty rozszczepienia mające nadmiar neutronów są nietrwałe. Przechodzą one w pierwiastki trwałe albo przez emisję cząstek  $\beta$ , albo przez emisję neutronów. Każde jądro powstające w wyniku rozszczepienia może w czasie krótszym niż 10-15 s emitować jeden lub dwa neutrony zwane natychmiastowymi. Neutrony emitowane w mierzalnym czasie po rozszczepieniu nazywa się opóźnionymi.  $Z$  jednej strony neutrony powodują rozszczepienia, a z drugiej powstają przy rozszczepieniu uranu, więc przy odpowiednio dobranych warunkach można wykorzystać neutrony powstałe podczas rozszczepienia do inicjowania następnych rozszczepień.

Liczba neutronów przypadających na jeden proces rozszczepienia ma istotny wpływ na możliwość uzyskania reakcji łańcuchowej. Przy rozszczepieniu jednego jądra  ${}^{235}_{92}\text{U}$  powstaje średnio  $2,47 \pm 0,03$  neutronów. Ten „nadmiar” neutronów umożliwia łańcuchową reakcję rozszczepienia. Widmo energetyczne neutronów zajmuje przedział energii od 0,05 do 17 MeV.

Stwierdzono, że wychwytywanie neutronów przez jądra  ${}^{232}_{92}\text{Th}$ ,  ${}^{233}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{235}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{238}_{92}\text{U}$  powoduje rozszczepienie tych jąder, przy czym podczas rozszczepienia powstają nowe neutrony, które z kolei mogą wywoływać dalsze rozszczepienia.

Cząstka	Energia
Średnia energia kinetyczna cząstki w temperaturze pokojowej	25 MeV
Foton widzialny	$1,5 \pm 3$ eV
Foton ultrafioletowy	$3 \pm 100$ eV
Foton twardych promieni X	$0,1 \pm 1$ MeV
Foton gamma	$1 \pm 3$ MeV
Rozpad radu	4,8 MeV
Rozpad ${}^{235}_{92}\text{U}$	205 MeV
Cząstka promieniowania kosmicznego	$10^{13}$ MeV

Tabela 2.1. Energie cząstek biorących udział w różnych procesach fizycznych [3]

W zależności od stosunku powstawania neutronów w rozszczepieniach do zaniku neutronów (przez absorpcję nieprowadzącą do rozszczepienia lub ucieczkę neutronów poza obręb materiału) reakcja łańcuchowa może przebiegać przy stałym natężeniu, narastać lub zanikać. Możliwość regulowania przebiegu reakcji łańcuchowej ma decydujące znaczenie w praktycznym wykorzystywaniu energii jądrowej. To, czy zapoczątkowana reakcja łańcuchowa będzie narastać, zanikać lub utrzymywać się na stałym poziomie, zależy od współczynnika mnożenia  $k$ . Wielkość  $k$  jest określona jako stosunek liczby neutronów danej generacji do liczby neutronów generacji poprzedniej i uwarunkowana przez przekroje czynne, konstrukcję reaktora i jego rozmiary. Reaktor, dla którego  $k < 1$ , jest w stanie podkrytycznym i zapoczątkowana w nim reakcja szybko wygasa. Gdy  $k > 1$ , reaktor jest w stanie nadkrytycznym.

Jeśli poziom strumienia neutronów w reaktorze nie ulega zmianie ( $k = 1$ ), reaktor znajduje się w stanie krytycznym.

W reaktorze stosuje się moderator, w którym neutrony rozszczepieniowe są spowalniane do energii termicznych, to znaczy mniejszych od 1 eV. Moderator to najczęściej woda, ciężka woda, beryl i grafit, a więc materiały o małej liczbie atomowej  $Z$ , z jądrami, których neutrony doznają zderzeń sprężystych, przy czym neutron traci ułamek energii tym większy, im mniejsza jest masa jądra pierwiastka, z którym się zderza. Ilustruje to tabela 2.2. Obszar reaktora zawierający materiał rozszczepialny nazywa się rdzeniem reaktora. Wokół rdzenia może być umieszczony materiał nieulegający rozszczepieniu, zwany ekranem odbijającym neutrony z powrotem do rdzenia reaktora. Zastosowanie ekranu zmniejsza masę krytyczną reaktora.

Pierwiastek	Przekrój czynny $\times 10^{-28} \text{ m}^2$		Średnia strata energii na zderzenie (względna)	Średnia liczba zderzeń potrzebna do termalizacji neutronów
	na absorpcję $\Sigma_a$	na rozpraszanie $\Sigma_s$		
Be	0,01	7	0,18	90
C	0,0032	4,8	0,14	114
B	755	4	0,17	98

Tabela 2.2. Właściwości pierwiastków lekkich wykorzystywanych jako moderatory (spowalniacze neutronów) [3]

W czasie zderzeń neutronu z jądrami spowalnacza neutron traci ułamek energii. Jeżeli  $E_n$  – energia neutronu,  $A$  – liczba masowa pierwiastka, z którego jądrem neutron zderza się sprężysto, to energia maksymalna  $E_m$  jądra odrzutu wynosi:

$$E_m = \frac{4A}{(1+A)^2} E_n \quad (2.4)$$

Ze wzoru tego wynika, że im mniejsza liczba masy  $A$ , tym większa jest energia jąder odrzutu (do spowalniania najlepsze są pierwiastki o małej liczbie masowej). Beryl, jak widać w tabeli 2.2, ma mały przekrój czynny na absorpcję, jest ciałem stałym w 300 K, nadaje się więc jako spowalniacz. Do tego celu używa się również węgla w postaci grafitu.

Oprócz spowalniania neutronów moderator spełnia inną funkcję – wydłuża czas życia neutronu między kolejnymi rozszczepieniami do wartości  $10^{-3} \div 10^{-1}$  s, przez co ułatwia sterowanie reakcją łańcuchową. Sterowania reaktorem dokonuje się przez wstawienie do rdzenia reaktora prętów materiału o dużym przekroju czynnym na absorpcję, na przykład z boru. Zanurzanie prętów do określonej głębokości rdzenia pozwala utrzymywać moc reaktora na żądanym poziomie. Moc reaktora zależy od natężenia strumienia neutronów wewnątrz reaktora. W celu ustawienia punktu pracy reaktora na żądanej mocy należy podnieść pręty kontrolne i zwiększyć współczynnik mnożenia neutronów. Gdy wymagana moc zostanie osiągnięta, zanurza się pręty sterownicze na taką głębokość, aby natężenie strumienia neutronów, a tym samym moc reaktora, zatrzymać na założonym poziomie. Podczas pracy ciągłej reaktora współczynnik  $k = 1$ . W miarę zużywania się materiału rozszczepialnego pręty sterownicze są podnoszone do góry, tak aby moc reaktora była stała.

Oprócz borowych prętów sterowniczych reaktor jest zaopatrzone w borowe pręty bezpieczeństwa, które są automatycznie opuszczane do wnętrza reaktora, jeżeli jego moc wzrasta

z przyczyn wymykających się spod kontroli (w stanach awaryjnych). Istnieje również regulacja chemiczna mocy reaktora, na przykład zatrucie rdzenia kwasem borowym.

W przypadku pracy reaktora na neutronach powolnych pewną rolę odgrywają również neutrony opóźnione wysyłane przez produkty rozszczepienia. Pomiar wykazały, że około 0,4% wszystkich neutronów ma opóźnienie co najmniej 0,1 s, a 0,01% – opóźnienie co najmniej 1 minutę. Równanie opisujące narastanie liczby neuronów w funkcji czasu ma postać:

$$N = N_0 \exp\left(\frac{k-1}{k} \cdot \frac{t}{\tau}\right), \quad (2.5)$$

gdzie:

$\tau$  – średni czas życia neutronów w reaktorze między rozczepieniem a pochłonięciem, ( $\tau = 10^{-9}$  s);

$$\rho = \frac{k-1}{k} \text{ – reaktywność reaktora}, \quad (2.6)$$

więc:

$$N = N_0 \exp\left(\frac{\rho t}{\tau}\right). \quad (2.7)$$

Na przykład: dla  $m = 1$  kg,  $k = 1,1$ ,  $\rho = 0,1$  i po czasie  $t = 1 \mu\text{s}$ ,  $N = N_0 \times 10^{43}$  jest liczbą powstałych neutronów.

Każdemu elementowi paliwowemu odpowiada pewna reaktywność dodatnia, natomiast każdemu prętowi kompensacyjnemu lub bezpieczeństwa odpowiada reaktywność ujemna.

### 2.1.1.2. Energetyka jądrowa a środowisko

Istnieje graniczna moc reaktora uzasadniona ekonomicznie, która wynosi obecnie 1200–1300 MW mocy elektrycznej lub około 4000 MW mocy cieplnej. Wynika stąd, że ciepło, będące bezpośrednim efektem pracy reaktora, można wykorzystać do wytwarzania energii elektrycznej ze sprawnością przetwarzania 30–33%. Paliwo jądrowe jest wykorzystywane w elektrowniach jądrowych już od 1954 roku. Energia jądrowa stanowiła w 1970 roku 0,6% całkowitej zużywanej na świecie energii, obecnie jest to już ponad 10%. Niestety, z rozwojem energetyki jądrowej wiąże się konieczność składowania odpadów promieniotwórczych oraz ryzyko sabotażu i katastrof o zasięgu globalnym; ze względu jednak na olbrzymią wartość opałową paliwa jądrowego – około  $9 \times 10^7$  MJ/kg – paliwa jądrowe z energetycznego punktu widzenia są korzystne.

Elektrownie jądrowe zanieczyszczają środowisko naturalne przez:

- uwalnianie substancji promieniotwórczych do otoczenia,
- wodę powodującą cieplne zanieczyszczenie środowiska przez podgrzewanie rzek lub jezior, do których wpływa woda chłodząca skraplacze turbin w otwartym obwodzie chłodzenia.

W pracy elektrowni z reaktorem wodnym ciśnieniowym nie można uniknąć uwalniania do otoczenia niewielkich ilości substancji promieniotwórczych w postaci gazowej i ciekłej.

Wśród kilkunastu, a nieraz kilkudziesięciu tysięcy prętów paliwowych znajdujących się w rdzeniu reaktora może się zdarzyć pewna liczba prętów nie całkiem szczelnych, z których część gazowych produktów rozszczepienia przedostanie się do obiegu pierwotnego – wody chłodzącej rdzeń reaktora. Są to gazy promieniotwórcze: izotopy kryptonu (Kr-85) i jodu (I-129). Gazy promieniotwórcze magazynuje się przez jakiś czas, aby izotopy o krótkim czasie życia uległy rozpadowi, a następnie przez komin i filtry wypuszcza się stopniowo do atmosfery, kontrolując aktywność, tak aby nie stanowiły bezpośredniego zagrożenia dla środowiska. Poza tym woda chłodząca może zawierać produkty aktywacji neutronami cząstek powstających w wyniku korozji i erozji materiałów konstrukcyjnych obiegu pierwotnego. W przypadku nieszczelności pomp, zaworów i innych elementów w obiegu pierwotnym powstają wycieki wody z zawartością izotopów promieniotwórczych. Wielkość uwolnień produktów rozszczepienia z elektrowni jądrowej do otoczenia zależy od wielu czynników, między innymi poziomu mocy reaktora. Aktywność uwalnianych rocznie substancji gazowych i aerozoli w reaktorze BWR i PWR jest rzędu odpowiednio:  $5 \cdot 10^5$  i  $2 \cdot 10^3$  kiurów, a ciekłych 100 i 200 kiurów. Uwolnienia są tym mniej szkodliwe dla środowiska, im bardziej są rozcieńczane dużymi objętościami powietrza w atmosferze.

Budowa reaktorów energetycznych RBMK (takich jak w Czarnobylu) różni się znacznie od budowy i zasady działania reaktorów PWR i BWR, które stanowią 80% pracujących na świecie reaktorów energetycznych. Reaktory RBMK charakteryzuje znacznie niższy poziom bezpieczeństwa. Problem bezpiecznego usuwania odpadów radioaktywnych jest opanowany w odniesieniu do odpadów średnio- i mało aktywnych.

Odpady wysokoaktywne stanowią natomiast zaledwie 1% objętości wszystkich, ale odpowiadają za 99,9% ich aktywności. Z paliwa dużej elektrowni jądrowej o mocy 1000 MW powstaje rocznie około 3 m<sup>3</sup> odpadów wysokoaktywnych w postaci roztworów wodnych, które po kilkuletnim przechowywaniu w specjalnych zbiornikach (gdzie ich aktywność spada do 10% aktywności początkowej) przekształca się do postaci stałej i w szczelnych pojemnikach transportuje w miejsca ostatecznego składowania.

Cieplne zanieczyszczenie środowiska jest uwarunkowane ilością i temperaturą wody odprowadzanej z elektrowni. Podgrzaną o 7–14% wodę wypuszcza się do dużych akwenów. Powoduje to ich podgrzanie o około 2°C. W efekcie zahamowany zostaje rozwój niektórych gatunków flory i fauny, w miejsce których rozwijają się inne. Stwarza to możliwość intensyfikacji hodowli ryb, zakładania ferm hodowlanych nowych gatunków, ciepłolubnych.

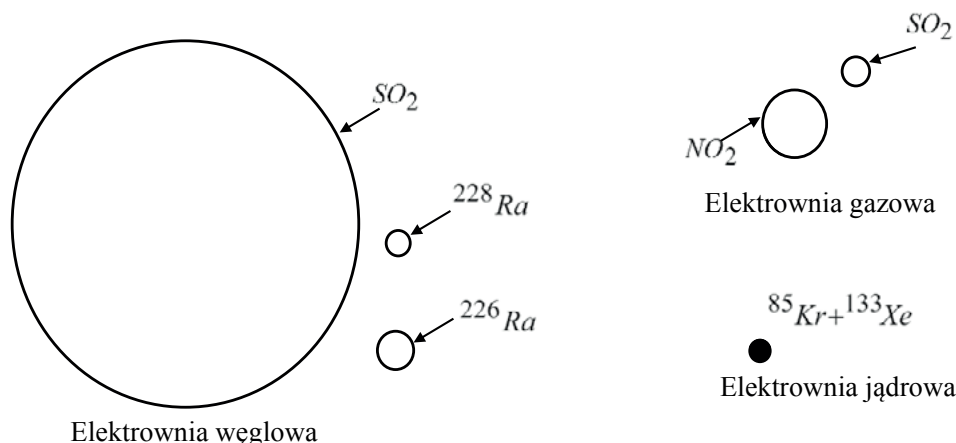
reklama



**ROBOTYKA.PL**

centrum polskiej robotyki





Rysunek 2.3. Objętości powietrza wymagane do rozcieńczenia stężeń dopuszczalnych uwalnianych w ciągu roku lotnych zanieczyszczeń energetycznych

W porównaniu z elektrownią ciepłą (węglową lub gazową) ilość wymaganego powietrza do rozcieńczenia emitowanych substancji promieniotwórczych przez elektrownię jądrową jest przeszło 100 000 razy mniejsza.

