

Energetyczne wykorzystanie biomasy i biopaliw

Energetyczne wykorzystanie biomasy i biopaliw

1. Pochodzenie i klasyfikacja

Biomasa jest to substancja organiczna, która powstaje w wyniku przetwarzania energii promieniowania słonecznego w procesach fotosyntezy odbywających się w roślinach. Jest formą gromadzenia energii słonecznej jako produktu fotosyntezy – procesu, w wyniku którego rośliny produkują węglowodany z dwutlenku węgla zawartego w atmosferze i wody przy wykorzystaniu promieniowania słonecznego. Skład chemiczny biomasy tworzą podstawowe pierwiastki: węgiel, wodór i tlen.

Według wielu ocen biomasa jako odnawialne źródło energii przedstawia już obecnie duży potencjał do energetycznego wykorzystania. Ilość biomasy, jaka rocznie powstaje, jest wielokrotnie większa od światowego zapotrzebowania na pierwotne nośniki energii.

Powszechnie za biomasę uznaje się materiał pochodzenia organicznego powstający w leśnictwie, przemyśle drzewnym, rolnictwie, przemyśle spożywczym i w gospodarce komunalnej. Biomasa traktowana jest jako odnawialne źródło energii, ponieważ wegetacja roślin będąca źródłem powstawania biomasy może odbywać się tak długo, jak długo dopływa promieniowanie słoneczne i istnieje gleba.

Biomasę pozyskuje się w wyniku produkcji roślinnej, z odpadów występujących w rolnictwie, przemyśle rolno-spożywczym, gospodarstwach domowych, odpadów drzewnych w leśnictwie, przemyśle drzewnym i celulozowo-papierniczym. Podejmuje się produkcję biomasy na specjalnych plantacjach energetycznych drzew szybko rosnących (wierzba, płatan, topola, eukaliptus), trzciny cukrowej, rzepaku, słonecznika, wybranych gatunków traw. Istotnym źródłem biomasy są odpady w produkcji zwierzęcej (gnojowica, biogaz) oraz odpady w gospodarce komunalnej (osady ściekowe, odpady z gospodarstw domowych, makulatura) [9].

Wyhodowano gatunki drzew odpornych na choroby, które charakteryzują się szybkim przyrostem masy drzewnej i zdolnością regeneracji z pnia po ścięciu. Rozwinięto krótkookresową intensywną kulturę upraw biomasy drzewnej, która wykorzystuje szybko rosnące drzewa lub krzewy, rotację 3 – 10-letnich cykli wycięcia, gęsto sadzonych drzew z nawadnianiem i nawożeniem gleby. Głównymi przedstawicielami krótkookresowych intensywnych upraw są: topola, wierzba, *miskanthus*. Przy 1 – 2-letnim okresie zakładania plantacji i 2 – 3-letniej rotacji wycięcia uzyskuje się 15 – 20 ton suchej masy z hektara powierzchni. Największe uzyskiwane wydajności z hektara stanowią równoważnik 25 ton węgla o wartości opałowej 25 MJ/kg [43].

Biomasa jest surowcem wyjściowym do produkcji biopaliw, wśród których rozróżnia się: stałe, ciekłe i gazowe. Każdą grupę tworzy wiele biopaliw różnego pochodzenia [43]:

- biopaliwa stałe: drewno opałowe (zrębki, trociny, ścinki, wióry, brykiety, pelety), pozostałości z rolnictwa (słoma zbóż, rzepaku i traw), osady ściekowe odwodnione, rośliny

energetyczne (drzewiaste i trawiaste), makulatura i inne;

- biopaliwa ciekłe: biodiesel (paliwo rzepakowe), etanol, metanol, paliwa płynne z drewna (benzyna, biooleje);
- biopaliwa gazowe: biogaz rolniczy (z fermentacji gnojowicy), biogaz (z fermentacji odpadów przetwórstwa spożywczego), biogaz (z fermentacji osadów ściekowych), biogaz wysypiskowy, gaz drzewny.

Biopaliwami są pierwotne lub wtórne nośniki energii stanowiące bezpośrednie lub pośrednie użytkowanie biomasy. Pierwotne nośniki energii są uprawami roślinnymi wykorzystywanymi bezpośrednio do celów energetycznych jako paliwa stałe. Wtórne nośniki energii stanowią przetworzone uprawy roślinne do postaci ciekłej, jak paliwo rzepakowe, etanol lub metanol lub do postaci gazowej jako niskokaloryczny gaz, którego głównym składnikiem jest tlenek węgla. Do przetworzonych biopaliw stałych należą brykiety i pelety drzewne.

Biopaliwa stałe mogą być wykorzystywane energetycznie w procesach bezpośredniego spalania, zgazowania oraz pirolizy. Obecne wykorzystanie biopaliw stałych sprowadza się przede wszystkim do bezpośredniego spalania. Specyficzne cechy paliw pochodzenia organicznego, wynikające ze składu chemicznego i właściwości fizycznych, powodują wiele trudności w przebiegu procesów spalania. Natomiast stosowanie biopaliw do celów energetycznych przez zgazowanie jest techniką, która znacznie zmniejsza problemy związane z erozją, korozją oraz osadami na powierzchniach wymiany ciepła kotłów.

2. Charakterystyka energetyczna biopaliw

Drewno składa się z następujących pierwiastków: 50% węgla, 43% tlenu, 6% wodoru, 1% azotu oraz związków mineralnych poniżej 1%. Pierwiastki te występują w postaci związków organicznych: celulozy, hemicelulozy i ligniny. Wartość opałowa drewna zaraz po ścięciu (ok. 50% wilgotności) wynosi 10 – 12 MJ/kg i ulega zwiększeniu do 18 MJ/kg po suszeniu do wilgotności 15 – 20% [42, 43].

Drewno jest spalane w kotłach najczęściej w postaci szczap, odpadów pochodzących z zakładów przemysłu drzewnego (np. trociny), zrębków, brykietów lub peletów stanowiących produkt przetworzony. Zawartość popiołu w drewnie wynosi 0,5 – 1%. Drewno wysuszone na powietrzu ma wilgotność ok. 20%, a wartość opałowa drewna zależy w dużym stopniu od jego wilgotności. W paleniskach kotłowych spala się często trociny z tartaku; wysuszone trociny mają wilgotność ok. 14% i zawierają 0,6% popiołu. Ich wartość opałowa wynosi ok. 17 MJ/kg.

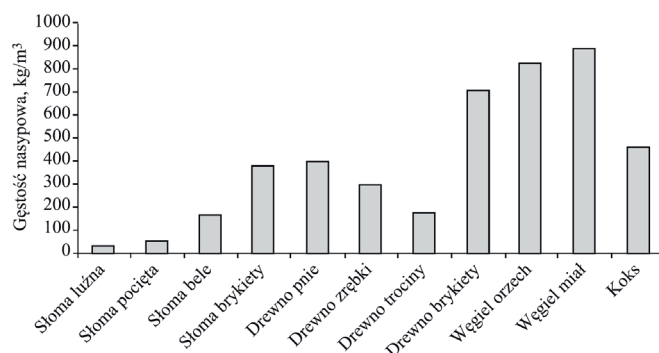
Parametry techniczne paliw są określone przez ich skład chemiczny i właściwości fizyczne, jak: stan skupienia, gęstość, zawartość składników lotnych, wilgotność, wartość opałowa. Przy rozpatrywaniu techniki wykorzystania paliw niezbędne jest uwzględnienie tych parametrów w celu zapewnienia wysokiej sprawności, niskiej emisji zanieczyszczeń oraz małej ilości odpadów.

Analiza elementarna suchej masy substancji organicznej pochodzenia roślinnego wykazuje mniejszą, w porównaniu ze składem chemicznym węgla kamiennego i gazu, zawartość węgla, a znacznie większą tlenu (tab. 4.2). Według [75] skład chemiczny substancji organicznych pochodzenia roślinnego jest przedstawiany wzorem sumarycznym $CH_{1,45}O_{0,7}$, podczas gdy skład typowego węgla kamiennego zapisuje się jako $CH_{0,8}O_{0,08}$. Stąd wynika, że biomasa zawiera prawie dwukrotnie więcej atomów wodoru i ponad osiem razy więcej atomów tlenu niż węgiel kamienny, co sprawia, że wartość opałowa jednej cząstki biomasy jest prawie dwukrotnie mniejsza od wartości opałowej węgla kamiennego.

W porównaniu z innymi powszechnie stosowanymi nośnikami energii pierwotnej biomasa jest paliwem dość ciężkim przy energetycznym wykorzystaniu. Wynika to przede wszystkim z jej właściwości fizycznych (tab. 4.2). Jest to bowiem materiał niejednorodny, o małej wartości opałowej w odniesieniu do jednostki objętości. Na przykład 1 m³ słomy luźnej lub siana charakteryzuje się ponad dziesięciokrotnie mniejszą masą w stosunku do drewna i ok. pięćdziesięciokrotnie mniejszą od węgla. Istotną więc wielkością charakteryzującą biopaliwa stałe jest gęstość nasypowa (rys. 4.13), ponieważ wpływa decydująco na pracę przewozową i koszty transportu, o czym decyduje objętość paliwa. Dlatego korzystne jest pozyskiwanie biopaliw w pobliżu ciepłowni i systemów skojarzonej produkcji ciepła i energii elektrycznej. Korzystniejsze z punktu widzenia transportu są paliwa brykietowane lub granulowane, których gęstość nasypowa jest większa niż innych biopaliw stałych, przy względnie wysokiej wartości opałowej. W przypadku słomy i siana można uzyskać zwiększenie gęstości biomasy przez prasowanie, nawet 8-krotnie.

Dla biopaliw stałych istotny jest również wskaźnik ilustrujący wartość opałową paliwa na jednostkę objętości (rys. 4.14). Najkorzystniejsze z tego punktu widzenia są paliwa kopalne, a najmniej korzystne słoma i trociny.

Zmienna zawartość wody (wilgotność), popiołu i składu chemicznego, a zwłaszcza azotu, siarki i chloru powoduje duże



Rys. 4.13. Porównanie gęstości nasypowej różnego rodzaju biomasy [42]

zróżnicowanie w zachowaniu poszczególnych rodzajów biopaliw podczas spalania.

Cechą charakterystyczną biopaliw stałych jest duża zawartość substancji lotnych (ponad 70%), które wydzielają się przy podgrzewaniu paliwa powyżej temperatury 100°C. Po spaleniu biopaliwa pozostaje popiół, przy czym jego ilość i skład zależy od rodzaju biopaliwa.

Z punktu widzenia przebiegu procesu spalania ważnym parametrem jest temperatura topnienia popiołu. Związki zawarte w popiele biopaliw stałych, głównie składniki alkaliczne (sole sodu i potasu), powodują znaczne obniżenie temperatury topliwości. Dlatego temperatura w strefie utleniania komory spalania łatwo przekracza poziom topnienia popiołu, formuje się żużel, co w konsekwencji pogarsza jakość procesu spalania i prowadzi do pogorszenia intensywności wymiany ciepła. Z tych powodów efektywne spalanie biopaliw stałych wymaga urządzeń odpowiednio dostosowanych do składu paliw i cech popiołu, a systemy spalania biopaliw powinny być projektowane z uwzględnieniem problemu niskiej temperatury topnienia popiołu oraz dużej zawartości składników lotnych.

