



Prof. dr hab. inż. Jan Pabis absolwent Politechniki Gdańskiej i Politechniki Warszawskiej, pracownik naukowo-badawczy w Instytucie Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa w Warszawie, specjalista w zakresie techniki rolniczej, suszarnictwa rolniczego, techniki cieplnej i odnawialnych źródeł energii. W latach 1953-1990 pełnił funkcje kierownika pracowni i kierownika Zakładu Energetyki Ciepłej. Po przejściu do pracy w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego na Wydziale Techniki Rolniczej i Leśnej w latach 1990 - 2000 pełnił funkcje kierownika Zakładu, kierownika Katedry i prodziekana Wydziału ds. Nauki.

Jest autorem i współautorem ok. 500 prac naukowo-badawczych, 160 publikacji, autorem 1 podręcznika i współautorem 2 podręczników. Był promotorem 10 rozpraw doktorskich, autorem wielu recenzji rozpraw doktorskich, habilitacyjnych i ocen wniosków o nadanie tytułu naukowego profesora. Po przejściu na emeryturę w 2000 r. wraca do pracy w IBMER.

Za osiągnięcia w pracy zawodowej uzyskał wiele odznaczeń państwowych, resortowych i nagród, w tym nagrodę naukową PAN, Komitetu Nauki i Techniki, 2 nagrody w Konkursie Oszczędności Energii i Paliw oraz nagrodę Mistrza Techniki.



Prof. dr hab. inż. Mieczysław Szpryngiel urodził się 10 sierpnia 1943 roku w Łucku. Absolwent Wydziału Rolniczego (specjalizacja mechanizacja rolnictwa) Wyższej Szkoły Rolniczej w Lublinie (1968 r.), dr nauk technicznych Wydziału Techniki Rolniczej Akademii Rolniczej (1975), dr hab. nauk rolniczych w zakresie techniki rolniczej (1991), prof. dr hab. inż. (1999). Prodziekan Wydziału Techniki Rolniczej AR w Lublinie (1993-1999), Dziekan Wydziału Inżynierii Produkcji (1999-2005), Członek Sekcji „Mechanizacja” Komitetu Techniki Rolniczej PAN w kadencji 1993-1995 i 2003-2005, Kierownik Katedry Eksploatacji Maszyn i Zarządzania w Inżynierii Rolniczej 1996-2013.

Autor i współautor 207 publikacji naukowych i popularnonaukowych z zakresu nowych technologii kombajnowego zbioru nasion roślin nie zbożowych, traw nasiennych, prosa, kanaru i nowych dwuzerowych odmian rzepaku ozimego. Popularyzator i entuzjasta niekonwencjonalnych źródeł energii, w tym energii słońca i wiatru. Współautor 3 podręczników i 2 monografii, autor 2 patentów i 14 wzorów użytkowych. Promotor 4 prac doktorskich, 45 prac magisterskich i 15 prac inżynierskich. Był autorem wielu recenzji rozpraw doktorskich, habilitacyjnych i ocen wniosków na nadanie tytułu naukowego profesora.

Odznaczenia: Złoty Krzyż Zasługi (1988), Medal Komisji Edukacji Narodowej (1997), Złoty Medal „Za Zasługi dla Obronności Kraju” (2000), Krzyż Kawalerski Orderu Odrodzenia Polski (2005).



Prof. dr hab. inż. JANUSZ LASKOWSKI - mgr inż. Wydz. Rolniczego WSR w Lublinie (1967); dr nauk technicznych Wydz. Techniki Rolniczej AR w Lublinie (1976); dr hab. nauk rolniczych w zakresie inżynierii rolniczej (1989); prof. nauk rolniczych (1997); prof. zwyczajny (2002). Kierownik Katedry Eksploatacji Maszyn Przemysłu Spożywczego (od 1990-2014 r.) na Wydziale Inżynierii Produkcji UP w Lublinie,; przez trzy kadencje Prodziekan Wydziału Techniki Rolniczej AR w Lublinie (1990-1993, 1993-1995, 1999-2002). Członek licznych towarzystw naukowych oraz rad programowych wydawnictw naukowych

Autor bądź współautor 392 publikacji z zakresu techniki i technologii obróbki materiałów sypkich w przetwórstwie zbożowym i zbożowo-paszowym; badania podstawowych właściwości fizycznych i technologicznych surowców pochodzenia roślinnego; badania teoretyczne i empiryczne procesów występujących w przetwórstwie rolno-spożywczym; właściwości fizyczne produktów spożywczych. Autor 211 recenzji w tym 49 na tytuł i stopień naukowy. Kierował 178 pracami magisterskimi i 42 inżynierskimi; promotor 8 przewodów doktorskich, opiekun 4 przewodów habilitacyjnych.

Odznaczenia i wyróżnienia między innymi: Złoty Krzyż Zasługi (1993), Medal Komisji Edukacji Narodowej (1996), Honorowa Odznaka AR w Lublinie, Zasłużony dla Miasta Lublina.



JAN PABIS
MIECZYŚLAW SZPRYNGIEL
JANUSZ LASKOWSKI

INŻYNIERIA KONWERSJI ENERGII ZE ŹRÓDEŁ ODNAWIALNYCH „OZE”

Wałbrzych - Lublin 2015

INŻYNIERIA KONWERSJI ENERGII ZE ŹRÓDEŁ ODNAWIALNYCH „OZE”

JAN PABIS, MIECZYŚLAW SZPRYNGIEL, JANUSZ LASKOWSKI

**INŻYNIERIA KONWERSJI ENERGII
ZE ŹRÓDEŁ ODNAWIALNYCH „OZE”**

WAŁBRZYCH - LUBLIN 2015

RECENZENT NAUKOWY
prof. dr hab. Franciszek Mroczo

SERIA
Zarządzanie

KIEROWNIK NAUKOWY SERII
prof. dr hab. Lucjan Kowalczyk

PROJEKT OKŁADKI
mgr inż. Marek Milanowski

REDAKCJA TECHNICZNA
Władysław Ramotowski

DRUK
Drukarnia D&D Spółka z o.o. 44-100 Gliwice, ul. Moniuszki 6

COPYRIGHT BY WYŻSZA SZKOŁA ZARZĄDZANIA I PRZEDSIĘBIORCZOŚCI
Z SIEDZIBĄ W WAŁBRZYCHU

ISBN 978-83-60904-11-4

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń	6
Przedmowa	11
1. Wprowadzenie	13
2. Odnawialne źródła energii	15
2.1 Energia słońca	15
2.2. Energia wiatru	21
2.3. Energia z biomasy	23
2.4. Pompy ciepła w energetyce ciepłej	25
2.5. Wody geotermalne	25
2.6. Energia wód	26
3. Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w rolnictwie	29
4. Energia słoneczna	33
4.1. Przemiana energii promieniowania słonecznego na energię ciepłą	35
4.2. Bilans cieplny kolektora słonecznego	42
5. Kolektory słoneczne	47
5.1. Rodzaje kolektorów słonecznych	47
5.2. Kolektory słoneczne powietrzne płaski płytowe odkryte	50
5.3. Kolektory słoneczne powietrzne zakryte płaskie płytowe zakryte	53
5.4. Uproszczone obliczenia kolektorów słonecznych przeznaczonych do podgrzewania powietrza.	67
5.4.1 Przykład. Obliczanie kolektora słonecznego do suszarki produktów rolniczych.	71
5.4.2. Przykład Zastosowanie kolektora słonecznego do ogrzewania tunelu foliowego	74

5.5. Cieczowe płaskie kolektory słoneczne do podgrzewania wody użytkowej	76
5.6. Uprozczone obliczenia kolektorów słonecznych z bezpośrednim podgrzewaniem wody użytkowej	83
5.7. Uprozczone obliczenia kolektorów słonecznych o pośrednim podgrzewaniu wody użytkowej	84
5.7.1. Przykład. Podgrzewanie wody przeznaczonej do nawadniania roślin w szklarni przy pomocy kolektora o bezpośrednim działaniu	89
5.8. Kolektory słoneczne skupiające	90
5.9. Kolektory próżniowe	92
5.10. Bierne (pasywne) ogrzewanie słoneczne	93
6. Ogniwa fotowoltaiczne	99
7. Zastosowanie kolektorów słonecznych w produkcji rolniczej i gospodarstwach domowych	103
7.1. Kolektory słoneczne w suszarnictwie produktów rolniczych	103
7.2. Obliczanie podstawowych danych kolektorów słonecznych wykorzystanych w produkcji warzyw pod osłonami	116
7.3. Zastosowanie kolektorów słonecznych w budynkach mieszkalnych	142
8. Magazynowanie energii cieplnej	129
8.1. Akumulatory wodne	132
8.2. Magazynowanie ciepła w złożu kamiennym	133
8.3. Akumulatory ciepła utajonego	117
9. Energia wiatru	145
9.1. Rys historyczny	146
9.2. Wpływ prędkości wiatru na wydajność energetyczną elektrowni wiatrowych	147
9.3. Lokalizowanie elektrowni wiatrowych	150
9.4. Stan energetyki wiatrowej w Polsce	156
9.5. Aktualny stan i zlokalizowanie elektrowni wiatrowych w Polsce	157

9.6. Warunki wiatrowe Polski	163
9.7. Ekologiczne uwarunkowania budowy elektrowni wiatrowych	169
9.8. Ekonomiczne aspekty wykorzystania energii wiatru	171
9.9. Uwarunkowania prawne	172
10. Elektrownie i siłownie wiatrowe	175
10.1. Zasada działania silników wiatrowych	177
10.2. Wydajność energetyczna elektrowni wiatrowych	180
10.3. Maksymalna teoretyczna sprawność wirnika	181
10.4. Mapy wiatrowe	183
10.4.1. Nomogramy	184
10.5. Rodzaje silników wiatrowych	185
10.6. Sterowanie silnikami wiatrowymi	190
10.7. Generatory	197
10.8. Wieże, maszty	198
10.9. Sposoby wykorzystania energii wiatru	199
11. Zasoby i potencjał energetyczny biomasy w Polsce	203
11.1. Drewno	204
11.2. Wierzba i trawy	213
11.3. Słoma	215
11.4. Spalanie biomasy	218
11.5. Biogaz	238
11.5.1. Budowa i działanie biogazowni	243
11.6. Biodiesel	251
11.7. Bioalkohole	255
12. Pompy ciepła	259
13. Elektrownie na małych ciekach wodnych	271
14. Energia geotermalna	283

15. Zintegrowane systemy energetyczne	289
16. Analiza wykorzystania ziarna zbóż do celów energetycznych	299
16.1. Wprowadzenie	299
16.2. Ziarno owsa na cele grzewcze	300
16.3. Instalacje do spalania ziarna	303
16.3.1. Spalanie owsa w Polsce	304
16.3.2. Ekonomiczne aspekty	306
16.4. Produkcja bioetanolu	308
16.4.1. Technologie otrzymywania etanolu	310
16.4.2. Produkcja etanolu	311
16.5. Produkcja biodiesla	315
16.6. Biogaz	317
16.7. Podsumowanie	320
17. Załączniki	327
17.1. Wybrane definicje i objaśnienia do zakresu techniki ciepłej i odnawialnych źródeł energii	327
17.2. Tabele	335

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

A – zdolność pochłaniania promieniowania słonecznego przez powłokę kolektora, przy promieniowaniu bezpośrednim q_h i rozproszonym q_r	
d_r – średnica równoważna	m
D_w – średnica wirnika siłowni wiatrowych	m
E_e – energia elektryczna	kWh
E_k – energia kinetyczna	$v^2/2g$
E_r – roczna produkcja energii	kWh/rok
E_{en} – potencjał energetyczny	kWh/rok
F – powierzchnia	m ²
F_k – powierzchnia kolektora słonecznego	m ²
F_{ot} – szacunkowa powierzchnia otoczenia odbijająca promienie słoneczne padające w kierunku kolektora	m ²
F_p – pole przekroju	m ²
F_w – powierzchnia właściwa wypełnienia złoża	m ²
G_p – natężenie przepływu masy	kg/s
H – wysokość	m
H_p – wysokość przeszkody terenowej	m
H_w – spad wody (różnica poziomów wody)	m
k – współczynnik przenikania ciepła	W/(m ² K)
K_n – doskonałość nośna	
K_c – całkowity współczynnik strat ciepła przez powierzchnię kolektora do otoczenia	
K_p – cieplny równoważnik pracy	
L, l – długość	m

M – masowy wydatek czynnika przepływającego przez kolektor słoneczny	kg/s
m_p – masa powietrza	kg
m_g – wydajność dobową gnojowicy	kg/dobę
M_k – masa kamieni	kg
M_{sg} – wydajność suchej gnojowicy	kg/dobę
M_w – całkowite zapotrzebowanie na wodę	l/(m ² dobę)
N – moc	kW
n_s – prędkość obrotowa wirnika siłowni wiatrowej	1/min
Δp_w – spręż wentylatora	Pa
Δp – opory przepływu powietrza	Pa
P_t – moc turbiny	N
P – siła	N
P_d – ciśnienie dynamiczne	Pa
P_c – moc przekazana wirnikowi	W
P_t – moc strumienia powietrza	W
P_z – siła nośna	N
P_x – siła oporu	N
Q – ciepło, energia cieplna, ilość ciepła	J
$Q_{uż}$ – ilość ciepła przyjęta przez czynnik roboczy przepływający przez kolektor słoneczny	J
Q_{st} – straty ciepła do otoczenia	
Q_{ak} – ciepło akumulowane w kolektorze słonecznym	J
q_c – całkowite natężenie promieniowania słonecznego	W/m ²
q_h – natężenie bezpośrednie promieniowania słonecznego	W/m ²
q_u – godzinowe natężenie promieniowania słonecznego	W/m ²
q_r – natężenie promieniowania słonecznego	W/m ²

q_n – stała słoneczna	W/(m ² h)
q_{ru} – natężenie cieplne rusztu	J/(m ² h)
q_{ks} – natężenie cieplne komory spalania	J/(m ³ h)
q_{in} – straty ciepłe instalacji słonecznej	J/h
$q_{uż}$ – natężenie użytecznego promieniowania słonecznego	W/m ²
q – gęstość strumienia ciepłego	W/m ²
q_d – dzienne natężenie promieniowania słonecznego	W/m ²
r – odległość rozpatrywanego przekroju łopatki od środka wirnika	m
r_o – średnia odległość ziemi od słońca	km
r – ciepło parowania	J/kg
R – współczynnik	
L – długość skrzydła wirnika	m
R_k – współczynnik korekcyjny zależny od szerokości geograficznej, pory roku i kąta pochylenia kolektora słonecznego do poziomu.	
R_p – moc znamionowa elektrowni	W
R_s – znamionowa prędkość wiatru	m/s
Δt – przyrost temperatury	K
t – temperatura	°C
T – czas	h, s
u – prędkość obwodowa wirnika	m/s
w – wilgotność względna	%
Wd_m – wartość opałowa drewna mokrego	GJ/t
Wd_s – wartość opałowa drewna suchego	GJ/t
W_g – ciepło spalania	MJ/kg
W_j – jednostkowe zapotrzebowanie wody	l/h
v_p – prędkość przepływu powietrza	m/s
V – objętość	m ³
V_p – natężenie przepływu objętości	m ³ /s
V_w – wydatek wentylatora	m ³ /h

V_z – pojemność zbiornika akumulacyjnego	m^3
V_g – objętość gnojowicy	m^3
α – współczynnik absorpcji przez powierzchnię płyty pochłaniającej promieniowanie	
β – kąt pochylenia kolektora słonecznego w stosunku do poziomu	stopnie
δ – deklinacja słoneczna	
δ_h – współczynnik poprawkowy	
γ_p – gęstość powietrza	kg/m^3
γ_w – gęstość wody	kg/m^3
η – sprawność elektrowni wiatrowej	
ω – prędkość kątowna wirnika	rad/s
Δ – zmiana dowolnej wielkości	
Θ – kąt padania promieni słonecznych na kolektor pochyły	stopnie
Θ_p – kąt padania promieni słonecznych na kolektor poziomy	stopnie
λ – współczynnik liniowego oporu przepływu powietrza lub wody	
λ_d – współczynnik lepkości dynamicznej	Pa
μ – współczynnik lepkości kinematycznej	m^2/s
ξ – współczynnik oporu miejscowego (przepływu)	
p – porowatość	%
Σ – suma wartości dowolnej wielkości	
φ_p – współczynnik przepuszczalności promieniowania	
φ_g – szerokość geograficzna	°
c_o – kąt obrotu Ziemi wokół swojej osi	°
Liczba Reynoldsa	$Re = v^2d/\mu$

PRZEDMOWA

W rozwoju społeczności ludzkiej energia wykorzystywana w formie ciepła, jako energia, ciepła odgrywała i nadal odgrywa znaczącą rolę. Sposób wykorzystywania energii świadczy o poziomie uprzemysłowienia kraju i jego dobrobycie. Stały wzrost zużycia energii i paliw, wzrost cen nośników energii oraz malejące zasoby paliw kopalnianych, przyczyniły się w znacznym stopniu do poszukiwania zastępczych, a zarazem uzupełniających źródeł energii. Drugim bardzo ważnym powodem poszukiwania nowych źródeł energii jest wzrost zanieczyszczenia środowiska naturalnego emisją do atmosfery od stałych i gazowych produktów spalania. Uzupełniającymi źródłami energii są aktualnie takie odnawialne źródła energii jak: energia słońca, energia wiatru, energia rzek, energia ciepła pochodząca ze spalania biomasy (drewno, słoma, odpady z produkcji rolniczej), biogaz, biopaliwa oraz energia geotermalna. W ostatnich latach wzrosło w Polsce również zainteresowanie praktycznym wykorzystaniem pomp ciepła oraz innych urządzeń do odzysku ciepła w różnych procesach produkcji. Od kilku lat obserwuje się w wielu krajach Europy i Ameryki bardzo szybki wzrost udziału odnawialnych źródeł energii w krajowych bilansach energetycznych. Obecnie krajach Unii Europejskiej udział odnawialnych źródeł energii wynosi ok. 6,0%. Do roku 2010 udział ten ma wzrosnąć do ok. 12,0%. Szacuje się, że obecnie w Polsce udział odnawialnych źródeł energii wynosi ok. 2,5%, zaś według prognoz i zaleceń Unii Europejskiej udział ten w Polsce powinien wzrosnąć do 7,5% w 2010 r. i do 14,0% w 2020 r. Wobec przewidywanego rozwoju odnawialnych źródeł energii, szczególnie w rolnictwie, konieczne jest zwrócenie uwagi na stosowny poziom wiedzy w kształceniu na poziomie akademickim młodej kadry specjalistów, którzy w przyszłości będą zajmować się doskonaleniem techniki i technologii zastosowania w rolnictwie odnawialnych źródeł energii, wykorzystaniem prac naukowo badawczych i wdrażaniem ich do praktyki oraz rozwiązywaniem różnych związanych z tym problemów technicznych oraz technologicznych. W pracy zaprezentowano informację o zasobach krajowych i podziale odnawialnych źródeł energii, możliwości ich wykorzystania w różnych technologiach produkcji rolniczej oraz podano przykłady obliczeń konstrukcji urządzeń technicznych stosowanych

w tych technologiach. Omówiono sposoby magazynowania odnawialnej energii, przykłady lokalizacji i instalacji urządzeń technicznych, sposoby doboru urządzeń technicznych do różnych technologii, metody ocen energetycznych, eksploatacyjnych i ekonomicznych oraz sposoby pomiarów podstawowych parametrów pracy urządzeń wykorzystujących energię. Autorzy starali się w możliwie szerokim zakresie uwzględnić praktyczne zastosowania odnawialnych źródeł energii w rolnictwie. Praca adresowana jest do studentów, pracowników naukowo badawczych, specjalistów z zakresu ochrony środowiska naturalnego oraz osób zainteresowanych problematyką odnawialnych źródeł energii.

1. WPROWADZENIE

Udział rolnictwa w ogólnokrajowym bilansie energetycznym nie jest duży. Zużycie energii wynosi ok. 6,0% na produkcję rolniczą i ok. 9,5% na całe rolnictwo łącznie z potrzebami mieszkańców wsi. Zużycie energii i paliw w roku 1985 wzrosło półtorakrotnie z 14,7 mln ton węgla w 1975 r. do 18,6 mln ton w 1985 r. i prawie dwa i półkrotnie, w porównaniu do obecnego zużycia wszystkich paliw, wynoszącego ok. 42 mln ton.

Rolnictwo ma bardzo dobre warunki do wykorzystania odnawialnych źródeł energii. Tu istnieje duże zapotrzebowanie na niskotemperaturowe źródła energii, jest stosunkowo niskie jeszcze zanieczyszczenie atmosfery, duży potencjał energetyczny odnawialnych źródeł energii, szczególnie w zasobach biomasy, która w procesie spalania może być przetwarzana na energię cieplną oraz przetwarzana na biopaliwa. Szacuje się [Tymiński 1997], że zasoby energii pochodzącej z biomasy (tj. drewno, słoma, biopaliwa) wynoszą 500 PJ rocznie, co przy całkowitej produkcji energii w Polsce sięgającej rocznie ok. 4000 PJ, umożliwiłoby pokrycie krajowych potrzeb energetycznych o ok. 12,5%, eliminując spalanie w ok. 17,0 mln ton węgla rocznie [Tymiński 1997].

Kolektory słoneczne mogą być wykorzystywane do podgrzewania wody do celów technologicznych, sanitarnych, domowych, nawadniania roślin uprawianych pod osłonami (szklarnie, tunele foliowe), podgrzewania powietrza w urządzeniach suszarniczych, w przechowalniach produktów rolniczych oraz ogrzewania pomieszczeń domowych i produkcyjnych. Odnawialne źródła energii mogą wspomagać tradycyjne źródła energii w zintegrowanych systemach energetycznych, np. w układach: kolektor słoneczny z siłownią wiatrową, instalacją biogazowni oraz z kotłem do podgrzewania wody opalany węglem, gazem lub drewnem.

Siłownie wiatrowe znajdują w ostatnich latach coraz szersze zastosowanie w praktyce. W Polsce pracuje obecnie ok. 150 siłowni wiatrowych o mocy od 60 kW do 150 kW. Moc zainstalowanych siłowni wiatrowych wzrosła z 70 MW w 2006 r. do 123 MW w 2008 r. i do 175 MW w 2009 r.

Wyniki prac naukowo badawczych na temat kolektorów słonecznych prowadzone w Polsce od ponad 30 lat wykazały, że w niektórych technologiach produkcji rolniczej zastosowanie kolektorów słonecznych do podgrzewania powietrza w suszarnictwie produktów rolniczych, jak też w produkcji warzyw pod osłonami, pozwala na zaoszczędzenie ok. 20 - 30% energii, ciepłej pochodzącej z tradycyjnych źródeł [Pabis J. 1987, Tymiński 1997]. Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii ma wpływ nie tylko na bilans energetyczny kraju, ale ma także istotne znaczenie społeczne. Wspomaga tworzenie nowych miejsc pracy, większe wykorzystanie powierzchni gruntów na produkcję surowców przetwarzanych na biopaliwa oraz tworzenie upraw roślin energetycznych. Co godzinę wydobywa się na świecie ok. 5,0 mln ton węgla, 2,0 mln baryłek ropy (ok. 300 tys. ton) i 200 mln m³ gazu ziemnego. Zakłady energetyczne wytwarzają ok. 1,0 mld kW mocy. Ta ilość energii elektrycznej mogłaby zapewnić zasilanie 5,0 mld 100 watowych żarówek świecących przez jedną godzinę. W przeliczeniu na jednego mieszkańca ilość takiej energii [Johansson 1997] wynosi rocznie ok. 70 GJ, co odpowiada 2,5 tonom węgla lub 1,6 tonom ropy naftowej. Obecnie zużycie energii w krajach rozwiniętych wynosi 18000 kWh/ rocznie na jednego mieszkańca, podczas gdy w Polsce zużycie energii wynosi tylko ok. 7000 kWh/ rocznie na jednego mieszkańca [Mikielewicz 1998]. W Polsce ok. 75,0% energii uzyskujemy ze spalania węgla, który powoduje największe zanieczyszczenie naturalnego środowiska. Kraje rozwinięte wytwarzają ok. 10,0% energii z węgla. W Polsce roczne zapylenie produktami spalania wynosi 6,2 t/km², a produkcja tlenku siarki wynosi ok. 1 t/km² rocznie. Przykładem emisji szkodliwych produktów jest spalanie węgla w elektrowniach [Mikielewicz 1998]. Np. elektrownia o mocy 1000 MW zużywa w ciągu roku 3,5 mln ton węgla (8 wagonów na godzinę) i wytwarza oprócz energii elektrycznej: 9,0 mln ton CO₂, 120 tys. ton SO₂, 20,0 tys. ton N₂O, 75,0 tys. ton pyłów, 1,0 mln ton popiołów. Rocznie podczas spalania ok. 112 mln ton węgla we wszystkich elektrowniach w Polsce powstaje ponad 330 mln ton produktów spalania, co w przeliczeniu na jednego mieszkańca wynosi ok. 8,4 kg w ciągu roku. Przedstawione w skrócie powyższe przykłady całkowicie uzasadniają celowość wykorzystywania odnawialnych źródeł energii.

2. ODNAWIALNE ŹRÓDŁA ENERGII

Prażródłami wszystkich źródeł energii na świecie są słońce i ziemia. W wyniku działania słońca powstały paliwa kopalne, konwencjonalne tj. węgiel, ropa naftowa i gaz, zwane pierwotnymi nośnikami energii. Wtórne nośniki energii powstają z przetwarzania nośników pierwotnych, np. benzyna z ropy naftowej, koks z węgla, energia elektryczna ze spalania węgla w elektrowniach. Odnawialnymi źródłami energii są takie jej rodzaje, które pod wpływem ciągłego oddziaływania promieniowania słonecznego zostają odtwarzane. Do nich zalicza się energię wiatru, energię geotermalną, energię ruchu wody w rzekach, energię pochodzącą z takiej biomasy jak: drewno opałowe, odpady drewna, słoma, biogaz, spirytus etylowy, olej roślinny, trawy z plantacji uprawowych i inne. Niekonwencjonalnymi lub alternatywnymi źródłami energii są źródła energii pozyskiwanej przez człowieka. Należy do nich odzyskiwanie ciepła w elektrowniach, zakładach przetwórstwa żywności, odzyskiwanie ciepła z ziemi, morza, rzek, stawów oraz podczas chłodzenia mleka za pomocą pomp ciepła.