Wieloletnie obserwacje skażeń wskazują, że maksymalna dawka promieniowania w pobliżu elektrowni nie przekracza 1/100 wartości dawki granicznej. Ochrona radiologiczna jest dziedziną starszą niż energetyka jądrowa. Już krótko po odkryciu promieni rentgenowskich pojawiły się doniesienia o szkodliwości promieniowania dla organizmu ludzkiego, a ponieważ jest to nieodczuwalne przez ludzkie zmysły, niezwykle ważna jest sprawa detekcji, pomiaru promieniowania i oceny zagrożenia.

Obecnie wyróżnia się kilka podstawowych wielkości pozwalających ocenić stopień zagrożenia:

- dawka i moc dawki pochłoniętej,
- dawka i moc dawki ekspozycyjnej (jonowej),
- dawka równoważna i moc dawki równoważnej,
- całkowita dawka zakumulowana.

Dopuszczalne roczne wchłonięcie graniczne wynosi 50 mSv (5 rem) lub 150 mSv w soczewkach oczu lub 500 mSv w innych tkankach. Dawka równoważna zagrożenia życia ludzkiego to odpowiednio: 0,5 Sv (50 rem) lub 3 Sv (300 rem). Już pierwsze objawy kliniczne u człowieka stwierdzono po jednorazowym napromieniowaniu dawką równoważną 0,5 Sv, a dawka 3 Sv

Wielkość	Definicja	Jednostka w układzie SI	Jednostka dawniej stosowana
Dawka pochłonięta	$D = \Delta E / \Delta m$ $\Delta E$ – energia stracona na procesy jonizacji	1 grey (Gy) (Gy) = (J/kg)	1 rad 1 rad = 0,001 Gy
Moc dawki pochłoniętej	$D = dD/dt$	Gy/s = W/kg	1 rad / 1 s = 001 Gy/s
Dawka ekspozycyjna (dawka jonowa)	$X = \Sigma q / \Delta m_{pow.}$ $\Sigma q$ – suma ładunków jednego znaku $\Delta m_{pow.}$ – masa powietrza, w której wytworzono ładunek $\Sigma q$	C/kg	1 rentgen (R) 1R = $2,58 \cdot 10^{-4}$ C/kg 1R = 0,88 rad absorb. – dla powietrza 1R = 0,97 rad absorb. – dla wody 1R = 1 rad absorb. – dla tkanin biologicznych
Moc dawki ekspozycyjnej	$P_x = dx/dt$	(C/kg·s) = (A/kg)	(R/s)
Dawka równoważna	$H = D \times Q$ Q (ang. <i>quality factor</i> ) – dla rodzaju i natężenia promieniowania*	1 siwert (Sv) (Sv) = (J/kg)	1 rem <sup>a)</sup> 1 rem – 0,01 Sv = 10 mSv

a) 1 rem (ang. *roentgen equivalent man*) – dawka równoważna promieniowaniu, które wywołuje takie same skutki biologiczne jak jeden rentgen twardego promieniowania rentgenowskiego

\* współczynnik Q wynosi [4]:

- 20 – dla promieniowania  $\alpha$ ,
- 5÷20 – dla neutronów,
- 1 – dla promieniowania  $\beta$ ,
- 1 – dla promieniowania  $\gamma$  i rentgenowskiego.

Tabela 2.3. Wielkość dawki i jednostki promieniowania (opracowanie własne)

może u 50% napromieniowanych spowodować śmierć w okresie kilku miesięcy.

Współczynnik jakości promieniowania  $Q$ , występujący jako jeden z czynników dawki równoważnej, uwzględnia względną skuteczność biologiczną różnego rodzaju promieniowania. Na podstawie znajomości dawki pochłoniętej  $D$  oraz rodzaju promieniowania (współczynnika  $Q$ ) można obliczyć dawkę równoważną  $H$  (tabela 2.3).

Określenie dawek.

- Dawka energii  $D$  (według ICRU1 dawka pochłonięta, ang. absorbed dose) jest stosunkiem  $\Delta E$  do  $\Delta m$ , gdzie  $\Delta E$  jest energią promieniowania jonizującego przeniesioną na substancję w objętości  $\Delta V$  oraz masie  $\Delta m = \rho \Delta V$ , a  $\rho$  to gęstość. Substancja odniesienia (o masie  $\Delta m$ ) musi być określona, na przykład  $D_w$  – dawka energii (dawka pochłonięta) dla wody.
- Kerma  $K$  (ang. kinetic energy released in material) jest stosunkiem  $\Delta E_k$  do  $\Delta m$ , gdzie  $\Delta E_k$  jest sumą wartości początkowych energii kinetycznych wszystkich naładowanych cząsteczek, które z pośredniego promieniowania jonizującego (fotony, neutrony) zostaną uwolnione w objętości  $\Delta V$  i masie  $\Delta m = \rho \Delta V$ .
- Dawka jonowa (według ICRU dawka ekspozycyjna, ang. exposure) jest stosunkiem ładunku jonów  $\Sigma q$  jednego znaku, które zostaną wytworzone w powietrzu w objętości  $\Delta V$  do masy  $\Delta m_{pow.} = \rho_{pow.} \Delta V$ .
- Dawka równoważna (według ICRU, ang. dose equivalent) jest iloczynem dawki energii dla tkanki biologicznej i czynnika bezwymiarowego jakości promieniowania  $Q$ . Wartość czynnika  $Q$  ustala się dla różnych rodzajów promieniowania, energii oraz warunków napromieniowania tak, że dawka równoważna oznacza jednocześnie ryzyko napromieniowania. Dawka osobista lub miejscowa jest dawką równoważną  $H$  dla tkanki mierzoną w miejscu ciała reprezentowanym dla ekspozycji promieniowania.
- Dawka efektywna równoważna (ang. effective dose equivalent) jest sumą składników z różnymi czynnikami ważności  $W_T$  średnich dawek równoważnych  $H_T$  dla odpowiednich organów lub tkanki:

$$H_E = \sum W_T H_T$$

Czynniki ważności  $W_T$  uwzględniają różne ryzyka napromieniowania poszczególnych organów w odniesieniu do stochastycznych działań promieniowania i ustalane są umownie.

Dawki graniczne określa Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005 roku w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego [5] (akt ten uznany jest za uchylony, obecnie procedowany jest projekt rozporządzenia Rady Ministrów w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące):

- dla pracowników: 20 mSv w ciągu roku kalendarzowego,
- dla ogółu ludności: 1 mSv w ciągu roku kalendarzowego,
- dla uczniów, studentów i praktykantów w wieku od 16 do 18 lat: 6 mSv w ciągu roku kalendarzowego.

Określono dawkę graniczną wyrażoną jako dawkę równoważną dla:

- soczewek oczu: 150 mSv dla grupy a), 15 mSv i 50mSv dla grupy b) i c),
- skóry (odpowiednio): 500 mSv/1cm<sup>2</sup>, 150 mSv/1cm<sup>2</sup> i 50 mSv/1cm<sup>2</sup>.

## 2.2. Odnawialne źródła energii

Zmniejszaniu się dostępnych zasobów surowców organicznych towarzyszy rosnące zapotrzebowanie na energię, a projekty budowy elektrowni jądrowych czy konwencjonalnych budzą sprzeciw licznych środowisk społecznych, więc obecnie najszerzej akceptowanym rozwiązaniem jest upowszechnienie energetyki wykorzystującej alternatywne źródła energii: Słońca, wiatru, wodospadów i rzek, ruchu wód oceanicznych, energii cieplnej wnętrza Ziemi oraz biomasy i wodoru.

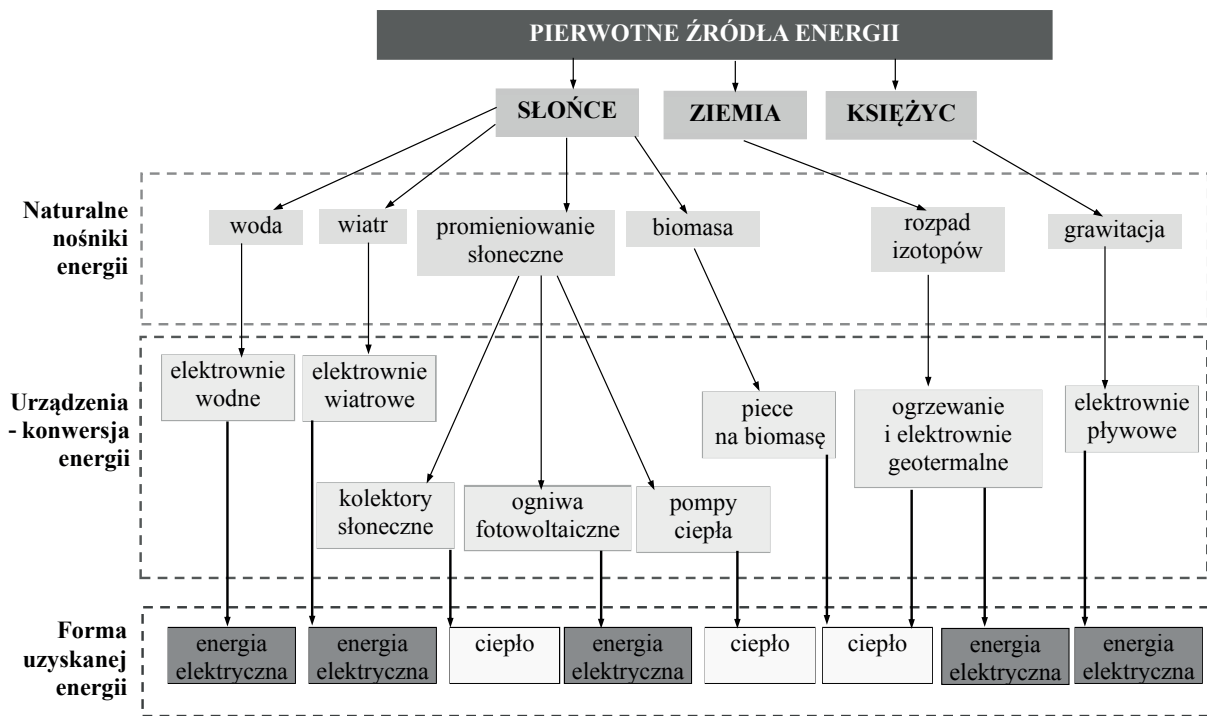
W strukturze mocy zainstalowanej OZE w Polsce dominuje obecnie fotowoltaika. W styczniu 2022 roku moc zainstalowana instalacji słonecznych wyniosła ponad 8 GW, co stanowi 47% wszystkich mocy odnawialnych źródeł energii. Na drugim miejscu jest wiatr – moc zainstalowana to 7,1 GW, czyli 41% mocy OZE. Moc zainstalowana w elektrowniach OZE wynosi: fotowoltaika 8146,5 MW, elektrownie biogazowe 260,8 MW, elektrownie wiatrowe 7118,4 MW [2].

Często popełniany błąd polega na mylnym używaniu pojęć odnawialnych źródeł energii, nośników energii i urządzeń do konwersji energii ze źródła odnawialnego na energię użyteczną w postaci energii elektrycznej i ciepła (rysunek 2.4). Podstawowe pojęcia, które pozwalają opisywać przemiany energetyczne, to:

- energia pierwotna – energia, która nie uległa żadnej przemianie (konwersji, transformacji),
- energia wtórna – energia otrzymana w wyniku przemian energii pierwotnej,
- transformacja energii – przemiana energii, w której nie następuje zmiana nośnika, a jedynie parametrów energii (na przykład przemiana energii elektrycznej (napięcia i prądu elektrycznego) w transformatorze),
- konwersja energii – przemiana energii, której towarzyszy zmiana nośnika energii (na przykład przemiana energii promieniowania elektromagnetycznego w energię elektryczną w ogniwie fotowoltaicznym).

Z punktu widzenia konsumenta energii dla prawidłowo wykonanego bilansu energetycznego i ekonomicznego instalacji wykorzystującej energię ze źródła odnawialnego istotnymi informacjami są:

- potencjał i dostępność energii ze źródła odnawialnego w danej lokalizacji (dla promieniowania słonecznego będzie to na przykład suma roczna energii promieniowania, dla wiatru: mapy wietrzności, dla wykorzystania energii pływów: moc pływów morskich i ich zmienność w czasie),
- koszt i sprawność urządzenia do konwersji energii,
- forma uzyskanej energii: wartość 1 kWh energii elektrycznej jest około 2,5 razy większa niż takiej samej ilości ciepła.



Rysunek 2.4. Schemat ideowy procesów wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych

### 2.2.1. Energia wiatru

Elektrownie wiatrowe są przeznaczone do przetwarzania energii wiatru na energię elektryczną. Są to najczęściej szybkoobrotowe elektrownie o osi poziomej. Trójłopatowy wirnik z nastawianymi automatycznie łopatkami o odpowiednio dobranym profilu przez przekładnię zębatą napędza generator asynchroniczny lub synchroniczny.

Do wstępnego określenia mocy wiatraka o średnicy  $D$  można obliczyć moc wiatru przepływającego przez płaszczyznę omiataną łopatkami i pomnożyć ją przez współczynnik wykorzystania ( $\xi$ ) energii wiatru i sprawność wiatraka ( $\eta_a, \eta_m$ ). Moc będzie wówczas równa:

$$N = \frac{\pi}{6} \cdot \xi_t \cdot \eta_a \cdot \eta_m \cdot \rho \cdot D^2 \cdot v^3 \quad (2.8)$$

Dla szybkobieżnego silnika wiatrowego  $\xi_t = 0,593$ ,  $\eta_a = 0,64$ ,  $\eta_m = 0,8$ .

Zależność mocy elektrowni wiatrowej od prędkości wiatru określa krzywa mocy elektrycznej, która ma charakterystyczne punkty:

- punkt startu – prędkość wiatru, przy której zaczynają się obracać śmigła: od 3 do 5 m/s, w zależności od konstrukcji turbiny,
- punkt wyłączenia – prędkość, przy której następuje zatrzymanie turbiny ze względu na zagrożenie dla konstrukcji, około 23 do 27 m/s,
- prędkość znamionowa – prędkość wiatru  $v$ , przy której turbina osiąga moc znamionową, około 11 do 16 m/s.
- Typowy generator wiatrowy składa się z 4 podstawowych elementów:
  - wirnika przejmującego energię kinetyczną ruchu powietrza,
  - przekładni,
  - wieży lub podstawy,
  - prądnicy z układem elektronicznym sterowania.