W praktyce spalania biopaliw stałych stosuje się zabiegi, które pozwalają na unikanie niekorzystnych skutków niskiej temperatury topnienia popiołu. Jednym z nich jest stosowanie dodatków

Tabela 4.2. Właściwości chemiczne i termofizyczne biomasy i wybranych paliw [42]

Parametr	Jednostka	Żółta słoma	Szara słoma	Siano	Zrębki drzewne	Węgiel	Gaz
Wilgotność	%	15	15	15	40	12	0,0
Składniki lotne	% wag.	70,00	73,00	70,00	70,00	25,00	100,0
Popiół	% wag.	04,00	3,00	8,40	0,6-1,5	12,00	0,0
Węgiel	% wag.	42,00	43,00	46,40	50	59,00	75,0
Tlen	% s.m.	37	38	37,60	43	7,3	0,9
Wodór	% wag.	5,00	05,20	05,10	6	3,50	24,0
Chlor	% wag.	0,75	00,20	01,03	00,02	0,08	-
Azot	% wag.	0,35	00,41	01,33	00,30	1,00	0,9
Siarka	% wag.	0,16	00,13	00,09	00,05	0,80	0,0
Wartość opałowa	MJ/kg	14,40	15,00	14,50	10,40	25,00	48,0
Ciepło spalania	MJ/kg	18,20	18,70	18,50	19,40	32,00	48,0
Temperatura płynięcia popiołu	°C	800 - 1000	950 - 1100	900 - 1000	1000 - 1400	1100 - 1400	-

zmniejszających udział związków alkalicznych w popiele lub podwyższających temperaturę topnienia popiołu. Korzystne z tych powodów jest również współspalanie biomasy z węglem, mającym większą zawartość popiołu o wyższej temperaturze topliwości.

Z punktu widzenia efektywności energetycznej upraw energetycznych istotne są trzy wielkości charakteryzujące rośliny:

- wartość opałowa suchej masy rośliny,
- wydajność plonów z jednostki powierzchni uprawy,
- skumulowane zużycie energii na pozyskanie roślin.

Skumulowane zużycie energii na pozyskanie uprawy wymaga uwzględnienia: energii na wytworzenie maszyn i zabiegi agrotechniczne, energii na wytworzenie nawozów sztucznych, środków ochrony roślin oraz energii na produkcję nasion i transport.

Według porównania wykonanego na podstawie danych przedstawionych w [12] najwyższą wydajnością i efektywnością energetyczną charakteryzuje się uprawa wierzby. Energia uzyskana na poziomie uprawy (bez uwzględniania dalszego przetwarzania) jest prawie 28-krotnie większa niż energia włożona. Uprawy roślin jednorocznych są zdecydowanie mniej efektywne i rozpatrywanie ich jako upraw przydatnych do produkcji biomasy w celu energetycznego wykorzystania nie znajduje uzasadnienia. Uprawy wieloletnie jak wierzba, malwa lub lucerna są tu zdecydowanie korzystniejsze. Najmniej korzystna pod tym względem jest uprawa ziemniaków, dla której wskaźnik efektywności energetycznej jest mniejszy od jedności, co oznacza, że energia włożona w celu uzyskania zbiorów jest większa niż uzyskana wartość energetyczna.

Przy wykorzystaniu drewna w postaci peletów należy zwrócić uwagę na skumulowaną sprawność ich pozyskania, ponieważ ich produkcja wymaga zużycia 24% energii w stosunku do wartości opałowej otrzymanego produktu [81]. Można więc przyjąć, że sprawność energetyczna procesu peletyzacji wynosi 76%. Proces peletyzacji obejmuje następujące podstawowe procesy cząstkowe: transport drewna, suszenie, zmniejszenie wymiarów (produkcja zrębków), peletyzacja, ochładzanie, przesiewanie, pakowanie, magazynowanie. W wyniku procesu peletyzacji, dla której surowcem były zrębki o wilgotności 50% i gęstości nasypowej 60 kg/m³, uzyskano produkt (paliwo) o wymiarach elementów: średnica 6 mm, długość (10 – 12 mm), o zawartości wody 6 – 8%, gęstości nasypowej ok. 650 kg/m³ i wartości opałowej 18,5 GJ/Mg.

3. Wykorzystanie energetyczne

Opłacalność stosowania technologii energetycznych wykorzystania biopaliw zależy od stopnia ich zaawansowania oraz wielkości instalacji. W porównaniu ze znacznie wcześniej rozwiniętymi technologiami paliw kopalnych technologie te wymagają większego początkowego nakładu inwestycyjnego, przy zwykle niższych kosztach pozyskania paliw. W miarę rozwoju rynku biopaliw należy spodziewać się obniżenia kosztów ich pozyskania i przetwarzania, natomiast w przypadku paliw kopalnych prognozowany jest wzrost cen, co zapewne wpłynie na zwiększenie wykorzystania lokalnie dostępnych odnawialnych źródeł energii.

Biomasa może być stosowana do energetycznego wykorzystania w procesach bezpośredniego spalania biopaliw stałych (np. drewno, słoma, osady ściekowe), przetwarzana na paliwa ciekłe (np. estry oleju rzepakowego, alkohol) bądź gazowe (np.

biogaz rolniczy, biogaz z oczyszczalni ścieków, gaz wysypiskowy).

Dla biomasy stałej, takiej jak drewno czy słoma, największe obecnie znaczenie mają technologie oparte na procesach spalania [43]. Oprócz bezpośredniego spalania biomasy istnieje możliwość konwersji termochemicznej w paliwo charakteryzujące się większą przydatnością z punktu widzenia odbiorców. Jednakże technologie energetyczne wykorzystujące wspomniane procesy znajdują się w początkowej fazie rozwoju w stosunku do technologii opartych na procesach spalania.

Najczęściej spotykane techniki energetycznego wykorzystania biopaliw stałych są następujące [43]:

- domowe urządzenia grzewcze opalane drewnem (kominki otwarte, wkłady kominkowe, piece, piece akumulacyjne, kotły spalające polana drzewne, zrębki i pelety, zautomatyzowane urządzenia zasilane zrębkami lub peletami);
- urządzenia wytwórcze ciepła opalane słomą;
- kotły ciepłownicze i przemysłowe z paleniskami ze złożem stałym, rusztowe, ze złożem fluidalnym i pyłowe;
- wytwarzanie energii elektrycznej i skojarzona gospodarka ciepłno-elektryczna: systemy małej mocy (turbiny parowe, turbiny gazowe, obieg Rankine'a, silnik Stirlinga, ogniwa paliwowe), systemy dużej mocy (siłownie z turbiną parową, siłownie gazowe z turbiną gazową lub silnikiem spalinowym, zaawansowane układy energetyczne z turbiną gazową);
- współspalanie węgla z biomasą w kotłach ciepłowniczych i przemysłowych.

Do współspalania biomasy z węglem wykorzystuje się istniejącą infrastrukturę przemysłową, bez potrzeby budowy nowych spalarni czy kotłowni, co nie wymaga istotnych nakładów. Współspalanie miałów węglowych i biomasy (głównie drewna) jest technicznie rozwiązaniem stosunkowo prostym [69]. Niezbędne jest dobre wymieszanie paliw ze względu na szybkie wypalanie drewna w stosunku do węgla. W skrajnych przypadkach może dojść do obnażenia znacznych powierzchni rusztu i zakłóceń rozdziału powietrza pierwotnego. W efekcie powstają zakłócenia procesu spalania, okresowe obniżanie sprawności i zwiększanie emisji zanieczyszczeń.

Najważniejszymi technicznymi argumentami za energetycznym wykorzystaniem biomasy są:

- stałe i pewne dostawy krajowego nośnika energii,
- ograniczenie emisji CO₂ w wyniku zmniejszenia zużycia paliw nieodnawialnych,
- wysokie koszty odsiarczania spalin z paliw kopalnych,
- decentralizacja produkcji energii i tym samym wyższe bezpieczeństwo energetyczne.

Jako wady energetycznego zagospodarowania biomasy można wymienić [43]:

- ryzyko zmniejszenia bioróżnorodności w przypadku wprowadzenia monokultur roślin o przydatności energetycznej;
- spalanie biopaliw, jak każde spalanie, powoduje powstawanie NO_x, jednak koszty ich usuwania są wyższe niż w przypadku dużych zakładów energetycznych;
- podczas spalania biomasy, zwłaszcza zanieczyszczonej pestycydami, odpadami tworzyw sztucznych lub związkami chloropochodnymi, wydzielają się dioksyny i furany o toksycznym i rakotwórczym oddziaływaniu;
- trudności spalania na skutek niskiej temperatury topnienia popiołu.

5. Wykorzystanie biopaliw gazowych

Według Rozporządzenia Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 9 grudnia 2004 r. [R8] definicja biogazu jest następująca: jest to gaz pozyskany z biomasy, w szczególności z instalacji przeróbki odpadów zwierzęcych lub roślinnych, oczyszczalni ścieków oraz składowisk odpadów.

Główny potencjał techniczny gazu wysypiskowego w Polsce stanowią większe wysypiska komunalne. Sposobem ograniczenia zagrożeń dla środowiska spowodowanych emisją gazu wysypiskowego jest budowa instalacji do jego odzysku i ewentualnego energetycznego wykorzystania. Uwalnianie gazu wysypiskowego bezpośrednio do atmosfery w świetle przepisów obowiązujących w Unii Europejskiej jest zabronione. Wykorzystanie gazu wysypiskowego rozwija się w kierunku produkcji ciepła i energii elektrycznej [75].

Istnieje znaczny potencjał techniczny wykorzystania do celów energetycznych biogazu z oczyszczalni ścieków. Do bezpośredniej produkcji biogazu najlepiej są dostosowane oczyszczalnie biologiczne, znajdujące się we wszystkich oczyszczalniach ścieków komunalnych oraz w części oczyszczalni przemysłowych. Oczyszczalnie ścieków mają stosunkowo wysokie zapotrzebowanie własne zarówno na energię cieplną, jak i elektryczną, dlatego zagospodarowanie biogazu z fermentacji osadów ściekowych może w istotny sposób poprawić opłacalność procesów oczyszczania.

Wykorzystanie gnojowicy w gospodarstwach hodowlanych odbywa się przez wytwarzanie metanu na drodze fermentacji

beztlenowej. Wysokie nakłady inwestycyjne oraz brak dostatecznie sprawdzonych rozwiązań technologicznych utrudniają jednak możliwości jej zagospodarowania.

Współczesne instalacje biogazowe wytwarzają z odpadków organicznych (zwierzęcych, rolniczych i komunalnych) równocześnie surowiec energetyczny w postaci gazu palnego o wartości opałowej ok. 20 MJ/m³ oraz naturalny nawóz wykorzystywany następnie w produkcji rolnej.

Eksploatacja instalacji biogazu pociąga za sobą pewne uciążliwości. Pierwszą z nich jest konieczność odizolowania pomieszczeń ludzkich od strefy nieprzyjemnych zapachów. Produkcja i konsumpcja gazu na ogół nie są zgodne w czasie, więc wiąże się to z problemem jego magazynowania i późniejszej dystrybucji. Siarkowódór będący jednym ze składników biogazu jest toksyczny i korodujący. Może to w efekcie doprowadzić do wycieków gazu groźących w następstwie wybuchem lub pożarem, co wymaga odpowiednich środków bezpieczeństwa. Instalacje biogazowe mogą też być źródłem emisji do atmosfery gazów cieplarnianych, głównie metanu i dwutlenku węgla.