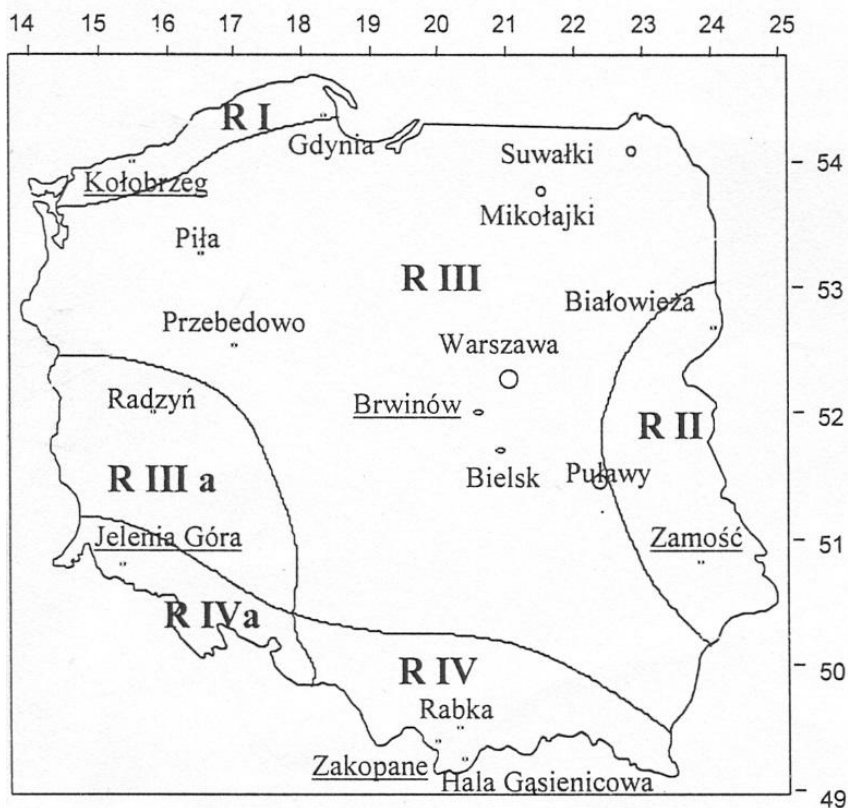
2.1. Energia Słońca

Słońce emituje w postaci ciepła energię, której strumień wynosi $3,86 \times 10^{26}$ W. Część tego strumienia ciepła, około $1,9 \times 10^{17}$ W dociera do powierzchni kuli ziemskiej. Odpowiada to gęstości strumienia ciepła 1350 W/m². Ilość energii promieniowania słonecznego docierająca do powierzchni Ziemi zależy od szerokości geograficznej, pory roku, pory dnia, zachmurzenia nieba oraz zanieczyszczenia atmosfery. Na skutek zjawisk pochłaniania i rozpraszania promieniowania w atmosferze, zachodzących nawet przy bezchmurnym niebie (pochłanianie promieniowania przez parę wodną, ozon, dwutlenek węgla, pył), do powierzchni Ziemi dociera promieniowanie słoneczne o zmniejszonym natężeniu. W Polsce, która jest położona w strefie klimatu umiarkowanego ilość energii docierającej na 1 m² powierzchni ziemi wynosi $930 - 1163$ kWh/m² rocznie. Liczba godzin rocznego nasłonecznienia w Polsce waha się od 1726 h na północy (Suwałki) do 1467 h na południu (Zakopane), średnio wynosi 1600 h rocznie. W tabeli 2.1 podano liczbę godzin dziennych i potencjalną ilość energii promieniowania słonecznego dopływającą na granicy at-

mosfery na 1 m² powierzchni dla wybranych miesięcy, półroczy i roku w trzech miejscach na obszarze Polski (Kołobrzeg, Warszawa, Zakopane). Rejonizację zasobów energii słonecznej opracowano w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej IMGW [Grzybowska 1987].

Tabela 2.1 Liczba godzin dziennych i dopływająca na granicy atmosfery potencjalna energia promieniowania słonecznego na jednostkę powierzchni [1m²] w trzech miejscach na obszarze Polski [Podęgorzki J. 1993].

Stacja aktywnościowa	Miesiące				Półrocze		Lato	Rok
	III	VI	IX	XII	IV - IX	X - III	VI - VIII	I - XII
	całkowita liczba godzin							
	744	720	720	744	4392	4375	2208	8767
	liczba godzin dziennych							
Kołobrzeg	368	515	382	229	2794	1698	1494	4492
Warszawa	368	499	380	243	2737	1745	1455	4482
Zakopane	371	484	377	258	2677	1795	1416	4472
	uśłonecznienie maksymalne [h]							
Kołobrzeg	170	300	198	63	1492	475	889	1967
Warszawa	168	283	221	90	1380	482	827	1819
Zakopane	162	240	223	131	1083	629	636	1760
	uśłonecznienie średnie [h]							
Kołobrzeg	108	218	140	34	1221	403	667	1624
Warszawa	108	231	143	29	1199	380	685	1579
Zakopane	117	157	138	51	944	523	510	1467
	uśłonecznienie minimalne [h]							
Kołobrzeg	46	120	85	11	973	255	491	1346
Warszawa	34	175	75	2	957	231	463	1288
Zakopane	66	87	72	22	765	373	373	1246
	napromieniowanie na granicy atmosfery [MJ - m ⁻²]							
Kołobrzeg	642	1253	731	161	6362	2072	3351	8434
Warszawa	685	1257	768	205	6468	2333	3564	8801
Zakopane	735	1262	810	260	6599	2655	3605	9254
	napromieniowanie całkowite maksymalne [MJ - m ⁻²]							
Kołobrzeg	354	713	376	60	3390	859	2000	4138
Warszawa	333	657	363	68	3129	843	1773	3942
Zakopane	389	633	427	115	2891	1138	1652	3977
	napromieniowanie całkowite średnie [MJ - m ⁻²]							
Kołobrzeg	257	637	319	42	3114	718	1766	3832
Warszawa	249	560	300	44	2770	710	1583	3480
Zakopane	307	474	317	79	2550	1008	1384	3558
	napromieniowanie całkowite minimalne [MJ - m ⁻²]							
Kołobrzeg	176	494	246	23	2770	590	1508	3427
Warszawa	167	447	230	27	2502	562	1328	3163
Zakopane	255	357	229	57	2185	907	1105	3145



Rys. 2.1 Rejonizacja obszaru Polski pod względem możliwości wykorzystania energii słonecznej oraz rozmieszczenia stacji aktynometrycznych. [Grzybowska A. 1987].

Na rysunku 2.1. przedstawiono wyróżnione na obszarze Polski cztery rejony:

- R 1 – pas nadmorski ograniczony izolacją $950 \text{ kWh/m}^2 \text{ rok}$ (wg stacji aktynometrycznej w Kołobrzegu),
- R 2 – wschodnia część Polski ograniczona izolacją $950 \text{ kWh/m}^2 \text{ rok}$ (wg stacji aktynometrycznej w Zamościu),
- R 3 – pozostała część Polski ograniczona od południa izolacją $900 \text{ kWh/m}^2 \text{ rok}$ (wg stacji aktynometrycznej w Brwinowie k/ Warszawy),

R 4 – południowa część Polski ograniczona od północy izolacją 900kWh/ m² rok (wg stacji aktynometrycznej w Zakopanem).

Dla rejonów R 3 i R 4 wydzielono podrejon. Uzupełnieniem mapy pokazanej na rysunku 2.1 jest tabela 2.2.

Tabela 2.2 Potencjalna energia użyteczna [kW/m² rok] dla wartości progowych gmin w wyróżnionych rejonach Polski [Grzybowska A. 1989].

Gmin W/m ²	Rejon	Rok I-XII	Półrocze letnie IV-IX	Sezon letni VI-VIII	Półrocze zimowe X-III
0	I	1076	881	497	195
	II	1081	821	461	260
	III III a	985	785	449	200
	IV	985	785	438	204
	IV a	962	682	373	280
	>tvK	IV a	950	712	393
100	I	1012	854	484	156
	II	1020	791	447	228
	III III a	915	752	433	163
	IV	918	752	422	166
	IV a	895	646	454	249
		IV a	880	676	374
200	I	903	794	454	109
	II	882	728	414	144
	III III a	797	686	401	110
	IV	796	686	391	111
	IV a	746	575	318	141
		IV a	741	606	338
300		-			-
		-	718	416	-
	I	-	650	374	-
	II III	-	608	359	-
	III a IV	-	605	346	-
	IV a	-	497	276	-
		-	516	295	-
		-			-

Dane zawarte w tabeli 2.2 i na rys.2.1 wskazują, że największy dopływ energii słonecznej w Polsce występuje na wybrzeżu (Rejon R 1) oraz we wschodniej części kraju (rejon R 2), a najniższy na południu Polski (rejon R 4). Natomiast w zimie, napromieniowanie na terenie południowej Polski jest wyższe niż w rejonach R 1 i R 3. W praktyce dla projektowania słonecznych instalacji grzewczych, istotne są sumy dzienne promieniowania słonecznego w poszczególnych miesiącach roku. W tabeli 2.3 podano wartości średnie minimalne i maksymalne promieniowania słonecznego całkowitego dziennego.

Tabela 2.3 Wartości średnie (\bar{S} , R) i średnie wartości ekstremalne (min., max.) dziennych sum promieniowania całkowitego dla reprezentowanych stacji aktynometrycznych [kWh/m²] [Podęgodzki J., Leszczyński M. 1980].

Miejscowość	H dziennie	Miesiące											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Kołobrzeg	ŚR	504	1009	2356	3745	5174	5663	5030	4417	2875	1456	640	367
	MIN	99	202	489	755	1261	1749	1272	1166	629	261	126	81
	MAX	1075	2227	4320	6237	7895	8420	7780	6888	5059	2956	1459	880
Zamość	ŚR	859	1514	2737	3720	4986	5603	5072	4485	3117	1789	1049	634
	MIN	218	386	586	899	788	1559	1422	1275	739	999	309	192
	MAX	1857	3075	4965	6764	7946	8504	7561	6788	5257	3670	2205	1393
Brwinów	ŚR	577	1127	2374	3412	4868	5951	4986	4305	276	1447	646	403
	MIN	125	230	550	726	931	1437	1336	1211	463	248	113	81
	MAX	1282	2413	4388	6364	7605	8050	7747	6540	4754	3189	1706	988
Zakopane	ŚR	927	1716	2826	3377	4033	4273	4090	3813	2761	1948	1077	721
	MIN	226	400	482	623	686	858	680	695	437	292	231	142
	MAX	1872	3156	4898	6589	7002	8088	7620	6658	5297	3559	2189	1414

Dane zawarte w tej tabeli wskazują, że największy potencjał energii słonecznej w Polsce przypada na pierwsze półroczcie (75%), na półroczcie drugie (50%). Wartości nasłonecznienia do obliczeń instalacji słonecznych (kolektorów słonecznych i ogniw fotowoltaicznych) na terenie Polski można przyjmować z danych zestawionych w tabeli 2.4.

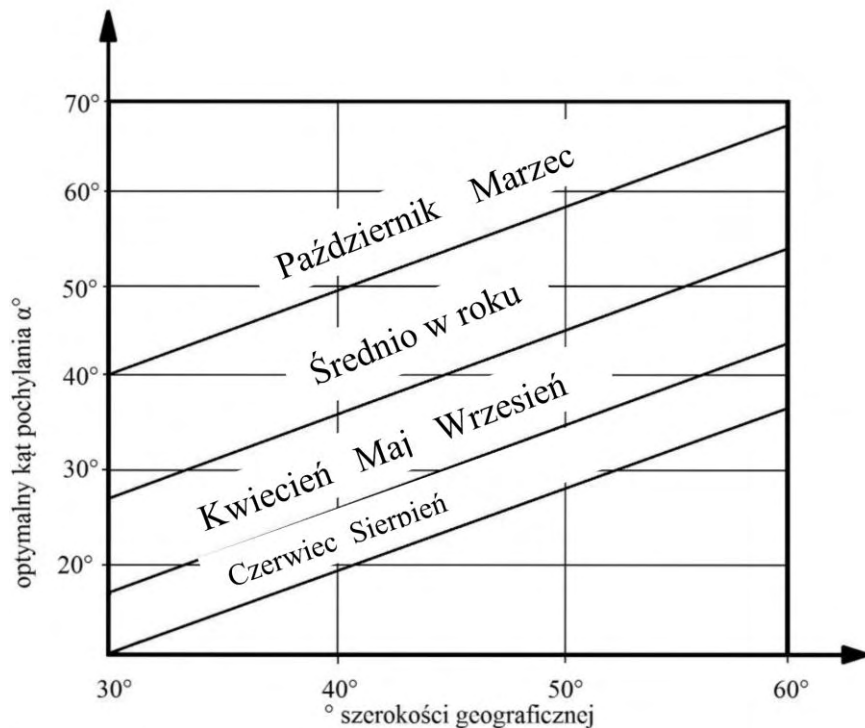
Tabela 2.4 Średnie wartości nasłonecznienia dla terenu Polski [Nowicki J. 1980].

Lp.	Wskaźniki	Pory roku		
		Cały rok I - XII	Lato IV - LX	Jesień, zima, wiosna X - III
1.	Liczba godzin nasłonecznienia, h/rok	1600	1200	400
2.	Suma nasłonecznienia, kWh/m ²	1000	775	222
3.	Średnia dzienna suma nasłonecz- nienia, kWh/m ²	2,8	4,3	1,3

Energia uzyskiwana z kolektorów słonecznych zależy nie tylko od pory roku, pory dnia, położenia geograficznego, pogody, ale również od kąta pochylenia kolektora w stosunku do poziomu lub pionu. Dla praktycznych obliczeń bardzo istotną jest znajomość ilości energii promieniowania słonecznego przypadająca na powierzchnię kolektorów pochylnych pod różnymi kątami do powierzchni poziomej. W tabeli 2.5 przedstawiono optymalne kąty pochylenia kolektora w różnych porach roku w Polsce, a na wykresie rysunek 2.2 przedstawiono optymalny kąt pochylenia kolektora w zależności od szerokości geograficznej dla różnych miesięcy oraz wartość średnioroczną.

Tabela 2.5 Optymalne kąty pochylenia kolektora słonecznego w różnych okresach jego wykorzystania w Polsce [Grzybowska A., Wysocka - Skup H. 1989].

Miesiące	Optymalny kąt nachylenia b°
I	60
II	55
III	45
IV	30
V	15
VI	10
VII	15
VIII	30
IX	45
X	55
XI	65
XII	65
IV - IX	20
I - XII	30
X - III	58
VI - VIII	18

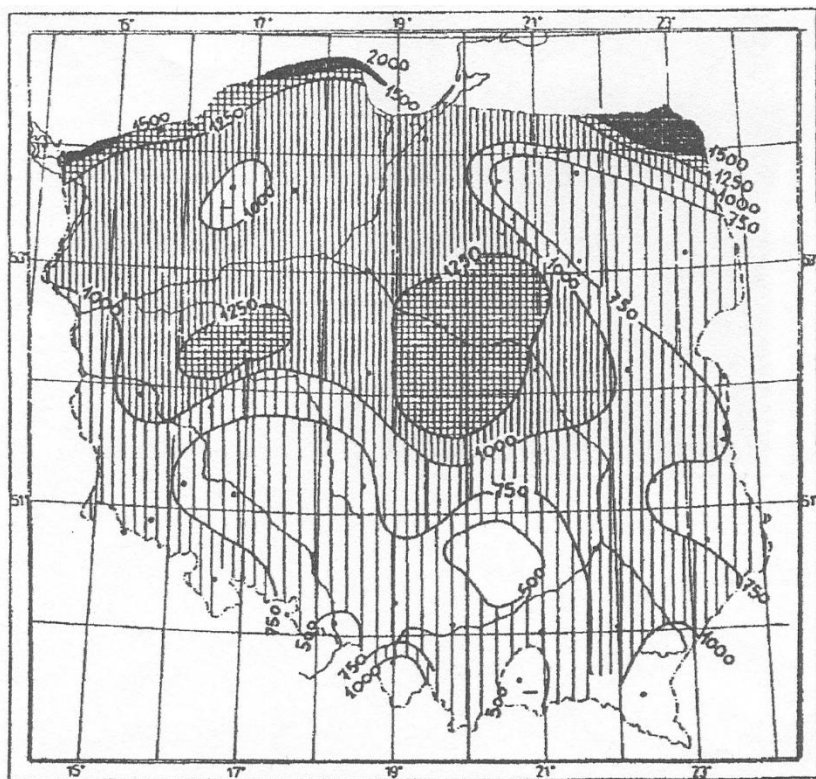


Rys. 2.2 Optymalne kąty pochyleń kolektora słonecznego w różnych okresach jego wykorzystania w Polsce [Grzybowska A., Wysocka - Skup H. 1989].

2.2. Energia wiatru

Ponad 30% obszaru Polski charakteryzuje się korzystnymi warunkami wykorzystania energii wiatru. Rejonami gdzie występują najkorzystniejsze warunki wiatrowe są: wybrzeże, pobrażę Słowińskie, Suwalszczyzna, północna część województwa warszawskiego i poznańskiego. W tych rejonach średnioroczna prędkość wiatru wynosi 5-6m/s przy potencjale energetycznym 1250 - 2000 kWh/m² rok (powierzchnia, jaką zataczają w czasie obrotu skrzydła wirnika siłowni wiatrowej). Do rejonów o średnich warunkach wiatrowych należy zaliczyć: Nizinę Mazowiecką, część Kotliny Sandomierskiej, Beskid Żywiecki i Śląski, część województwa lubelskiego i rzeszowskiego oraz okolice górskie, w któ-

rych prędkość wiatru wynosi 5m/s przy potencjale 1000 – 1250 kWh/m² rok. Na rys.2.3 przedstawiono mapę energetycznego potencjału wiatru, przy zachowaniu kryterium opłacalności np. 1000 kWh/m² rocznie na wysokości 30 m od powierzchni gruntu.



Rys.2.3 Potencjał energetyczny wiatru (kW/m²) na wysokości 30 m nad powierzchnią ziemi w terenie otwartym z przeszkodami i wysokości 2 m [Lorenc H., 1988].

Powierzchnia kraju spełniająca warunki wykorzystania energii wiatru szacowana jest na ok. 3000 km². Przy średnim rocznym wykorzystaniu siłowni wiatrowych ok. 1500 godz. rocznie wytworzona energia przypadająca na tę powierzchnie może wynosić 12 GWh rocznie. W tabeli 2.6 podano parametry energetyczne wiatru na wysokości 20 m nad poziomem ziemi dla prędkości wiatru w przedziale 4 – 16 m/s na

terenie wolnym od zabudowy i drzew. Prognozy rozwoju odnawialnych źródeł energii w Polsce, [Szeptycki2001] zakładają, że w rolnictwie wykorzystanie energii wiatru wynosiło 2,0 PJ rocznie w 2010 r. i wzrosło do 8,0 PJ w 2020 r.

Tabela 2.6 Parametry energetyczne wiatru [Kukla T. 1991].

Rejony	Potencjał energetyczny wiatru H = 20m, V = 4 - 16 m/s [kWh/m ² x rok]	Średnioroczna prędkość wiatru H = 20 m [m/s]
Rejon 1 Wybrzeże suwalskie, część ciechanowskiego	1250 - 2250	5 - 6
Rejon 2 pozańskie, ciechanowskie, część bydgoskiego, łódzkiego, warszawskiego i szczecińskiego	1000 - 1250	4,5 - 5
Rejon 3 środkowa część województw od szczecińskiego do krośnieńskiego	750 - 1000	4 - 4,5

2.3. Energia z biomasy

Rolnictwo może być potencjalnym dostawcą takich nośników energetycznych w postaci stałej jak: drewno, słoma, i trawy w postaci ciekłej, oleje roślinne, w postaci gazowej, biogaz z odchodów zwierzęcych i produkcji roślinnej. Szacuje się, [Pabis J. 2002], że zasoby energii pochodzącej z biomasy wynoszą w Polsce ok. 500 PJ rocznie, co przy całkowitej produkcji energii w Polsce wynoszącej ok. 4000 PJ rocznie umożliwiłoby pokrycie ok. 12,5%, potrzeb energetycznych w kraju eliminując spalanie ok. 17,0 mln ton węgla. Produkcja drewna w Polsce oceniana jest na ok. 22 mln m³ rocznie, z czego na drewno opałowe przypada ok. 3,8 mln m³ rocznie. W przemyśle drzewnym odpady drewna oceniane są na ok. 12,0 mln m³ rocznie, z czego na cele energetyczne można wykorzystać 50,0% czyli, 6,0 mln m³ rocznie. Z cięcia sadów (prześwieclania) i drzew terenów miejskich i rekreacyjnych można uzyskać dodatkowo ok. 1,0 mln m³ rocznie. Łącznie na produkcję energii cieplnej można byłoby wykorzystać ok. 7,0 mln m³ odpadów drewna rocznie, co za-

stąpiłoby spalanie ok. 5,5 mln ton węgla rocznie lub zużycie ok. 4000 PJ energii cieplnej. Stanowi to ok. 2,5% całkowitego wykorzystania energii cieplnej w Polsce. Wg Wójcickiego [2001] energia cieplna ze spalania biomasy (drewna i ich odpadów) w roku 2000 wynosiła 55 PJ/rok. Wg prognoz ma w 2010 r. wynosić 65 PJ.

Znaczny potencjał biomasy stanowią w Polsce trawy niewykorzystywane na paszę. Wyniki badań prowadzone przez Terlikowskiego [2010] wskazują, że potencjał ten wynosi 18,1 mln ton rocznie i przedstawia wartość energetyczną 25 PJ. Z ww. potencjału na cele energetyczne można wykorzystać 2,1 mln ton rocznie suchego siana o wartości opałowej 14,7 MJ/kg. Spalanie 1 tony siana równoważy energetycznie spalaniu 0,615 tony węgla o wartości opałowej 24MJ/kg,

Zasoby słomy z uprawy zbóż, rzepaku i kukurydzy szacuje się na ok. 30 mln ton rocznie, co równałoby się potencjałowi energetycznemu 495 PJ. Zakładając, że na cele energetyczne można by przeznaczyć 10% ogólnych zasobów, to pozyskana ze spalania biomasy energia cieplna wynosiłaby 49,5 PJ rocznie [Pabis J. 2002].

Oleje roślinne mogą być mieszane z olejem napędowym lub stanowić jego zamiennik. Z jednej tony nasion rzepaku uzyskuje się ok. 370 kg oleju. Zakładając wykorzystanie 50% zbioru rzepaku na paliwo płynne, to z 1,6 mln ton rzepaku w Polsce można uzyskać ok. 630 tys. ton oleju o wartości energetycznej 7,7 PJ. Warunki glebowe w Polsce pozwalają na produkcję rzepaku na ok. 30% powierzchni użytków rolnych. Wg prognoz Tyminskiego [1997] przewiduje się w 2030 przeznaczenie na cele energetyczne areалу uprawy rzepaku o pow. 500 tyś. ha, z którego można wyprodukować 485 tys. ton biopaliwa o wartości energetycznej 17 PJ. Alkohol produkowany z ziemniaków, buraków cukrowych, zbóż, melasy i owoców może być wykorzystywany na cele energetyczne, jako dodatek do benzyn. Polskie rolnictwo może wyprodukować surowce potrzebne do wytwarzania w ciągu roku ok. 250 mln litrów alkoholu o średniej wartości opałowej 27 MJ/kg i wartości energetycznej 5,4 PJ, przeznaczanego na cele napędowe. Prognozy wzrostu potencjału produkcji etanolu zakładają, że do 2030 r. ilość energii, uzyskana z produkcją etanolu będzie wynosiła 16,9 PJ.

W wyniku fermentacji metanowej płynnych odchodów zwierzęcych, ścieków miejskich i wysypisk śmieci uzyskuje się biogaz. Największe możliwości produkcji biogazu mają gospodarstwa rolne. Wg Romaniuka [1995] w gospodarstwach rolnych powstaje ok. 38 mln m³ gnojowicy i 51 mln ton obornika. Pozyskiwana rocznie objętość obornika wynosi 85 mln m³. Z 1 m³ płynnych odchodów można uzyskać przeciętnie 20 m³

biogazu, a z 1 m³ obornika 30 m³ biogazu. Rocznie z odchodów zwierzęcych można w Polsce uzyskać 33,10 mln m³ biogazu. Wg Myczki [1995] możliwości te są większe i mogą wynosić ok. 38 mln m³ biogazu o wartości energetycznej 8,75 PJ. W Polsce jest ok. 800 zorganizowanych wysypisk o powierzchni ok. 2900 ha. Z wysypiska o powierzchni 15 ha i masie składowanych odpadów ok. 180 tyś. ton można [Nowakowski 1995] uzyskać w ciągu roku 20 – 60 GWh energii cieplnej. Prognozuje się, że ze 100 wysypisk potencjał energetyczny wyniesie rocznie 7,2 PJ, a łączny potencjał energetyczny pozyskiwanego biogazu w Polsce może rocznie osiągnąć ok. 16 PJ.

2.4. Pompy ciepła w energetyce cieplnej

Zasada działania pompy ciepła jest podobna do działania chłodziarki. Realizują one ten sam obieg termodynamiczny. Różnica pomiędzy pompą ciepła a chłodziarką polega na sposobie przenoszenia ciepła. W chłodziarce ciepło przenoszone jest z układu o temperaturze niższej do układu o temperaturze wyższej, kosztem energii dostarczonej z zewnątrz. W pompie ciepła, ciepło pobierane jest z układu o temperaturze niższej i przenoszone jest do układu o temperaturze wyższej również kosztem energii dostarczonej z zewnątrz. Doprowadzenie energii i wykonanie pracy pozwala na podwyższenie temperatury czynnika krążącego w obiegu i wykorzystanie ciepła, które może być odebrane przy temperaturze wyższej. Nazwa pompy ciepła pochodzi od analogii do pompy wodnej, która w wyniku dostarczenia energii z zewnątrz przetłacza wodę z niższego poziomu na wyższy. Pompy ciepła znajdują coraz szersze zastosowanie do ogrzewania budynków mieszkalnych. W rolnictwie mogą znaleźć ich zastosowanie do odzysku ciepła w budynkach inwentarskich oraz w produkcji warzyw pod okryciami (szklarnie i tunele foliowe).