Wykorzystanie siły wiatru jest jedną z istotnych możliwości zasilenia polskiego systemu elektroenergetycznego taną i zarazem ekologiczną energią elektryczną. Według danych Agencji Rynku Energii z końca stycznia 2022 roku moc zainstalowana farm wiatrowych wyniosła w Polsce 7118,4 MW, co daje udział energetyki wiatrowej w wykorzystaniu OZE na poziomie 41%. Pierwsze miejsce w rankingu farm wiatrowych w Polsce według mocy zajmuje FW Potęgowo (219 MW), oddana do użytku w grudniu 2020 roku. Zlokalizowana jest w województwach pomorskim i zachodniopomorskim.

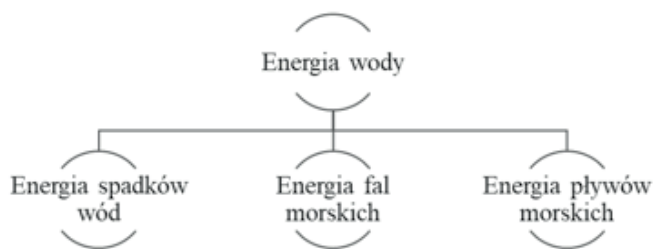
Składa się z 81 turbin firmy General Electric o mocach: 2,5 MW oraz 2,75 MW [6]. Według danych z raportu Banku Światowego jesteśmy w stanie zwiększać wykorzystanie energii wiatru o 4–5 PJ rocznie.

Przy projektowaniu instalacji wiatrowej w pierwszej kolejności niezbędne jest zbadanie charakterystyki wiatru na przeznaczonym dla niej terenie: obliczenie średniej rocznej prędkości wiatru i wyznaczenie jego dominujących kierunków. Aby poznać charakterystykę wietrzności wybranego obszaru, należy przeprowadzić na nim co najmniej 12-miesięczne pomiary na wysokości 30÷50 m. Najlepsze warunki wiatrowe, gdzie średnia prędkość wiatru na wysokości 30 m równa się 5÷6 m/s, występują na wybrzeżu i Suwalszczyźnie. Według danych Polskich Sieci Elektroenergetycznych w ostatnich 12 miesiącach rekord generacji wiatrowej padł 29 stycznia 2022 roku o godz. 18.15; farmy wiatrowe pracowały z mocą 6682,8 MW, a w godzinach 17.00–18.00 wyprodukowały 6646 MWh energii elektrycznej [7].

### 2.2.2. Energetyka wodna

Ważnym źródłem są zapasy energii zgromadzonej w wodzie (rysunek 2.5). Energię tę ludzie od dawna wykorzystywali dla własnych potrzeb. Historia kół wodnych sięga aż I wieku n.e. Służyły one najpierw do napędzania żaren w młynach, 1000 lat później ludzie zaczęli wykorzystywać energię wody do innych

celów – napędzania młotów i ciężkich młotów w kuźniach, piły w tartakach i wielu podobnych urządzeniach. Dziś ich nowoczesne odpowiedniki w postaci turbin wodnych są wykorzystywane do napędzania potężnych generatorów elektrowni wodnych. Ta gałąź przemysłu nosi nazwę hydroenergetyki. Nowoczesne hydroelektrownie wykorzystują olbrzymie zapory oraz zbiorniki wodne, dzięki czemu powstaje duża różnica poziomów energii potencjalnej i masy wody, co gwarantuje spad wody. Energię można pozyskiwać również dzięki falowaniu morza. Wielkie fale oceaniczne niosą ze sobą olbrzymią ilość energii, lecz pojawia się tu problem natury technicznej – nie istnieją jeszcze urządzenia pozwalające na ich efektywne wykorzystanie.



Rysunek 2.5. Ogólny podział możliwości wykorzystania energii wód

Przy całkowitym wykorzystaniu energii wód Ziemi można by uzyskać aż 2,25 mld kW zainstalowanej mocy elektrycznej. Niewykorzystywane zasoby energii wodnej znajdują się przede wszystkim w Afryce, Azji i Ameryce Południowej. Największe na świecie elektrownie wodne wybudowano na rzekach: Parana na granicy między Paragwajem a Brazylią (moc 12,6 mln kW), Kolumbia w USA oraz na Jeniseju w Rosji.

### 2.2.2.1. Potencjał energetyczny rzek

Docierające do powierzchni Ziemi promieniowanie Słońca jest siłą napędzającą naturalny obieg wody w przyrodzie i sprawia, że płynące rzeki można uważać za odnawialne źródło energii. Szacuje się, że umożliwi to uzyskanie 2,8 TW mocy. Światowy potencjał hydroenergetyczny (zasoby techniczne) jest wykorzystywany średnio w 15%. Ministerstwo Środowiska szacuje, że Polska wykorzystuje około 17% potencjału technicznego rzek, jeśli chodzi o wykorzystanie wody do produkcji energii elektrycznej.

Urządzenia hydroenergetyczne klasyfikuje się pod względem wielkości i rodzaju. Wyodrębnia się: elektrownie przemysłowe, regulacyjne i małe elektrownie wodne. Małe elektrownie wodne – o mocy poniżej 5 MW – to przeważnie elektrownie przepływowe (w Skandynawii i Szwajcarii małymi elektrowniami nazywa się te poniżej 2 MW, a w Stanach Zjednoczonych poniżej 15 MW). Wody nie gromadzi się tam w dodatkowych zbiornikach, a turbina i generator mieszczą się w korycie rzeki. Małe elektrownie wodne wyróżnia się jako odrębną grupę w klasyfikacji, ponieważ ich wpływ na środowisko naturalne jest znikomy i dlatego nie dotyczą ich kontrowersje ekologiczne związane z budową dużych elektrowni. Elektrownie zbiornikowe korzystają natomiast z wody spiętrzonej przez zapórę (przy okazji stanowią zabezpieczenie przeciwpowodziowe

i regulują przepływ, co jest korzystne dla żeglugi). Elektrownie szczytowo-pompowe wykorzystują wodę zgromadzoną w dwóch zbiornikach – górnym i dolnym. Kiedy zapotrzebowanie na prąd jest małe (na przykład nocą), wodę z dolnego zbiornika pompuje się z powrotem na górę, żeby wypuścić ją w godzinach największego zapotrzebowania. Elektrownie przepływowe, budowane na rzekach nizinnych, dostarczają mocy równoważnej dopływowi w danej chwili. Elektrownie regulacyjne wymagają dużych zbiorników, od których wielkości zależy uniezależnienie produkcji energii od zmiennych warunków hydrologicznych i umożliwienie zwiększenia dostaw w okresie zapotrzebowania szczytowego. W celu regulacji przepływu rzeki poniżej elektrowni szczytowej budowane są dodatkowo zbiorniki wyrównawcze. Inne rozwiązanie techniczne jest stosowane w elektrowniach szczytowo-pompowych, gdzie w godzinach mniejszego poboru mocy stosuje się przepompowywanie wody ze zbiornika dolnego do górnego.

Szczytowe elektrownie pompowe mają za zadanie uzupełnianie mocy w okresach największego zapotrzebowania (okresach szczytu). Składają się one z dwóch zbiorników: górnego i dolnego (wyrównawczego), przy czym woda jest przepompowywana za pomocą pomp ze zbiornika dolnego do górnego w okresie niskiego zapotrzebowania na energię elektryczną po to, aby w okresie szczytu, przepływając ze zbiornika górnego do dolnego, oddać energię do systemu energetycznego. Zbiornik górny jest tak umieszczony, aby istniejący dopływ pokrywał straty wody (wsiąkanie, parowanie). Moc zużyta na przepompowanie wody do górnego zbiornika jest tylko wtedy mniejsza niż uzyskana podczas jej spadku, gdy czas pompowania jest odpowiednio dłuższy od czasu przepływu w dół, chociaż energia zużyta na przepompowanie jest zawsze większa od energii uzyskanej, gdyż sprawność wynosi około 0,7.

Bilans ekonomiczny pracy elektrowni pompowej jest jednak dodatni, ponieważ energia zużyta na pompowanie jest tańsza niż energia uzyskana w godzinach szczytu – pobiera się ją z sieci w czasie małego zapotrzebowania w systemie energetycznym.

Do właściwego wykorzystania potencjału dużych rzek celowa jest budowa kaskad elektrowni wodnych zasilanych ze wspólnego zbiornika przed pierwszą elektrownią kaskady. W Polsce, której ludność stanowi 0,5% ludności świata, a powierzchnia kraju około 0,21% lądów Ziemi, teoretyczne zasoby energii rzek oceniane są zaledwie na 0,05% zasobów światowych.

Potencjał hydroenergetyczny rzek określa się, zgodnie z wytycznymi Światowej Konferencji Energetycznej, w jednostkach zwanych katastrofami sił wodnych.

Dolną granicą teoretycznej użyteczności energetycznej rzeki lub jej odcinka jest 100 kW/km (100 kW – strumień energii wody przypadający na 1 km przepływu). Dla polskich rzek potencjał ten, oszacowany z uwzględnieniem katastru sił wodnych, jest niewielki i wynosi teoretycznie 23 TW.h/rok. Liczba elektrowni wodnych na europejskich rzekach wynosi 30 172, z czego: 21 387 już istnieje, planowana jest budowa 8507 nowych, a według danych z 2019 roku 278 było w budowie [8]. Historia energetyki wodnej w Polsce sięga lat 20. ubiegłego wieku (tabela 2.4). Zasoby hydroenergetyczne Polski do wykorzystania technicznego nie są duże, gdyż wynoszą tylko 12 TW.h rocznie, z czego 45,3% przypada na Wisłę, 43,6% na



Rok	Liczba obiektów
1925–1935	8100 obiektów (w tym młyny, tartaki, kaszarnie, elektrownie) – szacunki mówią o 25 000 spiętrzeń
1953	7230 obiektów (6330 w eksploatacji) (wg prof. A. Hoffmanna)
1982	2131 obiektów (300 w eksploatacji) + 863 potencjalnych miejsc instalacji na istniejących lub planowanych obiektach hydrotechnicznych, 1026 lokalizacji o potencjale 1000 GWh/a (200 MW), zalecenia rewitalizacji istniejących elektrowni lub budowy nowych obiektów (< 5 MW), rozporządzenie nr 184 Prezesa Rady Ministrów – zezwolenie na uruchomienie MEW przez osoby prywatne
2006	676 MEW (< 10 MW) o łącznej mocy 270 MW, od roku 1983 przybyło 370 obiektów o łącznej mocy około 120 MW
2012	750 elektrowni wodnych (informacja Urzędu Regulacji Energetyki z 31 marca 2012 roku)

Tabela 2.4. Historia energetyki wodnej w Polsce [10]

Potencjał hydroenergetyczny	Teoretyczny	Techniczny
Wisła z dopływami, w tym	16 457	9270
Wisła	9305	6177
Dopływy lewobrzeżne	892	513
Dopływy prawobrzeżne	4914	2580
Odra z dopływami, w tym	5966	2400
Odra	2802	1273
Dopływy lewobrzeżne	1615	619
Dopływy prawobrzeżne	1540	507
Rzeki przymorza	582	280
Razem	23 005	11 950
w tym: MEW (< 10 MW)	23 005	11 950
Potencjał nieuwzględniony		około 1700

Tabela 2.5. Potencjał hydroenergetyczny w Polsce [GWh/rok] [10]

dorzecza Wisły i Odry, 9,8% na Odrę i 1,8% na rzeki Pomorza. Zasoby te są wykorzystane jedynie w 12% [9]. Ich rozkład zaprezentowano w tabeli 2.5.

#### 2.2.2.2. Energia fal morskich

Istnieją dwa rozwiązania wykorzystania energii fal morskich napędzających albo turbinę wodną albo powietrzną. W pierwszym rozwiązaniu woda morska pchana kolejnymi falami wpływa zwężającą się sztolnią do położonego na górze zbiornika. Gdy w zbiorniku jest wystarczająca ilość wody, wówczas przelewa się ona przez upust i napędza turbinę Kapłana sprzężoną z generatorem. Po przepłynięciu przez turbinę woda wraca do morza, wykorzystana jest więc przemiana energii kinetycznej fal morskich w energię potencjalną. W drugim rozwiązaniu zbiornik jest zbudowany na platformach na brzegu morza. Fale wlewają się do zbiornika na poziomie podstawy platformy i wypychają powietrze do górnej części zbiornika. Sprężone przez fale powietrze wprawia w ruch turbinę Wellsa, która napędza generator.

Łączna moc fal morskich i oceanicznych jest oceniana na około 3 TW. Jest to moc charakteryzująca się dużym rozproszeniem i wybitną nieregularnością. Średnia moc fal Atlantyku wynosi 50 kW/m długości grzbietu fali, podczas gdy w czasie sztormu osiąga 2 MW/m. Moc fal w pobliżu Japonii jest oceniana na 17÷100 kW/m. Badania prowadzone w Wielkiej Brytanii pozwoliły określić zmiany mocy fal wraz z odległością od brzegu.

Sposoby wykorzystania energii fal są różnorodne. Jedną z klasyfikacji wyodrębniła urządzenie:

- mechaniczne – wykorzystanie ruchu elementów względem siebie,
- pneumatyczne – sprężone powietrze obraca turbinę napędzającą generator,
- hydrauliczne – napędzanie wodą turbiny i generatora,
- indukcyjne – wykorzystanie indukcji elektromagnetycznej.

#### 2.2.2.3. Energia pływów morskich

Oddziaływanie grawitacyjne Słońca i Księżycy jest przyczyną występowania pływów morskich w postaci przypływów

i odpływów (podnoszenia się i opadania poziomu wód). Pływy są źródłem energii o mniejszym potencjale niż prądy morskie, ale za to bezpieczniejszym i lepiej poznanym. Szacuje się, że możliwe do wykorzystania zasoby wynoszą 200 GW. Techniczne ograniczenia określają warunki fizyczne do wykorzystania energii pływów: wysokość fali pływowej przekraczająca 5 m i korzystne ukształtowanie brzegu (wąska zatoka, lejkwate ujście rzeki).

Elektrownie pływowe działają na podobnych zasadach jak elektrownie wodne na rzekach, jednak zamiast tamy spiętrzającej wodę stosuje się w nich zbiorniki napełniane podczas przypływu, gdy woda obraca turbiny. Następnie podczas odpływu przesącza się do oceanu [11].

Fale o największej wysokości obserwuje się w Zatoce Fundy w Ameryce Północnej, na wybrzeżu Francji u ujścia rzeki Rance, na zachodnim wybrzeżu Anglii, nad morzami Białym, Ochockim, Barentsa oraz na wybrzeżu Kimberley w północno-zachodniej Australii. Łączną moc prądów oceanicznych szacuje się na 5–7 TW. Są to zasoby charakteryzujące się małą gęstością, która ogranicza opłacalność inwestycji. Z 1 m<sup>2</sup> poprzecznego przekroju prądu o prędkości 1 m/s można otrzymać około 600 W mocy elektrycznej.