Wykorzystanie energii ze źródeł geotermalnych

1. Energia wód geotermalnych

Energetyka geotermalna wykorzystuje energię wnętrza Ziemi dostępną w postaci gorącej wody, pary oraz zawartą w otaczających skałach dostępną w przepuszczalnej warstwie skalnej

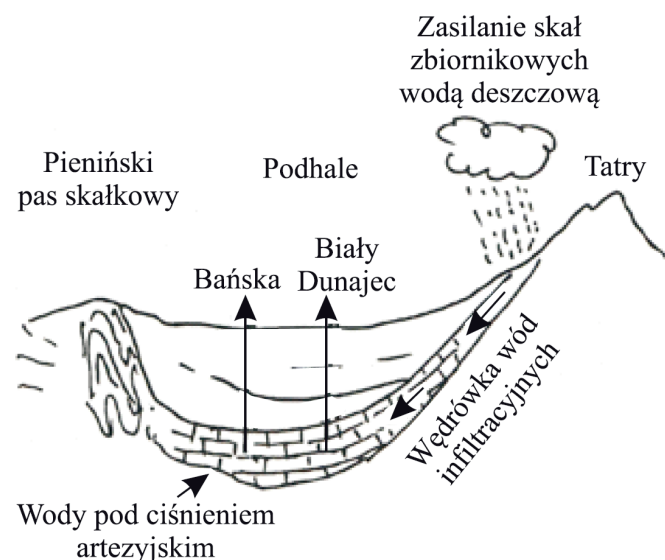
skorupy ziemskiej na głębokości większej niż 1000 m. Jest to energia zakumulowana w gruntach, skałach i płynach wypełniających pory i szczeliny skalne.

Największe dostępne źródła energii geotermalnej znajdują się głównie w strefie aktywności tektonicznej i wulkanicznej i tylko niektóre z nich mogą być eksploatowane przy użyciu znanych dzisiaj technologii. Obecnie wykorzystuje się jedynie gorącą wodę (lub parę) z podziemnych zbiorników lub skał porowatych zlokalizowanych na głębokości do 4500 m, zwykle jednak mniejszej niż 2500 m [89, 90]. Kojarzone powszechnie z geotermią gejzery są źródłami hydrotermalnymi, mającymi połączenie z powierzchnią ziemi. Do ogrzewania są wykorzystywane źródła termalne o niższej temperaturze, ok. 40 – 80°C, zlokalizowane z dala od stref tektonicznych, między innymi i w Polsce.

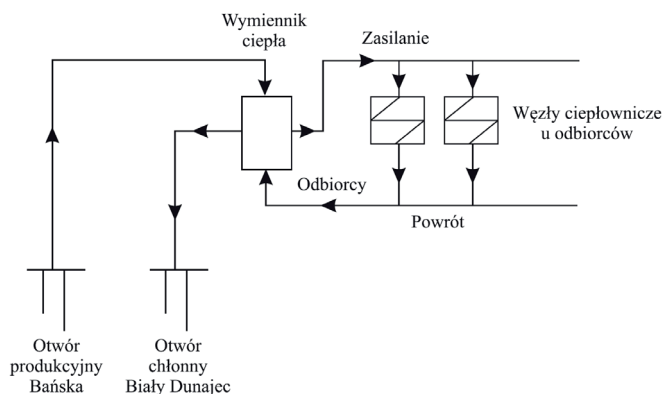
Wody geotermalne zawierają rozpuszczone składniki mineralne: NaCl, KCl, CaCl₂, SiO₂ oraz niekondensujące gazy, głównie CO₂ (95%) i H₂S (2 – 3%) oraz niewielkie ilości amoniaku, metanu, azotu, wodoru i radonu. Gazy zawarte w wodach termalnych stanowią od 1 do 10% objętości mieszaniny powstającej po rozprężeniu wody do fazy gazowej, średnio 2%. Zagrożenie skażenia środowiska naturalnego zależy głównie od zawartości tych składników w wodzie.

Ciepło wydzielane we wnętrzu Ziemi pochodzi z reakcji rozpadu pierwiastków promieniotwórczych. Przeciętny przyrost temperatury przy ruchu w głąb Ziemi wynosi 25 – 35 K/km. W niektórych regionach świata obserwuje się gradienty znacznie wyższe od przeciętnych. Spotykane są warunki geotermalne korzystne z bardzo wysokim gradientem temperatury (100–130 K/km), z gradientem wysokim (80 – 100 K/km), średnim (35 – 80 K/km) oraz z gradientem niskim (do 35 K/km). Warunki charakteryzujące się wysokim gradientem występują w nielicznych miejscach skorupy ziemskiej, zwykle jako wynik lokalnych anomalii geotermicznych [89].

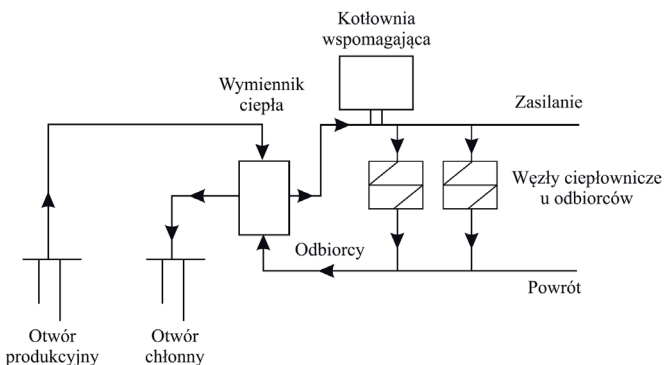
Sposób wykorzystania zasobów geotermalnych zależy od temperatury czynnika grzejącego. Przyjmuje się, że przy temperaturze geopłynu powyżej 120 – 150°C opłaca się go wykorzystywać do produkcji energii elektrycznej [89, 90]. Przy niższej temperaturze źródeł geotermalnych możliwe jest wykorzystanie do



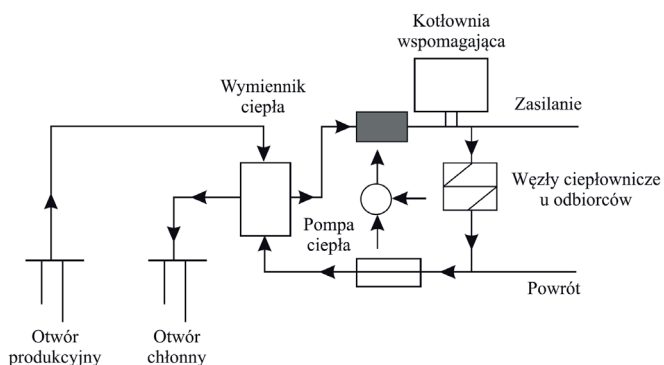
Rys. 4.15. Przekrój geologiczny złoża wód geotermalnych na Podhalu [w1]



Rys. 4.16. Wykorzystanie energii geotermalnej z zatlaczaniem wody schłodzonej do górotworu [w1]



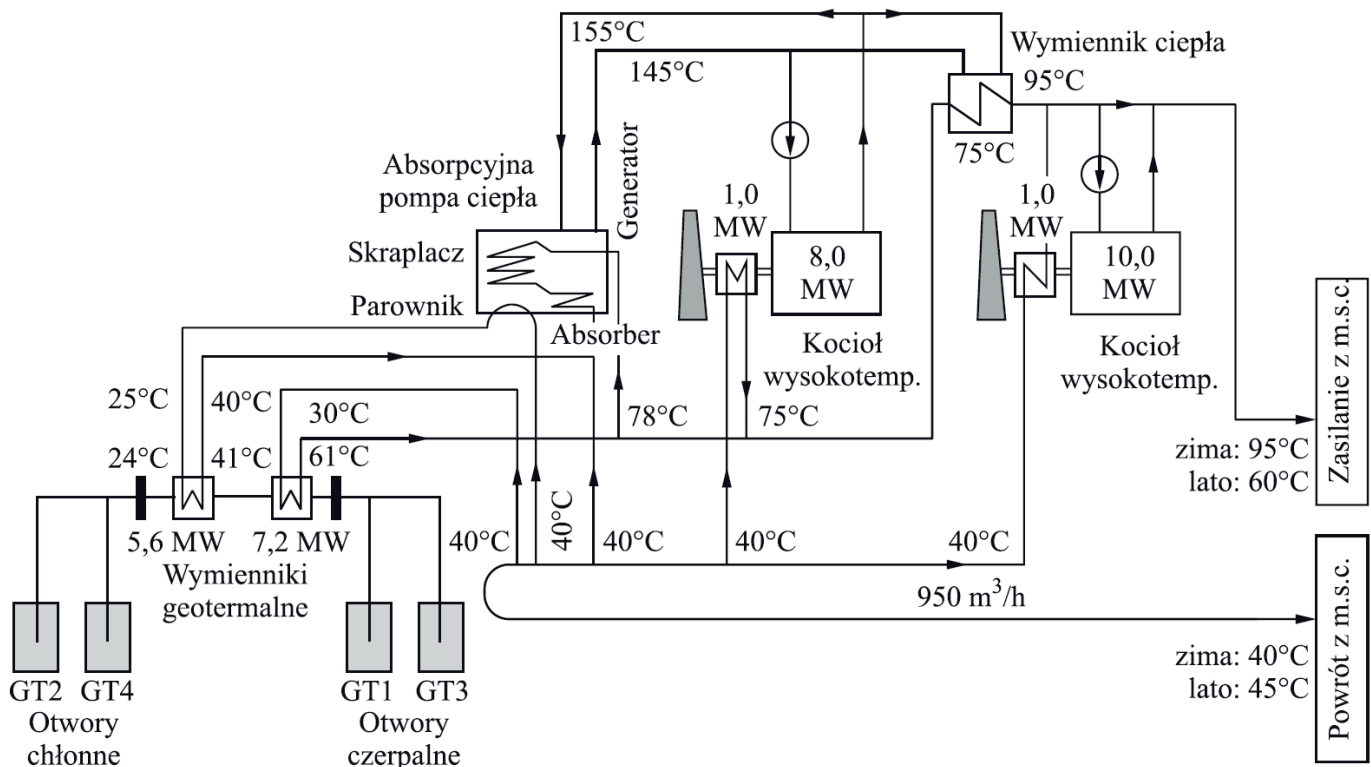
Rys. 4.17. Wykorzystanie energii geotermalnej ze wspomaganie kotłami gazowymi [w1]



Rys. 4.18. Wykorzystanie energii geotermalnej ze wspomaganie kotłami gazowymi i pompą ciepła [w1]

celów ciepłowniczych, klimatyzacyjnych, wytwarzania ciepłej wody użytkowej w systemach miejskich i przemysłowych, do ogrzewania szklarni, hodowli ryb oraz do celów balneologicznych i rekreacyjnych.

W miejscach, gdzie osiedla ludzkie są zlokalizowane bezpośrednio nad zasobami geotermalnymi, najbardziej efektywnym rozwiązaniem jest ogrzewanie scentralizowane. Stolica Islandii Reykiawik prawie w całości korzysta z ciepła dostarczanego z dwóch pól geotermalnych znajdujących się pod miastem i z jednego odległego o 15 km. Wykorzystywana tam woda geotermalna charakteryzuje się niską zawartością substancji mineralnych i bez uzdatniania może być kierowana bezpośrednio do sieci ciepłowniczej miasta. Miejski system ciepłowniczy



Rys. 4.19. Schemat ciepłowni geotermalnej w Pyrzycach [w2]

Rejkiawiku ma moc cieplną 600 MW. Instalacje geotermalne wykorzystywane w ciepłownictwie działają również w innych krajach: USA, Włochy, Francja, Nowa Zelandia.

W Polsce występuje znaczny potencjał energetyczny wód geotermalnych [90], jednak ze względu na niezbyt wysoką temperaturę (45 – 75°C) może być praktycznie wykorzystany tylko do ogrzewania budynków, szklarni, ośrodków rekreacyjnych itp. Zagospodarowanie w ciepłownictwie wymaga współpracy instalacji wykorzystującej wody geotermalne z dodatkowym źródłem ciepła.