2.5. Wody geotermalne

Wody geotermalne występują w Polsce na obszarze 251000 km². Znajduje się tu ok. 6687 km³ wód geotermalnych o potencjale energetycznym 34,7 mld t.p.u (ton paliwa umownego) [Sokołowski 2002]. Polska należy do krajów o średnich zasobach wód geotermalnych. Wg

Mikielewicz [1998], dotychczas zbadane i udokumentowane wody geotermalne występują głównie:

- na obszarze Niziu Polskiego o zasobach 6225 km² wód geotermalnych i temperaturach 20 ° C - 120 ° C, zawierających energię cieplną rzędu 32,4 mld t.p.u,
- na obszarze zapadliska karpackiego o zasobach 360 km² wód geotermalnych i temperaturach 35 ° C - 120 ° C, zawierających energię cieplną 1,5 mld t.p.u,
- w rejonie Karpat Polskich o zasobach ok.100 km² wód geotermalnych i temperaturach 35 ° C - 120 ° C, zawierających energię cieplną ok. 700 mln t.p.u.

Tabela 2.7 Efektywne zasoby małej energetyki wodnej dla wybranych województw [Tymiński J. 1997].

Województwo	Zasoby MEW w GWh/a przy spiętrzeniach	
	Istniejących	Planowanych
Bielskie	13,5	35,9
Bydgoskie	32,6	11,4
Gdańskie	28,7	12,8
Jeleniogórskie	41,2	19,9
Opolskie	28,4	32,1
Wałbrzyskie	10,0	59,8
Zielonogórskie	54,8	0,4

Wg Tymińskiego [1997] szacuje się, że potencjał wód geotermalnych w Polsce wynosi ok. 100 PJ.

2.6. Energia wód

Hunder [2003] podaje, że w 1999 pracowało w Polsce 472 małych elektrowni wodnych MEW o mocach poniżej 10 MW, z których 399 MEW to elektrownie będące własnością prywatną lub własnością spółek i spółdzielni Sumaryczna moc wszystkich MEW, będących własnością energetyki, wynosi ok.127 MW, prywatnych ok. 40 MW, łącznie ok. 167 MW. W tabeli 2.7 przedstawiono efektywne zasoby MEW dla wybranych wo-

jewództw. Szacuje się, że obecnie produkcja energii elektrycznej w MEW wynosi w Polsce ok. 705 GWh rocznie.

Literatura:

- [1]. Gołębiowski S., Krzemień Z. 1998. *Przewodnik inwestora małej elektrowni wodnej*. Biblioteka Fundacji Poszanowania Energii.
- [2]. Grzybowska A. 1987. *Charakterystyka promieniowania słonecznego na przykładzie Warszawy, jako próba wyboru parametrów do oceny zasobów krajowych* Instytut Budownictwa Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa (IBMER), XXXI 246, 5, Warszawa.
- [3]. Grzybowska A., Wysocka-Skup H. 1989. *Zasoby energii słonecznej w Polsce*. Opracowanie wytycznych do lokalizacji i konstrukcji kolektorów słonecznych na obszarze Polski. IBMER, Warszawa.
- [4]. Kulik T. 1987. *Budowa kolektora słonecznego i wstępne badania suszenia ziarna zbóż w silosie zbożowym o tadowości 30 ton*, IBMER, Warszawa.
- [5]. Lorenc H. 1988. *Charakterystyka warunków wiatrowych dla potrzeb lokalizacji siłowni wiatrowych*. IMGW.
- [6]. Mikieliewicz J. 1999. *Perspektywy energetyki odnawialnej w Polsce w świetle wytycznych Unii Europejskiej*. Ogólnopolskie Forum Odnawialnych Źródeł Energii (materiały konferencyjne) Warszawa.
- [7]. Myczko A. 1995. *Stan i perspektywy mechanizacji produkcji zwierzęcej*. IBMER, Warszawa
- [8]. Nowakowski J. 1995. *Technologie pozyskiwania biogazu dla celów energetycznych*. Trzecia Konferencja: Racjonalizacja użytkowania energii i środowiska. (Materiały konferencyjne)
- [9]. Nowicki J. 1980. *Promieniowanie słoneczne, jako źródło energii*. Arkady, Warszawa.
- [10]. Orliński J., Piechocki J. 1998. *Możliwość zastosowania pomp ciepła w rolnictwie*. Konferencja pt. Wykorzystanie energii odnawialnej w rolnictwie. Materiały konferencyjne. IBMER
- [11]. Pabis J. 1987. *Kolektory słoneczne uzupełniające źródło energii w rolnictwie*. IBMER, Warszawa.
- [12]. Pabis J. 2002. *Możliwości wykorzystania energii słońca w rolnictwie – współdziałanie kolektorów słonecznych z innymi źródłami energii*. Czysta Energia nr 10. ABRYS. Poznań.

- [13].Podegrodzki J. Leszczyński M. 1982. *Warunki klimatyczne Polski dla potrzeb energetyki słonecznej*. Mechanizacja Rolnictwa nr 1 PWRiL, Warszawa.
- [14].Podegrodzki J. 1989. *On solar energy resources in Poland during vegetation period*. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych z. 369.
- [15].Romaniuk W., Głaszczka A. 2000. *Utylizacja gnojowicy przez jej kompostowanie z odpadami organicznymi*. Problemy Inżynierii Rolniczej nr 3 (17).
- [16].Sokołowski J. 2002. *Geotermia w rolnictwie*. Czysta Energia nr 1. ABRYS, Poznań.
- [17].Szeptycki A. 2001. *Odnawialne źródła energii – szansa dla rolnictwa i obszarów wiejskich*.
- [18].Materiały konferencyjne. *Odnawialne źródła energii u progu XXI wieku*. IBMER – ECBREC, (Europejskie Centrum Energii Odnawialnej) Warszawa.
- [19].Twardy L.1994. *Opłacalność zastosowania pomp ciepła w gospodarstwie hodowlanym*. Materiały konferencyjne, IBMER Warszawa
- [20].Terlikowski J. 2010. *Materiały konferencyjne, XVI Międzynarodowa Konferencja Naukowa pt. „Problemy intensyfikacji produkcji zwierzęcej z uwzględnieniem struktury obszarowej gospodarstw rodzinnych, ochrony środowiska i standardów UE”*. Instytut Technologiczno-Przyrodniczy, Warszawa
- [21].Tymiński J. 1997. *Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w Polsce do 2030 r. – aspekty energetyczne i ekologiczne*. (Monografia) IBMER, Warszawa.

3. WYKORZYSTANIE ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII W ROLNICTWIE

Kolektory słoneczne wszystkich typów, zarówno do podgrzewania wody i podgrzewania powietrza, mogą znaleźć w rolnictwie szerokie zastosowanie. Rolnictwo, bowiem charakteryzuje się dużym zapotrzebowaniem na niskotemperaturowe źródła energii w różnych technologiach produkcji rolniczej oraz w gospodarstwach domowych, a mianowicie do:

- podgrzewania wody użytkowej do celów technologicznych w technologiach produkcji żywności, do celów sanitarnych w gospodarstwach domowych,
- podgrzewania wody użytkowej do nawadniania i deszczowania roślin produkowanych pod osłonami (szklarnie i tunele foliowe),
- podgrzewania wody użytkowej w budynkach inwentarskich do przygotowywania paszy dla zwierząt oraz w zbiornikach wodnych do hodowli ryb i narybku,
- podgrzewania powietrza w urządzeniach suszarniczych oraz przechowalniach warzyw (obsuszanie warzyw po zbiorze) i owoców,
- podgrzewania powietrza w budynkach inwentarskich (chlewnie, obory, stajnie, kurniki) i mieszkalnych,
- zastosowanie do napędu urządzeń sterujących, sygnalizacyjnych i aparatury kontrolno-pomiarowej ogniwami fotowoltaicznymi,
- do współpracy z innymi odnawialnymi i tradycyjnymi źródłami energii w energetycznych w systemach zintegrowanych (kolektory słoneczne z pompami ciepła i siłowniami wiatrowymi, kolektory słoneczne z biogazowniami i kotłami opalanymi węglem).

Wykorzystywanie energii wiatru datuje się od ponad 2000 lat. W większości siłownie wiatrowe wykorzystywane były w rolnictwie do osuszania mokradeł, nawadniania pól, napędu młynów zbożowych, pił do cięcia drewna i tłoczenia oleju. Obecnie siłownie wiatrowe wykorzy-

stywane są do produkcji energii elektrycznej, napędu pompowni wiatrowych, napędu kompresorów do natleniania wód w zbiornikach wodnych i jeziorach oraz w zintegrowanych systemach energetycznych do współpracy z innymi odnawialnymi i tradycyjnymi źródłami energii.

Pod pojęciem biomasy rozumie się materię pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, która ulega biodegradacji, substancje pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz leśnej, a także przemysłu przetwarzającego ich produkty oraz inne części odpadów, które ulegają biodegradacji. Biomasa pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego można wykorzystać na cele energetyczne przez spalanie, fermentację metanową (biogaz), produkcję biopaliw jak też na produkcję nawozów przez kompostowanie. Może ona pochodzić z celowego działania człowieka w uprawach roślinnych tj. zboża, rzepaku, burak cukrowych, ziemniaków, z tzw. plantacji wikliny, plantacji traw, produkcji sadowniczej, zieleni miejskiej, odpadów leśnych oraz jako organiczne pozostałości i odpady z produkcji rolniczej [Pabis J. 2002], są to:

- pozostałości roślin uprawowych, np. słoma zbożowa, rzepakowa, kukurydziana, osadki kukurydzy i inne,
- odpady w produkcji leśnej i przemyśle drzewnym,
- odpady zwierzęce, (tłuszcze z mięsa wieprzowego, wołowego, kurzego), odchody, gnojowica,
- odpady organiczne komunalne.

Biomasa w produkcji rolniczej może być wykorzystana w szerokim zakresie do celów energetycznych poprzez jej spalanie. A więc z drewna opałowego, odpadów drewna w produkcji leśnej i przemyśle drzewnym, słomy i traw. Biomasa można spalać w piecach, kotłach wodnych i parowych, podgrzewaczach powietrza, stosowanych do ogrzewania domów mieszkalnych, kotłowni osiedlowych, w suszarnictwie rolniczym, przetwórstwie rolno-spożywczym, owocowo-warzywnym, do ogrzewania szklarni i tuneli foliowych oraz w innych technologiach produkcji rolniczej. Biomasa może też być wykorzystana do produkcji energii cieplnej podczas pirolizy i gazyfikacji drewna, odpadów drewna w postaci trocin, wiórów, zrębków i kory.

Do celów energetycznych wykorzystywane są również odchody zwierzęce, oczyszczalnie ścieków, wysypiska śmieci, odpady w produkcji roślinnej na drodze fermentacji metanowej, z której uzyskuje się biogaz oraz bardzo dobry nawóz. Biogaz uzyskiwany ze spalania biomasy,

stosowany jest do ogrzewania pomieszczeń w budynkach mieszkalnych, pomieszczeń produkcyjnych, podgrzewania wody użytkowej oraz w silnikach spalinowych. W ostatnich latach nastąpił szybki rozwój stosowania biopaliw uzyskiwanych z przetwarzania nasion roślin oleistych na paliwa płynne oraz etanolu (spirytusu odwodnionego), uzyskiwanego z przetwarzania zbóż, ziemniaków, buraków i melasy.

Pompy ciepła absorpcyjne lub sprężarkowe wykorzystują dolne i górne źródła ciepła. Dolnymi źródłami ciepła są: grunt, wody powierzchniowe, jeziora, rzeki, zbiorniki wodne, morze, stawy, wody gruntowe, powietrze, promieniowanie słoneczne, obornik, woda odpadowa, ścieki i gazy odlotowe. Górnymi źródłami ciepła są powietrze odlotowe w urządzeniach grzewczych, w różnych technologiach przetwórstwa spożywczego, suszarnictwie, klimatyzacji, ogrzewaniu szklarni oraz woda w systemach grzewczych. Pompy ciepła znajdują coraz szersze zastosowanie w rolnictwie np. w chłodziarkach mleka, w podgrzewaniu wody użytkowej do celów sanitarnych i technologicznych, ogrzewaniu pomieszczeń mieszkalnych, ogrzewanie szklarni i tuneli foliowych przy odzyskiwaniu ciepła z głębokiej ściółki do kształtowania mikroklimatu w chlewni [Nawrocki 2003], oraz w zintegrowanych systemach energetycznych, np. współpraca kolektora słonecznego do podgrzewania wody z pompą ciepła do nawadniania roślin i ogrzewania podłoża w szklarniach i tunelach foliowych.

W bilansie energetycznym kraju udział energii wody małych elektrowni wodnych (MEW) jest niewielki. Obecnie pracuje w Polsce ok. 500 małych elektrowni wodnych o łącznej mocy 127 MW. Oprócz produkcji energii elektrycznej dla potrzeb lokalnych, zasilających odbiorców energii niepodłączonych do krajowej sieci, małe elektrownie wodne stanowią rezerwowe źródło energii, [Hunder 2003]. Spełniają one szereg funkcji. Wpływają na retencję powierzchniową i gruntową wody, stabilizację stosunków wodnych, punkty czerpania wody, napowietrzanie wody, filtracją (siatki, kratownice) wody pod urządzeniami piętrzącymi i obok nich. Piętrzenie wody i małe zbiorniki dla potrzeb MEW zmieniają stosunki wodne, co może oddziaływać na obszary rolnicze, gospodarkę rybną, oraz chronić przed powodzią. Małe elektrownie wodne zlokalizowane na terenach rolniczych mogą także sprzyjać tworzeniu terenów rekreacyjnych. Polska zaliczana jest do krajów o średnich zasobach wód geotermalnych, których temperatura wynosi 20 °C. Wodami geotermalnymi można ogrzewać budynki mieszkalne w osiedlach, w małych miastach, ośrodki rekreacyjne, szklarnie i tunele foliowe, podłoża w szklarniach, oraz nawadniać rośliny w szklarniach i tunelach folio-

wych. Wody geotermalne znajdują również zastosowanie w przetwórstwie rolno-spożywczym i owocowo-warzywnym, także do celów sanitarnych w gospodarstwach hodowlanych, w gospodarstwach domowych, w zbiornikach hodowli ryb i narybku oraz w basenach kąpielowych.

Literatura:

- [1]. Dziekońska E. 1998. *Problemy przestrzenne wykorzystania energii odnawialnej*. Ogólnopolskie Forum Odnawialnych Źródeł Energii, Warszawa.
- [2]. Hunder M. 2003. *Odnawialne źródła energii, jako element rozwoju lokalnego*. Przewodnik dla samorządów terytorialnych i inwestorów. ECBREC. IBMER, Warszawa.
- [3]. Pabis J. 2002. *Możliwości wykorzystania energii słońca w rolnictwie*. Czysta Energia nr 10. ABRYS, Poznań.
- [4]. Tyminski J. 1987. *Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w Polsce do roku 2030 – aspekty energetyczne i ekologiczne*. IBMER, Warszawa.

4. ENERGIA SŁONECZNA

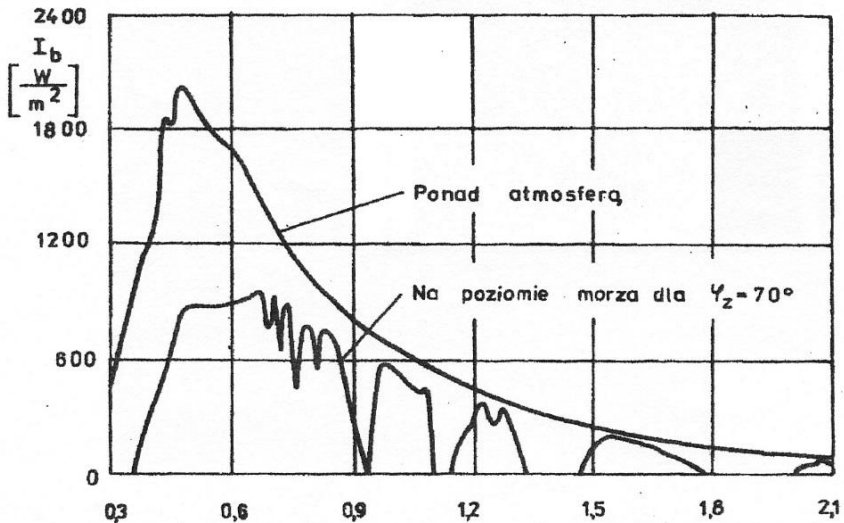
W wyniku reakcji jądrowych zachodzących we wnętrzu słońca, słońce wypromieniowuje w przestrzeń kosmiczną, strumień mocy wynoszący $2,81 \cdot 10^{17}$ GW. Z tego strumienia mocy do atmosfery dociera ok. 1,73 GW, co odpowiada gęstości strumienia ciepłego $1,4 \cdot 10^3$ W/m² [Nowicki 1980]. Gęstość strumienia ciepła promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię prostopadłą do kierunku padania promieni słonecznych, znajdującą się poza atmosferą ziemską i w średniej odległości Ziemia - Słońce, nazwana została stałą słoneczną. Została ona ustalona przez Międzynarodową Komisję Promieniowania w Toronto i Paryżu w 1957 r. i wynosi ona $q_0 = 1367$ W/m². Wartość ta zmienia się w ciągu roku w granicach od 3,4% do minus 3,4%, w zależności od odległości Ziemi od Słońca. Promieniowanie słoneczne dociera do Ziemi w postaci fal elektromagnetycznych o różnej długości od 0,15 nm - 120 nm, z czego ok. 99,5% całej energii promieniowania przypada na fale o długości od 0,22 - 5,0 nm [Gogół 1993]. Promieniowanie słoneczne można podzielić na krótkofalowe:

- ultrafioletowe o długości fali 0,15 - 0,4 nm (7,0% energii),
- widzialne o długości fali 0,4 - 0,75 nm, (45,0% energii),
- podczerwone o długości fali 0,74 - 4,0 nm (47,0% energii),
- długofalowe o długości fali 4,0 - 12,0 nm. (1,0% energii).

Promieniowanie słoneczne docierające do powierzchni Ziemi ulega częściowemu rozproszeniu, zostaje pochłonięte przez gazy atmosferyczne oraz zanieczyszczenia zawarte w powietrzu. Całkowite promieniowanie słoneczne docierające do powierzchni Ziemi jest sumą promieniowania bezpośredniego oraz rozproszonego i zależy od szerokości geograficznej i zanieczyszczenia atmosfery. Fale elektromagnetyczne docierające do powierzchni ziemi wywołują różne reakcje:

- foto termiczną - przetwarzanie energii promieniowania słonecznego na ciepło,
- fotowoltaiczną (fotoelektryczną) - przetwarzanie energii słonecznej na energię elektryczną,
- fotosyntezę (fotochemiczną) - przetwarzanie energii słonecznej na energię związków chemicznych, np. w roślinach.

Na rysunku 4.1 przedstawiono widmo promieniowania słonecznego ponad atmosferą i na poziomie morza, gdy kierunek promieniowania słonecznego odchylony jest od zenitu o kąt $\varphi_z = 70^\circ$.



Rys. 4.1 Widmo promieniowania słonecznego [Andersen B. 1979].

Każdy obiekt na Ziemi poddany jest promieniowaniu słonecznemu bezpośredniemu i rozproszonemu. Całkowite natężenie promieniowania słonecznego docierające do powierzchni Ziemi jest sumą promieniowania słonecznego bezpośredniego i rozproszonego:

$$q^c = q^b + q_r, \text{ W/m}^2 \quad (4.1)$$

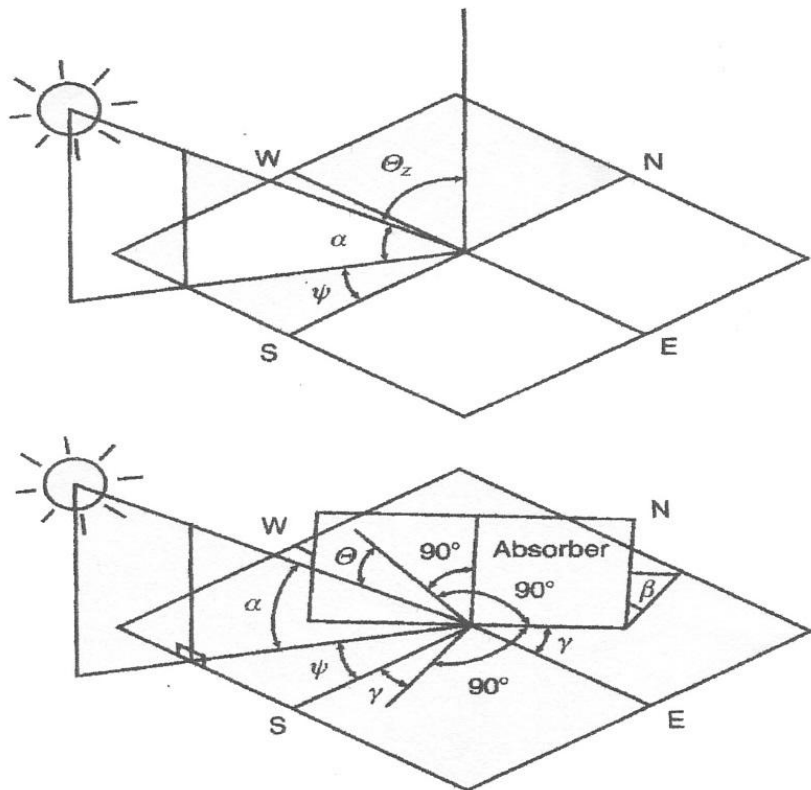
gdzie:

q_b – natężenie promieniowania bezpośredniego, W/m^2 ,

q_r – natężenie napromieniowania rozproszonego, W/m^2 .

4.1. Przemiana energii promieniowania słonecznego na energię ciepłą

Promieniowanie słoneczne obejmuje szerokie pasmo promieniowania różnej długości fali 03 – 1,5 nm i natężeniu $1,9 \cdot 10^{17}$ W. Promieniowanie podczerwone występujące w zakresie długości fal $\lambda > 0,75$ nm promieniowania niewidzialnego nazwane jest często promieniowaniem cieplnym. Właściwość ta ma podstawowe znaczenie w wykorzystaniu energii promieniowania słonecznego, przekształceniu jej w urządzeniach zwanych kolektorami słonecznymi na energię ciepłą. Promieniowanie podczerwone podlega prawom odbicia, załamania oraz pochłaniania i jest emitowane przez ciała stałe, ciekłe i gazowe. Natężenie promieniowania, będące promieniowaniem elektromagnetycznym, może być rozpatrywane, jako strumień fotonów. Największą zdolność pochłaniania lub zdolność absorpcji napromieniowania mają ciała czarne oraz warstwy selektywne, pokrywające absorbery kolektorów słonecznych. Promienie podczerwone mają jeszcze inną ważną dla praktyki właściwość. Przenikają, bowiem w głąb naświetlonego materiału porowatego wpływając na cyrkulację gazów w jego porach. Szybko wzrasta także temperatura warstw położonych głębiej [Malicki 1977]. Gęstość strumienia promieniowania słonecznego bezpośredniego, padającego na płaską powierzchnię kolektora, zależy od miejsca usytuowania kolektora na kuli ziemskiej i kąta jego pochylenia do powierzchni Ziemi. Geometrię pozornego ruchu Słońca w stosunku do kolektora przedstawiono na rys. 4.2.



Rys. 4.2 Geometria ruchu słońca w stosunku do kolektora(absorbera): Θ - kąt padania, Θ_z - kąt zenitu, β - kąt nachylenia kolektora do poziomu, γ - kąt odchylenia od kierunku południowego, α - kąt wysokości Słońca nad horyzontem, Ψ - kąt azymutu [Wiśniewski G. 2001].

Cykliczne, zmienne w ciągu roku, godzinowe natężenie promieniowania padające na prostopadłą do poziomu powierzchnię, opisuje równanie:

$$q_h = \left(\frac{r_0}{r} \right) q_0 \cos \Theta, \text{ W/m}^2 \quad (4.2)$$

gdzie:

- q_h – natężenie promieniowania, W/m^2 ,
- r_0 – średnia odległość Ziemi od Słońca, km,
- r – odległość Ziemi od Słońca w rozpatrywanym czasie, km,
- q_0 – średnie natężenie promieniowania na zewnątrz atmosfery (stała słoneczna), W/m^2 ,
- θ – kąt padania promieni słonecznych na kolektor, stopnie.

Uwzględniając ruch Ziemi wokół Słońca oraz nachylenie osi ziemskiej, zmienny kąt padania można wyznaczyć z równania:

$$\cos \theta = \cos(\alpha + \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta \quad (4.3)$$

gdzie:

- δ – deklinacja słoneczna, stopnie,
- φ – szerokość geograficzna, stopnie,
- β – kąt pochylenia kolektora w stosunku do poziomu, stopnie,
- ω – kąt obrotu Ziemi wokół osi, mierzony pomiędzy południkiem lokalizacji powierzchni kolektora, a południkiem, przez który przechodzi promień słoneczny skierowany na oś ziemską o danej godzinie (jedna godzina odpowiada kątowi obrotu Ziemi. $\omega = 15^\circ$).