Od kilkudziesięciu lat ludzie próbują wykorzystać do wytwarzania energii siłę fal pływowych. W latach 60. XX wieku Francuzi zainteresowali się wykorzystaniem powierzchniowych fal pływowych do wytwarzania prądu. U ujścia rzeki Rance do zatoki Saint-Malo w kanale La Manche, w pobliżu miejscowości Saint-Malo, rozpoczęto budowę pierwszej na świecie elektrowni wykorzystującej energię pływów morskich. Oddano ją do użytku w 1967 roku. Urządzenia pracują do dziś. Moc tej pierwszej na świecie elektrowni wykorzystującej siłę morskich pływów wynosi 240 MW [11].

Główne wady elektrowni pływowych to: zasalenie ujść rzek i negatywny wpływ na migrację ryb w górę rzeki. Z ekonomicznego punktu widzenia korzystny jest fakt, że elektrownie takie mogą być eksploatowane przed długi okres, około 100 lat.

#### 2.2.2.4. Energia cieplna oceanu i różnic zasolenia

Od wielu lat prowadzone są badania nad wykorzystaniem energii różnic temperatury i różnic zasolenia wód. Wykorzystanie energii cieplej oceanu opiera się na wykorzystaniu różnicy temperatury wody na powierzchni i w głębi morza lub oceanu. Na powierzchni milionów kilometrów kwadratowych oceanów temperatura powierzchniowych warstw wody nie spada poniżej 27,8°C, a na głębokości 600 m wynosi już tylko 1,7÷3,4°C. Na obszarach równikowych woda morska ma na powierzchni temperaturę około 30°C, a na głębokości 300÷500 m około 7°C. Wykorzystanie tej różnicy temperatury opiera się na zastosowaniu czynnika roboczego, który paruje w temperaturze wody powierzchniowej i jest skraplany za pomocą wody czerpanej z głębokości 300–500 m. Cała instalacja wraz z generatorem znajduje się na platformie pływającej.

Ilość energii, która może być uzyskana z tego źródła, szacuje się na 4·10<sup>14</sup> kWh rocznie. Oznacza to, że różnice temperatury mogą dostarczyć około tysiącrotnie więcej energii niż prądy morskie i prawie dwudziestokrotnie więcej niż fale. Dodatkowe zasoby energii kryją się w różnicach temperatur między wodą powierzchniową a powietrzem (na przykład arktycznym)

albo między wodą denną a skałami dna oceanu.

Pierwsza megawatowa instalacja doświadczalna powstała w Stanach Zjednoczonych w 1980 roku.

Przedmiotem zainteresowania specjalistów z wielu krajów, w tym japońskich, francuskich i izraelskich, od wielu lat są stawy słoneczne. Istotą stawu cieplnego jest występowanie warstw wody o różnym zasoleniu. Warstwa dolna, silniej zasolona, absorbująca promieniowanie słoneczne, jest akumulatorem energii cieplnej i osiąga temperaturę wyższą od warstwy powierzchniowej słabo zasolonej nawet o 90°C.

Dolna warstwa, o znacznej gęstości, z trudem przewodzi ciepło ku górze. Ciepło tej warstwy za pomocą wymiennika ciepła może być wykorzystane do odparowania czynnika roboczego napędzającego turbinę i generator. Problem uzyskiwania energii użytkowej z różnic zasolenia jest nadal badany. Nieliczne są próby budowania instalacji przemysłowych. Bierze się przy tym pod uwagę możliwość wykorzystania:

- zjawisk osmotycznych, czyli różnicy ciśnień między roztworami o różnych stężeniach,
- zjawiska dializy, czyli różnic w przepuszczalności błon,
- potencjałów membranowych.

Najbardziej zaawansowane są próby wykorzystania zjawiska osmozy. Wtłaczając strumień 1 m<sup>3</sup>/s słodkiej wody do wody morskiej o zasoleniu 35%, można uzyskać 2 MW mocy.

### 2.2.3. Energia biomasy

Źródłem taniej i ekologicznej energii może być biomasa. Jest to sucha roślinność, na ogół słoma bądź drewno z roślin szybko rosnących, jak wierzba. Przy jej spalaniu emisja CO<sub>2</sub> jest równa ilości tego związku, jaką pobrała roślina w czasie wzrostu, co w bilansie końcowym daje zero. Biomasa jako źródło energii przy racjonalnej gospodarce jest odnawialna (w przeciwieństwie do pokładów ropy czy gazu). Nie ma również problemu z utylizacją popiołu, będącego znakomitym nawozem.

Wartość kaloryczna biomasy jest prawie dwukrotnie niższa niż wartość kaloryczna węgla. Przyjmuje się, że 1 Mg węgla kamiennego jest równoważny energetycznie 2 Mg suchej biomasy. Przykładowe wartości opałowe biomasy są następujące: słoma żółta 14,3 MJ/kg, słoma szara 15,2 MJ/kg, drewno odpadowe 13 MJ/kg. Dla porównania wartość opałowa węgla kamiennego wynosi około 25 MJ/kg, gazu ziemnego 48 MJ/kg. Szacuje się, że w Polsce w samym tylko rolnictwie potencjał energetyczny niewykorzystanej biomasy wynosi 104 PJ/a, natomiast potencjał całkowity możliwej do zagospodarowania biomasy wynosi około 407,5 PJ (rolnictwo 195 PJ, leśnictwo 101 PJ, sadownictwo 57,6 PJ i przemysł drzewny 53,9 PJ) [12]. Paliwo to może być stosowane w systemach grzewczych, ale również do celów elektroenergetycznych po zamontowaniu turbiny i instalacji towarzyszącej, aby produkować prąd elektryczny.

### 2.2.4. Energia geotermalna

Olbrzymie zasoby energii geotermalnej są związane z wysoką temperaturą jądra Ziemi, utrzymującą się dzięki prądom konwekcyjnym w ciekłej strefie jądra zewnętrznego (grubość

około 2080 km) mimo ciągłego odpływu ciepła. Możliwość eksploatacji tych zasobów energetycznych zależy od stanu techniki dla głębokości wierceń, przy czym minimalna głębokość wiercenia szybów jest uzależniona od minimalnej temperatury, przy której wykorzystanie ciepła można jeszcze uznać za opłacalne, oraz od gradientu geotermicznego, wynoszącego przeciętnie 30°C na kilometr głębokości.

Stopień geotermiczny, czyli odległość w głąb Ziemi odpowiadająca wzrostowi temperatury o 1°C, wynosi w Europie średnio 33 m. Wielkość ta zależy głównie od przewodnictwa cieplnego skał, sposobu ich rozmieszczenia, nawodnienia i bliskości gorących źródeł. Istnieją obszary zwane hipertermicznymi, w których gradient geotermiczny przekracza 80°C na kilometr. Najczęściej wykorzystuje się zasoby hydrogeotermiczne w postaci pary wodnej lub wody gorących źródeł powierzchniowych i podziemnych o temperaturze 50–70°C.

Energia geotermalna występuje w formie ciepła we wnętrzu Ziemi. W modelu strefowym wnętrza Ziemi wyróżnia się 3 główne strefy: skorupę Ziemi, płaszcz Ziemi i jądro Ziemi. Zewnętrzna powłoka, skorupa ziemiska, jest niejednorodna, sztywna i stosunkowo chłodna. Grubość skorupy na kontynentach wynosi 30–40 km, pod oceanami 10–20 km, a pod masywami górskimi (Alpy, Kaukaz) do 70 km. Na terenie Polski grubość skorupy zmienia się od 27 km do 47 km. Jako granicę płaszcza i jądra Ziemi przyjmuje się powierzchnię na głębokości 2900 km, na której obserwuje się gwałtowny spadek prędkości podłużnych fal sejsmicznych.

Jądro zewnętrzne ma charakter cieczy o temperaturze 4000÷4800°C i znacznej przewodności elektrycznej i cieplnej. Jądro wewnętrzne, o promieniu 1250 km, ma charakter ciała stałego o bardzo dużej sztywności i gęstości 12–13 g/cm<sup>3</sup>, gdzie ciśnienie, jak obliczono, wynosi 360 000 MPa [13].

Wykorzystanie ciepła geotermalnego wymaga nośnika do transportu ciepła z pewnej głębokości aż do powierzchni Ziemi. Transport ciepła odbywa się najpierw przez przewodnictwo, a następnie przez konwekcję za pomocą płynu geotermicznego jako nośnika. Tym płynem jest najczęściej woda deszczowa, która przenika do skorupy ziemskiej i ogrzewa się w kontakcie z gorącymi skałami do 300°C (przy wysokim ciśnieniu). W celu uzyskania gorącego płynu wierce się odpowiednie otwory po to, by wejść w rezerwuuar ciepła (osadę gorących skał). O użyteczności płynu decyduje jego temperatura i ciśnienie.

Globalne wykorzystanie energii geotermalnej na świecie może być porównywalne z wykorzystaniem energii biomasy.

### 2.2.5. Energetyka fotowoltaiczna

Energia słoneczna jest jednym z najbardziej obiecujących odnawialnych źródeł energii na świecie, ponieważ nie obciąża otoczenia, a Słońce jest praktycznie niewyczerpalnym źródłem energii. Ogniwa fotowoltaiczne (PV) dzięki absorpcji i konwersji promieniowania słonecznego są źródłem energii elektrycznej. Promieniowanie słoneczne składa się z promieniowania bezpośredniego i pośredniego (dyfuzyjnego), przy czym ogniwa PV przetwarzają obie te składowe na prąd elektryczny. Znajdują one zastosowanie

w 3 podstawowych obszarach: elektronice powszechnego użytku, systemach wolnostojących i systemach dołączonych do sieci elektroenergetycznej.

- pozytywne cechy instalacji fotowoltaicznych są następujące:
- do pracy ogniw PV nie jest potrzebne żadne paliwo, nie ma więc problemów, związanych z transportem i magazynowaniem paliwa oraz odpadów,
  - ogniwa PV przekształcają także rozproszone promieniowanie słoneczne, padające na Ziemię również w zamglone i pochmurne dni całego roku,
  - w czasie produkcji energii nie powstają zanieczyszczenia chemiczne środowiska naturalnego i odpady,
  - stacjonarne systemy fotowoltaiczne nie wymagają bieżącej obsługi, a awarie systemów zdarzają się niezwykle rzadko,
  - wydajność systemu fotowoltaicznego nie zmniejsza się wraz z upływem czasu, gdyż większość komercyjnie stosowanych ogniw PV nie starzeje się w czasie eksploatacji,
  - żywotność modułów PV wynosi na ogół 20–30 lat (czynnikami nieodwracalnie niszczącymi są: wysoka temperatura rzędu 500 K oraz radiacja strumieniem cząstek elementarnych),
  - instalacje stacjonarne na skutek braku ruchomych podzespołów nie ulegają zużyciu, nie wymagają zatem części zamiennych i konserwacji w długim okresie użytkowania.

Typowe obszary zastosowań systemów fotowoltaicznych to:

- telekomunikacja (zasilanie stacji nadawczych i przekątnikowych naziemnych oraz satelitarnych),
- budownictwo (ogrzewanie, oświetlenie, zasilanie urządzeń elektrycznych powszechnego użytku),
- elektroenergetyka (produkcja energii elektrycznej dla ogrzewania i zasilania budynków oraz do ogólnej sieci elektroenergetycznej),
- transport drogowy i morski (zasilanie znaków sygnalizacji drogowej akustycznej i świetlnej, oświetlanie przystanków i ulic oraz napęd pojazdów mechanicznych),
- rolnictwo (zasilanie urządzeń pompujących i nawadniających glebę, przetwórstwo i konserwacja żywności),
- rekreacja i turystyka (źródła energii elektrycznej i cieplnej: jachty, pola namiotowe, domki kempingowe poza zasięgiem sieci elektroenergetycznej),
- elektronika użytkowa (zasilanie sprzętu powszechnego użytku: kalkulatory, zegarki, urządzenia gospodarstwa domowego).

Systemy fotowoltaiczne można podzielić na autonomiczne i podłączone do sieci energetycznej.

#### 2.2.5.1. Materiały do produkcji ogniw fotowoltaicznych

Absorpcja promieniowania oraz rozkład spektralny widma słonecznego ogranicza grupę materiałów półprzewodnikowych, które mogą być użyte w celu wytworzenia fotoelektryczności. Im mniejsza jest przerwa energetyczna  $E_g$  danego półprzewodnika, tym większa część widma słonecznego może być wykorzystana. Z drugiej strony większa przerwa energetyczna umożliwia uzyskanie wyższego napięcia fotoelektrycznego. Przy projektowaniu baterii słonecznej istotnym czynnikiem jest więc optymalne dopasowanie



czułości spektralnej fotoogniwa do charakterystyki widmowej promieniowania.

Najszerzej stosowanym materiałem do produkcji ogniw fotowoltaicznych na szeroką skalę pozostaje wciąż krystaliczny krzem (obecnie 90% światowej produkcji ogniw fotowoltaicznych stanowią ogniwa na bazie krzemu). Ma on oczywiście zalety związane z powszechnością występowania i dobrze dopasowaną dla konwersji fotowoltaicznej przerwą energetyczną. Dodatkowym atutem jest jego nietoksyczność. Dzięki dominacji w mikroelektronice krzem stał się najlepiej zbadanym półprzewodnikiem, a opracowane technologie krzemowe bezpośrednio przeniesiono do fotowoltaiki.

Czysty krzem (metalurgiczny, 98–99% czystości) otrzymuje się z dwutlenku krzemu ( $\text{SiO}_2$ ), który łączy się z węglem, tworząc krzem i dwutlenek węgla. W celu wykorzystania go do produkcji ogniw PV jest on oczyszczany w procesie Siemens.

Ogniwa z krystalicznego krzemu klasyfikuje się w 3 grupach, w zależności od dalszego przebiegu procesu produkcji podłoża krzemowego:

- monokrystaliczne (sc-Si) – monokrystaliczny krzem wytwarza się z roztopionego krzemu polikrystalicznego metodą Czochralskiego<sup>2</sup>, który opracował ją w roku 1916, lub w procesie topienia strefowego (metoda float-zone);
- multikrystaliczne (mc-Si) lub polikrystaliczne (pc-Si) – w zależności od rozmiarów ziaren o jednej orientacji krystalograficznej: mc-Si od 1 mm do 10 cm, pc-Si od 1 μm do 1 mm; produkcja multikrystalicznego krzemu polega na roztopieniu i ponownym krzepnięciu krzemu;
- taśmy i folie krzemowe otrzymywane metodą EFG (ang. Edge-Defined Film-Fed Growth) – metoda wyciągania z roztopionego materiału krzemowego taśmy powstającej na graficznej matrycy.