Zasoby energii geotermalnej w Polsce, przy założeniu realnej możliwości ich bezpośredniego wykorzystania do ogrzewania budynków, są na poziomie 10 mld tpu [89]. W latach 90. XX w. przeprowadzono w Polsce badania mające na celu określenie możliwości wykorzystania wód geotermalnych do produkcji ciepła dla systemów ogrzewania. Najbardziej atrakcyjnie przedstawia się wykorzystanie wód geotermalnych na obszarze niecki podhalańskiej, w okręgu grudziądzko-warszawskim, szczecińskim i łódzkim. W Polsce funkcjonuje obecnie kilka ciepłowni geotermalnych różniących się między sobą rozwiązaniami technicznymi, wynikającymi z odmiennych parametrów wód geotermalnych, pozyskiwanych mocy i rodzaju odbiorców ciepła.

2. Ciepłownicze wykorzystanie wód geotermalnych

Istnieje znaczne zainteresowanie wielu miejscowości budową ciepłowni geotermalnych, planowana jest budowa następnych kilku, należy więc przypuszczać, że w nadchodzących latach nastąpi w kraju znaczne zwiększenie wykorzystania energii gorących wód podziemnych.

Wody geotermalne na Podhalu w dolinie Białego Dunajca charakteryzują się stosunkowo wysoką temperaturą (84 – 88°C) [w1]. Przekrój geologiczny złoża wód geotermalnych na Podhalu

ilustruje schemat pokazany na rys. 4.15. Schemat ciepłowni geotermalnej w Bańskiej przedstawiono na rys. 4.16 i 4.17.

Obecnie pracujące zakłady geotermalne działają w systemie dwóch otworów (produkcyjny i chłonny), znajdujących się w odległości 1 km. Woda gorąca z otworu produkcyjnego przekazuje ciepło w obiegu pierwotnym za pośrednictwem płytowych wymienników ciepła, a po schłodzeniu w obiegu pierwotnym do temperatury 45°C jest transportowana do złoża geotermalnego przez otwór chłonny. Z kolei woda gorąca obiegu wtórnego zasila węzły ciepłownicze u odbiorców ciepła (rys. 4.16). Przy niższej temperaturze wód geotermalnych stosuje się dodatkowe źródło ciepła, którym jest zwykle kotłownia opalana gazem ziemnym (rys. 4.17) lub kotłownia opalana gazem i wspomagana pompą ciepła (rys. 4.18).

Uruchomiona w 1996 r. w Pyrzycach gazowo-geotermalna ciepłownia o mocy 50 MW była pierwszą dużą instalacją w Polsce wykorzystującą do produkcji ciepła ujęcie geotermalne o mocy maksymalnej 13 MW oraz szczytowe kondensacyjne kotły opalane gazem ziemnym [w2]. Ujęcie geotermalne stanowią dwa otwory czerpalne i dwa zatłaczające. Woda pozyskiwana za pomocą dwóch dubletów, o wydajności pojedynczego otworu 170 m³/h, przepływa przez zespół filtrów do geotermalnych wymienników ciepła. Schemat ciepłowni geotermalnej w Pyrzycach przedstawiono na rys. 4.19 [w2]. Woda geotermalna z otworu produkcyjnego o temperaturze 61 – 63°C jest schładzana w dwóch wymiennikach ciepła do temperatury ok. 26°C i odprowadzana przez otwór chłonny w głąb ziemi. Głębokość odwiertów wynosi 1630 m.

W celu poprawy efektywności wykorzystania entalpii wód geotermalnych zastosowano dwie absorpcyjne pompy ciepła, pozwalające na obniżenie do 25°C temperatury powrotnej wody sieciowej. Dwa kotły niskotemperaturowe (120°C) stanowią

szczytowe i awaryjne źródło ciepła. Natomiast dwa kotły wysokotemperaturowe (150°C) służą do zasilania absorpcyjnych pomp ciepła. Woda z kotłów wysokotemperaturowych służy także do okresowego dogrzewania wody sieciowej przy niskiej temperaturze zewnętrznej.

W wymienniku głównym ciepło wody geotermalnej jest przekazywane do wody sieciowej, podgrzewając ją do temperatury 60°C. Schłodzona woda geotermalna kierowana jest do drugiego wymiennika, gdzie ulega dalszemu ochłodzeniu do temperatury 26°C, po czym zatłaczana jest do ziemi. W drugim wymienniku geotermalnym podgrzewa się tylko część wody powrotnej z sieci miejskiej, która najpierw ulega schłodzeniu do temperatury 25°C w parownikach absorpcyjnych pomp grzewczych, a następnie jest podgrzewana w drugim wymienniku do temperatury 41°C. Do wody sieciowej opuszczającej wymienniki dopływają strumienie wody podgrzanej: w absorberach i skraplaczach pomp ciepła oraz w chłodnicach spalin kotłów szczytowych i kotłów wysokotemperaturowych. Całkowity strumień wody sieciowej dopływa do kotłów szczytowych, w których jest dogrzewany do wymaganej temperatury.

Woda wypełniająca rurociągi ciepłownicze oraz obiegu wysokotemperaturowego jest uzdatniana przy wykorzystaniu wymienników jonitowych oraz instalacji do odwróconej osmozy. Niskotemperaturowa (95/45°C) miejska sieć ciepłownicza jest wykonana w całości z rur preizolowanych, co zapewnia niskie straty ciepła.

Wykorzystanie energii wody

1. Zasady wykorzystania energii wody

Energia wody występująca w przyrodzie, która może być wykorzystana do celów energetycznych, to energia mórz i oceanów oraz wód śródlądowych. Podstawowe znaczenie dla energetyki ma wykorzystanie energii wód śródlądowych, ponieważ energia mórz i oceanów jak dotychczas jest wykorzystywana w niewielkim stopniu i nie liczy się w bilansie energii zużywanej na świecie. Energia wód śródlądowych jest wynikiem obiegu wody w przyrodzie uruchamianego działaniem energii słonecznej, co ilustruje rys. 4.20.

Zależności umożliwiające określenie energii strumienia wody otrzymujemy na podstawie równania Bernoulliego

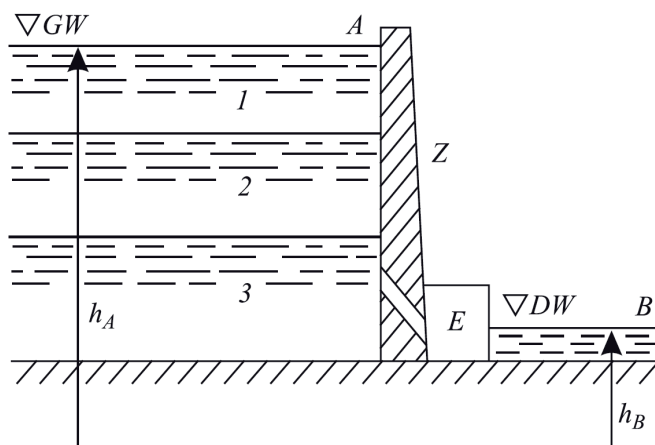
$$\frac{p}{\rho} + \frac{w^2}{2} + g_z h = \text{const} \quad (4.1)$$

Zapisując równanie energii strumienia wody dla punktów A i B (rys. 4.21), otrzymujemy strumień energii wody możliwy do uzyskania z określonego strumienia objętości wody

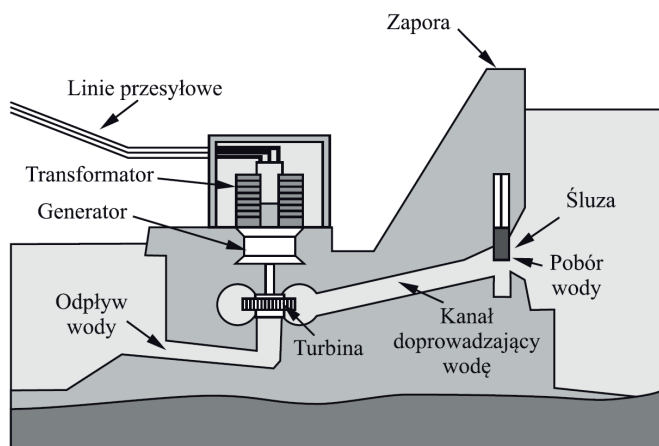
$$\dot{E} = \dot{V} \rho g_z \left[(h_A - h_B) + \frac{p_A - p_B}{\rho g_z} + \frac{w_A^2 - w_B^2}{2g_z} \right] \quad (4.2)$$

gdzie: w – prędkość przepływu wody, g_z – przyspieszenie ziemskie, p – ciśnienie wody, ρ – gęstość wody, V – strumień objętościowy przepływu wody.

Energia wody śródlądowej jest przetwarzana na energię elektryczną w elektrowniach (siłowniach) wodnych (hydroelektrowniach). W elektrowniach wodnych wykorzystuje się głównie energię potencjalną wynikającą z różnicy wysokości położenia



Rys. 4.21. Koncentracja spadku wody przy zastosowaniu zapory: E - elektrownia, Z - zapora, 1 - warstwa retencyjna, 2 - warstwa energetyczna, 3 - warstwa martwa, DW - dolna woda, GW - górna woda [71]



Rys. 4.22. Schemat elektrowni wodnej zbiornikowej

(spadu wody), to znaczy uwzględnia się jedynie pierwszy człon we wzorze (4.2), czyli różnicę ($h_A - h_B$) poziomów wody dostarczanej do siłowni i odpływającej z siłowni. Pozostałe dwa człony równania (4.2) są zwykle pomijalnie małe.

Podstawowe wielkości decydujące o rozmiarach siłowni wodnej to strumień objętościowy wody V i spad wody określony różnicą wysokości położenia $h_A - h_B$. Przy czym różnica ta pomniejszona o opory przepływu Δh_r wody dostarczanej do siłowni nosi nazwę spadku użytecznego, który wyraża się wzorem $H_u = h_A - h_B - \Delta h_r$.

Moc elektrowni wodnej P jest określana przede wszystkim przez strumień objętości przepływającej wody oraz spadek użyteczny

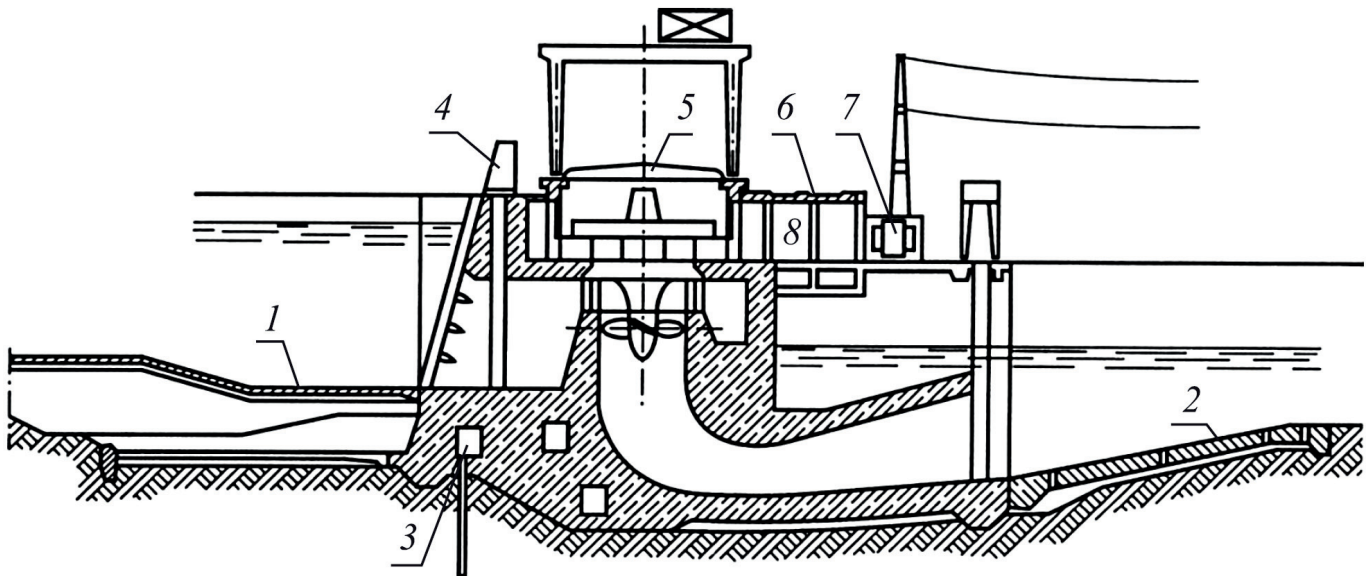
$$P = V \rho g_z H_u \eta_e \quad (4.3)$$

gdzie: η_e – sprawność energetyczna elektrowni wodnej.