Po podstawieniu do równania (4.2) wartości $\cos \theta$ otrzymujemy z równania (4.3) równanie natężenia promieniowania:

$$q_h = q_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 [\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta], W/m^2 \quad (4.4)$$

Równanie to wyraża zmienne natężenie promieniowania słonecznego nieruchomego kolektora słonecznego, nachylonego do poziomu pod kątem φ szerokości geograficznej kąta β nachylenia kolektora. Przyjmując, że;

$$\gamma = \varphi - \beta$$

gdzie:

γ – kat określający orientację kolektora względem kierunku północ – południe,

otrzymujemy:

$$q_h = q_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 (\cos \gamma \cos \delta \cos \omega + \sin \gamma \sin \delta), \text{ W/m}^2 \quad (4.5)$$

Natężenie promieniowania słonecznego jest bezpośrednio zależne od szerokości geograficznej φ . Jeżeli kolektor usytuowany jest na płaszczynie poziomej wtedy $\beta = 0$, a równanie (4.5) ma postać:

$$q_h = q_0 \left(\frac{r_0}{r} \right) \cos \varphi \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta, \text{ W/m}^2 \quad (4.6)$$

W obliczeniach kolektorów słonecznych należy uwzględnić zarówno promieniowanie bezpośrednie padające na kolektor, jak też promieniowanie rozproszone oraz powierzchnie otoczenia kolektora mogące odbijać promieniowanie w kierunku kolektora. Średnie natężenie promieniowania, padające w ciągu roku na powierzchnię kolektora nachylnego do poziomu oblicza się z równania [Kaiser 1979]:

$$q_h = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_p} \left(q_{hp} - q_{hrp} \right) + \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) q_{hrp} + \frac{1}{2} (1 - \cos \beta) q_{hrp} \rho \frac{F_{ot}}{F_{ab}}, \text{ W/m}^2 \quad (4.7)$$

gdzie:

θ – kąt padania promieni na kolektor nachylony, stopnie,

θ_p – kąt padania na kolektor poziomy, stopnie,

q_{hp} – średnie godzinowe natężenie promieniowania bezpośrednio padającego na kolektor poziomy W/m^2 ,

q_{hrp} – średnie godzinowe napromieniowanie na kolektor poziomy powstające w wyniku promieniowania rozproszonego, W/m^2 ,

- F_{ot} - szacunkowa powierzchnia otoczenia, odbijająca promienie padające w kierunku kolektora, m²,
 F_{ab} - powierzchnia kolektora, m,
 p - bezwymiarowy współczynnik odbicia od otoczenia.

W tabeli 4.1 przedstawiono wartości współczynnika odbicia promieniowania słonecznego ρ dla różnych powierzchni.

Tabela 4.1 Współczynniki odbicia promieniowania słonecznego dla niektórych materiałów [Nowicki J. 1980].

Rodzaj materiału lub powierzchni	Współczynnik odbicia, %
Aluminium czyste	89
Aluminium handlowe	80
Chrom	51
Cynk polerowany	54
Duraluminium	55
Konstantan	64
Lustro szklane	88
Miedź polerowana	82
Nikiel polerowany	60
Stal	58
Stal chromowana	54
Stal ocynkowana	64
Stal ocynowana	49
Stal posrebrzana	91
Metal srebrzony elektrolitycznie	96

Z równania (4.7) można obliczyć natężenie napromieniowania kolektora wykorzystanego do podgrzewania wody. Przed obliczeniem powierzchni kolektora należy obliczyć natężenie promieniowania z równania:

$$q_{uz} = q_c R_k \alpha \varphi_p - k \Delta t, W/m^2 \quad (4.8)$$

gdzie:

q_c – całkowite natężenie napromieniowania powierzchni poziomej, W/m^2 ,

R_k – współczynnik korekcyjny zależny od szerokości geograficznej, pory roku, i kąta pochylenia kolektora do poziomu,

a – współczynnik absorpcji powierzchni płyty pochłaniającej,

φ_p – współczynnik przepuszczalności promieniowania,

K – współczynnik przenikania ciepła, $W/(m^2 K)$,

Δt – przyrost temperatury, K.

$$R_k = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_p} \quad (4.9)$$

Wartości współczynnika korekcyjnego dla Warszawy i Zakopanego, różnych kątów pochylenia kolektora do poziomu oraz pór roku przedstawiono w tabeli 4.2. Ciepło potrzebne do podgrzewania powietrza lub wody, można obliczyć z równania:

$$q_w = V_w \gamma_p c (t_2 - t_1), J \quad (4.10)$$

gdzie:

V_w – natężenie przepływu powietrza lub wody przez kolektor, m^3/s ,

γ_p – gęstość powietrza lub wody, kg/m^3 ,

c – ciepło właściwe powietrza lub wody, $J/(kg K)$,

t_1 – temperatura powietrza lub wody na wlocie do kolektora, stopnie,

t_2 – temperatura powietrza lub wody na wylocie z kolektora, stopnie.

Tabela 4.2 Wartości współczynnika korekcyjnego R_k dla Warszawy i Zakopanego [Pabis J. 1987].

Miejscowość	Pory roku	Kąt β pochylenia kolektora względem poziomu terenu				
		20°	30°	40°	50°	60°
Warszawa	kwiecień, maj – wrzesień	1,242	1,308	1,334	1,318	1,262
	czerwiec – sierpień	1,166	1,198	1,192	1,149	1,071
	kwiecień – wrzesień	1,203	1,251	1,261	1,230	1,163
	październik – marzec	1,741	2,038	2,273	2,438	2,530
	cały rok	1,377	1,505	1,588	1,623	1,608
Zakopane	kwiecień, maj – wrzesień	1,210	1,261	1,273	1,247	1,184
	czerwiec – sierpień	1,141	1,160	1,144	1,093	1,009
	kwiecień – wrzesień	1,173	1,208	1,206	1,167	1,092
	październik – marzec	1,629	1,874	2,061	2,186	2,245
	cały rok	1,333	1,441	1,505	1,524	1,496

Dla obliczonej wartości zapotrzebowania ciepła i przyjętej z tabeli 2.4 użytecznej gęstości strumienia ciepłego q , można obliczyć powierzchnię kolektora uwzględniając współczynnik rezerwy X (w małych kolektorach $X = 1,5$, a w dużych o $F > 10$ m, $X = 1,25$)

$$F_k = \frac{q_w}{q_{uż}} \chi, \text{m}^2 \quad (4.11)$$

gdzie:

χ - współczynnik rezerwy (w małych kolektorach $\chi = 1,5$, w dużych np. o powierzchni

$$F_k > 10 \text{ m}^2 \quad \chi = 1,25)$$

4.2. Bilans cieplny kolektora słonecznego

Bilans cieplny kolektora określamy, jako ilość energii cieplnej, doprowadzonej do powierzchni kolektora w wyniku promieniowania słonecznego, oraz uzyskanej z kolektora energii cieplnej użytecznej i strat cieplnych. Bilans cieplny opisuje równanie:

$$F_k (I R q_b + I R q_r) = Q_{uz} + Q_{st} + Q_{ak} \quad (4.12)$$

gdzie:

F_k - powierzchnia czynna kolektora, m²,

I - natężenie promieniowania słonecznego bezpośredniego lub rozproszonego padającego na powierzchnię kolektora o dowolnym położeniu, W/m²,

q_b - natężenie promieniowania bezpośredniego W/m²,

q_r - natężenie promieniowania rozproszone, W/m²,

R - współczynnik geometryczny do przeliczania gęstości strumienia promieniowania do padającego na płaszczyznę poziomą kolektora i na płaszczyznę pochyloną pod kątem do płaszczyzny poziomej,

Q_{uz} - ciepło przyjęte przez przepływający przez kolektor czynnik roboczy, J,

Q_{st} - straty ciepła do otoczenia na skutek przewodnictwa, konwekcji i promieniowania, J,

Q_{ak} - ciepło zakumulowane w kolektorze, J.

Ilości ciepła uzyskiwane w kolektorze słonecznym, zależą od jego konstrukcji, materiałów użytych do jego budowy, lokalizacji oraz warunków eksploatacji. Miarą sprawności cieplnej kolektora jest współczynnik sprawności η , będący stosunkiem ilości użytecznego ciepła zaabsorbowanego przez kolektor w określonym przedziale czasowym przez czynnik roboczy do ilości energii całkowitego promieniowania słonecznego, padającego na kolektor w tym samym czasie.

Wg Pluty [1993], miarami efektywności kolektorów płaskich mogą być:

- sprawność chwilowa, definiowana, jako stosunek mocy odbieranej z kolektora przez czynnik roboczy do iloczynu powierzchni fron-

towej kolektora i całkowitego natężenia promieniowania słonecznego padającego na tę powierzchnię,

- sprawność długoterminowa, będącą stosunkiem energii użytecznej, dostarczonej z kolektora w określonym czasie do całkowitej sumy napromieniowania powierzchni kolektora w tym czasie (dzień, miesiąc, sezon grzewczy, rok).

Sprawność chwilową można opisać, jako:

$$\eta = \frac{q_{uż}}{F_k q_c} \quad (4.13)$$

gdzie:

$q_{uż}$ – strumień ciepła użytecznego, W,

F_k – powierzchnia kolektora, m²,

q_c – całkowite natężenie promieniowania słonecznego (bezpośredniego i odbitego), W/m² docierającego do zewnętrznego pokrycia kolektora pochylonego pod kątem β względem poziomu, lub też:

$$\eta = \frac{mc(t_{f0} - t_{fi})}{F_k q_c} \quad (4.14)$$

gdzie:

m – wydatek masowy czynnika przepływającego przez kolektor, kg/s,

c – ciepło właściwe czynnika, J /kg K,

t_{f0} – temperatura czynnika opuszczającego kolektor, stopnie,

t_{fi} – temperatura czynnika na wlocie do kolektora, stopnie.

Natomiast sprawność długoterminową wyraża równanie:

$$\eta = A \frac{\int q_{st} d\tau}{F_k \int q_c d\tau} \quad (4.15)$$

Równanie (4.14), umożliwia obliczanie temperatury czynnika opuszczającego kolektor. Wg Nowickiego [1980] sprawność kolektora można wyrazić w innej postaci:

$$\eta = A - \frac{q_{st}}{q_c F_k} = A - \frac{K_c (t_f - t_o)}{q_c F_k} \quad (4.16)$$

gdzie:

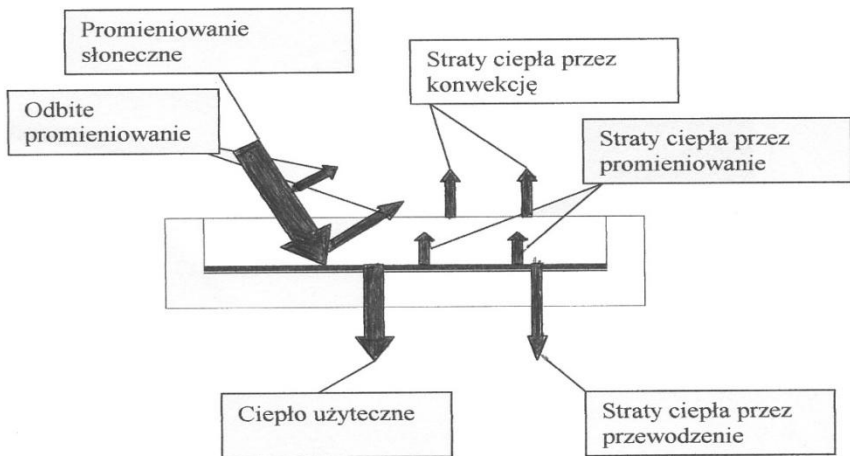
K_c - całkowity współczynnik strat ciepła przez przenikanie do otoczenia (przewodzenie, przenikanie, konwekcja),

t_f - średnia temperatura powierzchni pochłaniającej, stopnie,

t_o - temperatura otoczenia, stopnie,

F_k - powierzchnia kolektora, m².

Na rysunku 4.3. pokazano rozkład strumieni ciepła w kolektorze.



Rys. 4.3 Struktura strumieni ciepła w kolektorze płaskim [Nowicki J. 1980].

Całkowite straty ciepła stanowią sumę strat:

- pochłaniania strumienia ciepła przez osłonę, (4 – 10%)
 - zabrudzenia osłony, 5%
 - odbicia strumienia ciepła od osłony przezroczystej kolektora, (8 – 30%)
 - pochłaniania przez ramę kolektora, 3%
 - odbicia strumienia ciepła od absorbera. (2 – 10%)
- Razem: (22 – 58%)

Sprawność cieplna zależy nie tylko od strat cieplnych, ale również od gęstości energii promieniowania słonecznego w danym momencie eksploatacji kolektora.

Literatura:

- [1]. Andersen B. 1977. *Solar energy fundamentals in building design*. Mc Graw Hill, New-York.
- [2]. Gogół W. 1993. *Konwersja termiczna energii promieniowania słonecznego w warunkach krajowych*. PAN. Raport, Warszawa.
- [3]. Nowicki J. 1980. *Promieniowanie słoneczne, jako źródło energii*. ARKADY, Warszawa.
- [4]. Malicki M. 1977. *Wentylacja i klimatyzacja*. PWN, Warszawa.
- [5]. Staniszewski B. 1978. *Termodynamika*. PWN, Warszawa.
- [6]. Kaizer H. 1979. *Analiza możliwości wykorzystania promieniowania słonecznego do celów grzewczych*. Zeszyty Naukowe AGH, nr 107, Kraków.
- [7]. Pluta Z. 1999. *Przegląd charakterystyk sprawnościowych płaskich kolektorów promieniowania słonecznego*. Materiały konferencyjne, pt. Wykorzystanie energii odnawialnej w rolnictwie, IBMER, Warszawa.

5. KOLEKTORY SŁONECZNE

Promieniowanie słoneczne docierające do powierzchni Ziemi, oprócz decydującego wpływu na życie biologiczne ziemi, może być także w różny sposób i dla różnych celów wykorzystywane przez człowieka. Najczęściej energia słoneczna wykorzystywana jest w praktyce do podgrzewania wody użytkowej i powietrza również do bezpośredniego przetwarzania na energię elektryczną w fotoogniwach, zwanych często ogniwami słonecznymi. Urządzeniami umożliwiającymi wykorzystywanie energii słonecznej są kolektory słoneczne nazwane także instalacjami słonecznymi, jeżeli wyposażone są w dodatkowe urządzenia towarzyszące, tj. zbiorniki wodne akumulacyjne, pompy wodne, wentylatory. Nazwa „kolektor” wywodzi się od słowa łacińskiego „collectio” – zbiór, bowiem energia cieplna przemiany promieniowania słonecznego zbierana jest w jedno miejsce z całej powierzchni kolektora.

5.1. Rodzaje kolektorów słonecznych

W zależności od czynnika będącego nośnikiem ciepła kolektory dzielimy na:

- kolektory powietrzne,
- kolektory cieczowe.

W zależności od zastosowania i budowy wyróżniamy następujące rodzaje kolektorów

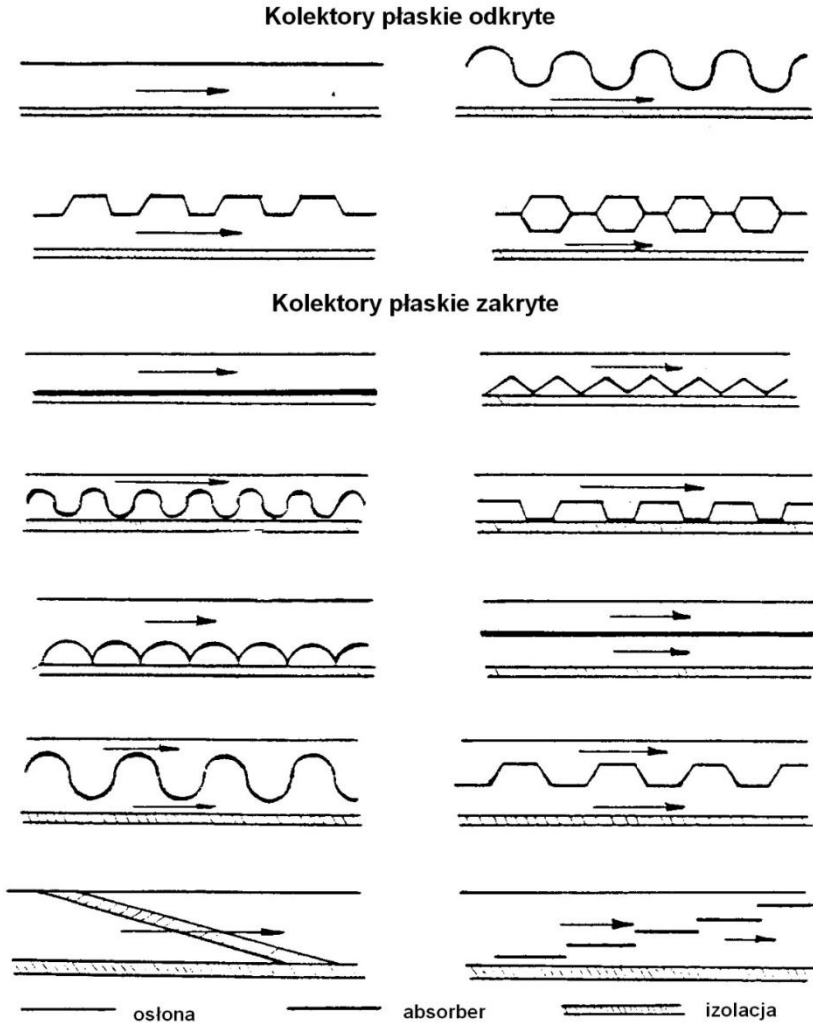
- kolektory odkryte,
- kolektory zakryte.

Kolektory wszystkie dzielą się na:

- kolektory o rozwiniętej powierzchni z absorberami płaskimi, falistymi, trapezowymi i płytowymi,
- kolektory z absorberami porowatymi,
- kolektory z absorberami z tworzyw.

Kolektory cieczowe dzielą się na:

- kolektory płaskie - płytowe,
- kolektory skupiające zwane również koncentrycznymi,
- kolektory próżniowe.

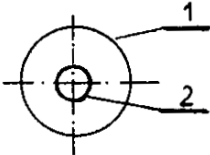
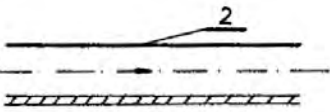
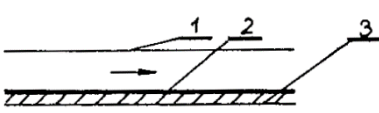
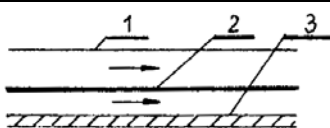



Rys. 5.1 Rodzaje kolektorów płaskich odkrytych i zakrytych [Pabis J. 1987].

Pierwszy podział jest podziałem podstawowym, nie wyczerpuje jednak podziału na wiele innych rodzajów kolektorów powietrznych i cieczowych. Na rysunku 5.1 przedstawiono schematycznie kolektory odkryte i zakryte stosowane do podgrzewania powietrza o różnych rodzajach absorberów.

Dla porównania w tabeli 5.1 przedstawiono sprawność kolektora rurowego z folii PCV oraz sprawności cieplne kolektorów płaskich odkrytych i zakrytych do podgrzewania powietrza.

Tabela 5.1 Sprawności cieplne różnych rodzajów kolektorów słonecznych [Pabis J. 1987].

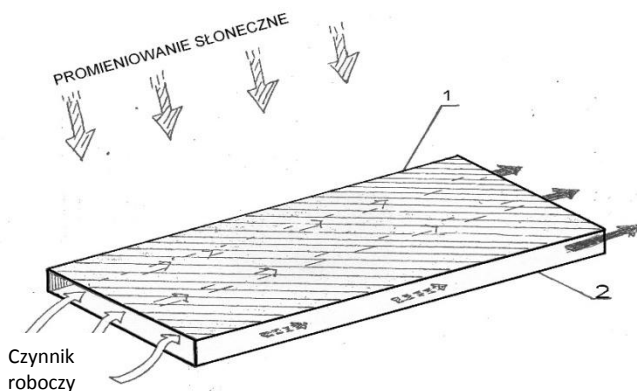
Lp.	Rodzaj kolektora słonecznego		Sprawność cieplna $\eta\%$
1	2	3	4
1	Rurowy z folii PCV		20 – 25
2	Płaski, płytowy odkryty		25 – 30
3	Płaski płytowy zakryty (pojedyncza osłona przezroczysta, przepływ powietrza nad absorberem)		30 – 35
4	Płaski płytowy zakryty (pojedyncza osłona przezroczysta, przepływ powietrza nad i pod absorberem)		35 – 40
5	Płaski płytowy zakryty (podwójna osłona przezroczysta, przepływ powietrza nad i pod absorberem)		40 – 50

Jak wynika z tabeli sprawność cieplna zależy od rodzaju kolektora. Istnieje jednak możliwość znacznego zwiększenia sprawności cieplnej kolektorów nawet do 70 – 80% poprzez zastosowanie [Gołębiowski 1992]

absorbera z rozwiniętą powierzchnią wykonanego z warstwy wiór metalowych skonstruowany w IBMER. Dotychczasowe badania kolektorów słonecznych do podgrzewania powietrza wskazują, że w warunkach krajowych w miesiącach letnich (maj – sierpień) możliwe jest, uzyskanie przyrostu temperatury podgrzanego powietrza rzędu 4 – 12 K, zaś w kolektorze z rozwiniętą powierzchnią od 15 – 18 K [Pabis J. 1987, Gołębiowski St. 1999].

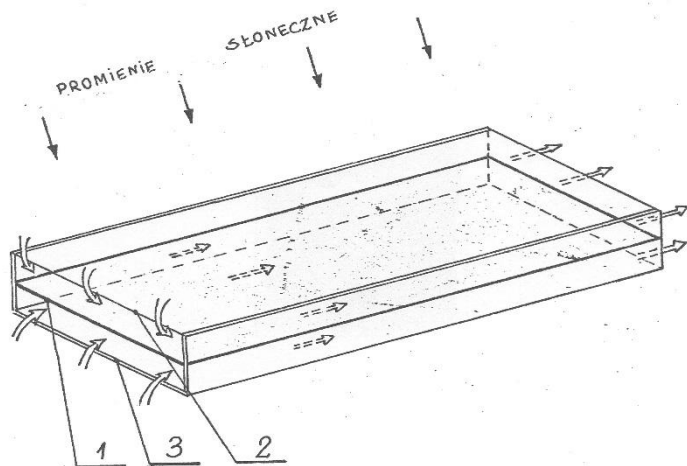
5.2. Kolektory słoneczne powietrzne płaskie, płytowe, odkryte

Kolektory odkryte są najprostszymi kolektorami, w których płaski absorber o różnym ukształtowaniu powierzchni nie posiada przezroczystej osłony. Tego typu kolektory ze względu na ich umieszczenie na budynkach noszą nazwę kolektorów dachowych lub ściennych. Kolektory odkryte stosowane są w rolnictwie przeważnie do podgrzewania powietrza w różnego rodzaju suszarkach podłogowo-kanalowych do suszenia produktów rolniczych (zielonek przeznaczonych na siano, ziarna zbóż, ziół, nasion warzyw suszonych w masie roślinnej przed ich omlotem, nasion po ich omlocie, jak też zrębków drewna i wikliny przeznaczonych na cele energetyczne). Kolektory te charakteryzują się stosunkowo niskimi przyrostami temperatur powietrza i niskimi sprawnościami cieplnymi. Kolektory zakryte posiadają znacznie lepsze parametry pracy. Na rys. 5.2 pokazano zasadę działania kolektora płytowego, odkrytego.



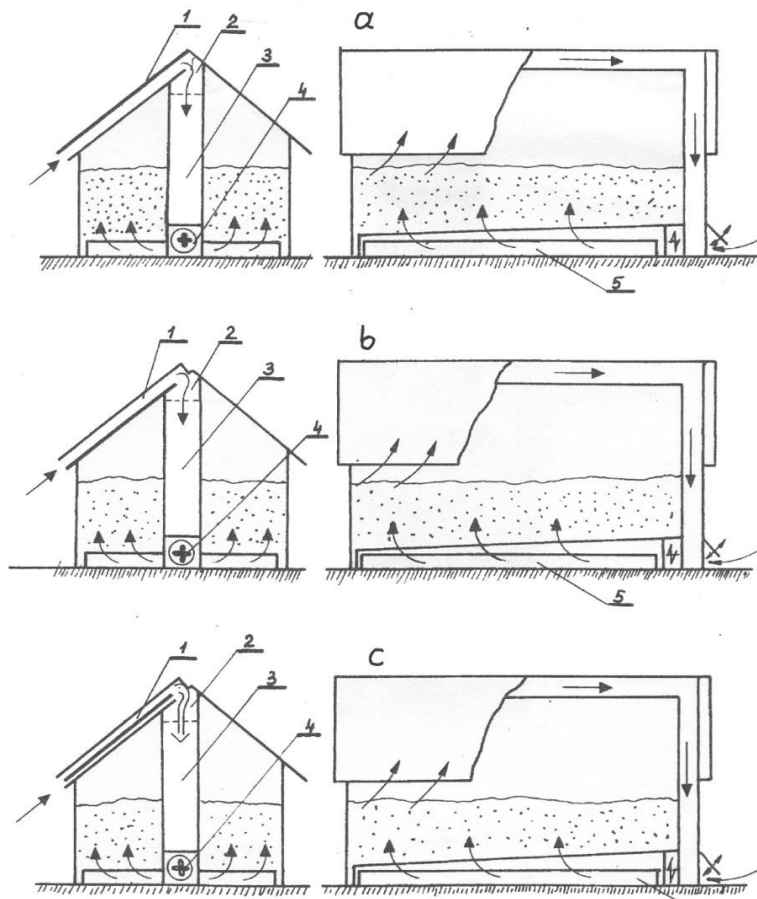
Rys. 5.2 Kolektor słoneczny płytowy odkryty do podgrzewania powietrza: 1 - absorber, 2 - obudowa [Pabis J. 1987].

Powietrze z otoczenia przepływa pomiędzy absorberem 1, a dolną osłoną 2. Na rysunku 5.3 pokazano przykłady usytuowania kolektorów słonecznych na dachu.



Rys. 5.3 Kolektor słoneczny płytowy zakryty do podgrzewania powietrza: 1 - absorber, 2 - osłona przezroczysta, 3 - obudowa [Pabis J. 1987].