Obecnie fotowoltaika znajduje się na skraju przejścia z „technologii pierwszej generacji”, opartej na płytkach krzemowych, do „technologii drugiej generacji” – produkcji ogniw cienkowarstwowych, co pozwoli na znaczną redukcję kosztów, jednak krzem nadal będzie odgrywał dominującą rolę.

Obecnie są stosowane 3 podstawowe typy ogniw cienkowarstwowych:

- ogniwa z amorficznego krzemu (a-Si i a-Si/μc-Si),
- ogniwa z tellurku kadmu (CdTe),
- ogniwa z selenku miedziowo-indowego  $\text{CuInSe}_2$  (Copper-Indium-Selenide, CIS) i selenku miedziowo-indowo-galowego  $\text{CuInGaSe}_2$  (Copper-Indium-Gallium-Diselenide, CIGS).

Zaletami ogniw cienkowarstwowych są w szczególności:

- materiałowooszczędność i niska cena,
- oszczędność czystych materiałów półprzewodnikowych,
- niskie straty materiałowe – unika się hodowania kryształu i cięcia bloku monokrystalicznego,
- zintegrowany proces łączenia szeregowego modułów w zależności od wymaganego napięcia baterii na wyjściu,
- stosowanie techniki cienkowarstwowej, co umożliwia prostą realizację stosu ogniw, czyli strukturę warstwową połączonych szeregowo złącz p-n o różnych wartościach przerwy

energetycznej oraz lepsze wykorzystanie widma słonecznego i tym samym większą sprawność konwersji,

- wytwarzanie laboratoryjne pojedynczych ogniw z amorficznego krzemu o wymiarach kilku  $\text{cm}^2$  osiągających sprawność konwersji 11÷12%<sup>3</sup>.

Krzem amorficzny (a-Si) to niekrystaliczny alotrop pozyskiwany z krzemu, jest masowo wykorzystywany przy produkcji ogniw fotowoltaicznych, wyświetlaczy LCD, OLED. Żywność krzemu w tej postaci jest ponad dwukrotnie niższa niż krzemu monokrystalicznego. Produkcja ogniw fotowoltaicznych z krzemu amorficznego różni się znacznie od technologii na bazie krzemu krystalicznego – procesy produkcji ogniw fotowoltaicznych z a-Si są proste, energooszczędne i materiałowooszczędne, a dodatkowo można otrzymać ogniwa o dużej powierzchni. Ponadto, w przeciwieństwie do monokrystalicznego krzemu, nie ma w tej technologii strat materiałowych na cięciu płytek i polerowanie; obniża to koszt produkcji ogniw.

Krzem amorficzny może być osadzany na dużych powierzchniach szklanych w procesie niskotemperaturowym, ma jednak istotną wadę: efekt degradacyjny (tzw. efekt Staeblera-Wronskiego) powoduje spadek sprawności ogniw fotowoltaicznych z amorficznego krzemu do 40% wartości początkowej. Stosunkowo skuteczną metodą regeneracji modułów z amorficznego krzemu jest metoda termiczna, polegająca na podgrzewaniu czynnej substancji fotowoltaicznej modułu do określonej temperatury. Po napromieniowaniu ich sprawność znów spada i ze wzrostem temperatury stabilizuje się na niższym poziomie.

Ogniwa z tellurku kadmu ( $\text{CdTe}$ ) są tańsze, a jednocześnie osiągają wyższą sprawność. Produkowane są na podłożu szklanym z warstwą transparentną tlenku indowo-cynowego (ITO), pełniącą funkcję kontaktu przedniego, a następnie bardzo cienką warstwą siarczku kadmu  $\text{CdS}$  typu n i  $\text{CdTe}$  typu p, odgrywającego rolę absorbera.

$\text{CdS}$  absorbuje niewielki zakres światła widzialnego i niebieskiego, pozwalając pozostałej części widma dotrzeć do aktywnej warstwy tellurku kadmu. Tylny kontakt metaliczny wytwarzany jest przez napylenie.

Dwuselenek miedziowo-indowy  $\text{CuInSe}_2$  jako cienkowarstwowy materiał fotowoltaiczny jest wykorzystywany coraz częściej. Ogniwa tworzone są przez naparowanie próżniowe warstwy  $\text{CdS}$  na powierzchni kryształu  $\text{CuInSe}_2$  albo przez: naparowanie związków dwuskładnikowych  $\text{Cu}_3\text{Se}_2$ - $\text{InSe}$  lub  $\text{Cu}_3\text{Se}_2$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$ , naparowanie tych pierwiastków z trzech źródeł (Cu, In, Se), rozpylanie katodowe, epitaksję wiązką molekularną, rozpraszanie pirolityczne.

Ogniwa CIGS są wykonane ze stopu miedzi, indu, galu i selenu. W tej technologii często cały moduł jest zbudowany z jednego ogniwa.

#### 2.2.5.2. Konstrukcja modułu PV

Najistotniejszym elementem systemu fotowoltaicznego jest ogniwo fotowoltaiczne i jego parametry (charakterystyka prądowo-napięciowa, charakterystyka spektralna, sprawność konwersji energii). Ogniwa są grupowane i łączone ze sobą, tworząc moduły fotowoltaiczne. Połączone ze sobą moduły tworzą panele fotowoltaiczne stanowiące elementy systemu fotowoltaicznego, zwanego również generatorem PV lub polem



modułów (rysunek 2.6). W zależności od liczby połączonych w module ogniw i rodzaju połączenia (szeregowe, równoległe, szeregowo-równoległe) otrzymuje się inne parametry elektryczne modułu.

Ogniwa PV wymagają połączenia, a następnie laminacji w celu ochrony przed uszkodzeniem, gdyż w formie monokrystalicznej stanowią cienkie (rzędu 0,1÷0,3 mm grubości) i kruche płytki, a w formie cienkowarstwowej wraz z podłożem sztywną (w przypadku podłoża szklanego) cienką płytę lub elastyczną folię. Proces laminacji zależy od technologii wytwarzania danego typu ogniwa i od rodzaju zastosowania modułu. Połączenia muszą zapewnić dobre przewodzenie i niezawodność na długi czas, niezależnie od możliwych wahań temperatury i innych czynników klimatycznych, które mogą wpływać na ich działanie.

Bardziej precyzyjne określenie modułu PV obejmuje rodzaj zastosowanych ogniw, na przykład :

- moduł monokrystaliczny,
- moduł polikrystaliczny,
- moduł cienkowarstwowy (na bazie amorficznego krzemu, CdTe lub CIS),

lub podłoża:

- moduł na warstwie nieprzezroczystej,
- moduł na szkle,
- moduł na warstwie metalu,
- moduł na akrylu (tworzywa sztucznego).

Połączenia ogniw w module mogą być sztywne lub giętkie, jednak stosuje się zwykle ten drugi rodzaj, aby uniknąć przesunięć i naprężeń wewnątrz modułu wskutek rozszerzalności termicznej i innych czynników. Wszystkie połączenia elektryczne i kontakty muszą prowadzić do jak najmniejszej rezystancji szeregowej i jak najmniejszego wpływu na przebieg procesu konwersji, dlatego przewody powinny być krótkie i mieć odpowiedni przekrój poprzeczny. Połączenie realizuje się za pomocą przewodów i lutowania przednich kontaktów każdego ogniwa z tylnymi kontaktami następnego ogniwa, tak aby połączyć ujemny biegun ogniwa (z przodu) z dodatnim biegunem (z tyłu) następnego ogniwa. W ten sposób łączy się ogniwa szeregowo. Przewody początku i końca takiego układu szeregowego wydłuża się w celu dokonania dalszych połączeń elektrycznych.

Rozmiary ogniw są istotnym aspektem przy projektowaniu modułu, gdyż wpływają na jego charakterystykę elektryczną. Natężenie prądu wzrasta proporcjonalnie do powierzchni ogniw, podczas gdy napięcie jest od tego czynnika niezależne; jest ono funkcją wysokości bariery potencjału w obszarze złącza p-n oraz liczby ogniw połączonych szeregowo.

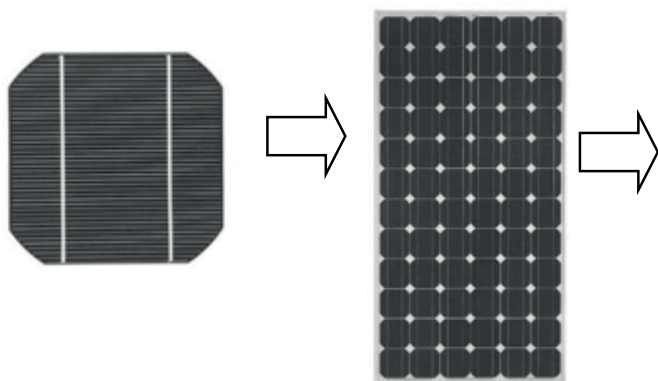
W celu ochrony warstw przed naprężeniami mechanicznymi i wilgotnością ścieżki przewodzące ogniwa umieszczone są w przezroczystej substancji ochronnej, która jest dielektrykiem.

Obecnie stosuje się 3 rodzaje hermetyzacji modułów słonecznych:

- z EVA (z ang. ethylene-vinyl acetate) – kopolimeru etylenu i octanu winylu,
- z teflonu,
- z odlewu gumowego.

W większości przypadków warstwy osadza się na szkle, ale jest też możliwe wykorzystanie tworzywa akrylowego lub metalu. W zależności od procesu ogniwa słoneczne mogą się znajdować poza lub między warstwami materiału podłoża. Istotne jest, aby pokrycie strony światłoczułej było wykonane z wysoce przezroczystego materiału pozwalającego na przenikanie prawie całkowitego promieniowania. Z tego względu używa się do tego celu szkła z małą zawartością żelaza jako pokrycia czołowego, dla którego współczynnik przenikania wynosi 0,91. Pokrywa szklana zabezpiecza przed uszkodzeniami mechanicznymi. Warstwy antyrefleksyjne zwiększają transmisję promieniowania przez pokrywą do 96%. Moduł musi być odporny na zmiany wilgotności, zmiany temperatury, transport, montaż, przyspieszenie i naprężenia mechaniczne, korzystnie jest więc, aby miał usztywniającą ramę.

Połączenie elektryczne ogniw cienkowarstwowych odbywa się w procesie nanoszenia warstw, a cięcie ścieżek przewodzących w indywidualnych warstwach wykonuje się przy pomocy lasera lub za pomocą frezowania mechanicznego. Cienkie warstwy z ogniw z CuInSe<sub>2</sub> (CIS) i z amorficznego krzemu osadza się na elastycznym podłożu, poczynając od warstwy kontaktowej tylnej ogniwa. Natomiast ogniwa cienkowarstwowe z tellurku kadmu (CdTe) osadza się w odwrotnej kolejności, zaczynając od przezroczystej i przewodzącej warstwy tlenku TCO (Transparent-Conducting-Oxygen).



Rysunek 2.6. Ogniwo fotowoltaiczne - moduł fotowoltaiczny - system fotowoltaiczny [14]

Tradycyjne technologie fotowoltaiczne oparte na krystalicznym krzemie utrzymują wiodącą pozycję, jednak w przyszłości można się spodziewać coraz większej ekspansji technologii II generacji. Nie należy również lekceważyć nowych koncepcji, które obecnie są na etapie rozwoju, ale w przyszłości mogą się stać wiodące.

Ponieważ ogniwa krzemowe ulegają degradacji w temperaturze wyższej niż 25°C, niekiedy wskazane jest chłodzenie modułu. Zwykle ciepło jest z niego odprowadzane przez promieniowanie i konwekcję, jeżeli tylko jest zapewniona odpowiednia cyrkulacja powietrza. W niektórych zastosowaniach (szczególnie satelitarnych) czarne powłoki i ożebrowania radiatora umieszczone na tylnej powierzchni modułu zapewniają odprowadzanie zbędnego ciepła (system pasywny). Stosuje się również (w zastosowaniach naziemnych) chłodzenie wodą lub fluoropochodnymi węglowodorów, które są przepompowywane przez przewody umieszczone na powierzchni tylnej modułu (system aktywny).

### 2.2.6. Kolektory promieniowania słonecznego

Wykorzystanie promieniowania słonecznego do produkcji ciepła wymaga stosowania urządzeń zwanych kolektorami ciepła. Charakteryzują się one stosunkowo wysoką sprawnością dla naszej szerokości geograficznej (20÷90% w zależności od warunków pogodowych). Na całym świecie pozyskiwanie termicznej energii solarnej odbywa się nie tylko za pomocą małych instalacji, służących odbiorcom indywidualnym, lecz także w postaci dużych instalacji zasilających kompleksy budynków.

W komercyjnych zastosowaniach dominują kolektory płaskie oraz próżniowe rurowe. Płaskopłytowy kolektor słoneczny jest najprostszym i najbardziej rozpowszechnionym urządzeniem. Strumień promieniowania słonecznego przenika przez przezroczyste dla tego rodzaju promieniowania płyty osłonowe wykonane ze szkła lub tworzywa i pada na zaczernioną powierzchnię absorbera w kolektorze. Przepływający czynnik roboczy – ciecz lub powietrze – pobiera z absorbera energię cieplną.

W celu zredukowania strat energii stosuje się płyty osłonowe oraz izolację cieplną odwrotnej strony płaskopłytowego kolektora ze styropianu lub wełny mineralnej. Lekka i szczelna konstrukcja kolektorów umożliwia ich montaż zarówno w połaci dachowej, na stelażu nad dachem czy też na fasadzie budynku. Ilość uzyskanego w ten sposób ciepła zależy od:

- konstrukcji absorbera i materiału, z którego jest wykonany,
- kształtu i wielkości kanałów przepływu czynnika roboczego,
- rodzaju czynnika roboczego oraz wielkości strumienia przepływu.

Jako materiał konstrukcyjny absorbera stosuje się: miedź, aluminium, stal lub mosiądz.

W rurach kolektora próżniowego następuje parowanie czynnika o niskiej temperaturze wrzenia. Podczas ogrzewania rur przez słońce ciecz zaczyna parować i ciepło konwekcyjnie przechodzi do końcówki rury umiejscowionej w kanale zbiorczym będącym wymiennikiem ciepła. Przez kondensator ciepło oddawane jest najpierw do płynu przepływającego przez

kanał zbiorczy, a następnie przekazywane do zbiornika ciepłej wody. Kolektory próżniowe rurowe są droższe, ale pozwalają uzyskać w okresie jesienno-zimowym około 20% więcej ciepła niż kolektory płaskie. Ich stosowanie uzasadnione jest szczególnie w instalacjach całorocznych. Ich wyższa sprawność w okresie zimowym wynika ze zdolności kolektora próżniowego do absorbowania promieniowania rozproszonego oraz ograniczania strat ciepła dzięki próżni istniejącej między dwoma rurami szklanymi kolektora. Powłoka absorbująca w kolektorach rurowych znajduje się najczęściej na zewnętrznej powierzchni wewnętrznej rury. Zapewnia to maksymalną absorpcję promieni słonecznych. Minusem tego rozwiązania jest wyższa cena w porównaniu do kolektorów płaskich.