Sprawność elektrowni wodnej zależy od sprawności najważniejszych urządzeń biorących udział w przetwarzaniu energii wody na energię elektryczną: turbiny, generatora i systemu transformacji wytwarzanego prądu na napięcie sieciowe. Sprawność tę zapisuje się wzorem

$$\eta_e = \eta_t \eta_g \eta_{tr} \quad (4.4)$$

gdzie: η_t – sprawność turbiny, η_g – sprawność generatora, η_{tr} – sprawność transformacji napięcia.



Rys. 4.23. Przekrój elektrowni wodnej we Włocławku na Wiśle [71]: 1, 2 – umocnienie płytami betonowymi, 3 – drenaż, 4 – czyszczarka, 5 – ruchome elementy nad generatorami, 6 – most drogowy, 7 – transformatory, 8 – pomieszczenie dla obsługi

Obliczeniowy strumień objętościowy V wody w odniesieniu do pojedynczej turbiny wodnej jest określany jako przełyk turbiny, a w przypadku elektrowni jako przełyk elektrowni. Przełyk elektrowni ma decydujący wpływ na rozmiary elektrowni wodnej i wszystkich związanych z nią urządzeń hydro-technicznych.

Warunkiem uzyskania elektrowni o jak największej mocy na danym cieku wodnym jest uzyskanie dużego spadu H_w , dlatego często doprowadza się do spiętrzenia górnego poziomu wody przez budowę zapór. Mimo dużych kosztów inwestycji hydro-technicznych i długiego czasu ich realizacji, w przypadkach gdy istnieją sprzyjające warunki (np. duże zasoby przepływającej wody i korzystne warunki hydrologiczne), podejmowana jest budowa elektrowni wodnych.

2. Rodzaje elektrowni wodnych

Elektrownie wodne charakteryzują się znaczną różnorodnością rozwiązań technicznych ze względu na konieczność dostosowania do istniejących warunków terenowych. W zależności od sposobu gospodarowania przepływem wody i współpracy z systemem elektroenergetycznym rozróżnia się trzy grupy elektrowni wodnych: przepływowe, zbiornikowe i szczytowo-pompowe. Tylko elektrownie przepływowe i zbiornikowe stanowią źródła energii. Elektrownie pompowe służą do pośredniego akumulowania energii elektrycznej. Z kolei zależnie od wielkości spadu elektrownie wodne mogą być niskospadowe, średnispadowe i wysokospadowe. Wielkość spadu ma decydujący wpływ na rodzaj zastosowanej turbiny i w konsekwencji na rozwiązanie techniczne obiektu.

Elektrownie przepływowe wykorzystują ciągły przepływ wody cieku wodnego bez zbiornika do magazynowania wody. W Polsce elektrownie przepływowe są zwykle niskospadowe z wykorzystaniem niewielkiego spiętrzenia wody przez zapory ziemne. Pojemność zbiornika przed zaporami spiętrzającymi jest niewielka i zapewnia wyrównywanie przepływu jedynie przed nierównomiernością spowodowaną bieżącymi opadami.

Elektrownie zbiornikowe (rys. 4.22) wymagają zwykle budowy zapór i zbiorników betonowych. Są budowane w miejscach, gdzie ukształtowanie terenu to umożliwia. Głównym zadaniem zbiorników jest gromadzenie wody w okresach niskiego obciążenia systemu elektroenergetycznego lub istnienia dużych przepływów wody. Mogą spełniać funkcje wyrównywania przepływów w systemie dobowym, tygodniowym, sezonowym, rocznym, również funkcję zabezpieczenia przeciwpowodziowego.

W elektrowniach szczytowo-pompowych górny zbiornik jest napełniany wodą podawaną ze zbiornika dolnego przy wykorzystaniu w tym celu energii elektrycznej pobieranej z systemu elektroenergetycznego w czasie, gdy jest ona najtańsza, czyli podczas niskiego obciążenia systemu, w tzw. dolinie nocnej. Ze względu na łatwość włączenia do pracy elektrownie szczytowo-pompowe są projektowane i wykorzystywane do pracy interwencyjnej, czyli w okresach szczególnie dużego wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną, co ma miejsce w godzinach przedpołudniowych i w szczycie wieczornym. W tych elektrowniach stosowane są agregaty prądowórcze z możliwością pracy odwracalnej, podczas napełniania zbiornika górnego także pracują jako pompy oraz jako turbiny napędowe generatorów energii elektrycznej w okresach, kiedy jest wymagana natychmiastowa praca interwencyjna.

Energia elektryczna wytwarzana w elektrowniach szczytowo-pompowych w Polsce nie jest postrzegana jako energia uzyskiwana ze źródła odnawialnego, ponieważ do pracy pompowej elektrownie tego typu wykorzystują energię elektryczną wytwarzaną w zdecydowanej większości w elektrowniach ciepłych opalanych węglem, czyli paliwem nieodnawialnym.

Od wielkości spadu zależy rodzaj zastosowanych w elektrowni turbin wodnych. W obiektach zainstalowanych w Polsce w siłowniach niskospadowych (do 15 m spadu) są wykorzystywane turbiny Kaplana o budowie śmigłowej, w średnispadowych (15 – 50 m) – turbiny Francisa zbliżone konstrukcyjnie do pomp diagonalnych, w wysokospadowych (powyżej 50 m) – również

turbiny Francisca o budowie zbliżonej do pomp wirowych o dużej wydajności. W Polsce w elektrowniach szczytowo-pompowych najwyższy spad zastosowano w elektrowni Młoty, w której zainstalowano pompoturbiny o spadzie 260 m. Szczegóły konstrukcyjne różnego rodzaju turbin omówiono obszernie w pracy [71].

Według [71] sprawność cyklu w elektrowniach szczytowo-pompowych wynosi $\eta = 0,70 - 0,77$, co oznacza to, że z 1 kWh energii elektrycznej pobranej przez pompy w okresie szczytowego obciążenia systemu elektroenergetycznego otrzymuje się 0,70 – 0,77 kWh energii elektrycznej przekazanej z powrotem do systemu.

3. Znaczenie elektrowni wodnych

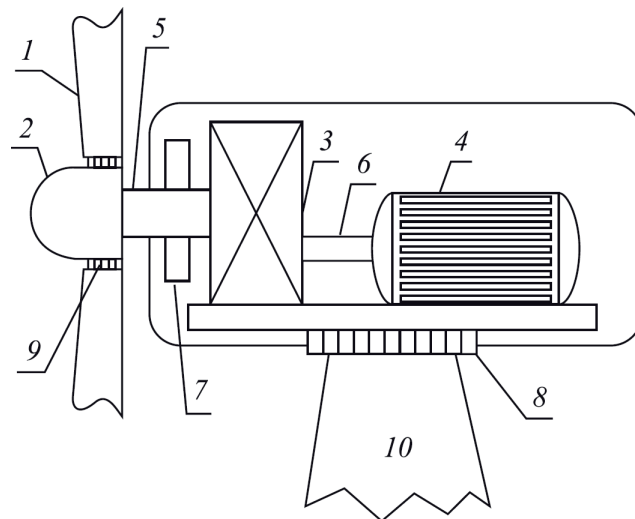
Elektrownie wodne (poza pompowymi) są obiektami, które oprócz wytwarzania energii elektrycznej spełniają inne funkcje w gospodarce kraju:

- wpływają na stabilizację stosunków wodnych i chronią przed powodzią;
- są źródłem wody pitnej i przemysłowej;
- służą do prowadzenia gospodarki rybnej i nawadniania terenów rolniczych;
- poprawiają komunikację (przeprawy drogowe i kolejowe),
- tworzą nowe tereny rekreacyjne.

Elektrownia zbiornikowa, która pracuje jako szczytowa, nie wyrównuje wahań przepływów poniżej elektrowni, a nawet je powiększa. Dlatego na rzekach buduje się kaskady elektrowni



Rys. 4.24. Elektrownia wiatrowa w Pucku [w6]



Rys. 4.25. Schemat budowy siłowni wiatrowej: 1 - łopaty, 2 - piasta, 3 - przekładnia mechaniczna, 4 - generator energii elektrycznej, 5 - wał wolnoobrotowy, 6 - wał szybkoobrotowy, 7 - hamulec, 8 - mechanizm kierunkowania siłowni, 9 - mechanizm ustawiania łopat, 10 - wieża

wodnych, to znaczy ciąg elektrowni położonych w stosunkowo małych odległościach na tej samej rzece. W takiej kaskadzie pierwsza elektrownia pracuje jako szczytowa, a ostatnia jako wyrównawcza.

W Polsce powstała koncepcja budowy kaskady na Wiśle. Z przewidywanych w tej kaskadzie elektrowni wybudowano dotychczas stopień wodny i elektrownię zbiornikową Włocławek (rys. 4.23). Przewiduje się budowę dalszych siedmiu elektrowni między Tczewem a Wyszogrodem. Długość dolnej kaskady Wisły wynosiłaby 319 km, a łączna moc zainstalowana 1340 MW.

Elektrownie wodne o mocach poniżej 5 MW są zaliczane do tzw. małej energetyki. Do małej energetyki zalicza się również turbiny napędowe w tartakach i młynach. Zadaniem małych elektrowni wodnych polega na zasilaniu w energię elektryczną obszarów niepodłączonych do sieci, podwyższaniu napięcia w końcowych odcinkach sieci elektroenergetycznej i zwiększaniu niezawodności zasilania obszarów wiejskich.

Energetyka wodna zapewnia dostawę energii elektrycznej w sposób przyjazny dla środowiska naturalnego, a zastępując energię wytwarzaną z paliw kopalnych wpływa na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń do środowiska.

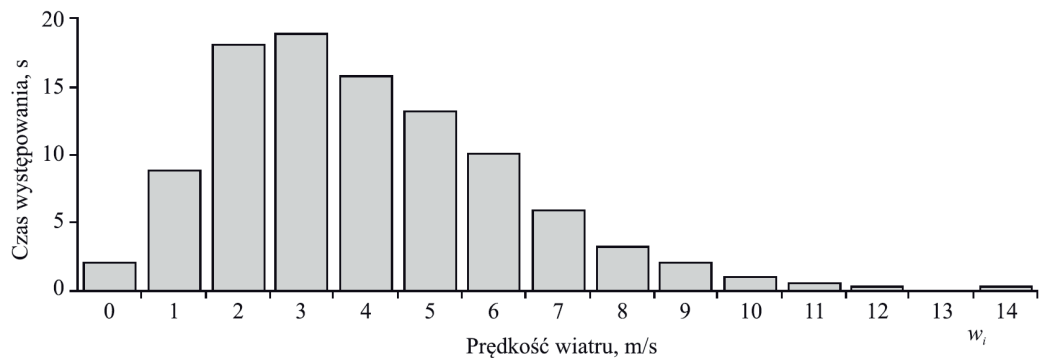
Podwyższenie poziomu zwierciadła wód przez zapory powoduje jednak podniesienie poziomu wód gruntowych i niekiedy stwarza konieczność budowy odwodnień. Nie można również wykluczyć awarii zapór wodnych.