Absorberem kolektora dachowego jest cała powierzchnia połaci dachowej lub jej część pokryta blachą pomalowaną czarną farbą (matową), względnie papą. W celu utworzenia przestrzeni (kanału) dla przepływu powietrza pod połacią dachową będącą absorberem, podbija się dach twardą płytą pilśniową, sklejką lub deskami. Powietrze z otoczenia przepływające między połacią dachową 1, a dnem z płyty pilśniowej 2, a następnie kanałem 3 zasysane jest przez wentylator 4. W praktyce, stosowane są różne warianty opisanej zasady budowy kolektorów otwartych. Na rys. 5.4 pokazano różne sposoby przepływu powietrza przez kolektor. Powietrze może przepływać wzdłuż dachu „A”, z dwóch stron dachu „B” lub spod okapu dachu „C”.



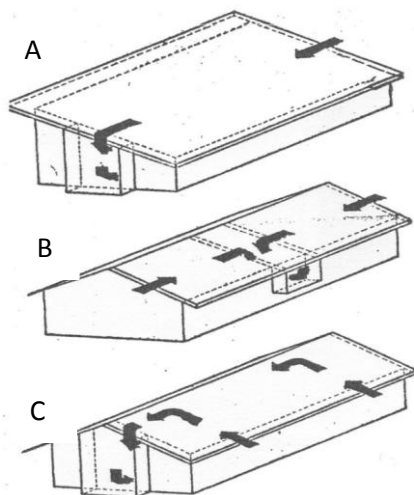
Rys. 5.4 Kolektory słoneczne dachowe do podgrzewania powietrza w urządzeniach suszarniczych: a - kolektor odkryty, b - kolektor zakryty jednokanałowy, c - kolektor zakryty dwukanałowy. 1 - absorber kolektora, 2 - kanał powietrzny poziomy, 3 - kanał powietrzny zbiorczy, 4 - wentylator osiowy, 5 - suszarka podłogowo-rusztowa [Pabis J. 1987].

W kolektorach słonecznych stosowanych w rolnictwie, zlokalizowanych na dachach budynków gospodarczych, i wykorzystywanych w suszarnictwie produktów rolniczych, stosuje się połączenie dachowe z blachy. W tego typu kolektorach, stosowane do suszenia zielonki suszonej na siano, nasion, warzyw w masie roślinnej, tytoniu lub zrębków drewna wykorzystuje się wentylatory osiowe charakteryzujące się sto-

sunkowo niskim ciśnieniem statycznym w granicach 100 – 300 Pa, znacznym wydatkiem powietrza w granicach 10000 – 40000 m³/h i niskim zapotrzebowaniem mocy (1,0 – 5,0) kW. Jeżeli kolektory wykorzystuje się w urządzeniach suszarniczych do suszenia drobnoziarnistych produktów rolniczych, jak np. ziarno zbóż, stosuje się wentylatory promieniowe nisko lub średniociśnieniowe o ciśnieniu statycznym w granicach 300 – 1000 Pa, stosunkowo niskim wydatku powietrza w granicach od 1000 do 10000 m³/h. Wentylatory te charakteryzuje wysokie zapotrzebowanie mocy 5,0 – 20 kW. We wszystkich przypadkach instalowania kolektorów słonecznych na dachach lub ścianach budynków wentylatory instaluje się od strony południowej budynku, bowiem od strony południowej w godzinach rannych temperatura i wilgotność względna powietrza otoczenia jest wyższa niż z innych stron świata.

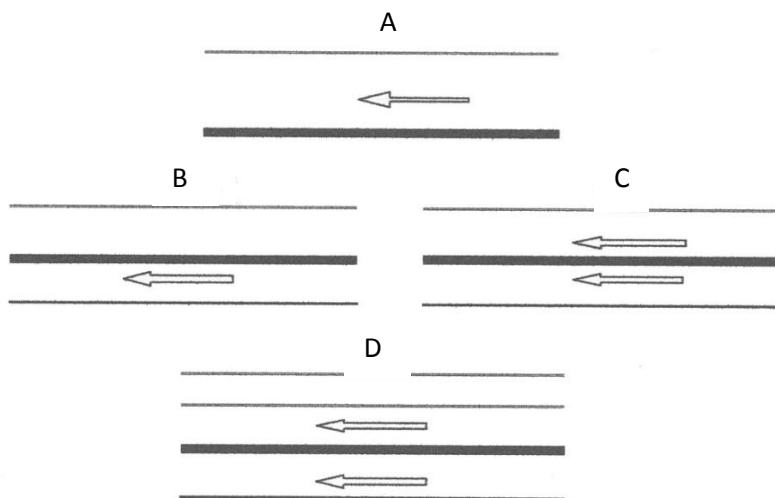
5.3. Kolektory słoneczne powietrzne płaskie płytowe zakryte

Na rysunku 5.5 pokazano kolektory o różnym sposobie przepływu powietrza w kanałach powietrznych kolektora.



Rys. 5.5 Układy przepływów powietrza w kanałach płaskich kolektorów. A – wzdłuż połaci dachu, B – z dwóch stron połaci dachu, C – spod okapu dachu [prospekt].

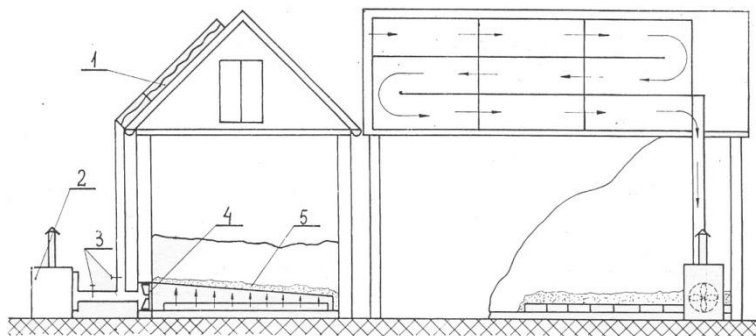
W kolektorze „A” powietrze przepływa pomiędzy przezroczystą osłoną a adsorberem, w kolektorze „B” pomiędzy adsorberem a dolną osłoną kolektora, a w kolektorze „C” nad i pod adsorberem. Natomiast w kolektorze „D” powietrze przepływa podobnie jak w kolektorze „C”, przy czym w tym kolektorze zastosowano dwie osłony przezroczyste. Stosowanie więcej niż jednej przezroczystej osłony zmniejsza straty ciepła, a tym samym zwiększa cieplną sprawność kolektora przeważnie o ok. 5,0%, Na rys. 5.6 pokazano zasadę działania zamkniętego kolektora słonecznego przeznaczonego do podgrzewania powietrza.



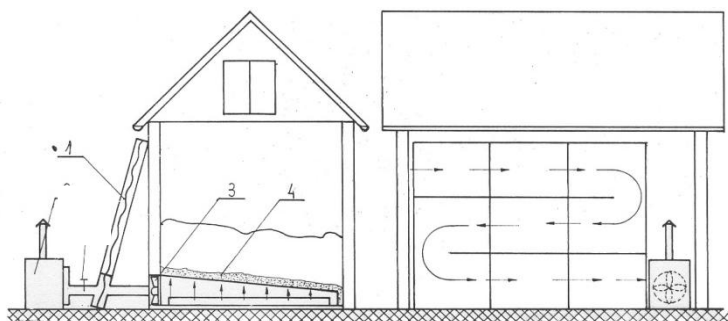
Rys. 5.6 Układy przepływu powietrza w kanale zamkniętego kolektora: A - pomiędzy przezroczystą osłoną a adsorberem, B - pomiędzy adsorberem a dolną osłoną, C - nad i pod adsorberem, D - nad i pod adsorberem z dwoma przezroczystymi osłonami [Pabis J. 2002].

Najważniejszym elementem takiego kolektora jest absorber płytkowy 1. Płyta absorbera może być wykonana z różnych materiałów, jednak najczęściej są to metale (stal, aluminium, miedź), pokryte warstwą pochłaniającą promieniowanie słoneczne, tzw. warstwą selektywną. Płyty absorbera mogą posiadać różne profile. Są to kolektory o tzw. powierzchni rozwiniętej. Płyty osłonowe przezroczyste 2 wykonywane są z tworzyw sztucznych lub ze szkła. Mają na celu zredukowanie strat ciepłych do otoczenia oraz ochronę przed wpływem warunków atmosferycznych. Kolektor słoneczny jest zamknięty od dołu osłoną 3 wykonaną

ną z materiałów o właściwościach izolacyjnych. Powietrze z otoczenia przepływa nad i pod absorberem. Takie kolektory są montowane, jako konstrukcje zwarte, tworzące połąc dachową lub ścianę, albo konstrukcję wolnostojącą. Mogą też być także montowane z gotowych segmentów. W kolektorach powietrznych stosowane są absorbery porowate wykonane z różnych materiałów, przeważnie z tworzyw sztucznych. Na rys. 5.7 pokazano przykłady kolektora zakrytego, zainstalowanego na dachu, a na rys. 5.8 na ścianie budynku.



Rys. 5.7 Kolektor słoneczny zainstalowany na dachu współpracujący z suszarką nasion i podgrzewaczem powietrza: 1 - kolektor słoneczny, 2 - podgrzewacz powietrza, 3 - zasuwki regulacyjne, 4 - wentylator, 5 - suszarka podłogowo rusztowa [Leszczyński M. i in. 1982].



Rys. 5.8 Kolektor słoneczny zainstalowany na ścianie budynku współpracujący z suszarką nasion i podgrzewaczem powietrza: 1 - kolektor słoneczny, 2 - podgrzewacz powietrza, 3 - wentylator, 4 - suszarka podłogowo - rusztowa, 5 - zasuwki regulacyjne [Leszczyński M. i in. 1982].

Na dachu pokrytym blachą, pomalowaną na czarno, na drewnianych kantówkach przymocowana jest przezroczysta osłona z tworzywa sztucznego. W podobny sposób wykonany jest kolektor na ścianie budynku, przy czym absorberem jest tu ściana budynku, pomalowana na czarny kolor. Najważniejszymi elementami kolektorów zakrytych są, osłona przezroczysta i absorber.

Wg Nowickiego[1980], osłona kolektora powinna charakteryzować się wytrzymałością zapewniającą, przejście obciążeń spowodowanych działaniem wiatru, uderzeniami deszczu śniegu i gradu. W tabeli 5.2 podano, współczynniki przepuszczalności promieniowania słonecznego materiałów na pokrycie kolektorów słonecznych, a w tabeli 5.3 właściwości fizyczne materiałów stosowanych do budowy kolektorów. W tabeli 5.4 zestawiono właściwości niektórych osłon stosowanych przy produkcji kolektorów słonecznych.

Tabela 5.2 Współczynnik przepuszczalności materiałów stosowanych na pokrycie kolektorów słonecznych [Wiśniewski G. i in. 2001].

Rodzaj materiału	Grubość mm	Przepuszczalność %
Poliwęglan	3,20	82-89
Poliester zbrojony włóknem szklanym	1,00	77-90
Szkło budowlane hartowane	3,00	86-93
Polietylen	0,10	91,0
PVC	0,25	88,0
Poli(metakrylan metylu) (pleksi)	3,20	84,92
Poliamid	0,10	91,0
Teflon poliwęglowy	2,50	96,0

Tabela 5.3 Własności fizyczne materiałów stosowanych w kolektorach słonecznych [Smolec W. 2000].

Material	Współczynnik przewodzenia ciepła W/(m x K)	Gęstość Kg/m ³	Ciepło właściwe J/(kg x K)	Współczynnik rozszerzalności liniowej 10 ⁻⁶ m(m x K)
METALE				
Aluminium	210	2700	880	25
Mosiądz	100 - 110	8470-9750	385	19 - 20
Miedź	386	8960	380	16
Stal węglowa	45 - 60	7800	450	11
Stal nierdzewna	15 - 60	7800-8700	460	10
TWORZYWA SZTUCZNE				
PMMA*	0,20	1190	1500	70
Poliester zbrojony włóknem szklanym (35% szkła)	0,16	1500		32 - 40
Teflon (PTFE)**	0,25	2100	1050	10 - 15
Tedlar (PFW)***	0,16	1400		50
Polichlorek winylu (PCW)	0,19	1300-1500		50 - 70
Mylar (poliester)		1300-1400		17
Polipropylen	0,20	905	600-1100	70 - 110
Poliwęglan	0,23	1300	1400	60 - 70
INNE MATERIAŁY				
Szkło	0,8 - 1,1	2400-2700	840	8,6
Guma	0,1 - 0,2	900-1100	1500-2100	220
Drewno	0,1 - 0,2	400-800	1500-3000	5 - 50
Cegła	0,4 - 1,3	1600-2000	840	5 - 15
Beton	0,9 - 1,7	1900-2500	840	5 - 15

* PMMA - poli(metakrylan metylu).

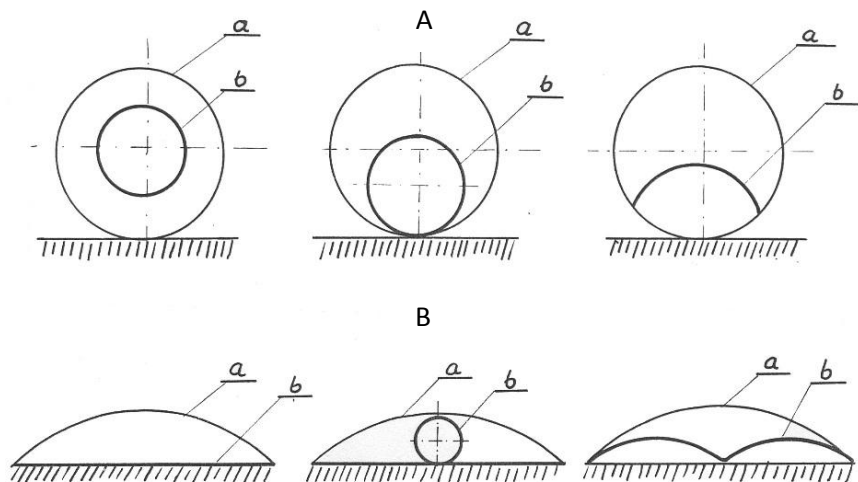
** PTFE - poli(tetrafluoroetylen).

*** PFW - poli(fluorek winylu)

Tabela 5.4 Właściwości materiałów stosowanych do wykonywania przykryć kolektorów słonecznych [Nowicki J. 1980].

Material	Współczynnik pochłaniania α	Współczynnik emisji ϵ	Selektywność α/ϵ
Aluminium utlenione (KMnO_4)	0,80	0,35	2,30
Aluminium pokryte (CuO)	0,85	0,11	7,70
Beton	0,90	0,60	1,50
Cu-czarne (miedź czerniona przez działanie NaOH + NaClO_2)	0,93	0,11	8,50
Czerń chromowa	0,98	0,14	7,00
Etanol na miedzi kolorowany na czarno (CuO)	0,90	0,16	5,60
Farby czarne	0,98	0,89	1,10
- czarna Persona	0,98	0,98	1,00
- szaroczarna	0,87	0,87	1,00
Nikiel czarny zawierający tlenki siarczki	0,92	0,11	8,40
Tlenki magnezu	0,86	0,14	4,80
Sadza na bazie akrylu, jako środka wiążącego	0,90	0,37	0,88
PbS, jako pigment z silikonowym lepiszczem	-	-	2,43
Lakier solarny	0,90	0,25	3,60

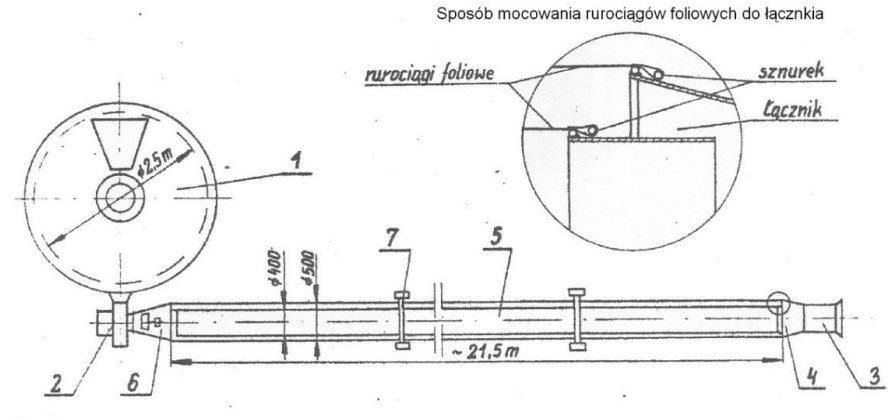
Do najprostszych kolektorów słonecznych zakrytych i jednocześnie najtańszych należy zaliczyć kolektory foliowe zwane również nadciśnieniowymi. Na rys. 5.9 pokazano różne rozwiązania kolektorów: Kolektor *A* w postaci dwóch cylindrów. Cylinder zewnętrzny *a* jest przezroczystą osłoną, a cylinder wewnętrzny *b* koloru czarnego jest absorberem. Do innych rozwiązań należy kolektor foliowy *B* o kształcie soczewki, w których absorberami *b* są: płaszczyzna, cylinder lub dwie czasze.



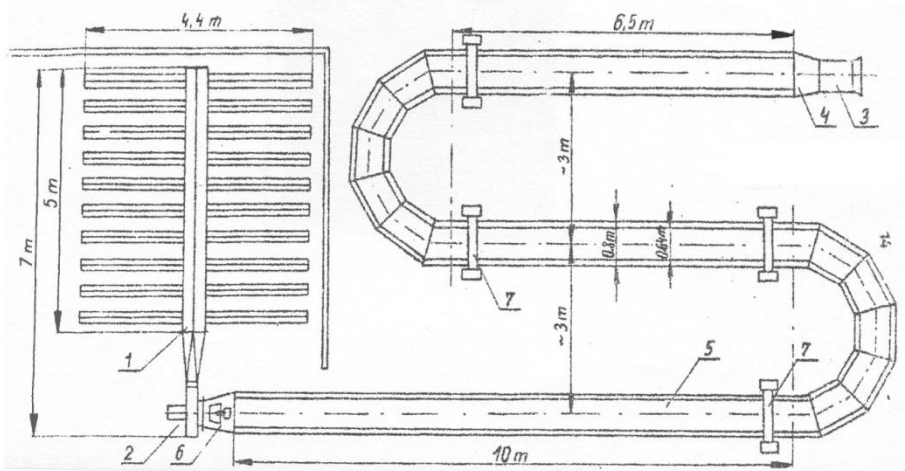
Rys. 5.9 A - kolektory cylindryczne: „a” - osłona, „b” - absorber. B - kolektory soczewkowe: „a” - osłona, „b” - absorber [Pabis J.1987].

Pewną wadą tych kolektorów jest konieczność stosowania dwóch wentylatorów tłoczącego i ssącego. Tego typu kolektory stosowane są, np. w takich urządzeniach suszarniczych, jak suszarki podłogowo-kanałowe, podłogowo-rusztowe, suszarki sitowe, silosy zbożowe do suszenia ziarna zbóż, nasion warzyw, ziół i zielonek przeznaczonych na siano.

Na rys. 5.10 pokazano zastosowanie do silosu zbożowego kolektora rurowego foliowego, a na rys. 5.11 zastosowanie podobnego kolektora do suszarki podłogowo-kanałowej przeznaczonych do suszenia różnych produktów rolniczych.

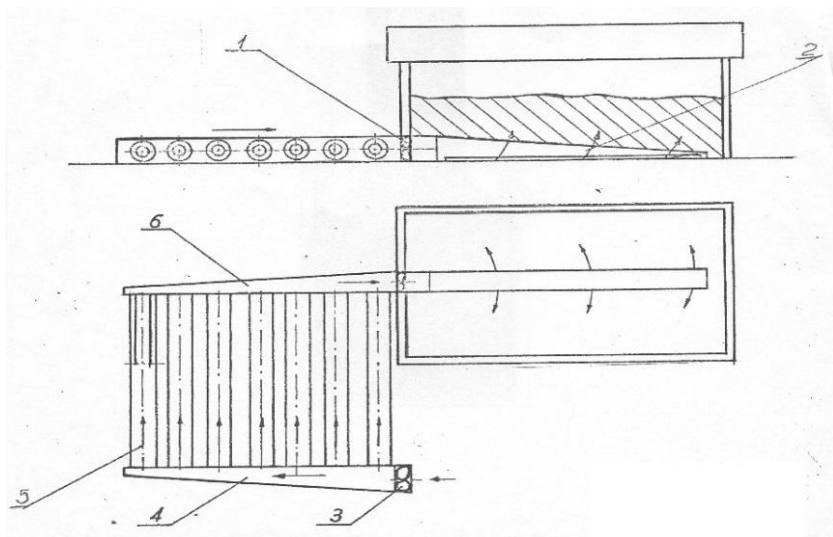


Rys. 5.10 Zastosowanie kolektora cylindrycznego foliowego do silosu zbożowego. 1 - silos, 2 - wentylator promieniowy, 3 - wentylator osiowy, 4 - dyfuzor, 5 - kolektor, 6 - konfuzor, 7 - obejmy ustalające [Przystupa K. 1985].



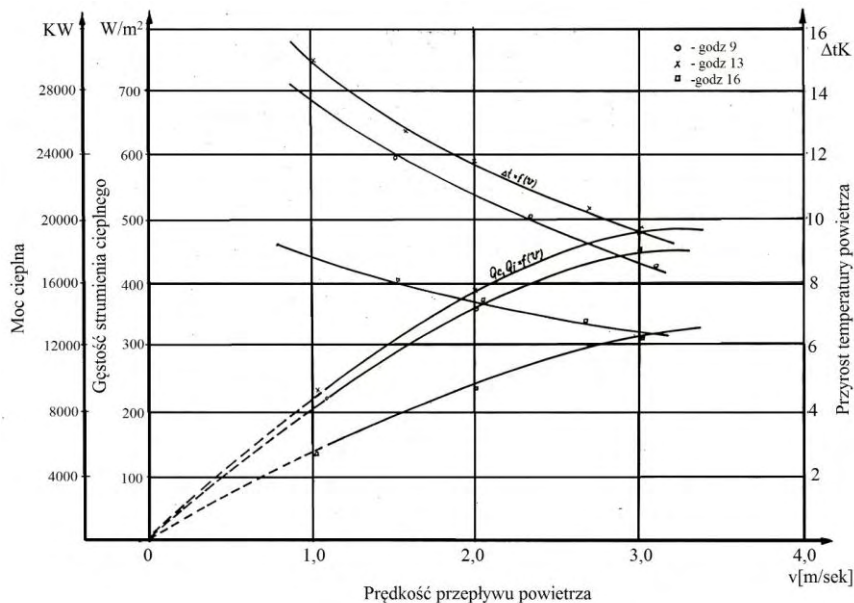
Rys. 5.11 Zastosowanie kolektora cylindrycznego foliowego do suszarki podłogowo kanałowej: 1 - suszarka, 2 - wentylator promieniowy, 3 - wentylator osiowy, 4 - dyfuzor, 5 - kolektor, 6 - konfuzor, 7 - obejmy ustalające [Przystupa K. 1985].

Stosuje się również kolektory foliowe o układzie wielorurowym. Przykładem takiego kolektora jest kolektor pokazany na rys. 5.12.



Rys. 5.12 Zastosowanie kolektora słonecznego wielocylindrycznego do suszarki podłogowo - rusztowej do suszenia zielonek na siano: 1 - wentylator osiowy, 2 - suszarka, 3 - wentylator osiowy, 4 - kanał powietrzny tłoczący, 5 - kolektory cylindryczne, 6 - kanał powietrzny ssący [Leszczyński M. i in. 1982].

W konstrukcji kolektorów do podgrzewania powietrza istotne znaczenie ma prędkość przepływu powietrza i charakter tego przepływu. Wyniki przeprowadzonych badań [Pabis J. 1967] przedstawione na wykresie rys. 5.13 wskazują, że wraz ze wzrostem prędkości przepływu powietrza do ok. 3,0 m/s wzrasta gęstość strumienia ciepłego, a tym samym i moc cieplna kolektora, maleje zaś przyrost temperatury powietrza.



Rys. 5.13 Wpływ prędkości przepływu powietrza przez kanały kolektora na gęstość strumienia ciepłego, moc cieplną i przyrost temperatury powietrza [Pabis J. 1967].

Za optymalna prędkość przepływu powietrza należałoby przyjąć prędkość $v = (2,5 - 3,0)$ m/s. Z przebiegu krzywych prędkości przepływu powietrza i przyrostu temperatury powietrza wynika możliwość sterowania przyrostem temperatury powietrza dla prędkości przepływu w granicach od 1,0 do 3,0 m/s.

Często w literaturze, oprócz prędkości przepływu powietrza v [m/s], podany jest strumień objętości przepływu powietrza lub wskaźnik strumienia masy przepływu powietrza. Natężenie przepływu powietrza, oraz długość kanałów w kolektorze i kanałów rozprowadzających powietrze z kolektora i kształt przekroju kanałów, wpływają na ciśnienie przepływu i mają istotny wpływ na wartość oporów przepływu powietrza, a tym samym na pobór mocy silnika elektrycznego wentylatora, co wynika z powyższego równania:

$$N = \frac{V_w \Delta p}{3600 \times 102 \times \eta}, \text{ kW} \quad (5.1)$$

gdzie:

V_w – wydatek wentylatora, m^3/h ,

Δp – spręż wentylatora, Pa,

η – sprawność wentylatora.

Opory przepływu powietrza (straty ciśnienia) w odcinku prostym przewodu o średnicy d i długości l oblicza się wg równania Darcy – Weisbacha:

$$\Delta p = \lambda \frac{l \gamma_p v^2}{2d}, \text{ Pa} \quad (5.2)$$

współczynnik liniowego oporu przepływu,

l – długość przewodu, m,

v – prędkość przepływu powietrza, m/s ,

γ_p – gęstość powietrza, kg/m^3 ,

d – średnica wewnętrzna przewodu, m.