Obecnie także znaczna ilość mocy elektrycznej może być generowana przez skoncentrowaną moc termiczną, przy umiarkowanych kosztach.

Większość technologii generowania elektryczności z energii cieplnej wymaga wysokich temperatur po to, by osiągnąć przy tym znaczne sprawności konwersji. Stwierdzono, że nieskoncentrowane promieniowanie słoneczne padające na absorber w kolektorze termicznym podnosi jego temperaturę poniżej 200°C. Aby skutecznie podnieść temperaturę absorbera w kolektorze, potrzebny jest zatem system z koncentratorem odbitych i skupionych promieni słonecznych. Reflektor, który koncentruje promieniowanie słoneczne na linii ogniskowej lub w punkcie, ma zwykle kształt paraboliczny. Cały czas musi nadążać za pozornym ruchem Słońca. Rozróżnia się przy tym system nadążny jednoosiowy, który koncentruje wiązkę promieniowania wzdłuż linii ogniskowej, lub dwuosiowy, który koncentruje promieniowanie w małym obszarze, w przybliżeniu w punkcie, czyli w ognisku koncentratora. Maksymalny czynnik koncentracji promieniowania wynosi niemal 50 000 i jest ograniczony ze względu na to, że Słońce nie jest punktowym źródłem promieniowania.

Maksymalna temperatura koncentracji, którą można osiągnąć, jest równa temperaturze powierzchni Słońca 5500°C. Przy mniejszym czynniku koncentracji temperatura w ognisku koncentratora jest niższa, jednak rzeczywiste układy nie osiągną tego teoretycznego maksimum, ponieważ z jednej strony nie jest możliwe zbudowanie absolutnie dokładnego układu, a z drugiej – występują straty energii podczas przepływu ciepła do odbiornika. Jeśli natomiast odbiór ciepła w procesie transferu zostanie z jakiegoś powodu zatrzymany, to odbiornik może osiągnąć krytycznie wysoką temperaturę.

W warunkach klimatycznych Polski uzasadnione ekonomicznie jest stosowanie kolektorów słonecznych do ogrzewania wody użytkowej. Najkorzystniejszy jest system, który pokrywa zapotrzebowanie na ciepło do ogrzania c.w.u. w okresie od kwietnia do września. W pozostałych miesiącach roku podgrzanie wody powinno zapewniać to samo źródło ciepła, które służy do ogrzewania budynków (kocioł gazowy, pompa ciepła).

### 2.3. Odpady jako źródło energii

Od zarania dziejów każdej cywilizacji towarzyszą odpady bytowo-gospodarcze pochodzące z prowadzonych upraw, hodowli i codziennego życia. Zrównoważony rozwój i życie

w zgodzie z naturą pozwalało na zagospodarowywanie powstających odpadów i ich wykorzystywanie na cele energetyczne, jako nawozu itp. Problem z rosnącą lawinowo ilością odpadów pojawił się wraz z rewolucją przemysłową, gospodarczą i przejściem na wielkoskalowe produkcje dzięki wprowadzeniu maszyn do hal technologicznych. Rozwój technologii pozwolił na wielki skok cywilizacyjny, umożliwił pracę maszyn, urządzeń wspomagających ludzką pracę, pozwolił na rozwój transportu, co usprawniło wymianę międzynarodową, dostęp do zasobów i złóż z odległych rejonów świata. Możliwość przesyłania towarów wpłynęła na rozwój handlu i przemysłu, wprowadzenie automatyki i maszyn w rolnictwie pozwoliło na zwiększenie areалу upraw, równoległy rozwój medycy przyczynił się również do zwiększenia populacji ludności na świecie. Rynek, dotąd regionalny, stał się globalny, a wraz z ogromną dynamiką rozwoju gospodarczego z biegiem czasu pojawił się konsumpcjonizm, związany z chęcią zdobywania dóbr materialnych nieuzasadnionych realnymi potrzebami, lecz z tzw. komfortem i jakością życia. Fakt poprawy jakości życia społeczeństw, powszechny dostęp do wielu dóbr materialnych, dobrobyt bytowo-gospodarczy wiąże się wprost z globalnym problemem gigantycznych ilości produkowanych odpadów oraz ekspansywną gospodarką zasobami naturalnymi.

Wydaje się, że dzisiejszym kierunkiem i wyzwaniem dla naukowców jest opracowywanie nowych technologii recyklingu odpadów – w pierwszej kolejności zajęcie się odzyskiem surowców i możliwością zwracania ich do wtórnego obiegu materiałów stanowiących ponownie substrat w produkcji. W przypadku niemożliwości ponownego wykorzystania powstających odpadów należy je traktować jako źródło energii, którego strumień jest od wielu lat na stałym poziomie lub rośnie. Dywersyfikacja źródeł energii kraju i świata polega na wsparciu energetyki odnawialnymi źródłami energii, opracowywaniu nowych technologii, ale, co również ważne, potraktowaniu odpadów jako swoistego odnawialnego źródła energii, opracowaniu technologii bezpiecznych dla środowiska naturalnego i pozwalających na uzysk energii cieplnej lub elektrycznej pochodzącej z różnorodnych frakcji odpadów.

Podejściem do tematu odpadów propagowanym w ostatnich latach jest gospodarka odpadami typu zero waste (bez odpadów). To styl życia czy też nurt polegający na ograniczeniu konsumpcjonizmu przez wdrażanie zasad odmawiania, odgraniczania, ponownego użytku, recyklingu, kompostowania. Niewielkie zainteresowanie nim przedsiębiorców i wielkich koncernów produkujących sprawia, że takie podejście można obecnie uznać za marginalne w skali kraju czy świata. Nie ulega wątpliwości, że główną rolę w odwróceniu obecnych trendów odgrywają duże koncerny i przedsiębiorstwa o zasięgu międzynarodowym. Prawdziwe jest jednak powiedzenie, że zmiany globalne należy zacząć od zmian lokalnych i postępowania jednostki.

### 2.3.1. Gospodarka odpadami

Gospodarka odpadami obejmuje ogół czynności, których celem jest organizacja, nadzór, kontrola, ale przede wszystkim planowanie recyklingu lub zagospodarowania odpadów.

Stanowi analizę end of life, czyli zagospodarowania powstających produktów już na etapie planowania produkcji. Gospodarka odpadami to również szeroko rozumiana polityczna i prawna kwestia dotycząca implementacji europejskich przepisów, udoskonalania obecnych i wprowadzania nowych rozporządzeń. W myśl ustawy o odpadach powinna być prowadzona tak, aby zapewnić ochronę zdrowia, życia ludzi i minimalizować negatywny wpływ na środowisko [15]. W szczególności mowa tu o niezanieczyszczaniu wód, powietrza, gleby, szeroko pojętej flory i fauny, nieoddziaływaniu negatywnie na obszary zurbanizowane poprzez wydzielanie odorów lub hałasów. Ponadto poszanowanie terenów wiejskich, lasów i obszarów o szczególnym znaczeniu kulturowym i przyrodniczym, takim jak parki narodowe, krajobrazowe i inne. Planując i wdrażając rozwiązania systemowe, należy brać pod uwagę wiele czynników mogących wpływać negatywnie na otoczenie. Dotyczy to zagadnienia gospodarowania odpadami jako całości włączając w to również frakcję, która jest składowana.

Mając na uwadze fakt, że wraz z rozwojem przemysłu z roku na rok liczba generowanych odpadów wciąż rośnie, mogą one stanowić stałe źródło energii. Wykorzystanie odpadów jako źródła energii jest bardzo korzystne i pozwala zamknąć „cykl życia produktu” przez odzyskanie ciepła lub energii elektrycznej włożonej w procesie produkcyjnym. Mowa tu o części strumienia, która obecnie trafia na składowisko. Warto wspomnieć, że prawidłowa gospodarka odpadami polega na szczegółowym planowaniu i realizowaniu recyklingu, tak aby jak najmniejsza ich ilość była kierowana na wysypisko, dlatego jednym z głównych wyzwań w gospodarce odpadami jest wprowadzenie obiegu zamkniętego powstających produktów, czyli analiza i wdrażanie recyklingu i zagospodarowania produktów. W celu usprawnienia całego procesu wdrażania rozwiązań stosuje się odpowiednie regulacje prawne i instrumenty ekonomiczne.

Na podstawie ustawy o odpadach została opracowana piramida postępowania z odpadami (rysunek 2.7). Istotne jest, aby obróbka głównego strumienia odpadów odbywała się zgodnie z przyjętą hierarchią postępowania, tj. w pierwszej kolejności procesy technologiczne, produkcja i przemysł powinny od samego początku uwzględniać rozwiązania generujące najmniejszą ilość odpadów. Mowa o wykorzystywaniu wtórnych obiegu, układów ORC, odzysku ciepła odpadowego, zwracaniu produktów ubocznych, oszczędności wody i innych – już w trakcie procesu produkcji. W przypadku powstawania produktów ubocznych bądź odpadów istotne jest uwzględnienie możliwości ich zwracania do procesu i ponownego użycia. Gdy produkt uboczny nie nadaje się do powtórnego użycia, na etapie planowania należy uwzględnić możliwości jego zagospodarowania jako substratu w innych procesach technologicznych lub opracowania technologii recyklingu, zagospodarowania go. Recykling materiałowy jest kolejnym etapem w procedurze planowania gospodarki odpadami. Możliwość wykorzystania produktów ubocznych jako cennego źródła substratów w innych procesach technologicznych pozwala na oszczędność zasobów naturalnych. Recykling energetyczny jest stosowany jako uzupełnienie odzysku materiałowego, frakcja odpadów, która nie nadaje się do ponownego zwrócenia, może zostać wykorzystana jako cenne źródło energii, którego strumień dostaw jest stabilny i ciągły.





Rysunek 2.7. Piramida kolejności działań z odpadami. Opracowanie własne na podstawie [15]

Prezentując porównanie wartości energetycznej odpadów komunalnych z innymi paliwami, należy podkreślić, że w tabeli zamieszczono wartości uśrednione (tabela 2.5). Mimo to wartość opałowa w wysokości 11,6 MJ/kg dla odpadów komunalnych stanowi dobrą perspektywę odzysku energii. Wśród strumienia odpadów możemy wyróżnić frakcję wysokoenergetyczną RDF (ang. refuse derived fuel), której wartość opałowa jest wyższa i wynosi około 18 MJ/kg. RDF, składający się m.in. z polimerów pochodzących z selektywnej zbiórki, które nie nadają się do odzysku, stanowi alternatywne paliwo i można go obrabiać termicznie. Z uwagi na fakt, że obecnie strumień odpadów w kraju uznaje się za generowany w sposób ciągły i na stałym poziomie i w porównaniu z wartościami opałowymi z innymi paliwami jest to alternatywne źródło energii, poniekąd również odnawialne. Ważne, aby technologie termicznej degradacji odpadów stosowane w recyklingu energetycznym były opracowywane kompleksowo i pozwalały na wydajną pracę, która nie wpływa negatywnie na środowisko naturalne. Konieczne jest stosowanie w procesie odpowiednich warunków, a także uzupełnienie linii technologicznej o systemy oczyszczania gazów.

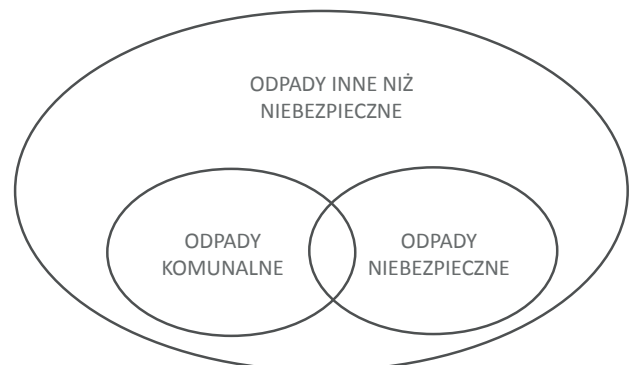
Najmniej pożądane rozwiązanie dotyczące zagospodarowania strumienia odpadów to składowanie. Wiąże się z utratą możliwości odzysku energii, ale też koniecznością przechowywania i magazynowania odpadów na wysypiskach, co negatywnie wpływa na najbliższe otoczenie oraz środowisko naturalne. Związane jest z emisją odorów, problemem

z odciekami, a także terenem koniecznym do przygotowania pod taką inwestycję. Mimo wielu norm i przepisów prawnych w Polsce wciąż spotykamy nielegalne składowiska odpadów na terenach leśnych, wąwozach, przy drodze, w pustostanach itp., jak również trwa proceder związany z dzierżawą gruntów i tworzeniem w dołach, nieckach i zagłębieniach nielegalnych składowisk odpadów niebezpiecznych, biologicznie czynnych, co wpływa katastrofalnie na środowisko naturalne.

### 2.3.2. Definicja odpadów

Podstawowym kryterium klasyfikacji odpadów jest miejsce ich powstania, tj. podział na odpady komunalne związane z ludzkim bytowaniem oraz odpady przemysłowe związane z prowadzeniem działalności gospodarczych.