Wykorzystanie energii wiatru

1. Budowa i działanie siłowni wiatrowej

Siłownia (elektrownia) wiatrowa to zespół urządzeń wytwarzających energię elektryczną dzięki wykorzystaniu energii strumienia wiatru. Przemianę energii wiatru w energię mechaniczną zapewnia silnik wiatrowy (turbina wiatrowa). Wyróżnia się kilka typów silników wiatrowych, między innymi są to silniki: karuzelowe, bębnowe, śmigłowe i wielołopatowe. W Polsce najczęściej

Rys. 4.26. Przykładowy histogram prędkości wiatru dla danej lokalizacji $p(w_i)$



spotyka się silniki śmigłowe trójpłatowe (rys. 4.24) i przedstawiony tu krótki opis budowy siłowni wiatrowej dotyczy takiej właśnie siłowni. Podstawowymi członami tworzącymi zespół prądotwórczy siłowni są: silnik (turbina) wiatrowy i generator energii elektrycznej, zwykle połączone za pośrednictwem przekładni mechanicznej. Przekładnia zapewnia zwiększenie prędkości obrotowej siłowni (wynoszącej zazwyczaj 15 – 20 obr./min) na prędkość umożliwiającą optymalną pracę generatora (często jest to 1500 obr./min). Podstawowym elementem silnika wiatrowego są łopaty zamocowane do piasty i osadzone na wale – stanowią wirnik siłowni. Silnik wiatrowy zapewnia wykorzystanie energii wiatru do wytwarzania energii mechanicznej, która w postaci momentu obrotowego na wale jest przekazywana do napędu generatora wytwarzającego energię elektryczną. Wał z systemem łożysk jest umieszczony w gondoli osadzonej obrotowo na wieży lub maszcie o odpowiedniej wysokości z systemem do samoczynnego ustawiania wirnika w stosunku do kierunku wiatru wraz z urządzeniami regulacyjnymi i sterowniczymi oraz przekładnią przenoszącą napęd na generator.

Podstawowe elementy tworzące siłownię wiatrową ilustruje schemat przedstawiony na rys. 4.25. Oprócz zespołu prądotwórczego niezbędnymi elementami siłowni wiatrowej są: fundament, wieża, drabina wejściowa, wyjście do sieci elektroenergetycznej, serwomechanizm kierunkowania siłowni, gondola, wiatromierz, hamulec postojowy, siłownik mechanizmu przestawiania łopat. Najczęściej spotykane są wirniki trójpłatowe z łopatami wykonanymi z włókna szklanego wzmocnionego poliestrem. W piaście wirnika znajduje się serwomechanizm pozwalający na ustawianie kąta nachylenia łopat. Gondola siłowni jest mocowana na wieży o odpowiedniej wysokości, ma możliwość obrotu o 360 stopni i zawsze jest ustawiana w kierunku pod wiatr. Obrót gondoli zapewnia mechanizm kierunkowania siłowni z silnikiem napędowym i przekładnią zębatą. Ponadto w gondoli są instalowane: transformator napięcia, system osadzania układu wirującego wewnątrz gondoli, układy smarowania oraz hamulec zapewniający zatrzymanie wirnika.

Według [86] oraz [w6] siłownie wiatrowe są budowane jako przydomowe lub przemysłowe, a zakres mocy pozwala je rozpatrywać jako siłownie mikro, małe i duże. Mogą być lokalizowane na lądzie lub morzu. Do zastosowań przydomowych, budowanych na potrzeby własne użytkowników, wykorzystywane są mikrosiłownie (o mocy do 100 W). Najczęściej są stosowane do ładowania baterii akumulatorów stanowiących zasilanie obwodów wydzielonych, wykorzystywane są także do zasilania części oświetlenia domu: pojedynczych lamp, a nawet poszczególnych

pomieszczeń czy urządzeń.

Małe siłownie wiatrowe – o mocy od 100 W do 50 kW mogą zapewnić energię elektryczną w pojedynczych gospodarstwach domowych, a nawet w małych przedsiębiorstwach. W instalacjach przydomowych najczęściej są wykorzystywane siłownie 3 – 5 kW do zasilania oświetlenia, do napędu układów pompowych, sprzętu i wyposażenia domowego. Jako przydomowe siłownie wiatrowe określane jest zespół urządzeń służący do wytwarzania i magazynowania energii elektrycznej przeznaczonej do wykorzystania w jednym lub kilku budynkach mieszkalnych, najczęściej są ustawiane bezpośrednio w pobliżu odbiorców energii.

Duże siłownie wiatrowe to zwykle obiekty przemysłowe o mocy powyżej 50 kW (najczęściej o mocy znacznie większej) przystosowane do produkcji i sprzedaży energii elektrycznej. W odniesieniu do takich siłowni niezbędne jest uzyskanie zgody na przyłączenie do sieci elektroenergetycznej po spełnieniu wymagań stawianych przez operatora sieci.

2. Cechy charakterystyczne wiatru

Energia wiatru jest to energia kinetyczna przemieszczania się mas powietrza wywołana niezerównoważonym rozkładem ciśnienia atmosferycznego w różnych miejscach na Ziemi. Jest pochodzenia słonecznego, stanowi około 1% energii słonecznej docierającej do powierzchni Ziemi.

Wiatr, rozumiany jako składowa pozioma ruchu powietrza względem powierzchni Ziemi, jest wynikiem nierównomiernego (zmiennego w cyklu dobowym) dopływu energii promieniowania słonecznego w zależności od szerokości geograficznej oraz ruchu obrotowego Ziemi względem własnej osi. Nierównomierne nagrzewanie powierzchni powoduje różnice temperatury, które z kolei wywołują ruchy konwekcyjne w atmosferze prowadzące do różnic ciśnienia w różnych miejscach powierzchni Ziemi, a to z kolei powoduje ruch powietrza w dolnej warstwie atmosfery, czyli wiatr. Ponadto istotny wpływ na ruch mas powietrza i jego złożoność mają różnice zdolności nagrzewania i ochładzania powierzchni lądów (pól i lasów), mórz i oceanów, a także różnice nachylenia powierzchni Ziemi względem kierunku padania promieniowania słonecznego. Na powstający w wyniku tych oddziaływań charakterystyczny układ krążenia powietrza w troposferze nakładają się siły Coriolisa, wywołane ruchem obrotowym Ziemi, zakrzywiające toru ruchu mas powietrza.

Z punktu widzenia energetyki wiatrowej interesuje nas energia wiatru w strefie przyziemnej, której wysokość nad poziomem terenu zależy od charakteru podłoża, ukształtowania terenu

i od wielu innych czynników. Powstające w strefie przyziemia zaburzenia atmosfery wpływają w sposób istotny na prędkość wiatru i zmiany kierunku ruchu powietrza w stosunku do jego strumienia głównego, nazywane strukturą wiatru.

Prędkość wiatru jest wielkością, która zmienia się w sposób przypadkowy, dlatego można ją opisać tylko w sposób statystyczny. Najbardziej wiarygodnie można scharakteryzować przebieg zmian prędkości wiatru na podstawie pomiarów. Na rys. 4.26 przedstawiono przykładowy rozkład (histogram) prędkości wiatru dla określonej lokalizacji, wykonany na podstawie pomiarów.

Histogram przedstawia prawdopodobieństwo $p(w_i)$ wystąpienia wiatru o prędkości w_i w funkcji prędkości w_i , które jest określane stosunkiem czasu $\tau(w_i)$ wystąpienia wiatru o prędkości w_i do całkowitego czasu τ_R w ciągu roku, co można zapisać jako

$$p(w_i) = \frac{\tau(w_i)}{\tau_R} \quad (4.5)$$

gdzie: w_i – prędkość wiatru w i -tym pomiarze ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) w m/s, $\tau_i = \tau(w_i)$ – czas występowania wiatru o prędkości w_i , τ_R – całkowity rozpatrywany okres, zwykle rok ($\tau_R = 8760$ h).

Podstawowym parametrem charakteryzującym losowo zmianę danej wielkości jest jej średnia wartość w określonym czasie. W przypadku prędkości wiatru są to średnioroczne prędkości charakteryzujące dany obszar, będące efektem wieloletnich pomiarów. Istnieją możliwości rozszerzenia lokalnych danych klimatycznych (z uwzględnieniem rzeźby terenu) na tereny przyległe do kilku kilometrów. Średnią miesięczną i średnią roczną prędkość wiatru oblicza się na podstawie wyników pomiarów według wzoru

$$w_{sr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i \quad \text{lub} \quad w_{sr} = \int_0^{\infty} wp(w)dw \quad (4.6)$$

gdzie: n – liczba pomiarów w danym okresie (miesiąc, rok), w_i – prędkość wiatru w i -tym pomiarze.

W analizach wykorzystania energii wiatru oprócz znajomości średniej prędkości wiatru dla rozpatrywanego miejsca niezbędna jest również informacja o rozkładzie prędkości w ciągu roku i średnich miesięcznych oraz częstości występowania określonej prędkości. W celu bliższego scharakteryzowania zmienności prędkości wiatru posługujemy się najczęściej rozkładem Weibulla $p(w)$, który stanowi dobre przybliżenie rozkładu

prędkości rzeczywistej wiatru, potwierdzone wieloletnim stosowaniem do modelowania rozkładu prędkości. Rozkład Weibulla dla danej średniorocznej prędkości wiatru określający gęstość prawdopodobieństwa $p(w)$ wystąpienia wiatru o danej prędkości wyraża relacja [83]

$$p(w) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{w}{\beta}\right)^{\gamma-1} \exp\left[-\left(\frac{w}{\beta}\right)^{\gamma}\right] \quad (4.7)$$

gdzie: γ – parametr kształtu rozkładu, β – parametr skali.

Rozkład Weibulla wyrażony równaniem (4.7) przedstawia zależność oczekiwanej liczby godzin występowania wiatru z określoną prędkością w . Mając prawdopodobieństwo $p(w)$ wystąpienia wiatru o prędkości w oraz wykorzystując wzór (4.7), można określić czas $\tau(w)$ występowania takiej prędkości wiatru.

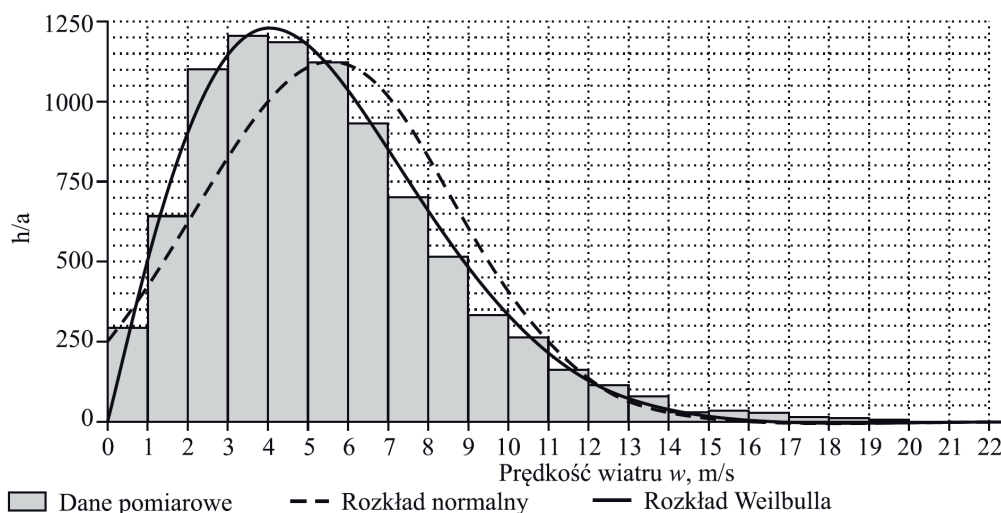
Na rys. 4.28 przedstawiono, wg [86], histogram prędkości wiatru dla Łeby wraz z naniesionym rozkładem Weibulla. Opracowanie rozkładu Weibulla opiera się na danych pomiarowych otrzymanych dla wystarczająco długiego okresu. Rozkład ten zależy od parametru kształtu γ i od parametru skali β , zależnego z kolei od średniej prędkości wiatru. Dla danej lokalizacji parametry rozkładu γ i β są wyznaczane przez dostosowanie wyników obserwacji do rozkładu danego wzorem (4.7). Niezbędna jest również ocena klasy szorstkości α terenu wykonywana dla danego miejsca na podstawie map topograficznych i lotniczych.

Bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na energię mas powietrza na danym obszarze jest pionowy profil prędkości wiatru w warstwie przyziemnej, na który wpływa tarcie zewnętrzne związane z rodzajem terenu oraz pionowa wymiana pędu, którą określa stan równowagi pionowej powietrza, nazywany gradientem termicznym.

Prędkość wiatru wzrasta wraz z wysokością. Jeśli pomiary prędkości wiatru zostały wykonane na wysokości innej niż wysokość zainstalowania rozpatrywanej siłowni wiatrowej, to wówczas stosuje się wzór korekcyjny. Najczęściej jest wykorzystywana zależność podana w [86]

$$w(h_2) = w(h_1) \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{\alpha} \quad (4.8)$$

gdzie: h_1, h_2 – wysokość; $w(h_1), w(h_2)$ – prędkość wiatru odpowiednio na wysokości h_1, h_2 ; α – parametr zależny od szorstkości gruntu, najczęściej przyjmuje się wartość 1/7 [Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki (laboratorium)]. Ocena



Rys. 4.28. Histogram prędkości wiatru dla Łeby i zastosowanie rozkładu Weibulla [86]

szerskości terenu dla danej lokalizacji jest wykonywana na podstawie map topograficznych i lotniczych.

3. Ocena energetyczna wiatru

3.1. Strefy energetyczne wiatru

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMiGW) dokonał ogólnej oceny przydatności prędkości wiatru do wykorzystania energetycznego dla całego obszaru kraju [77]. Na podstawie pomiarów przeprowadzonych w latach 1966–1989 na wysokości 30 m nad poziomem gruntu i większej wyróżnione zostały strefy energetyczne wiatru, które zaznaczono na mapie przedstawiającej mezoskalową rejonizację Polski z punktu widzenia zasobów wiatru w ciągu roku (rys. 4.29). Wydzielono pięć rejonów o różnych zasobach energii, zapewniając wstępną ocenę przydatności danego obszaru kraju do ewentualnej budowy siłowni wiatrowych. Z mapy tej wynika, że ok. 30% powierzchni kraju ma umiarkowanie korzystne warunki do wykorzystania wiatru jako odnawialnego źródła energii.

W Polsce rejonami uprzywilejowanymi pod względem zasobów wiatru są: środkowe, najbardziej wysunięte na północ, części wybrzeża od Koszalina po Hel, rejon wyspy Wolin, Suwalszczyzna, środkowa Wielkopolska i Mazowsze, Beskid Śląski i Żywiecki, Bieszczady i Pogórze Dynowskie.

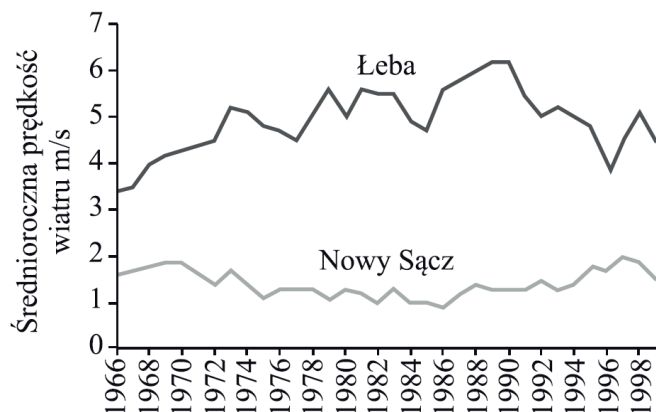
Na rys. 4.30 przedstawiono wg [w6] przebieg średnich rocznych wartości prędkości wiatru w dwóch miejscowościach, leżących w zupełnie skrajnych strefach wiatrowych kraju: Łeba i Nowy Sącz.

3.2. Sprawność przemiany energii wiatru w energię elektryczną

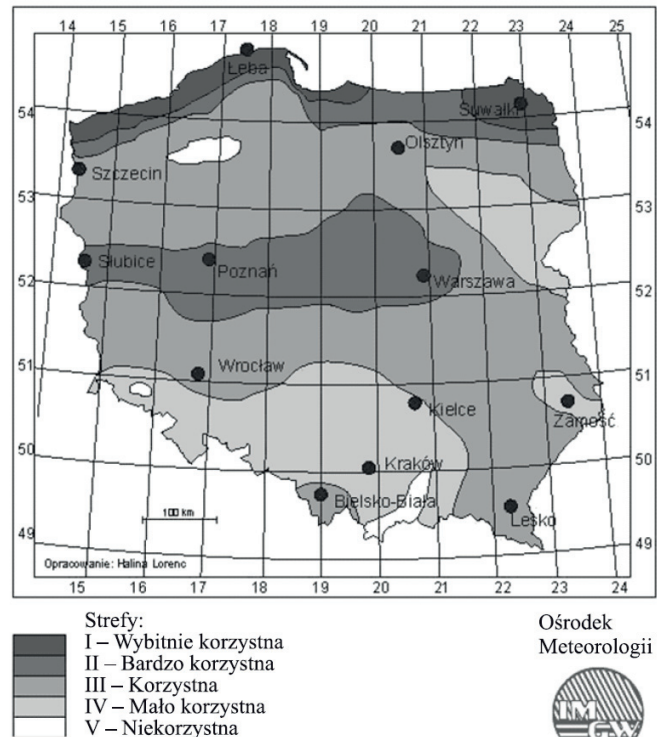
Prędkość wiatru jest podstawową wielkością, która wpływa decydująco na moc i efektywność energetyczną i ekonomiczną siłowni wiatrowej. Strumień energii kinetycznej E , czyli moc strumienia wiatru napływającego na pole powierzchni S zataczane przez wirnik siłowni, wyraża się wzorem

$$\dot{E} = \frac{\dot{G}w^2}{2} = \frac{S\rho w^2}{2} = \rho S \frac{w^3}{2} \quad (4.9)$$

gdzie: G – masowy strumień powietrza napływającego na pole powierzchni zataczanej przez wirnik, w – prędkość przepływu powietrza, ρ – gęstość powietrza, S – pole powierzchni zataczanej przez łopaty wirnika siłowni wiatrowej.



Rys. 4.30. Średnie prędkości wiatru: a) roczne dla dobrych warunków wiatrowych (Łeba) i słabych (Nowy Sącz) w latach 1966 – 1989 (według [w6]), b) miesięczne dla Helu w latach 1951 – 1975 [w6]



Aktualizacja mapy na podstawie okresu obserwacyjnego 1971–2000

Rys. 4.29. Strefy energetyczne wiatru w Polsce wg IMiGW [77]

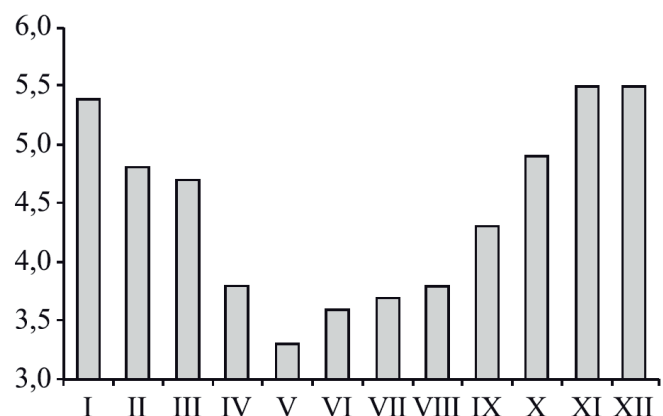
Wymaga podkreślenia, że zgodnie z wzorem (4.9) moc strumienia wiatru jest proporcjonalna do trzeciej potęgi prędkości wiatru. Świadczy to o podstawowym znaczeniu prędkości wiatru z punktu widzenia jego energetycznego wykorzystania.

Stosuje się również pojęcie gęstości mocy e_w strumienia wiatru

$$e_w = \frac{\dot{E}}{S} = \rho \frac{w^3}{2} \quad (4.10)$$

Należy także mieć na uwadze, że zmiany gęstości powietrza, związane ze zmianą warunków atmosferycznych, mogą znacząco wpływać na energię wiatru.

Energia masowego strumienia G wiatru według wzorów (4.9) i (4.10) wyraża jedynie potencjalne możliwości energii wiatru pozostające do wykorzystania, gdyby prędkość wiatru za wirnikiem spadła do zera, co oczywiście fizycznie nie jest możliwe.



Prędkość wiatru za wirnikiem zmniejsza się jedynie do pewnej wartości w_0 , dlatego strumień energii pobierany przez łopaty turbiny wiatrowej jest proporcjonalny do różnicy kwadratów prędkości powietrza przed i za wirnikiem turbiny, co wyraża następująca zależność [56]:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \dot{G}(w^2 - w_0^2) \quad (4.11)$$

gdzie: w – prędkość powietrza napływającego na wirnik, w_0 – prędkość powietrza odpływającego.

Po przekształceniu zależności (4.11) moc mechaniczna pobierana przez wirnik silnika wiatrowego wyraża się wzorem

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \left(\rho S \frac{w + w_0}{2} \right) (w^2 - w_0^2) = \frac{1}{2} \rho S w^3 \cdot \frac{1}{2} \left(1 + \frac{w_0}{w} \right) \left[1 - \left(\frac{w_0}{w} \right)^2 \right] \quad (4.12)$$

Uwzględniono, że strumień masy G powietrza jest określony przy średniej prędkości wiatru $0,5(w + w_0)$.

Najczęściej moc mechaniczna pobierana przez łopaty wirnika silnika wiatrowego jest przedstawiana za pomocą wyrażenia

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho S w^3 \eta_p \quad (4.13)$$

gdzie współczynnik η_p wykorzystania energii wiatru (nazywany też sprawnością strumieniową albo współczynnikiem Betza) zależy tylko od stosunku prędkości przed i za wirnikiem turbiny, zgodnie z wzorem

$$\eta_p = \frac{\dot{E}}{P_{\max}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{w_0}{w} \right) \left[1 - \left(\frac{w_0}{w} \right)^2 \right] \quad (4.14)$$

Współczynnik ten osiąga wartość maksymalną $\eta_{p,\max}$ przy prędkości wiatru $w = 3w_0$, co można łatwo wykazać, przyrównując pochodną η_p względem stosunku w_0/w do zera. Obliczona zgodnie z równaniem (4.14) maksymalna wartość współczynnika wykorzystania energii wiatru (czyli przy $w = 3w_0$) wynosi $\eta_{p,\max} = 0,593$ i jest nazywana limitem Betza.

W warunkach rzeczywistych, ze względu na straty mechaniczne i aerodynamiczne, dla współczesnych, najczęściej stosowanych trójłopatowych turbin wiatrowych o poziomej osi obrotu, udaje się osiągnąć wartości η_p niewiele przekraczające 0,4.