Współczynnik λ dla przepływu laminarnego (uwarstwionego) przy liczbie Reynoldsa $Re < 2300$, oblicza się z równania:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (5.3)$$

dla obliczenia współczynnika λ podczas przepływu burzliwego stosuje się różne równania:

dla zakresu: $3000 < Re < 50000$ – równanie Blasiusa):

$$\lambda = 0,31 Re^{-0,25} \quad (5.4)$$

dla zakresu $3000 < Re < 3000000$ – równanie Koo:

$$\lambda = 0,0052 + \frac{0,500}{\text{Re}^{0,32}} \quad (5.5)$$

dla zakresu $\text{Re} < 3000000$ – równanie Nikuradsego:

$$\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{\text{Re}^{0,237}} \quad (5.6)$$

Równanie (5.2) może mieć również zastosowanie do obliczania oporów w przewodach o przekroju nie kołowym, np. prostokątnym lub dowolnym innym. Należy wtedy obliczyć tzw. średnicę równoważną (zastępczą) d , podstawiając ją do równania (5.2). Średnicę równoważną, np. dla przekroju prostokątnego obliczamy z równania:

$$d_r = \frac{2ab}{a+b}, \text{ m} \quad (5.7)$$

gdzie:

a, b – wymiary boków prostokąta, m,

a dla przekroju o kształcie trójkąta równobocznego o boku a z równania:

$$d_r = 0,58 a, \text{ m} \quad (5.8)$$

dla dowolnego przekroju przewodu stosuje się równanie:

$$d_r = \frac{4F_p}{U}, \text{ m} \quad (5.9)$$

gdzie:

F_p – pole przekroju przewodu, m^2 ,

U – obwód przewodu, m.

W celu obliczenia całkowitych oporów przepływu powietrza przez przewody rurowe, należy uwzględnić miejscowe (lokalne), opory prze-

plywu np. zwężenia przewodów, kolana, zmiany przekroju oraz dyfuzory i konfuzory. Opory miejscowe obliczamy z równania:

$$\Delta_p = \xi \frac{v_p^2 \gamma_p}{2}, Pa \quad (5.10)$$

gdzie:

ξ - współczynnik oporu miejscowego,

v_p - prędkość przepływu powietrza, m/s,

γ_p - gęstość powietrza, kg/m³.

Wartości współczynnika miejscowych oporów zestawiono w tabeli. 1 (załącznik 2). Dotychczasowa praktyka stosowania kolektorów słonecznych do podgrzewania powietrza wskazuje, że prędkość przepływu powietrza, a tym samym i charakter przepływu ma wpływ na sprawność cieplną kolektora. Z nauki o wymianie ciepła wiadomo, że najlepsze warunki wymiany ciepła uzyskuje się podczas przepływu turbulენტnego (burzliwego), kiedy przy odpowiednio dobranych parametrach prędkości przepływu powietrza liczba kryterialna Reynoldsa Re uzyskuje wartość powyżej 2320 a, przejście z przepływu laminarnego w burzliwy określa liczba Reynoldsa:

$$Re = \frac{v_p d}{\nu} \quad (5.11)$$

gdzie:

v_p - prędkość przepływu powietrza, m/s,

d - średnica przewodu rurowego lub wymiar liniowy np. długość, szerokość, m,

ν - współczynnik lepkości kinematycznej, m²/s.

Wartość krytyczna liczby Reynoldsa równa 2320, pozwala na wyznaczenie prędkości krytycznej dowolnego przepływu cieczy lub powietrza przy dowolnej średnicy przewodu. Prędkość krytyczna określa przejście ruchu uwarstwionego w ruch burzliwym:

$$v_{kr} = 2320 \frac{v}{d}, \text{ m/s} \quad (5.12)$$

gdzie:

v – prędkość przepływu powietrza w przewodzie, m/s,

d – średnica przewodu, m.

W obliczeniach technicznych wprowadza się pojęcie prędkości średniej, wyrażającej stosunek objętości cieczy lub powietrza przepływającego w jednostce czasu przez przewód rurowy do powierzchni poprzecznego przekroju przewodu:

$$v_{\acute{s}r} = \frac{V}{F_p}, \text{ m/s} \quad (5.13)$$

gdzie:

V_p – objętościowe natężenie przepływu powietrza, m³/s,

F_p – powierzchnia poprzecznego przekroju przewodu, m².

Wyznaczając wartość liczby Reynoldsa, należy zwracać uwagę na znaczny wpływ prędkości przepływu powietrza, bowiem wyżej, ona ma istotny wpływ na opory przepływu, a tym samym na zużycie energii elektrycznej wentylatora. Pomimo, że kolektory do podgrzewania powietrza, w porównaniu do kolektorów wodnych, charakteryzują się mniej skomplikowaną konstrukcją i stosowaniem ogólnie dostępnych materiałów do ich budowy, to jednak wybierając taki kolektor należy dokonać obliczeń podstawowych parametrów konstrukcyjnych kolektora. Do najważniejszych uwarunkowań, poprawnego doboru kolektora należy zaliczyć:

- wybór rodzaju kolektora w zależności od przeznaczenia, parametrów technologicznych,
- procesów roboczych, cech charakterystycznych urządzeń technicznych i ich lokalizacji,
- okresu eksploatacji i wykorzystania w ciągu roku i lokalizacji obiektu,

- możliwości współpracy z innymi tradycyjnymi lub odnawialnymi źródłami energii.

Podana poniżej, metoda, [Pabis J. 2003] obliczania płaskiego płytowego kolektora, może być stosowana w obliczeniach konstrukcyjnych kolektorów do podgrzewania powietrza w różnych urządzeniach i obiektach jak, np. suszarkach różnych produktów rolniczych, silosach ziarna zbóż, uprawach warzyw pod osłonami (szklarnie, tunele foliowe), w budynkach inwentarskich, przechowalniach warzyw oraz ogrzewaniu budynków mieszkalnych i technologicznych.

5.4. Uprozczone obliczenia kolektorów słonecznych przeznaczonych do podgrzewania powietrza

Obliczenie podstawowych parametrów kolektora słonecznego, można przeprowadzić różnymi sposobami.

Dla suszarki podłogowo-kanalowej o znanej powierzchni F_u , oraz prędkości pozornej przepływu powietrza v , [m/s] (załącznik 2) przez niezapełnioną powierzchnię suszarki podłogowej, obliczamy wydatek wentylatora (powietrza) tego urządzenia obliczamy z równania:

$$V_w = 3600 F_u v_p, \text{ m}^3/\text{h} \quad (5.14)$$

Przyjmując z tabeli objętościowe natężenie przepływu powietrza V_p , m^3/h , powierzchnię kolektora F_k obliczamy z równania:

$$F_k = \frac{V_w^3}{V_p}, \text{ m}^2 \quad (5.15)$$

Z odczytanego z tabeli 2.4 dziennego nasłonecznienia q_s kWh/m^2 dla wybranej miejscowości, miesiąca lub pory roku, w której ma być zainstalowany kolektor, czasu T , h pracy kolektora w ciągu dnia i sprawności cieplnej η gęstość strumienia ciepłego wyniesie:

$$q_c = \frac{q_s \eta}{T}, \text{ kW}/\text{m}^2 \quad (5.16)$$

Znając zapotrzebowanie energii cieplnej Q , kWh, urządzenia, z którym ma współpracować kolektor oraz gęstość strumienia ciepłego q_c , kW/m², obliczamy powierzchnię kolektora:

$$F_k = \frac{Q}{q_c}, \text{ m}^2 \quad (5.17)$$

Dla znanych lub obliczonych parametrów zapotrzebowanie energii cieplnej kolektorów wyniesie:

$$Q_k = F_k q_c, \text{ kWh} \quad (5.18)$$

Z odczytanego z tabeli 2.4 dziennego nasłonecznienia q_s , kW/m² w miejscowości, w której ma być zainstalowany kolektor, miesiąca lub pory roku oraz czasu pracy T , h kolektora w ciągu dnia i sprawności cieplnej η obliczamy gęstość strumienia ciepłego wyznacza równanie:

$$q_c = \frac{q_s \eta}{T}, \text{ kW/m}^2 \quad (5.19)$$

Ilość ciepła uzyskiwaną z kolektora wyznacza równanie:

$$Q_c = V_p \gamma_p c_p \Delta t, \text{ kJ} \quad (5.20)$$

przyrost temperatury obliczamy z przekształcenia równania (5.20):

$$\Delta t = \frac{Q_c}{V_p \gamma_p c_p}, \text{ K} \quad (5.21)$$

w którym:

V_p – objętościowe natężenie przepływu powietrza, m³/h,

γ_p – gęstość powietrza, kg/m³,

c_p – ciepło właściwe powietrza, kJ/kgK.

Dla znanej temperatury powietrza otoczenia i obliczonego przyrostu temperatury powietrza Δt , moc cieplna kolektora wyniesie:

$$Q = 0,278 V_p \gamma_p c_p \Delta t, \text{ kW} \quad (5.22)$$

Zakładając prędkość przepływu powietrza przez kanały kolektora v_p wydatek wentylatora obliczamy z równania (5.14):

$$V_w = F_k v_p 3600, \text{ m}^3 \quad (5.23)$$

Powierzchnię przekroju poprzecznego kanału wlotu powietrza do kolektora obliczamy z równania:

$$F_k = \frac{V_w}{3600 v_p}, \text{ m}^2 \quad (5.24)$$

Zakładając szerokość kolektora „a” w zależności, np. od szerokości połaci dachowej, ściany budynku, wysokość kanału wyniesie:

$$H_w = \frac{F_k}{a}, \text{ m} \quad (5.25)$$

Wysokość umieszczenia wlotu powietrza jest jednocześnie wysokością boku kolektora, przy czym absorber umieszczony jest w połowie wysokości kanału. W obliczeniach kolektorów wykonanych z tworzywa sztucznego, rurowych lub materacowych (załącznik 2 tabela nr 16) parametry przepływu powietrza i nasłonecznienia są takie same jak w kolektorach płaskich płytowych. Dla kolektorów rurowych pokazanych na rys. 5.10 i 5.11 [Przystupa 1985] średnicę zewnętrzną przewodu rurowego d_z wyznacza się z równania:

$$d_z = 1,13 \sqrt{\frac{V_p}{v_p}}, \text{ m} \quad (5.26)$$

gdzie:

V_p - objętościowe natężenie przepływu powietrza, m^3/s ,

v_p - prędkość przepływu powietrza przez przewód rurowy (przyjmujemy $v_p = 1,0-3,0$ m/s).

Średnica wewnętrzna przewodu d_w wynosi wtedy

$$d_w = (0,7-0,8)d_z, \text{ m} \quad (5.27)$$

Postępując podobnie jak w przykładach 1 i 2 z równania (5.14), obliczamy wydatek wentylatora, a z równania (5.15) lub (5.17), powierzchnię kolektora. Dla odczytanego z tabeli 2.4 dziennego nasłonecznienia q_s obliczamy z równania (5.16), gęstość strumienia ciepłego uzyskanego z kolektora. Z równania (5.18), obliczamy energię, ciepłą kolektora, a z równania (5.21) przyrost temperatury powietrza. Długość czynną przewodu rurowego wyznacza równanie:

$$L = \frac{V_p c_p \gamma_p \Delta t}{d_w q_c} = \frac{1,2 V_p c_p \gamma_p \Delta t}{d_w q_c}, \text{ m} \quad (5.28)$$

gdzie:

V_p - wydatek wentylatora, m^3/h ,

c_p - ciepło właściwe powietrza, kJ/kgK ($c_p = 4.19$ kJ/kgK),

γ_p - gęstość powietrza, kg/m^3 ($\gamma_p = 1,2$ kg/m^3),

Δt - przyrost temperatury powietrza, K ,

q_c - gęstość strumienia ciepłego, W/m^2 .

Po złożeniu przewodów rurowych (bez powietrza, jeden na drugim w pozycji poziomej) szerokość tych przewodów wyniesie:

zewnątrznego:

$$S_z = \frac{\pi d_z}{2} = \text{m} \quad (5.29)$$

wewnętrznego:

$$S_w = \frac{\pi d_w}{2} = m \quad (5.30)$$

5.4.1. Przykład. Obliczanie kolektora słonecznego do suszarki produktów rolniczych

Suszarka podłogowa zainstalowana będzie w budynku gospodarczym na parterze. Kolektor słoneczny płytowy zakryty zostanie zlokalizowany na dachu budynku od strony południowej. Kolektor będzie wykorzystywany od czerwca do sierpnia, przy temperaturze powietrza otoczenia średnio $t_{p0} = 20^\circ\text{C}$. Suszarka posiada wentylator osiowy o wydatku powietrza $V_w = 25000 \text{ m}^3/\text{h}$, sprężu 3000 Pa i mocy silnika elektrycznego $N = 4,0 \text{ kW}$.

Obliczenie powierzchni suszarki.

Dla pozornej prędkości przepływu powietrza $v_p = 0,1 \text{ m/s}$ przez niezapełnioną ziarnem powierzchnię czynną suszarki równej, powierzchnię suszarki obliczamy z równania:

$$V_w = 3600 F_s v_p \text{ m}^3/\text{h}$$

w którym:

V_p - wydatek wentylatora, 2500 m^3/h ,

v_p - pozorna prędkość przepływu powietrza, m/s .

po przekształceniu mamy:

$$F_s = \frac{V_w}{3600 v_p} = \frac{25000}{3600 \cdot 0,1} = 69,0 \text{ m}^2$$

Wprowadzając z tabeli 2.4 średnią dzienną wartość q_d nasłonecznienia w miesiącach czerwiec i sierpień równą 5 kWh/m i uwzględniając czas pracy T kolektora przez 8 godzin w ciągu dnia oraz sprawność cieplną kolektora $\eta = 0,5$, gęstość strumienia cieplnego q_s z kolektora:

$$Q_s = \frac{q_s \eta}{T} = \frac{5000 \cdot 0,05}{8} = 312,5 \text{ W/m}^2$$

Przyjmując objętościowe natężenie przepływu powietrza $V_v=100 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, przypadające na 1 m^2 powierzchni kolektora, obliczamy przyrost temperatury powietrza:

$$\Delta t = \frac{q_s}{V_v \gamma_p c_p} = \frac{312,5}{28,8} = 10,76 \text{ K}$$

gdzie:

c_p - ciepło właściwe powietrza, $1,0 \text{ kJ/kgK}$,

V_v - objętościowe natężenie przepływu powietrza równa $100 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$,

γ_p - gęstość powietrza równa $1,2 \text{ kg/m}^3$.

Zatem gdy temperatura otoczenia $t_{po} = 20^\circ\text{C}$ i przyrost temperatury powietrza w kolektorze $\Delta t = 10 \text{ K}$ to temperatura t_{p1} powietrza na wlocie do suszarki będzie równa 30°C . Wtedy strumień ciepły Q_c kolektora będzie mieć wartość:

$$Q_c = 0,278 V_p \gamma_c c_p \Delta t = 0,278 \cdot 25000 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 10,7 = 89,7 \text{ kW},$$

Powierzchnia kolektora będzie równa:

$$F_k = \frac{Q_c}{q_s} = \frac{89700}{312,5} = 287 \text{ m}^2$$

Obliczenie powierzchni wlotu powietrza i wymiarów kanału powietrznego kolektora. Dla optymalnego zakresu prędkości przepływu powietrza przez kolektor $v_p = (2 - 4) \text{ m/s}$, zakładamy maksymalną wartość $v = 4,0 \text{ m/s}$ z równania:

$$V_w = 3600 \cdot F_k \cdot v_p, \text{ m}^3/\text{h},$$

w którym wydatek wentylatora $V_W = 25000 \text{ m}^3/\text{h}$ i prędkość przepływu powietrza $v_p = 4 \text{ m/s}$ obliczamy powierzchnię wlotu powietrza do kolektora:

$$F_{ka} = \frac{V_w}{v_p \cdot 3600} = 1,7 \text{ m}^2$$

Zakładając, że szerokość a połaci dachowej budynku wynosi 10 m , to wysokość kanału wlotowego do kolektora będzie równa:

$$H_w = \frac{F_{ka}}{a} = \frac{1,7}{10} = 0,17 \text{ m} = 17 \text{ cm}$$

Obliczona wysokość kanału jest jednocześnie wysokością kanału kolektora, przy czym absorber kolektora umieszczony jest w połowie wysokości, czyli $8,5 \text{ cm}$ od osłony przezroczystej i $8,5 \text{ cm}$ od dna kolektora.

W kolektorach powietrznych istnieje możliwość regulacji przyrostu temperatury powietrza przez zmianę wydatku wentylatora, a tym samym zmianę prędkości przepływu powietrza w kanałach wentylatora. Jeżeli, np. zmniejszymy prędkość przepływu powietrza z przyjętych w obliczeniach od $v_p = 4,0 \text{ m/s}$ do $2,5 \text{ m/s}$, to wydatek V_W wentylatora obniży się do wartości:

$$V_{W'} = 3600 F_{ka} v_p' = 3600 \cdot 1,7 \cdot 2,5 = 15300 \text{ m}^3/\text{h}$$

a objętościowe natężenie przepływu powietrza osiągnie wartość:

$$V_v = \frac{V_w}{F_{ka}} = 53,3 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$$

zaś przyrost temperatury powietrza podgrzanego w kolektorze będzie wynosił:

$$\Delta t = \frac{q_s}{V_v \gamma_v c_p} = \frac{312,5}{53,3 \cdot 1,2 \cdot 1,0} = 20,4 \text{ K}$$

Jak wynika z powyższych obliczeń zamiast wzrostu temperatury powietrza $\Delta t = 10,7$ K można przy pełnym wydatku wentylatora uzyskać przyrost temperatury powietrza $\Delta t = 20,4$ K. Należy jednak pamiętać, że zyskując na przyroście temperatury tracimy na mocy cieplnej kolektora i jego sprawności. Przedstawioną wyżej uproszczoną metodą można obliczać kolektory do suszarek podłogowych przeznaczonych do niskotemperaturowego suszenia produktów rolniczych, tj. ziarna zbóż, nasion warzyw suszonych w nasiennekach, ziół oraz różne rodzaje rozdrobnionej biomasy przeznaczonej na cele energetyczne. Projektując suszarkę podłogową z kolektorem, i wykorzystaniem wentylatorów osiowych należy tak obliczać grubość warstwy, by opory przepływu powietrza przez suszoną warstwę nie przekraczały (300 – 3000) Pa.

5.4.2. Przykład Zastosowanie kolektora słonecznego do ogrzewania tunelu foliowego

Do ogrzewania tunelu foliowego wybrano płaski kolektor płytowy zainstalowany obok tunelu. Jaka powinna być powierzchnia kolektora słonecznego?

Wymiary tunelu foliowego:

- długość $L_t = 30$ m,
- wysokość $H_t = 3$ m,
- szerokość tunelu foliowego $a = 6$ m,
- średnia dzienna temperatura powietrza otoczenia, $t_{po} = 5^\circ\text{C}$,
- średnia temperatura powietrza wewnątrz tunelu, $t_{pl} = 15^\circ\text{C}$,
- liczba wymian powietrza w tunelu, $n = 2$ godz.,
- wykorzystanie kolektora w ciągu roku: od 1.VI do 30.X.

Dla założonej liczby wymiany powietrza oraz wymiarów gabarytowych tunelu objętość tunelu foliowego wyniesie:

$$V_t = \frac{L_t \pi a^2}{8} = \frac{30 \cdot \pi \cdot a^2}{8} = 423,9 \text{ m}^3$$

Zapotrzebowanie powietrza będzie równe:

$$V_p = V_t n = 423,9 \cdot 2 = 848 \text{ m}^3/\text{h}$$

Przyrostu temperatury powietrza $\Delta t = 10,0 \text{ K}$ zapewnia moc cieplną:

$$Q_t = 0,278 V_t \gamma_p c_p \Delta t = 0,278 \cdot 848 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 10 = 2,9 \text{ kW}$$

gdzie:

$$c_p = 1,05 \text{ kJ/kgK.}$$

Straty Q_{st} , gdy współczynnik k przenikania ciepła przez płaszczyz foliowy tunelu równa się 8 W/mK wyniosą:

$$Q_{st} = F_p k \Delta t = 282,6 \cdot 8 \cdot 10 = 22,6 \text{ kW}$$

Powierzchnia płaszczyzny tunelu foliowego będzie równa:

$$F_p = \frac{L_t \pi a}{2} = \frac{30 \pi \cdot 6}{2} = 282,6 \text{ m}^2$$

Całkowite zapotrzebowanie ciepła na ogrzewanie tunelu foliowego wyniesie:

$$Q_c = Q_t + Q_{st} = 2,9 + 22,6 = 25,5 \text{ kW}$$

Przyjmując średnie dzienne nasłonecznienie w wyżej wymienionych miesiącach $q_d = 5,0 \text{ kWh/m}^2$, dzienny czas wykorzystania kolektora $T = 8$ godz. oraz sprawność cieplną kolektora $\eta = 0,5$, gęstość strumienia ciepłego q_s będzie równa:

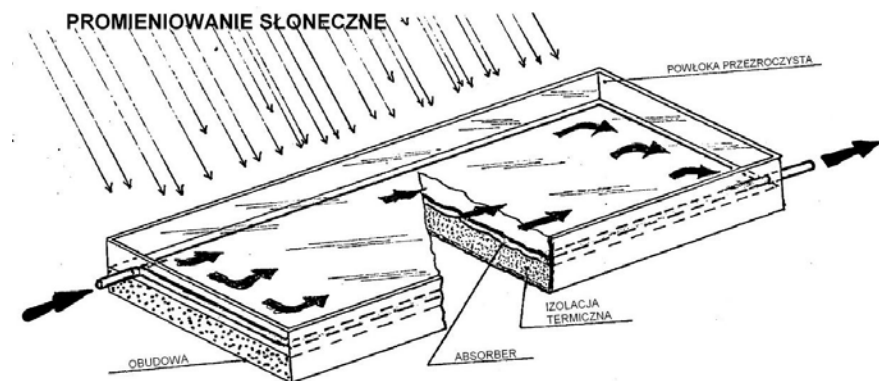
$$q_s = \frac{q_d \eta}{T} = \frac{5000 \cdot 0,5}{8} = 312,5 = \text{W/m}^2$$

Dla gęstości strumienia powietrza q_s powierzchnia kolektora słonecznego wyniesie:

$$F_k = \frac{Q_c}{q_s} = \frac{25,5}{312,5} = 81,6 \text{ m}^2$$

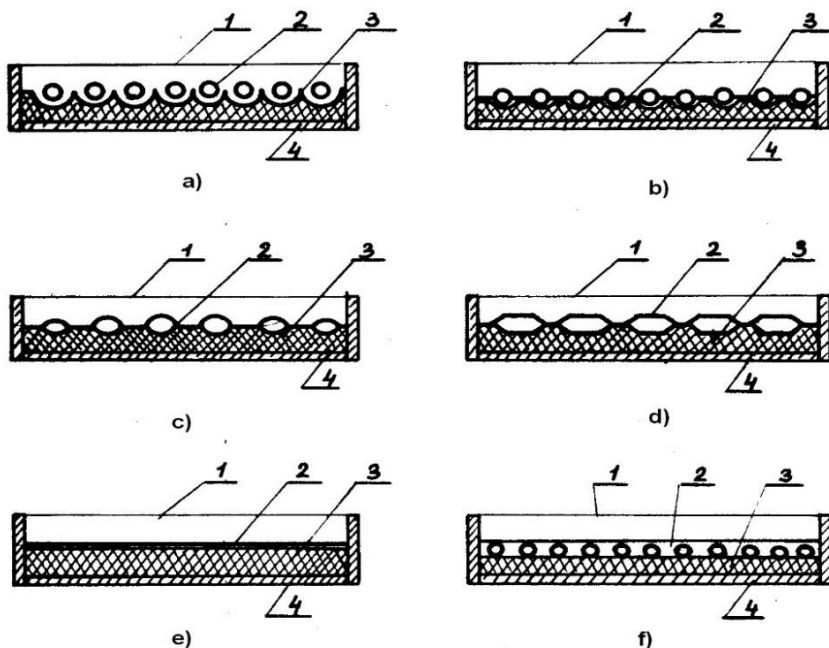
5.5. Cieczowe płaskie kolektory słoneczne do podgrzewania wody użytkowej

Cieczowe kolektory słoneczne produkowane przeważnie, jako kolektory płaskie płytowe, zamknięte, z jedną lub wieloma osłonami przezroczystymi Są również kolektory skupiające, próżniowe, akumulacyjne oraz wykonane z tworzyw. Kolektory cieczowe stosowane są głównie do podgrzewania wody użytkowej do celów sanitarnych, wspomagania instalacji grzewczych budynków, podgrzewania wody technologicznej w przetwórstwie produktów rolniczych, podgrzewania wody do nawadniania roślin uprawianych w szklarniach, tunelach foliowych i ogrzewania podłoża oraz ogrzewania wody w basenach kąpielowych. Na rys. 5.14 pokazano kolektor płaski płytowy do podgrzewania wody.



Rys. 5.14 Kolektor płaski płytowy do podgrzewania wody [Pabis J. 1987].

Kolektor składa się z powłoki przezroczystej, absorbera płytowego i termicznej izolacji jego obudowy. Najbardziej rozpowszechnione są kolektory płaskie płytowe i płaskie rurkowe. Na rys. 5.15 a, b, c, d, f, pokazano kolektory rurowe, a na rys. 5.15,e płaski kolektor płytowy.



Rys. 5.15 Kolektory do podgrzewania wody: a, b, c, d, f, – kolektory płaskie rurkowe, e – kolektor płaski płytowy, 1 – osłona przezroczysta, 2 – absorber, 3 – izolacja, 4 – obudowa [Pabis J. 1987].

Zasadniczymi elementami kolektorów są powłoka przezroczysta 1 absorber 2 izolacja cieplna 3 oraz obudowa kolektora 4. Na powłokę przezroczystą stosuje się szkło zwykle lub hartowane, lub tworzywa sztuczne przezroczyste, odporne na promieniowanie ultrafioletowe (tworzywo epoksydowe, poliestrowe, folie) o niskim zaciemnianiu i stabilności barwy. Absorbery kolektorów wykonane są ze stali, miedzi, aluminium lub tworzywa sztucznego. Absorber płytowy 2 (rys. 5.15,e), wykonany jest z dwóch warstw zgrzewanych blach o różnie profilowanych kanałach lub rurek osadzonych na płycie 2. Powierzchnie zewnętrzne absorberów pokryte są warstwą pochłaniającą o dobrych właściwościach selektywnych, tj. o dużych wartościach stosunku współczynnika pochłaniania do współczynnika emisji przy danych długościach fali. Izolację cieplną wykonuje się przeważnie z wełny mineralnej, waty szklanej lub spienionych tworzyw sztucznych o grubościach od 20 do 50 mm. W tabe-

li 5.5 zestawiono, według Nowickiego [1980], właściwości materiałów termoizolacyjnych stosowanych w kolektorach.