Klasyfikacja odpadów może być dokonana ze względu na wiele czynników, takich jak właściwości, źródła powstania, sposobu unieszkodliwiania, recyklingu, wpływ odpadów na środowisko i inne. Podstawą wszelkich podziałów jest jednak określenie właściwości fizykochemicznych danej grupy odpadów. W tym celu ważne jest określenie stanu skupienia, składu chemicznego, toksyczności, pH (zasadowość, kwasowość), pochodzenia odpadu, możliwego negatywnego wpływu na środowisko, możliwości dalszego wykorzystania. Dopiero



Rysunek 2.8. Podstawowy podział odpadów. Opracowanie własne na podstawie materiałów Polskiej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości i ustawy o odpadach [15]

Wybrane rodzaje paliwa	WO [MJ/kg]	WE CO <sub>2</sub> [kg/GJ]
Węgiel kamienny	22,7	94,71
Węgiel brunatny	8,1	104,14
Gaz ziemny	48,0	55,43
Ropa naftowa	42,3	73,30
Drewno opałowe i odpady pochodzenia drzewnego	15,6	112,00
Odpady komunalne	11,6	100,00
Oleje opałowe	40,4	77,40

Tabela 2.6. Wartości opałowe uśrednione odpadów i paliw kopalnych, wartości opałowe (WO), wskaźniki emisji (WE) [16]

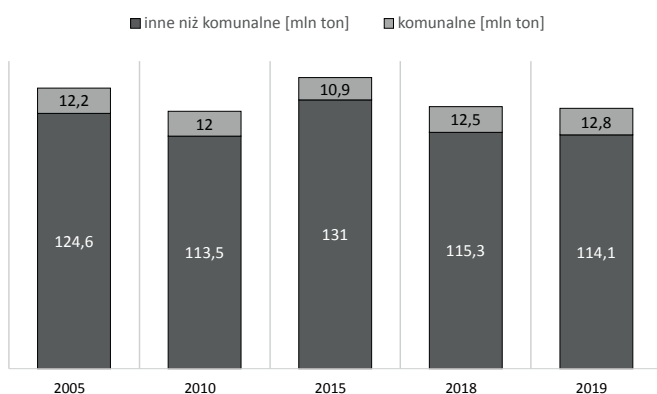


wstępnie scharakteryzowany odpad może zostać zaklasyfikowany do jednej z grup odpadów: niebezpiecznych, innych niż niebezpieczne, komunalnych. Podział ten i pozyskane informacje pozwalają na wykorzystanie odpowiednich przepisów prawnych dla poszczególnych grup, a także procedur postępowania.

### 2.3.3. Odpady krajowe w statystykach

Omawiając zagadnienia związane z gospodarką odpadami, należy rozpocząć od analizy typu i ilości odpadów, ocenić, jakie obecnie rozwiązania są stosowane w sektorze gospodarki odpadami. W tym celu zaprezentowano zestawienie danych dotyczących Polski zamieszczonych w rocznikach statystycznych opracowywanych przez Główny Urząd Statystyczny.

W roku 2021 na terenie Polski wytworzonych zostało około 130 mln ton odpadów, z czego 13,7 mln ton stanowiły odpady komunalne. We wcześniejszych latach po roku 2000 ilość produkowanych odpadów przemysłowych wynosiła 110–130 mln ton [17]. Ilość generowanych odpadów jest na stałym poziomie, co stanowi stabilne źródło surowców i energii. Dodatkowo jest to korzystny trend, tj. mimo stałego wzrostu PKB



Rysunek 2.9. Zestawienie ilości odpadów komunalnych i niekomunalnych (mln ton) w latach 2005–2019 w Polsce. Opracowanie własne na podstawie danych GUS [17]

ilość wytwarzanych odpadów utrzymuje się na jednakowym poziomie.

Należy jednak pamiętać, że na statystyki ostatnich lat znacząco wpływa fakt pandemii COVID-19, która spowolniła gospodarkę, a nawet wstrzymała w pewnych okresach pracy wiele przedsiębiorstw, tym samym obniżając ilość produkowanych odpadów.

W latach 2005–2019 ilość generowania odpadów komunalnych i niekomunalnych oraz ich łączna wartość utrzymywały się na stałym poziomie, niezauważalny jest trend wzrostu ilości generowanych odpadów. Ponad 12 mln ton stanowiły odpady komunalne, odpadów niekomunalnych, czyli generowanych przez różne sektory przemysłu, każdego roku było powyżej 113 mln ton (rysunek 2.9). Porównując te dwa główne źródła odpadów, możemy zauważyć, że ilość odpadów pochodzących z przemysłu jest znacznie wyższa od odpadów bytowo-gospodarczych generowanych w gospodarstwach domowych. W tym kontekście kluczowe jest analizowanie i rozwiązywanie problemów powstających strumieni produktów ubocznych oraz odpadów przez przedsiębiorców i opracowywanie konkretnych technologii pozwalających na ich szybkie i skuteczne wdrażanie do cyklu produkcyjnego. Takie postępowanie umożliwia zagospodarowanie dużych strumieni produktów ubocznych pochodzących z różnych gałęzi przemysłu i często będących potencjalnie wysokokalorycznym paliwem. W Polsce możemy zauważyć dość stabilną ilość generowanych odpadów, co więcej, prognozy i obserwacje rynku globalnego wskazują, że trend jest wciąż rosnący. Powinno to być motorem napędowym do podejmowania aktywności, które miałyby na celu wprowadzanie, opracowywanie i wdrażanie nowych technologii odzysku i recyklingu energetycznego odpadów.

Warto się przyjrzeć zestawieniu ilości generowanych odpadów z podziałem na sektory przemysłu: górnictwo i wydobywanie, przetwórstwo przemysłowe, wytwarzanie i zaopatrywanie w energię elektryczną, gaz, parę wodną, gorącą wodę, dostawę wody, gospodarowanie ściekami i odpadami, rekultywację, budownictwo i inne (tabela 2.6). Przykładem przedsiębiorstw kolejno reprezentujących każdą sekcję mogą być: kopalnie, zakłady produkcyjne żywności, elektrownie, oczyszczalnie

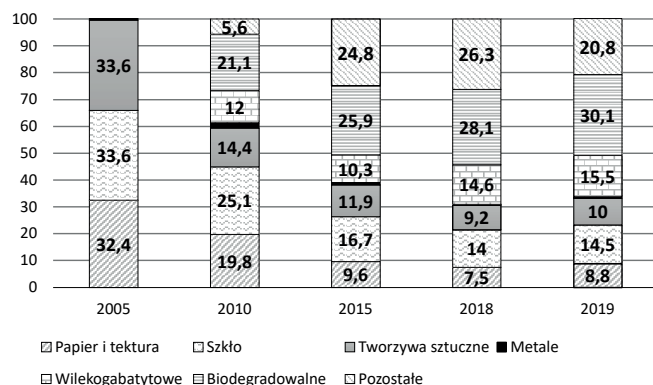
Sektor	Odpady wytworzone w ciągu roku						Odpady dotychczas składowane (nagromadzone)
	ogółem	poddawane odzyskowi	unieszkodliwione		przekazane innym przedsiębiorcom	magazynowane czasowo	
			razem	w tym składowane			
w tysiącach ton							
<b>OGÓLEM</b>	<b>114 134</b>	<b>55 790</b>	<b>54 869</b>	<b>48 929</b>	<b>2 069</b>	<b>1 405</b>	<b>1 794 514</b>
<b>Górnictwo i wydobywanie</b>	63 704	25 576	37 745	37 474	4	378	827 844
<b>Przetwórstwo przemysłowe</b>	27 165	19 688	6 276	3 746	462	740	280 470
<b>Wytwarzanie i zaopatrywanie w energię elektryczną, gaz, parę wodną, gorącą wodę</b>	14 040	5 888	7 868	7 552	193	91	325 477
<b>Dostawa wody, gospodarowanie ściekami i odpadami, rekultywacja</b>	5 355	2 387	2 823	51	7	139	348 627
<b>Budownictwo</b>	2 931	1 462	35	7	1 400	35	–
<b>Pozostałe sekcje</b>	938	788	123	99	4	23	12 095

Tabela 2.7. Odpady wytworzone i dotychczas składowane. Opracowanie na podstawie danych sekcji Polskich Klasyfikacji Działalności w 2019 roku, GUS [17]

ścieków, przedsiębiorstwa budowlane i inne. Sektor przetwórstwa przemysłowego charakteryzuje się najwyższym odzyskiem odpadów produkowanych. Podliczając sumaryczne ilości odpadów generowanych przez przemysł, możemy zaobserwować, że odzyskowi poddawanych jest około 49%, natomiast około 43% ogółu odpadów trafia na składowiska, gdzie stanowią one niewykorzystany potencjał energetyczny. Korzystając ze statystyk opublikowanych przez GUS, zestawiających kraje europejskie i porównanie procesów odzysku i unieszkodliwiania w roku 2018, możemy odczytać, że Polska poddaje recyklingowi około 50% wszystkich produkowanych odpadów, co plasuje ją na 10. miejscu w UE. Dla porównania we Włoszech recyklingowi podlega prawie 80% generowanych odpadów. Ciekawą informacją jest liczba wyrobisk wypełnionych pokopalnianych odpadami powstającymi głównie w sektorze wydobywczym, które w Polsce stanowią około 20%. Zaledwie kilka procent całego strumienia odpadów stanowi odzysk energetyczny, w tym spalanie około 1%. Dla porównania Dania około 20% odpadów poddaje odzyskowi energetycznemu innemu niż spalanie. Analizując zaprezentowane dane, możemy zauważyć, jak cenne źródło energii stanowią odpady. Należy podkreślić, że konieczne są rozwiązania technologiczne już na etapie produkcji, uwzględniające zagospodarowanie i recykling produktów ubocznych, opracowanie i wdrożenie rozwiązań technologicznych pozwalających na ich energetyczne wykorzystanie.

### 2.3.3.1. Morfologia odpadów

Morfologia odpadów komunalnych w latach 2005–2019 zmieniła się znacząco: do frakcji szkła, tworzyw sztucznych, metali i papieru odnotowanej w roku 2005 doszły kolejno odpady wielkogabarytowe, biodegradowalne i pozostałe. W danych statystycznych z 2005 roku pominięto frakcję pozostałe; wydaje się, że uwzględniono jedynie część odpadów, które podlegały sortowaniu. Brak frakcji wielkogabarytowej i biodegradowalnej może wynikać z faktu ujęcia jej w innych statystykach lub też nieprowadzenia ewidencji tej grupy odpadów w tamtym okresie. W ostatnich kilkunastu latach widzimy znaczące zmiany ilościowe w selektywnej zbiórce odpadów, z odbiorem odpadów i recyklingiem poszczególnych grup. Wzrosła świadomość społeczeństwa, co wpłynęło korzystnie na efektywność zbiórki i recyklingu, a także pojawiły się



Rysunek 2.10. Morfologia odpadów w latach 2005–2019. Opracowanie własne na podstawie GUS [17]

na przestrzeni kilkunastu lat specjalne pojemniki na odpady i worki dedykowane.

Cały system został usprawniony, po 2015 roku ilość poszczególnych frakcji wyglądała następująco: odpadów papierowych i tektury było od 7,5 do 9,6%, szkła 14–16,7%, odpadów biodegradowalnych systematycznie przyrastało z 25,9 do 30,1%, ilość tworzyw sztucznych w odpadach w latach 2015–2019 wynosiła 10–11,9%, nieznaczny udział w masie całkowitej stanowiły metale. Obserwowany spadek udziału frakcji „pozostałe” o około 6% w roku 2019 względem roku 2018 pozwala przypuszczać, że jest to wpływ coraz większej świadomości społeczeństwa i wzrostu efektywności w segregacji odpadów, co również zostało wymuszone przez środki prawne i finansowe związane ze wzrostem cen utylizacji odpadów niesegregowanych (tzw. frakcji zmieszanej).

Wzrost ilości odpadów biodegradowalnych wiąże się z wprowadzeniem dodatkowego pojemnika na odpady bio, szczególnie w miastach w pobliżu bloków i osiedli. Wcześniej taki odbiór prowadzono na terenach wiejskich i domkach jednorodzinnych.

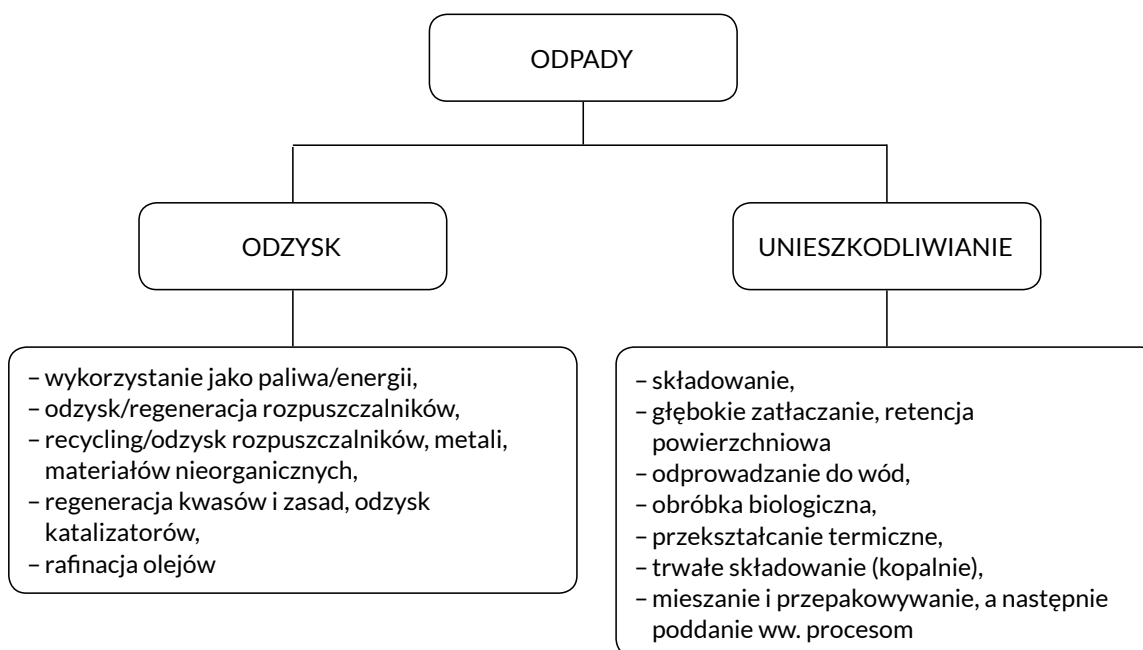
Warto też dodać, że odpady komunalne stwarzają do dziś wiele problemów z utylizacją, a jednym z przykładów uciążliwych grup odpadów mogą być pieluchy jednorazowe i środki higieniczne, które ze względu na to, że są biologicznie czynne oraz mają złożoną budowę (kilka typów materiałów), muszą być koniecznie neutralizowane przez spalanie lub inne procesy obróbki termicznej. Jednak wymaga to oddzielania ich ze strumienia odpadów zmieszanych, co technologicznie jest zadaniem trudnym. Problem stanowią również kartony do napojów i mleka, które nie są wykonane z jednego rodzaju materiału, tj. tektury połączonej folią, a ich utylizacja również wymaga obróbki termicznej. Dodatkowo frakcja stanowiąca nawet 15% ogółu to odpady wielkogabarytowe, do których należą zużyte meble, to znaczy płyty wiórowe lakierowane, tekstylia i sprzęty gospodarstwa domowego. Elektroodpady powinny być ujęte w osobnej grupie. Odpady wielkogabarytowe w głównej mierze są składowane, obecnie nie ma technologii, które pozwalałyby na energetyczne wykorzystanie tej frakcji z zachowaniem wartości granicznych dotyczących emisyjności.

### 2.3.4. Odzysk a unieszkodliwianie odpadów

Odzysk odpadów definiuje się jako możliwość zastąpienia ich innymi materiałami.