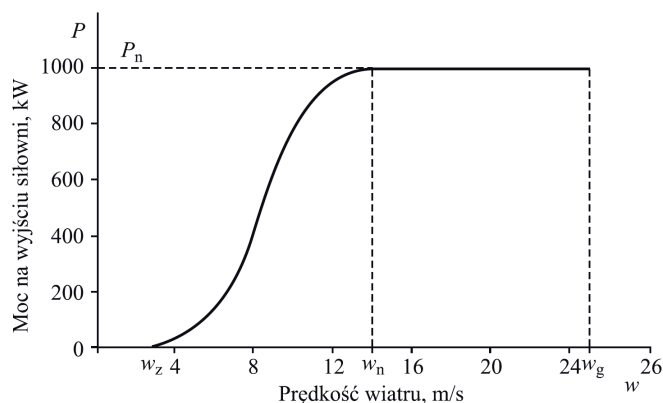
Według [93] sprawność ($\eta_m \eta_a$) silnika wiatrowego jest wynikiem strat mechanicznych i aerodynamicznych, powodowane przez:

- tarcie powietrza opływającego powierzchnie łopat;
- wyrównywanie ciśnienia powietrza po obu stronach łopat;
- zawirowania strumienia powietrza za wirnikiem;
- niemożliwość energetycznego wykorzystania środkowej części wirnika;
- ubytek strumienia powietrza na zewnątrz wirnika;
- straty energii w wyniku wzajemnego oddziaływania łopat (w silnikach wielołopatowych);
- straty energii mechanicznej w wyniku tarcia w elementach układu wirującego.

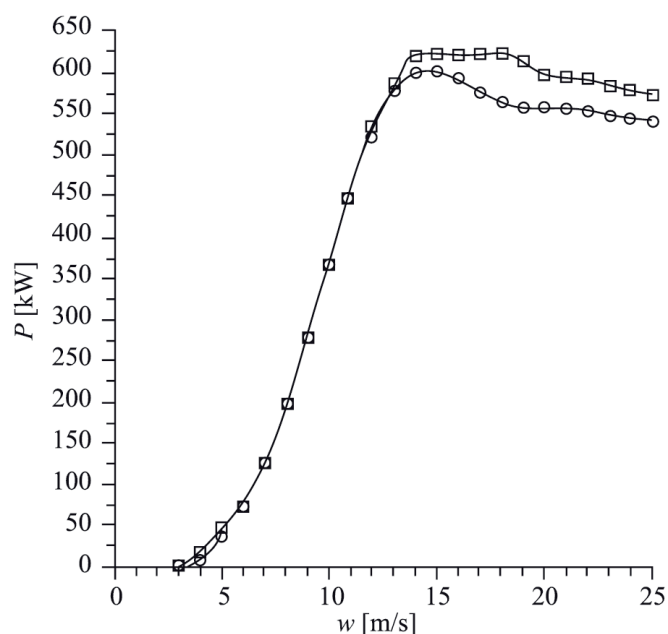
Wymienione wyżej straty są wyrażane przez sprawność aerodynamiczną η_a i mechaniczną η_m .

Sprawność przemiany energii wiatru w energię elektryczną otrzymywaną na wyjściu generatora można zdefiniować wzorem

$$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{E}} \quad (4.15)$$



Rys. 4.31. Krzywa mocy i charakterystyczne punkty pracy siłowni wiatrowej; P_n – moc nominalna, w_z – prędkość załączania, w_n – prędkość nominalna, w_g – prędkość graniczna (wyłączania) [w7]



- NEG Micron NM600/43
- Nordex N 43/600

Rys. 4.32. Krzywa mocy wybranych siłowni wiatrowych: NEG Micon NM600/43 i Nordeks N43/600 [w7]

gdzie: P_e – moc elektryczna otrzymywana na wyjściu z generatora energii elektrycznej, E – moc strumienia wiatru napływającego na wirnik określona wzorem (4.9).

Wzór (4.15) można przekształcić, uwzględniając sprawność silnika wiatrowego, sprawność mechaniczną i aerodynamiczną silnika oraz sprawność (mechaniczną i elektryczną) generatora

$$\eta_e = \frac{P_{\max}}{\dot{E}} \cdot \frac{P_w}{P_{\max}} \cdot \frac{P_{wg}}{P_w} \cdot \frac{P_e}{P_{wg}} = \eta_p (\eta_a \eta_m) \eta_t \eta_g \quad (4.16)$$

gdzie: η_p – współczynnik wykorzystania energii wiatru przez silnik wiatrowy, η_a – sprawność aerodynamiczna silnika wiatrowego, η_m – sprawność mechaniczna silnika wiatrowego, η_t – sprawność mechaniczna przekładni prędkości obrotowej wału, η_g – sprawność generatora (z uwzględnieniem strat mechanicznych i elektrycznych), P_{\max} – teoretycznie maksymalna moc

wiatru przekazywana do silnika wiatrowego, P_w – moc na wale wirnika za silnikiem wiatrowym, P_{wg} – moc na wale wirnika przed generatorem, P_e – moc elektryczna otrzymywana na wyjściu z generatora energii elektrycznej.

Moce największych silników wiatrowych są rzędu kilku megawatów, jednak optymalne pod względem ekonomicznym są agregaty wiatrowe o mocy 200 – 400 kW i średnicy wirnika 30 – 40 m.

4. Charakterystyka mocy siłowni wiatrowej

Współczesne siłownie wiatrowe są projektowane i budowane, biorąc pod uwagę określoną prędkość wiatru, charakterystyczną (szacowaną) dla danej lokalizacji, ustalaną na podstawie odpowiednich informacji dla danego terenu. Możliwe do wykorzystania prędkości wiatru mieszczą się w zakresie 4–25 m/s. Załączanie siłowni następuje przy prędkości 2–6,5 m/s (prędkość startu wr), a najwyższą sprawność energetyczną siłownie uzyskują przy nominalnej prędkości wiatru w_n , której wartość jest ustalana w zakresie 9 – 15 m/s, natomiast przy prędkości powyżej 25 m/s następuje wyłączenie (prędkość wyłączenia ww). Przy prędkościach wiatru poniżej nominalnej układ sterowania dąży do zapewnienia jak najwyższej sprawności. Nie buduje się siłowni na większe prędkości wiatru niż 15 m/s, ponieważ występują one bardzo rzadko. Przy prędkościach wiatru większych niż 15 m/s, czyli w zakresie 15 – 25 m/s, konieczne jest wytracanie mocy, aby chronić siłownię przed uszkodzeniem. Przy prędkościach powyżej 25 m/s następuje wyłączenie silnika wiatrowego przez zadziałanie odpowiedniego układu regulacji, w który każda siłownia wiatrowa musi być zaopatrzona.

Podstawową charakterystykę pracy siłowni wiatrowej stanowi krzywa mocy $P(w)$, która przedstawia przebieg mocy siłowni w zależności od prędkości napływu wiatru w ustalonym zakresie prędkości. Przebieg krzywej mocy zależy od rozwiązań konstrukcyjnych turbiny, rodzaju zastosowanej mechaniki, typu turbiny, rodzaju płatów wirnika czy systemu regulacji. Przy regulacji przez zmianę kąta nastawienia łopat krzywa mocy ma przebieg pokazany na rys. 4.31. Przebieg krzywej pozwala na określenie mocy nominalnej oraz prędkości wiatru w charakterystycznych punktach pracy siłowni.

Rzeczywistą krzywą mocy uzyskuje się na podstawie pomiarów. Na rys. 4.32 przedstawiono przykład krzywej mocy dla wybranych dwóch siłowni wiatrowych [w7] o mocy nominalnej 600 kW przy regulacji, podczas której oprócz wykorzystywania charakterystyki aerodynamicznej łopat istnieje również ograniczona możliwość zmiany kąta ich ustawienia względem napływającego wiatru.

Regulacja mocy siłowni wiatrowych odbywa się przez zmianę kąta nastawienia łopat wirnika oraz zmianę kierunku napływu strumienia wiatru na wirnik przez obrót osi gondoli.

Regulacja przez zmianę kąta nastawienia łopat wirnika w przypadku zbyt dużej prędkości wiatru ma na celu zmniejszenie momentu napędowego wirnika. Natomiast przy mniejszej prędkości wiatru działanie układu regulacji prowadzi do zwiększenia momentu napędowego. Zastosowanie zmiennej prędkości obrotowej w siłowniach wiatrowych umożliwia optymalne wykorzystanie energii wiatru i zapewnia w danych warunkach większy uzysk energii.

Regulacja przez zmianę kierunku ustawienia osi obrotu wirnika turbiny odbywa się w taki sposób, aby zapewnić ukośny napływ wiatru na pole zakreślone przez wirnik, czego wynikiem jest zmniejszenie powierzchni użytecznej zarysu wirnika i tym samym zmniejszenie mocy siłowni. Zmniejszenie mocy jest tym większe, im większe jest odchylenie osi obrotu wirnika od kierunku napływu wiatru. Przy prostopadłym do osi obrotu wirnika kierunku napływu wiatru moc urządzenia spada do zera.

5. Możliwości wykorzystania mocy zainstalowanej siłowni wiatrowej

Ze względu na zmienność prędkości wiatru silniki wiatrowe przez większość czasu w ciągu roku nie pracują z pełną dostępną mocą. Najwyższą efektywność wykorzystania energii wiatru uzyskują siłownie zainstalowane w szczególnie dogodnych warunkach wiatrowych.

Możliwości wykorzystania mocy zainstalowanej danej siłowni wiatrowej charakteryzuje *współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej*

$$\sigma = \frac{P_{sr}}{P_n} \quad (4.17)$$

gdzie: P_n – moc zainstalowana (nominalna) siłowni wiatrowej, P_{sr} – średnia moc danej siłowni uzyskana w rozpatrywanym czasie (zwykle w ciągu roku).

W pracy [47] przedstawiono analizę możliwości wykorzystania mocy siłowni wiatrowej o mocy 160 MW w warunkach wiatrowych na terenie Polski. Pełne (w 100%) wykorzystanie mocy siłowni wiatrowej miałyby miejsce w sytuacji, gdyby pracowała cały rok z mocą nominalną (zainstalowaną). To znaczy produkcja energii wyrażona w kWh byłaby równa mocy nominalnej elektrowni, wyrażonej w kW, pomnożonej przez liczbę godzin w ciągu roku. Tę wielkość energii przyjęto jako poziom odniesienia i w stosunku do niej określono stopień wykorzystania mocy elektrowni przy różnej średniorocznej prędkości wiatru.

Analizie poddano w szczególności istotny w warunkach wiatrowych Polski przedział średniorocznych prędkości wiatru od 4 m/s do 6 m/s. Poniżej średniej prędkości 4 m/s budowa siłowni wiatrowej nie ma uzasadnienia ekonomicznego, natomiast prędkość 6 m/s wg [47] to największa średnioroczna prędkość spotykana na terenie Polski. Dla obszarów, gdzie średnioroczna prędkość wiatru mieści się w przedziale od 4 m/s do 6 m/s, oszacowany stopień wykorzystania mocy nominalnej mieści się w granicach od 7% do około 25%. Przy prędkości wiatru 3 m/s stopień wykorzystania mocy wynosiłby zaledwie 2%, a przy wietrze o średniej prędkości 12 m/s (niespotykanej na obszarze Polski) oszacowany stopień wykorzystania mocy wynosiłby 64%. W analizach dotyczących wykorzystania energii wiatru w danej lokalizacji należy zalecać konieczność uwzględnienia współczynnika σ wykorzystania mocy zainstalowanej.

 Fragment artykułu pochodzi z książki

Efektywność energetyczna w działalności gospodarczej Jan Górzyński
Wydawnictwo Naukowe PWN SA