Tabela 5.5 Właściwości materiałów termoizolacyjnych stosowanych w kolektorach słonecznych [Nowicki J. 1980].

Material	Współczynnik przewodzenia ciepła W/(m x K)	Gęstość kg/m ³	Maksymalna temperatura pracy °C	Współczynnik rozszerzalności liniowej 10 ⁻⁶ m(m x K)
Wełna szklana	0,03 - 0,04	25 - 100	340	8,5 - 10
Wełna mineralna	0,035 - 0,055	30 - 200	650 - 1040	-
Polistyren spieniony	0,03 - 0,04	15 - 30	74	70
Pianka poliuretanowa	0,02 - 0,03	20 - 60	120	70
Pianka mocznikowo-formaldehydowa	0,03	-	130	-
Pianka fenolowa	0,03	-	135	-

Obudowy kolektorów wykonuje się z drewna, profili stalowych, aluminiowych lub tworzywa. Kolektory produkowane są w postaci prostopadłościanów o wymiarach od 0,5 do 1,0 m, od 0,5 do 1,5 m, lub od 1.0 do 2,0 m i grubościach od 0,1 do 0,15 m. Mogą one pracować w instalacji grzewczej, jako jednostki niezależne lub mogą być wmontowane w baterie umieszczane na dachach, ścianach lub jako instalacje wolnostojące obok budynków. W warunkach maksymalnego nasłonecznienia, przy jednorazowym przepływie cieczy przez kolektor w ciągu godziny, można uzyskać przyrost temperatury od 3 do 4 K. Oznacza to, że podczas pracy kolektora ze zbiornikiem wodnym magazynującym ciepłą wodę i jej recyrkulacji przez kolektor, można w ciągu dnia (8 - 10 h) uzyskać przyrost temperatury wody o ok. (30 - 40 K). Kolektory cieczowe pracują w obiegu naturalnym (grawitacyjnym), przy czym zbiornik wodny instalowany jest nad kolektorem lub w obiegu wymuszonym z zastosowaniem pompy wodnej. Zbiornik wodny w obiegu wymuszonym instalowany jest poniżej kolektora. Istnieją dwa rodzaje podgrzewania cieczy, bezpośredni, kiedy ciecz z kolektora (absorbera płytowego lub rurkowe-

go) wpływa do zbiornika akumulacyjnego a stamtąd pobierana jest przez użytkownika, lub pośredni, kiedy w spiralnym rurkowym wymienniku ciepła zainstalowanym w zbiorniku akumulacyjnym krąży płyn niezamarzający ogrzewając wodę w zbiorniku akumulacyjnym. W tabeli 5.6 zestawiono różne płyny stosowane w instalacjach absorber – wymiennik ciepła.

Tabela 5.6 Właściwości czynników roboczych stosowanych w kolektorach słonecznych [Gogół W. 1991].

Nazwa czynnika	Punkt krzepnięcia °C	Punkt wrzenia °C	Współczynnik przewodzenia ciepła W/(m x K)	Ciepło właściwe kJ/(kg x K)	Lepkość kinematyczna (m ² /s) x 10 ⁻⁶
60-proc. roztwór wodny glikolu polipropylenowego	-48	109	0,35	3,4 (temp. 25°C)	3,0 (temp. 38°C)
60-proc. roztwór wodny glikolu etylenowego	-37	110	0,42	3,4 (temp. 27°C)	2,6 (temp. 38°C)
Olej syntetyczny węglowodorowy	-85	227	0,13	2,3 (temp. 25°C)	22,5 (temp. 38°C)
Olej silikonowy	-46	315	0,14	1,6 (temp. 100°C)	20,0 (temp. 20°C)
Płyn do chłodziw samochodowych Borygo	-36	110	-	-	-

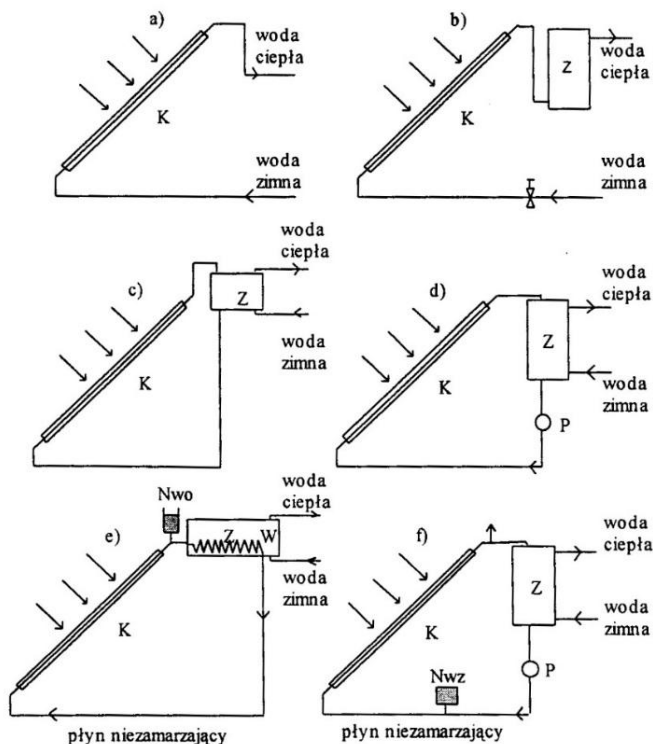
Ostatnio ww. w opisane rozwiązanie stosowane jest zarówno latem jak zimą. W zależności od zakresu podgrzanej wody użytkowej, kolektory takie dzielą się na trzy grupy:

- niskotemperaturowe, w których podgrzewa się wodę do 100 °C,

- średnio temperaturowe, w których podgrzewa się wodę do temperatury (100 – 200°C),
- wysokotemperaturowe w których osiąga się temperatury do (200 – 3000 °C).

Do pierwszej grupy zaliczamy kolektory płaskie płytowe, natomiast w grupie drugiej i trzeciej, kolektory skupiające.

W rolnictwie istnieje duże zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową. Jest ona wykorzystywana przez cały rok zarówno do celów sanitarnych w budynkach mieszkalnych, jak i w budynkach inwentarskich do mycia aparatury udojowej, do celów pielęgnacyjnych (mycia wymion przed dojeniem, mycie krów przed ocieieniem), weterynaryjnych oraz higieny osobistej obsługi. W warunkach wiejskich zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową o temperaturze 45°C w budynkach mieszkalnych wynosi 60 – 100 l/dobę na jednego mieszkańca, zaś w budynkach inwentarskich zapotrzebowanie na wodę o temperaturze (70-75)°C wynosi 10 – 15 l/dobę na 1 stanowisko [Tymiński 1997]. Kolektory słoneczne do podgrzewania wody użytkowej mogą być stosowane w różnych systemach i układach. Na rys. 5.16 przedstawiono schematycznie różne układy kolektorów. Najprostszy jest układ bezpośredni (rys. 5.16 a), w którym woda z sieci przepływa przez kolektor i po podgrzaniu kierowana jest do wykorzystania. Stosowanie tego układu jest ograniczone, nie ma, bowiem możliwości regulacji temperatury wody, która uzależniona jest od natężenia przepływu wody i chwilowej gęstości promieniowania słonecznego. Takie rozwiązanie stosuje się w zbiornikach wodnych hodowli ryb i narybku oraz do podgrzewania wody w basenach kąpielowych. Przyrost temperatury wody w tym układzie jest niewielki i wynosi kilka stopni Kelvina. Znacznie korzystniejszy jest układ bezpośredni (rys. 5.16 b), w którym kolektor słoneczny wyposażony jest w zbiornik wodny, co umożliwia podgrzanie wody do temperatury 30 – 60°C. Ponadto zbiornik wody wpływa dodatnio na wyrównywanie się temperatury w zbiorniku, wywołane zmianą gęstości promieniowania słonecznego i poborem ciepłej wody. Znacznie lepszy od poprzedniego jest układ pokazany na rys. 5.16 c i 5.16 d. W pierwszym przypadku zbiornik wody zainstalowany jest nad kolektorem, co umożliwia uzyskanie grawitacyjnego obiegu wody, w drugim zaś obieg wodny odbywa się za pomocą pompy wodnej.

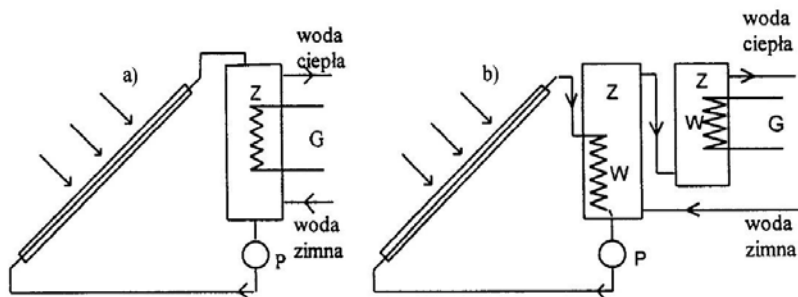


Rys. 5.16 Układy kolektorów słonecznych do podgrzewania wody użytkowej: a - bezpośredni przepływowy, b - bezpośredni z zasobnikiem, c - bezpośredni z zasobnikiem (obieg grawitacyjny), d - bezpośredni z zasobnikiem i obiegiem wodnym wymuszonym pompą, e - pośredni z zasobnikiem i obiegiem w kolektorze płynu niezamarzającego oraz z wymiennikiem ciepła, f - pośredni z zasobnikiem i płynem niezamarzającym oraz wymiennikiem ciepła, g - bezpośredni z zasobnikiem i dodatkowym podgrzewaczem, h - pośredni z zasobnikiem i dodatkowym podgrzewaczem. K - kolektor słoneczny, Z - zasobnik, P - pompa, W - wymiennik ciepła, Nwo - naczynie zbiorcze otwarte, Nwz - naczynie zbiorcze zamknięte, G - dodatkowy podgrzewacz [Pabis J. 1987].

Układy bezpośrednie kolektorów ze zbiornikami wody charakteryzują się prostą budową, natomiast wadą ich jest korozja absorbera, przez który przepływa zawsze świeża woda, oraz niemożliwość ich eksploatacji w zimie. Całoroczną eksploatację umożliwiają układy pośrednie, w których w kolektorze ze zbiornikiem wodnym (wymiennik rurokowy) krąży płyn niezamarzający. Układy takie pokazane są na rys. 5.16

e i 5.16 f. Niezamierzający czynnik grzewczy z kolektora przepływa w wymienniku ciepła (węzownica) i podgrzewa wodę użytkową w zbiorniku będącym jednocześnie zbiornikiem akumulacyjnym. Obieg czynnika grzewczego może być grawitacyjny lub wymuszony pompą wodną.

Oprócz możliwości stosowania tych układów w ciągu całego roku, absorbery tych kolektorów są odporniejsze na korozję. Kolektory pracujące w układzie grawitacyjnym nie wymagają stosowania automatyki, natomiast kolektory pracujące w układach wymuszonych wymagają automatycznego sterowania pracą pompy. W różnych porach roku zwłaszcza podczas złej pogody gęstość strumienia energii słonecznej jest mała, co uniemożliwia uzyskania wymaganej temperatury wody. W tym przypadku stosuje się zainstalowane w zbiorniku podgrzewacze elektryczne lub gazowe (rys. 5.17 a) albo instaluje się dodatkowy zbiornik wodny (rys. 5.17 b). Ewentualnie mogą być stosowane wodne wymienniki ciepła w piecach opalanych paliwem stałym lub ciekłym. Układ kolektora pokazany na rys. 5.17 b, jest lepszy od układu pokazanego na rys. 5.17 a, ponieważ w układzie b krąży woda o podwyższonej temperaturze. Dlatego sprawność cieplna tego układu jest niska w porównaniu z układem a.



Rys. 5.17 Kolektory słoneczne pracujące w układach wymuszonych: a - z zasobnikiem i podgrzewaczem wody elektrycznym lub gazowym, b z zbiornikiem dodatkowym i podgrzewaczem: G - podgrzewacz, P - pompa, W - woda, Z - zasobnik [Pabis J.1990].

5.6. Uprozczone obliczenia kolektorów słonecznych z bezpośrednim podgrzewaniem wody użytkowej

Do podgrzewania wody użytkowej w gospodarstwie domowym planuje się zastosowanie kolektora płaskiego płytowego o bezpośrednim działaniu, w którym czynnikiem grzewczym jest woda. Rodzina składa się z czterech osób. Zużycie wody na jedną osobę wynosi 60 l dziennie. Zatem dzienne zużycie wody dla całej rodziny wyniesie:

$$W_d = w_j n, \text{ l/dzień} \quad (5.31)$$

gdzie:

w_j – jednostkowe zapotrzebowanie wody, l/dobę,
 n – liczba osób.

Dla znanej temperatury wtedy t_{wo} z sieci wodnej i zakładanej po podgrzaniu temperatury wody t_{w1} przyrost temperatury wody wyniesie:

$$\Delta t = t_{w1} - t_{wo} \quad (5.32)$$

Przyjmując z tabel 2.4 dobowe nasłonecznienie, q_d zapotrzebowanie wody W_d , m³/dobę i przyrost temperatury Δt , K obliczamy zapotrzebowanie energii cieplnej na podgrzewanie wody obliczamy z równania analogicznego do (5.22)

$$Q_d = 0,278 W_d \gamma_d \Delta t, \text{ kWh/dobę} \quad (5.33)$$

a powierzchnię kolektora z równania:

$$F_{kt} = \frac{Q_d}{(q_s + q_{st})\eta}, \text{ m}^2 \quad (5.34)$$

W tych równaniach oznaczają:

γ_d – gęstość właściwa wody, kg/m³,

c_d – ciepło właściwe wody, kJ/kg K_{sr},

q_s – nasłonecznienie, kWh/m²

η – sprawność cieplna kolektora, (przyjmuje się $\eta = (0,4 - 0,6)$),
 q_{st} – straty ciepłone instalacji (przewody rurowe, zbiornik wodny
akumulacyjny, przyjmuje się od 20 do 30%).

Moc cieplną kolektora wyznacza równanie:

$$Q_k = q_s F_{kt} T, \text{ W} \quad (5.35)$$

w którym T jest czasem w godzinach.

Dla obliczonej użytecznej powierzchni kolektora pojemność zbiornika wodnego akumulacyjnego V_{za} oblicza się [Pabis J. 1987, Nowicki 1980] z równania:

$$V_{za} = 0,1 F_{kt}, \text{ m}^3 \quad (5.36)$$

W kolektorach słonecznych do podgrzewania wody użytkowej w warunkach letnich natężenie objętościowe wody przepływającej przez kolektor wynosi $W_k=1,2 \text{ dcm}^3/\text{min m}$, $W_k = 72 \text{ l/m}^2\text{h}$, a w warunkach zimowych $W_k = 0,8 \text{ dcm}^3/\text{min m}^2$ czyli $60 \text{ l/m}^2\text{h}$.

5.7. Uprozczone obliczenia kolektorów słonecznych o pośrednim ogrzewaniu wody użytkowej

W kolektorze słonecznym, pracującym w układzie pośrednim, czynnikiem grzewczym jest płyn niezamarzający (glikol lub borygo), krążący pomiędzy absorberem kolektora a rurowym wymiennikiem ciepła (węzownią), znajdującym się w zbiorniku akumulacyjnym wody użytkowej. Dla obliczanego kolektora o działaniu bezpośrednim zakładamy, że wymiennikiem ciepła będzie węzownica rurkowa miedziana o średnicy wewnętrznej $d_w = 21,0 \text{ mm}$ i zewnętrznej $d_w = 24,0 \text{ mm}$. Powierzchnię F_{wc} wymiennika obliczamy z równania:

$$Q = k F_{wc} (t_g - \Delta t_{sr}), \text{ W} \quad (5.37)$$

z którego mamy:

$$F_{wc} = \frac{Q}{k(t_g - \Delta t_{sr})}, \text{ m}^2 \quad (5.38)$$

gdzie:

t_g – temperatura czynnika grzewczego (glikolu) na wlocie do wymiennika, °C,

k – współczynnik przenikania ciepła dla miedzi ($K = 350 \text{ W/m}^2\text{K}$),

F_{wc} – powierzchnia wymiennika, m^2 .

Średnia temperatura wody użytkowej wyniesie:

$$\Delta t_{sr} = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{2}, \text{ K} \quad (5.39)$$

gdzie:

t_{w1} – temperatura wody z sieci na wlocie do zbiornika akumulacyjnego, °C,

t_{w2} – temperatura wody podgrzanej na wylocie ze zbiornika akumulacyjnego, °C.

Długość rurki miedzianej wymiennika obliczamy z równania:

$$l = \frac{F_{wc}}{\pi d_w}, \text{ m} \quad (5.40)$$

Pojemność glikolu w wymienniku rurkowym obliczmy z równania:

$$V_{gr} = \frac{\pi d_w^3}{4} l, \text{ m}^3 \quad (5.41)$$

a pojemność glikolu w absorberze kolektora słonecznego z równania:

$$V_{gab} = F_{wc} a, \text{ m}^3 \quad (5.42)$$

w którym a jest szerokością absorbera słonecznego w metrach, zatem, całkowita pojemność glikolu w układzie absorber kolektora – wymiennik ciepła, bez pojemności glikolu w rurkach instalacji będzie równa:

$$V_{gc} = V_{gr} + V_{gab}, \text{ m}^3 \quad (5.43)$$

Przyjmując natężenie $V_g = 60 \text{ l/m}^3\text{h}$ przepływu glikolu przez absorber kolektora równe i znając jego obliczoną pojemność V_{gc} możemy obliczyć liczbę n_{ob} obiegów glikolu przez absorber kolektora w ciągu 1 godziny:

$$n_{ob} = \frac{W_g F_{uż}}{V_{gc}}, \text{ obiegów/h} \quad (5.44)$$

W Polsce w miesiącach letnich, przez absorber przyrost temperatury wody w zbiorniku akumulacyjnym po jednym obiegu glikolu wynosi przeważnie od 3 do 5 K. Znając z obliczeń liczbę obiegów, można uzyskać orientacyjną odpowiedź, do jakiej temperatury zostanie podgrzana woda po jednym dniu pracy kolektora. W kolektorach, do podgrzewania wody użytkowej o działaniu bezpośrednim, nie stosuje się zabezpieczenia przed przekroczeniem dopuszczalnego ciśnienia i temperatury, bowiem zbiornik akumulacyjny podłączony jest do sieci wodnej, która kompensuje zmiany objętości wody. Natomiast w kolektorach o działaniu pośrednim, stosuje się, jako zabezpieczenia naczynia zbiorcze zainstalowane w sieci obiegu czynnika grzewczego na wlocie do kolektora. Pojemność naczynia zbiorczego oblicza się z równania:

$$V_{wz} = 0,045 x V_{gc}, \text{ m}^3 \quad (5.45)$$

gdzie:

x – powierzchnia użytkowa w gospodarstwie

V_{gc} – całkowita pojemność glikolu w układzie absorber – wymiennik ciepła, przewody instalacji wodnej w m^3 .

Przykład

Dla czteroosobowej osobowej rodziny dzienne zapotrzebowania wody M_w o średniej temperaturze t_g podgrzanej wody 45°C wyniesie 240 l/dobę . Do podgrzewania zastosowany będzie płaski płytowy kolektor o

pośrednim działaniu (płyn niezamarzający – akumulator ciepła), zainstalowany na dachu budynku. Temperatura wody z sieci miejskiej wynosi 8,0 °C. Zakłada się dwudniowe zapotrzebowanie wody.

Dobowe zapotrzebowanie na energię cieplną wynosi:

$$Q = \frac{M_w (t_p - t_0) c_w}{3600} = \frac{240 \cdot (45 - 8) 4,199}{3600} = 10,35 \text{ kWh}$$

Energia cieplna potrzebna na dwudniowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę wyniesie $q = 20,7$ kWh. Przyjmując dzienne średnioroczne nasłonecznienie dla Warszawy równe 2,8 kWh/m² dzień, obliczamy powierzchnię kolektora z równania:

$$F_k = \frac{2Q}{q} = \frac{2 \cdot 10,35}{2,9} = 7,4 \text{ m}^2$$

Uwzględniając sprawność cieplną kolektora $\eta = 0,5$ oraz współczynnik korekcyjny pochylenia kolektora $R = 1,2$ można obliczyć potrzebną powierzchnię kolektora:

$$F_k = \frac{F_k}{\eta R} = \frac{7,4}{0,5 \cdot 1,2} = 12 \text{ m}^2$$

Przyjmując wymiary kolektora, a – długość, = 4,8 m, b – szerokość = 2,5 m, h – wysokość = 8,0 cm, pojemność zbiornika akumulacyjnego wodnego V_a będzie wynosić:

$$V_a = 0,1 F_{kr} = 0,1 \cdot 12 = 1,2 \text{ m}^3$$

Jeżeli roczne wykorzystanie w dni słoneczne jest równe 1500 godzin, oraz średnioroczna gęstość strumienia ciepła q_s uzyskanego z kolektora wynosi 0,25 kW, to zastosowanie kolektora do podgrzewania wody pozwoli wtedy na oszczędność energii równą:

$$Q = 1500 q_s F_{kr} = 1500 \cdot 0,25 \cdot 12 = 4500 \text{ kWh}$$

Zatem, w przeliczeniu na zużycie paliwa stałego na podgrzewanie wody, oszczędność węgla wyniesie 968 kg rocznie, co pozwala w tych warunkach na zmniejszenie rocznego zużycia węgla ok. 8,8%. Dla akumulacyjnego zbiornika wodnego o pojemności $V_a = 1,2 \text{ m}^3$ powierzchnię rurkowego wymiennika ciepła obliczamy z równania przenikanie ciepła:

$$Q = k F_w \Delta t_{sr}, \text{ kW}$$

w którym:

$$F_w = \frac{Q}{k(t_{g2} - \Delta t)} = \frac{10350}{350(40 - 20)} = 1,47 \text{ m}^2$$

gdzie:

k – współczynnik przenikania ciepła, $k = 350 \text{ W/m}^2$,

F_w – powierzchnia wymiennika, m^2 ,

t_{g2} – temperatura podgrzanego w kolektorze glikolu, $^{\circ}\text{C}$,

Δt_{sr} – średnią temperaturę podgrzanej wody wyznacza wzór:

$$\Delta t_{sr} = \frac{t_{w2} - t_{w1}}{2} = \frac{50 - 10}{2} = 20, \text{ K}$$

w którym:

t_{w2} – temperatura wody podgrzanej, $^{\circ}\text{C}$,

t_{w1} – temperatura wody z sieci na wlocie do zbiornika akumulacyjnego, $^{\circ}\text{C}$.

Długość L rurki o średnicy $d = 2 \text{ cm}$ wymiennika spiralnego będzie wynosić:

$$L = \frac{F_w}{\pi \cdot d} = \frac{1,47}{\pi \cdot 0,02} = 23,4 \text{ mb}$$

Objętość czynnika grzewczego (glikolu) w wymienniku rurkowym wyniesie:

$$V_g = \frac{\pi d^2}{4} L = 23,4 \frac{\pi \cdot 0,02^2}{4} = 7,34 \text{ litrów}$$

Objętość V_a czynnika grzewczego (glikolu) w absorberze kolektora o powierzchni $F_k = 12 \text{ m}^2$ i grubości absorbera $a = 8 \text{ mm}$ wyniesie:

$$V_a = F_k a = 12 \cdot 0,008 = 0,096 \text{ m}^3 = 96,0 \text{ litra}$$

Sumaryczna objętość czynnika grzewczego w wymienniku i w kolektorze wyniesie:

$$V_{cg} = V_g + V_a = 7,34 + 96 = 103,3 \text{ litra}$$

5.7.1. Przykład. Podgrzewanie wody przeznaczonej do nawadniania roślin w szklarni przy pomocy kolektora o bezpośrednim działaniu

Zapotrzebowanie dzienne wody do podlewania roślin w szklarni wynosi ok. $3,6 \text{ m}^3$. Temperatura wody do podlewania roślin winna wynosić ok. 20°C , a temperatura wody z sieci wodociągowej wynosi średnio 8°C (tzw. średnia roczna temperatura obliczeniowa). Oznacza to, że wymagany przyrost temperatury wody winien wynosić 12 K .

Wyniki badań IBMER (24) wykazały, iż w miesiącach od kwietnia do września przy średniej gęstości strumienia ciepła 2100 W/m^2 można w ciągu słonecznego dnia podgrzać wodę od temperatury $6-7^\circ\text{C}$ do ok. 40°C . W tym przypadku stosując mieszanie podgrzanej wody z wodą z sieci można uzyskać temperaturę wody do podlewania równą ok. $20,0^\circ\text{C}$. Zatem do podlewania roślin przy dziennym zapotrzebowaniu wody $3,6 \text{ m}^3$ pojemność zbiornika wodnego powinna wynosić $1,8 \text{ m}^3$ (1/2 dziennego zapotrzebowania).