Pozwala to na oszczędzanie zasobów naturalnych, surowców, minerałów i innych.

Przykładem może być wykorzystanie zużytych opon jako odbojników w nabrzeżach lub wykonanie plecionych dywanów z odpadów tekstylnych. Produkty uboczne mogą posłużyć jako substrat w innych procesach produkcyjnych, na przykład resztki produkcyjne w przemyśle rybnym wykorzystuje się do otrzymania mączki rybnej (suchej, rozdrobnionej), która stanowi komponent paszowy. Recykling natomiast polega na ponownym przetworzeniu odpadów na pełnowartościowe produkty. Proces, który pozwala na zastąpienie substratów produktem ubocznym albo odpadem, nie obejmuje odzysku energii. Przykładem recyklingu może być wykorzystanie żużli jako produktu ubocznego powstającego w hutnictwie do



Rysunek 2.11. Porównanie czynności wchodzących w zakres odzysku i składowania. Opracowanie własne na podstawie ustawy o odpadach [15]

utwardzania dróg. Do recyklingu możemy zaliczyć procesy biologiczne, biochemiczne i termiczne (wydzielane jako procesy unieszkodliwiania odpadów). Do termicznego przekształcania możemy zaliczyć procesy spalania, gazyfikacji, pirolizy, toryfikacji.

Unieszkodliwianie odpadów to składowanie, przetwarzanie w glebie i ziemi, retencja powierzchniowa (poletka osadowe) oraz termiczne przekształcanie. Składowanie odbywa się w hałdach, na składowiskach, często są to odpady wydobywcze.

Znaczną frakcję odpadów stanowią odpady składowane, co sprawia, że temat zagospodarowania odpadów i opracowywania kolejnych technologii obróbki odpadów pozwalających na odzysk energetyczny jest wciąż aktualny i rozwojowy.

W ostatnich latach nasiliła się liczba pożarów powstających w miejscach gromadzenia, składowania odpadów, która powodowała niekontrolowane spalanie zgromadzonych pozostałości z różnych gałęzi przemysłu. To dodatkowo skłania do konsekwentnej realizacji planu, aby jak najmniejsza liczba odpadów trafiała na składowiska.

Istnieje podejrzenie, że podpalenia dokonywane były w celu pozbycia się odpadów oraz zmiany ich klasyfikacji. W sumie w roku 2019 roku odnotowano 177 pożarów na terenie całego kraju. Warto zaznaczyć, że niekontrolowany pożar składowiska wiąże się z ryzykiem degradacji środowiskowej i powoduje emisję toksycznych związków do atmosfery [17].

### Produkt uboczny

Produkt uboczny jest wytwarzany w procesie produkcyjnym, którego celem jest otrzymanie innego produktu. Aby zakwalifikować produkt uboczny, który nie jest odpadem, muszą zostać spełnione następujące warunki:

- dalsze wykorzystanie przedmiotu lub substancji jest pewne i możliwe,
- przedmiot lub substancja mogą być wykorzystywane bez dalszego przetwarzania będącego normalną praktyką przemysłową,

- przedmiot lub substancja powstają jako integralna część procesu produkcyjnego,
- przedmiot lub substancja spełniają wszelkie wymogi środowiskowe, nie stanowią zagrożenia dla zdrowia i życia ludzkiego,
- przedmiot lub substancja spełniają warunki określone przez UE na produkt uboczny oraz art. 11 ust. 6 ustawy o odpadach.

Istotne jest, aby na etapie projektowania instalacji i całych linii technologicznych brać pod uwagę strumienie otrzymywanych produktów, w tym produktów ubocznych, i planować ich zagospodarowanie lub dalsze wykorzystanie.

### 2.3.5. Charakterystyka odpadów niebezpiecznych

A amerykańska Agencja Ochrony Środowiska EPA (ang. Environmental Protection Agency) dzieli odpady niebezpieczne według 4 głównych cech:

- palność,
- korozyjność – materiał podlegający korozji,
- reaktywność – w kontekście potencjalnej eksplozji,
- toksyczność.

Palność odpadów jest związana z 3 możliwymi stanami skupienia. Mogą to być:

- ciecze o niskiej temperaturze zapłonu oraz samozapłonu, tj. te, których temperatura samozapłonu, zapłonu gazów pochodzących z odpadów jest niższa niż 60°C, jak lotne związki organiczne: alkohole, odpady rafineryjne, aceton,
- substancje stałe, które ulegają samozapłonowi,
- utleniacze i sprężone gazy.

Do odpadów korozyjnych można zaliczyć te, które charakteryzują się niskim (poniżej lub równym 2) lub wysokim (powyżej lub równym 12,5) pH. Są to różnego rodzaju kwasy mineralne, takie jak kwas solny, azotowy czy siarkowy, oraz silne zasady. Korozyjność wpływa niekorzystnie na pojemniki

i opakowania służące do przechowywania i transportu. Odpady kwasowe pochodzą m.in. z akumulatorów, odrdzewiaczy.

Do grupy odpadów niestabilnych, które mogą być niebezpieczne i wybuchać, zalicza się odpady charakteryzujące się okresowymi zmianami właściwości, reaktywne bez detonacji, dające możliwość powstania mieszaniny wybuchowej lub gwałtownej egzotermicznej reakcji w kontakcie z wodą oraz wydzielania toksycznych gazów w reakcji z wodą.

Odpady toksyczne to te, które mogą stanowić zagrożenie dla środowiska naturalnego, wód, ludzi i mieć negatywny długofalowy wpływ. Ocenę takiego oddziaływania sprawdza się, wykonując testy wymywania.

Warto podkreślić, że zgodnie z prawem zakazuje się mieszania odpadów niebezpiecznych pochodzących z różnych

sektorów przemysłu i różniących się znacząco z innymi odpadami, a także ich rozcieńczania. W tabeli 2.7 znajduje się podział odpadów niebezpiecznych wraz z kodami.

Nowy rodzaj odpadów niebezpiecznych, które niejako uzupełniają grupę odpadów medycznych, stanowią odpady powstałe w wyniku ochrony przed zarażeniem wirusem SARS-CoV-2. W ostatnich latach na terenie kraju i całego świata generowane były ogromne ilości odpadów, takich jak rękawiczki, maseczki, odzież ochronna i inne, których recykling nie został prawnie uregulowany. Z racji potencjalnego zanieczyszczenia wirusem mowa o odpadach biologicznie czynnych, stanowiących zagrożenie biologiczne, należy je więc poddawać termicznej degradacji. W myśl nowych przepisów prawnych za bezpieczną formę spalania uznano przetrzymywanie gazów

Kod	TYP ODPADÓW NIEBEZPIECZNYCH
01	Odpady powstające przy poszukiwaniu, wydobyciu, wzbogacaniu oraz przeróbce fizycznej i chemicznej minerałów
02	Odpady z rolnictwa, ogrodnictwa, akwakultury, leśnictwa, łowiectwa i rybołówstwa oraz przygotowania i przetwórstwa żywności
03	Odpady z przetwórstwa drewna oraz produkcji płyt i mebli, masy celulozowej, papieru i tektury
04	Odpady z przemysłu skórzanego, futrzarskiego i włókienniczego
05	Odpady z rafinacji ropy naftowej, oczyszczania gazu ziemnego oraz wysokotemperaturowej przeróbki węgla
06	Odpady z procesów chemii nieorganicznej
07	Odpady z procesów chemii organicznej
08	Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania (PPDS) powłok ochronnych (farb, lakierów, emalii ceramicznych), kitu, klejów, szczeliw i farb drukarskich
09	Odpady z przemysłu fotograficznego
10	Odpady z procesów termicznych
11	Odpady z chemicznej obróbki i powlekania powierzchni metali i innych materiałów oraz z procesów hydrometalurgii metali nieżelaznych
12	Odpady z kształtowania oraz fizycznej i mechanicznej, powierzchniowej obróbki metali i tworzyw sztucznych
13	Oleje odpadowe i odpady pochodzące z paliw płynnych (z wyłączeniem olejów jadalnych oraz grup 05 i 12)
14	Odpady z rozpuszczalników organicznych, chłodziw i propelentów (z wyłączeniem grup 07 i 08)
15	Odpady opakowaniowe; sorbenty, tkaniny do wycierania, materiały filtracyjne i ubrania ochronne nieujęte w innych grupach
16	Odpady nieujęte w innych grupach w wykazie
17	Odpady z budowy i rozbiórki (włącznie z wydobytą ziemią z miejsc skażonych)
18	Odpady z działalności służb medycznych i weterynaryjnych oraz związanych z nimi badań (z wyłączeniem odpadów kuchennych i restauracyjnych niepowstających bezpośrednio w wyniku działalności służb medycznych)
19	Odpady z urządzeń do gospodarowania odpadami oraz z pozazakładowych oczyszczalni ścieków i instalacji uzdatniania wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi oraz wody do celów przemysłowych
20	Odpady komunalne (odpady z gospodarstw domowych oraz podobne odpady handlowe, przemysłowe i instytucjonalne) łącznie z frakcjami gromadzonymi selektywnie

Tabela 2.8. Klasyfikacja odpadów niebezpiecznych wg ustawy o odpadach [15]



w komorze spalania w temperaturze powyżej 850°C przez minimum 5 s – jest to tzw. dopalanie frakcji lotnej. Zaleca się również stosowanie innych form obróbki termicznej odpadów, takich jak piroliza i gazyfikacja, których zastosowanie w przypadku utylizacji odpadów niebezpiecznych ma uzasadnienie.

### Podsumowanie

Analizując dane dotyczące strumieni odpadów, podziału na frakcje i sektory przemysłu, możemy zauważyć, że trend generowania odpadów w Polsce jest obecnie na stałym poziomie. Do największych wyzwań gospodarki odpadami należy opracowanie technologii, które umożliwią w jak największym stopniu wykorzystywanie odpadów jako zasobów energetycznych bądź materiałowych. Składowanie odpadów to przejaw utraty potencjalnego źródła energii i świadczy o nieefektywnej gospodarce oraz nierozwiązanych problemach technologicznych w zagospodarowywaniu odpadów.

Obserwując rozwój technologii recyklingu odpadów na rynku światowym, od kilkunastu lat możemy zauważyć duży postęp. Brakuje jednak nowoczesnych rozwiązań technologicznych w zakresie zagospodarowania dotychczas składowanych i uciążliwych odpadów, które spełniałyby obecne regulacje prawne. Problem wciąż stanowi wielość przepisów, pozwoleń potrzebnych do rozpoczęcia inwestycji, niechęć społeczeństwa związana głównie z niewiedzą. Wszystko to sprawia, że na terenie kraju mamy wiele nielegalnych wysypisk, niekontrolowanych pożarów składowisk odpadów, a niewiele instalacji, nawet prototypowych, które mogłyby pracować i rozwijać technologie, pozyskując cenną energię z odpadów. Technologie przeznaczone do takich odpadów oparte są na beztlenowej degradacji termicznej (pirolizie, toryfikacji), ale także degradacji z ograniczoną ilością tlenu (gazyfikacji). Należałoby dopracować przepisy prawne, które umożliwiłyby wprowadzenie na rynek technologii, które przyczyniłyby się do minimalizacji ich szkodliwego wpływu na środowisko. Prawdopodobnie podczas eksploatacji takich urządzeń emisje mogłyby zostać okresowo przekroczone, jednak wymaga to opracowania technologii oczyszczania gazów, tak aby nie miały one negatywnego wpływu na otoczenie, wprowadzenia odpowiednich parametrów procesu, stosowania katalizatorów. Biorąc pod uwagę bilans ogólny i minimalizację ryzyka, neutralizacja i unieszkodliwianie odpadów zawsze znajdują się wyżej w hierarchii niż składowanie. Wysypiska śmieci borykają się z wieloma problemami, takimi jak odory, wydzielania gazów trujących, odcieki itp. Dodatkowo odpady składowane przez wiele lat ulegają częściowej degradacji, wzajemnie na siebie oddziałując, co może stanowić wtórne zagrożenie dla środowiska.

### Bibliografia

- [1] Mała Encyklopedia Techniki, Warszawa 1969.
- [2] Moc zainstalowana OZE. Spada liczba nowych instalacji, <https://www.rynekelektryczny.pl/moczainstalowana-oze-w-polsce/>.
- [3] Massalski J.M., Fizyka jądrowa, skrypt, Kraków 1991.
- [4] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 11 sierpnia 2021 roku w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące (Dz.U. 2021, poz. 1657).
- [5] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005 roku w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego (Dz.U. 2005 nr 20, poz. 168, uchylone).
- [6] Moc zainstalowana farm wiatrowych, aktualizacja, <https://www.rynekelektryczny.pl/moczainstalowana-farm-wiatrowych-w-polsce/>.
- [7] Praca KSE – generacja źródeł wiatrowych i fotowoltaicznych, <https://www.pse.pl/dane-systemowe/funkcjonowanie-kse/raporty-dobowe-z-pracy-kse/generacja-zrodel-wiatrowych>.
- [8] Schwarzwald U. i in., Presja hydroenergetyki na europejskie rzeki – historia w liczbach, WWF, RiverWatch, EuroNatur, GEOTA 2019.
- [9] Energia wodna na świecie, <http://www.uwm.edu.pl/kolektory/energia-wody/link3.html>.
- [10] Towarzystwo Rozwoju Małych Elektrowni Wodnych, Potencjał Hydroenergetyczny Polski, <http://trmew.pl>.
- [11] Gacek K., Niezmienny, niezależny od warunków atmosferycznych, wywołany przyciąganiem Księżyca i Słońca. Prąd z morskich głębin, Energia Gigawat 2005.
- [12] Bedi E., W kierunku odnawialnych źródeł energii. Nowe wiadomości dla Europy Środkowo-Wschodniej, t. 12, Kraków 1996.
- [13] Barbier E., Nature and Technology of Geothermal Energy: A review, Renewable and Sustainable Energy Review 1997, 1, 1–69, [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(97\)00001-4](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(97)00001-4).
- [14] Klugmann-Radziemska E., Fotowoltaika w teorii i praktyce, Legionowo 2009.
- [15] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 roku o odpadach (tekst jedn. Dz.U. 2022, poz. 699).
- [16] Dane z Instytutu Ochrony Środowiska/ Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzanie Emisjami, <https://ios.edu.pl/tag/kobize/>.
- [17] Dane GUS (Główny Urząd Statystyczny), Ochrona Środowiska 2020, Opracowanie merytoryczne, Departament Badań Przestrzennych i Środowiska pod kierunkiem Wiesławy Domańskiej, Warszawa 2020, ISSN 0867-3217.

Fragment pochodzi z książki:  
Ewa Klugmann-Radziemska  
„Energetyka i ochrona środowiska”  
Wydawnictwo Naukowe PWN