Mając na uwadze konieczność podlewania wody również w miesiącach jesiennych, zimowych i wiosennych, w których to uzyskuje się gęstość q_s strumienia ciepła około 250 W/m^2 , należy zastosować zbiornik wodny o pojemności dwa razy większej, a mianowicie $3,6 \text{ m}^3$. Jednostkowe natężenie przepływu wody przez 1 m^2 powierzchni kolektora, przy podgrzaniu wody z 8°C do 40°C , obliczamy z równania:

$$Q = M_w c_w (t_{w1} - t_{w0}), W$$

skąd natężenie masowe M_w przepływu wody, jeżeli $c_w = 1 \text{ kJ/kgK}$ i $t_{w1} = 40^\circ\text{C}$ będzie równe:

$$M_w = \frac{Q}{c_w (t_{w1} - t_{w0})} = \frac{250}{1,0 \cdot (8 - 40)} 7,8 \text{ kg wody/m}^2$$

Przy ośmiogodzinnym podgrzewaniu wody przez kolektor, dzienne jednostkowe masowe natężenie przepływu wody wyniesie:

$$M_d = 8 M_w = 8 \cdot 7,8 = 62,5 \text{ kg wody/m}^2$$

Przy dziennym zapotrzebowaniu wody $M_{wc} = 8 \text{ m}^3$ do podlewania, podgrzanej do temperaturze 40°C , powierzchnia kolektora F_k będzie równa:

$$F_k = \frac{M_{wc}}{M_d} = \frac{1800}{62,5} = 28,8 \text{ m}^2$$

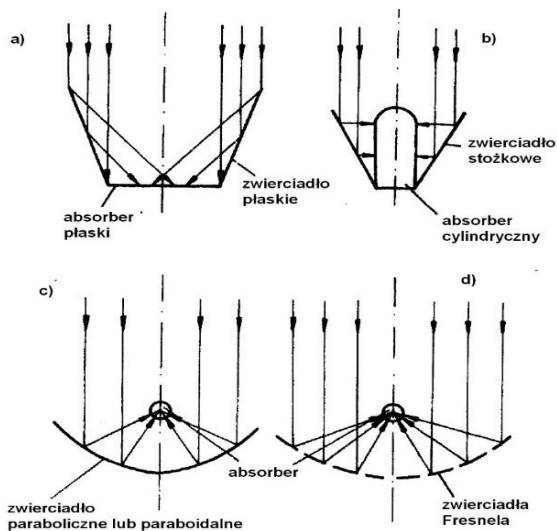
Przyjmujemy pojemność zbiornika wodnego $V_w = 2000$ litrów, gdy w ciągu dnia podczas podgrzewania, woda krąży pomiędzy kolektorem, a zbiornikiem wodnym. W warunkach krajowych woda po jednorazowym przepływie przez kolektor $M_w = 1/\text{m}^2$ minutę ogrzewa się o ok. 4 K. Przy natężeniu przepływu wody przez kolektor 60 l/m^2 godz. dla warunków letnich, i zimowych 48 l/m^2 godz., przez kolektor o powierzchni $F_k = 28,8 \text{ m}^2$ przepływie masa wody:

$$M_{wc} = F_k M_w = 28,8 \cdot 60 = 1728 \text{ l/godz.}$$

Dla przyjętej pojemności zbiornika wodnego w ciągu ośmiu godzin nastąpi ośmiokrotna cyrkulacja wody. Zatem przy przyroście temperatury wody o 4,0 K dla jednej cyrkulacji temperatura wody w zbiorniku może osiągnąć ok. 35°C .

5.8. Kolektory słoneczne skupiające

W kolektorach słonecznych skupiających, zwanych również kolektorami koncentrycznymi, wykorzystano różnego rodzaju zwierciadła i soczewki do powiększenia stopnia koncentracji (stosunek powierzchni koncentratora do powierzchni absorbera) może osiągnąć wartość do 10000 razy większą. Takie warunki uzyskuje się w tzw. piecach słonecznych. Kolektory skupiające dzielą się na kolektory zwierciadlane i soczewkowe. Podział ten wynika ze sposobu skupienia promieniowania słonecznego. Kolektory zwierciadlane można podzielić na paraboliczne oraz paraboliczne. Na rys. 5.18 pokazano schematycznie kolektory skupiające.



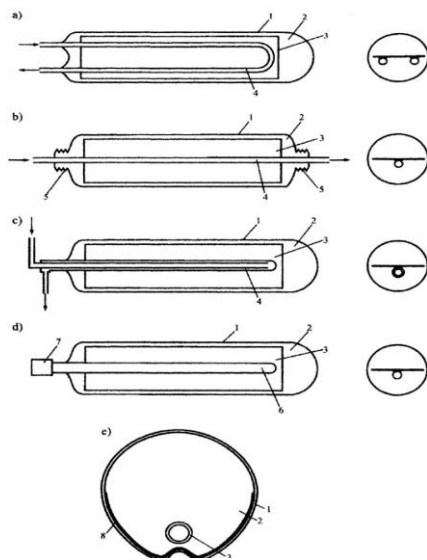
Rys. 5.18 Kolektory skupiające: a - z absorberem płaskim, b - z absorberem cylindrycznym, c - z absorberem cylindrycznym o przekroju kołowym, d - z absorberem kulistym [Gogół W. i in. 1979].

Kolektory skupiające charakteryzują się mniejszymi gabarytami. Muszą być ustawiane prostopadle do padania promieni słonecznych, w promieniowa słonecznego padającego na powierzchnie absorbera. W związku z tym kolektory takie muszą być wyposażone urządzenia sterujące, umożliwiające ich obrót wraz z ruchem słońca. Kolektory sku-

piające umożliwiają uzyskanie mocy cieplnej od kilkudziesięciu do kilkuset wat. Wg powszechnej opinii specjalistów, w warunkach Polski nie ma możliwości stosowania tego typu kolektorów.

5.9. Kolektory próżniowe

W ostatnich latach dzięki pracom badawczym zmierzającym do obniżenia strat ciepłych z kolektora do otoczenia, a tym samym poprawienia sprawności cieplnej kolektora, opracowano kolektory próżniowe. W kolektorach płaskich, absorber metalowy, pokryty warstwą selektywną umieszczony jest w próżni. Na rys. 5.19 pokazano różne rodzaje kolektorów próżniowych.



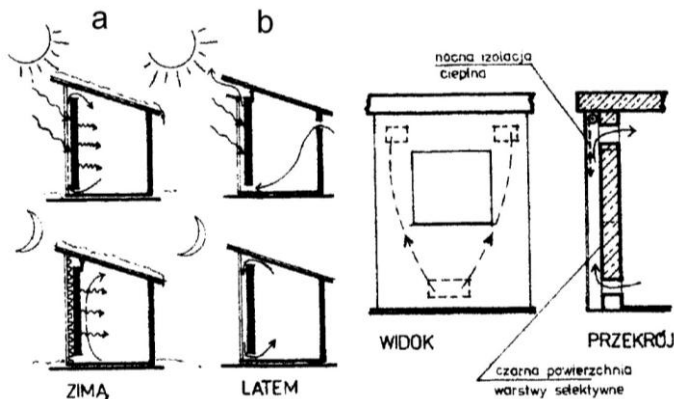
Rys. 5.19 Kolektory próżniowe: a - z przewodem rurkowym czynnika roboczego w kształcie litery U, b - z przewodem rurkowym prostym czynnika rurowego, c - dwiema wspólnymi rurkami czynnika roboczego, d - z rurką ciepłą, 1 - szklana rurka próżniowa, 2 - obszar próżni, 3 - absorber, 4 - rurka z czynnikiem roboczym, 5 - przewód harmonijkowy, 6 - rurka ciepła - parownik, 7 - rurka ciepła - skraplacz, 8 - warstwa srebra [Smolec W. 2000].

Do płaskiej płyty absorbera, przymocowana jest rurka w kształcie litery U lub rurka prosta, przez którą przepływa czynnik grzewczy. Rur-

ki dwukrotnie przechodzą przez szklaną ściankę izolacji próżniowej. W kolektorach próżniowych można [Smolec 2000] uzyskać sprawność cieplną 45 – 50% (przy przetwarzanej energii promieniowania słonecznego na ciepło użyteczne o temperaturze czynnika roboczego 100 – 300°C).

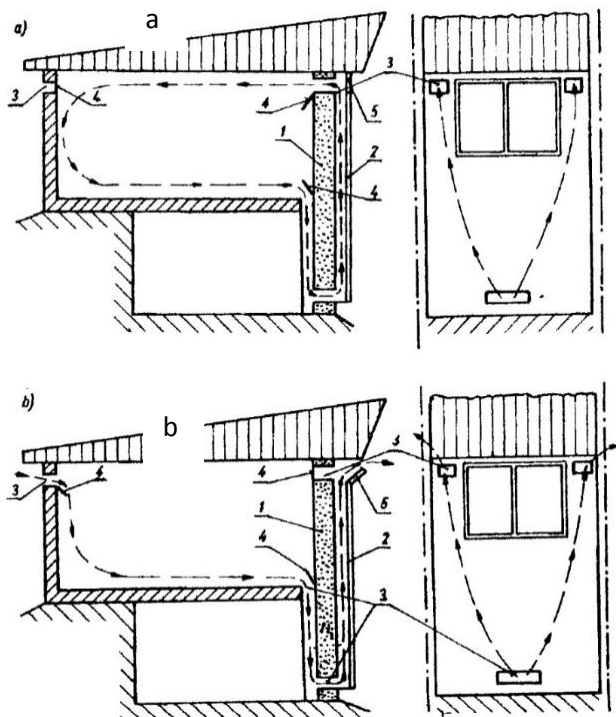
5.10. Bierne (pasywne) ogrzewanie słoneczne

W odróżnieniu od omówionych w poprzednich rozdziałach instalacji słonecznych, w których przepływ czynnika grzewczego np. powietrza lub wody przez kolektor wymuszony jest mechanicznie za pomocą wentylatora lub pompy wodnej, w systemach biernych wykorzystanie energii słonecznej odbywa się na zasadzie tzw. efektu szklarniowego. Efekt szklarniowy polega na przepuszczaniu krótkofalowego promieniowania słonecznego przez elementy przezroczyste instalacji, np. okna szklarnie lub ściany, a następnie absorbowaniu go na zewnętrznej powierzchni ścian i przegród wewnątrz pomieszczeń. W przypadku budynku mieszkalnego, ciepło emitowane jest w postaci promieniowania długofalowego nieprzepuszczanego. Ciepło uzyskane tą drogą częściowo akumulowane przez ściany i przegrody budynku i częściowo na drodze konwekcji i rozprowadzane jest powietrzem ogrzewając wnętrze pomieszczenia. Na rys. 5.20 przedstawiono klasyfikację biernych systemów wykorzystywania energii słonecznej.

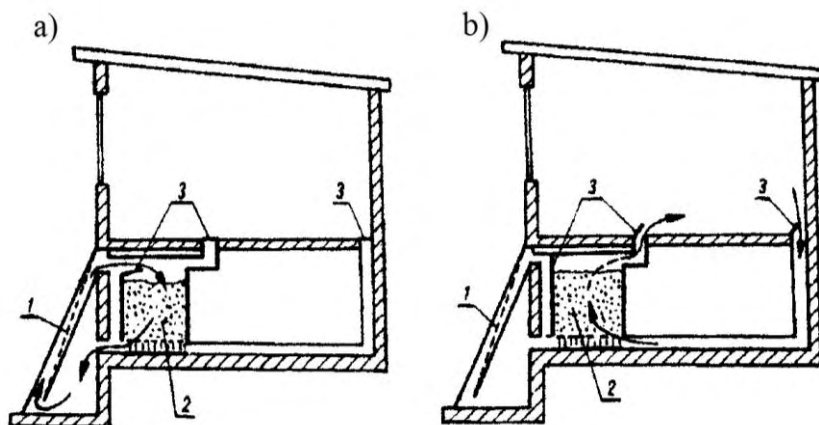


Rys. 5.20 Klasyfikacja systemów biernych wykorzystania energii słonecznej: a – w systemie zysków bezpośrednich, bezpośrednich – bezpośrednich w systemie zysków pośrednich [Wołoszyn M. A. 1991].

W systemie zysków bezpośrednich (rys. 5.20 a) bezpośrednie promieniowanie słoneczne przenika do wnętrza budynku, gdzie jest akumulowane przez ściany i inne elementy budowlane. Natomiast w systemie zysków pośrednich (rys. 5.20 b) bezpośrednie promieniowanie słoneczne akumulowane jest przez specjalną przegrodę umieszczoną za szklaną ścianą. Przykładem takiego systemu jest przedstawiony na rys. 5.21 system, tzw. „domu słonecznego”, wg projektu profesora. F.-Trombe z Odeillo, ogrzewanego w okresie chłodnym i chłodzonego w lecie [Kotarscy 1989]. Na rys. 5.22 pokazano system ogrzewania domu biernym kolektorem słonecznym współpracującym z kamiennym akumulatorem ciepła.



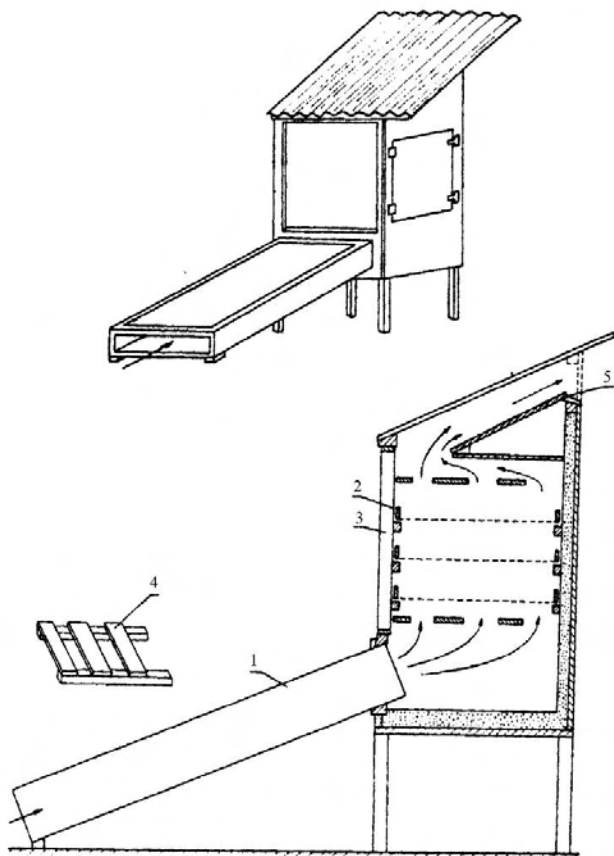
Rys. 5.21 System domu słonecznego wg projektu Trombe, a w Odeillo: a - ogrzewanie w okresie chłodnym, b - chłodzenie w okresie ciepłym: 1 - ściana kolektorowo magazynowa, 2 - podwójne oszklenie, 3 - otwory wentylacyjne, 4 - zasuw, 5 - uchylny wywietrznik, [Kotarska Z., Kotarski K. 1989].



Rys. 5.22 Termosyfonowe ogrzewanie powietrzne z kolektorem i magazynem ciepła: a - cykl dzienny [gromadzenie ciepła w magazynie] b - cykl ogrzewczy pomieszczeń: 1 - kolektor powietrzny, 2 - skalny magazyn ciepła, 3 - zasuwki [Kotarska Z., Kotarski K. 1989].

Podczas słonecznego dnia powietrze podgrzane w biernym kolektorze słonecznym jest magazynowane w kamiennym akumulatorze, z którego w ciągu nocy ciepło, na zasadzie naturalnej wentylacji i przepływu powietrza przez kamienne złożo akumulatora i konwekcyjnej wymiany ciepła jest z akumulatora unoszone do pomieszczenia. Innymi znanymi i powszechnie stosowanym przykładami biernego ogrzewania słonecznego są szklarnie i tunel foliowe.

W rolnictwie bierny systemy słoneczne wykorzystywane w suszarnictwie produktów rolniczych tam gdzie suszy się niewielkie masy surowców jak, grzyby, jagody, owoce, lub zioła. Na rys. 5.23 pokazano przykładowo tego rodzaju suszarkę.



Rys. 5.23 Suszarka z powietrznym kolektorem i ścianą pochłaniaczem: 1 - kolektor słoneczny, 2 - ściana absorbująca promieniowanie słoneczne (pochłaniacz), 3 - osłona przezroczysta, 4 - kierownice rozdzielcze, 5 - kierownica wypływu powietrza [Kotarska Z., Kotarski K. 1989].

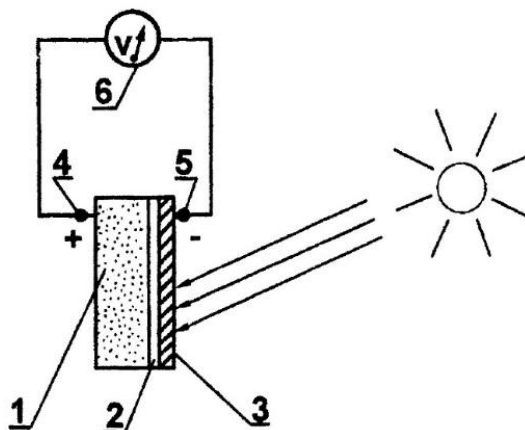
Powietrze z otoczenia podgrzane w kolektorze 1 i ścianie pochłaniającej promieniowanie słoneczne 2 osłoniętej szkłem lub pleksi, przepływa przez komorę suszenia 3. Od dołu w komorze suszenia znajdują się deski rozdzielcze 4 a na wylocie powietrza z komory suszenia znajduje się zaporę przepływu powietrza 5. Suszarki te są przydatne w gospodarstwach domowych i na działkach.

Literatura:

- [1]. Gogół W., Chocholski A., Pabis J., Wiśniewski G. 1993. *Konwersja techniczna energii promieniowania słonecznego w warunkach krajowych*. Ekspertyza Komitetu Termodynamiki i Spalania PAN, Warszawa.
- [2]. Gołębiowski S. 1992. *Wysokosprawny kolektor do podgrzewania powietrza*. Materiały z seminarium pt. Kolektory słoneczne, problemy budowy i eksploatacji. IBMER, Warszawa.
- [3]. Kotarski K., Kotarska Z. 1989. *Ogrzewanie energią słoneczną*. NOT, SIGMA, Warszawa
- [4]. Nowicki J. 1980. *Promieniowanie słoneczne, jako źródło energii* ARKADY, Warszawa
- [5]. Pabis J. 1987. *Podstawy techniki ciepłej w rolnictwie*. PWRiL, Warszawa.
- [6]. Pabis J. 1987. *Kolektory słoneczne uzupełniającym źródłem energii w rolnictwie*, [broszura] IBMER, Warszawa.
- [7]. Pabis J. 1967. *Możliwości. Wykorzystania energii słonecznej do podgrzewania powietrza w urządzeniach suszarniczych*, [broszura] sprawozdanie z badań, IBMER XXII/347, Warszawa.
- [8]. Pabis J. 2003. *Uwarunkowania budowy instalowania eksploatacji kolektorów słonecznych do podgrzewania powietrza w produkcji rolniczej*. Czysta Energia. Nr10. OBRYS, Poznań.
- [9]. Smolec W. 2000. *Fototermiczna konwersja energii słonecznej*. PWN, Warszawa.
- [10]. Wołoszyn M. A. 1992. *Wykorzystanie energii słonecznej w budownictwie jednorodzinym*. Centralny Ośrodek Budownictwa, Warszawa.

6. OGNIWA FOTOWOLTAICZNE

Ogniwa fotowoltaiczne, zwane też fotoogniwami, są urządzeniami umożliwiającymi bezpośrednią przemianę światła słonecznego w energię elektryczną. Działanie ogniw słonecznych oparte jest na zjawisku fotowoltaicznym, polegającym na zmianie elektrycznych właściwości ciał pod wpływem promieniowania słonecznego. Typowym ogniwem fotowoltaicznym jest ogniwo krzemowe pokazane na rys. 6.1.



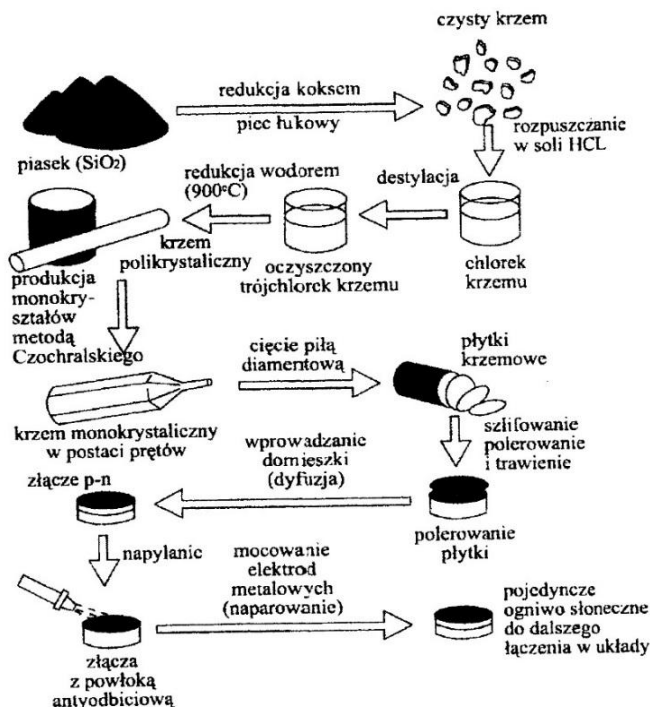
Rys. 6.1 Budowa krzemowego ogniwa słonecznego typu P - N: 1 materiał typu P - 2 - materiał typu N - 3 - warstwa przeciwodblaskowa, 4, 5 - zaciski, 6 - woltmierz [Dreszer K., Michałek R., Roszkowski A. 2003].

Jednakże pozbawiony innych dodatków tak zwany czysty krzem nie przewodzi prądu elektrycznego. Jeżeli natomiast do czystego krzemu, mającego cztery elektrony walencyjne, dodamy atomy pierwiastka mającego inną liczbę elektronów walencyjnych niż atom krzemu, nastąpi ujawnienie się w nim nośników energii elektrycznej. Do czystego krzemu można dodawać bor lub arsen. Podczas dodawania do krzemu boru, liczba elektronów walencyjnych potrzebnych do utworzenia potrzebnych wiązań w sieć krystaliczną jest za mała. W rezultacie, powstają puste miejsca tzw. „dziury”, które mogą zmieniać

swoje położenie wewnątrz materiału i są dodatnimi nośnikami energii elektrycznej. Uzyskany z połączenia materiał zwany jest półprzewodnikiem typu „P”, jeżeli do krzemu dodamy arsen, uzyskujemy wolne elektrony, zbędne w wiązaniach atomowych, które są ujemnymi nośnikami energii elektrycznej. W wyniku ich połączenia uzyskujemy półprzewodnik typu „N”, jeżeli nastąpi zetknięcie się półprzewodnika „P” posiadającego nadmiar „dziur”, z półprzewodnikiem typu „N”, mającym nadmiar elektronów, powstaje ogniwo krzemowe, na zaciskach, którego może wytworzyć się napięcie elektryczne. Ogniwo fotowoltaiczne można traktować, jako złącze między dwoma warstwami półprzewodnika, w którym nośnikiem prądu są swobodne elektrony i półprzewodnika „P”, w którym występują dziury zwane „dziurawym” półprzewodnictwem. Efekt fotowoltaiczny występuje nie tylko w złączach „P” i „N” z tego samego materiału, ale również pomiędzy różnymi półprzewodnikami wytworzonymi z różnych materiałów. Schemat złącza typu „P” – „N” pokazano na rys. 6.1. Fotoogniwo składa się z cienkiej warstwy krzemu „N” będącego półprzewodnikiem, którego podstawowym nośnikami energii elektrycznej są elektrony oraz z grubszej znajdującej się pod nią warstwy krzemu typu „P” o ładunkach dodatnich, które są także nośnikami energii. Górna powierzchnia fotoogniwa, pokryta jest warstwą przeciw odbiciową, zwiększającą absorpcję promieniowania słonecznego dolna zaś, osłonięta jest blaszką metalową stanowiącą elektrodę dodatnią. Półprzewodnik „N” osłonięty jest od góry szklaną osłoną chroniącą go przed wpływem szkodliwych warunków atmosferycznych. Podstawowym materiałem do budowy ogniw fotowoltaicznych jest krzem krystaliczny pozyskiwany ze złóż kwarcowych. Obecnie istnieje kilka technologii produkcji ogniw fotowoltaicznych z krzemu [Lange 2001], a mianowicie:

- technologia krzemu monokrystalicznego,
- technologia krzemu polikrystalicznego,
- technologia krzemu amorficznego.

Na rys. 6.2 przedstawiono technologię produkcji krzemowych ogniw słonecznych



Rys. 6.2 Technologia produkcji krzemowych ogniw słonecznych [Wiśniewski G. 1999].

W praktyce stosowanie ogniw fotowoltaicznych, oprócz zegarków i kalkulatorów, jest rzadko stosowane. Dla uzyskania większej mocy elektrycznej baterie łączy się w układy, które po umieszczeniu ich w ramach pomiędzy dwoma szybami stanowią moduły fotowoltaiczne, z których tworzy się systemy fotowoltaiczne. Wg Langego [2001] w praktyce istnieją trzy rodzaje systemów fotowoltaicznych:

- autonomiczne – wyposażone w baterię akumulatorową, umożliwiające zasilanie w energię w porze nocnej oraz w dni pochmurne, stosowane na obszarach bez dostępu do sieci elektrycznej,
- hybrydowe – autonomiczne zespoły fotoelektryczne, występujące w kombinacji z generatorem dieslowskim lub turbiną wiatrową,
- podłączone do sieci – bez baterii, gdy sieć służy, jako magazyn energii elektrycznej.

Sprawność modułów fotowoltaicznych nie powinna być mniejsza niż 10,5% i o napięciach ponad 13 V. Takie napięcia umożliwiają ładowanie akumulatora. Wg Łupkowskiego [2003] ogólnodostępne na polskim rynku moduły fotowoltaiczne mają powierzchnię od 0,3m² do 1,0m². Stosowane są w transporcie drogowym, (sygnalizacja, znaki drogowe) transporcie morskim oraz w pojazdach słonecznych, a w rolnictwie do systemów nawadniania roślin oraz w wentylacji i klimatyzacji. Moc modułów określa się w watach mocy szczytowej, czyli parametrach, jakie osiągają przy promieniowaniu słonecznym o mocy 1,0 kW/m² i w temperaturze powietrza otoczenia 25°C. Moce szczytowe zawierają się od 15 W do 120 W. Watt peak jest zdefiniowana, jako moc dostarczona przez ogniwo w warunkach standardowych (STC – Standard Testing Conditions), tj. przy promieniowaniu słonecznym 1000 W/m² i temperaturze 25°C [Pietruszko 2001]. Trwałość ogniw z krzemu monokrystalicznego wynosi ok. 25 lat, a ogniw z krzemu amorficznego ok. 8 – 10 lat. Systemy fotowoltaiczne znajdują w praktyce coraz szersze zastosowanie. Najbardziej rozpowszechnione jest ich stosowanie w elektronice użytkowej do zasilania zegarków, kalkulatorów, odbiorników radiowych i aparatury kontrolno – pomiarowej. Coraz szersze zastosowanie znajdują fotoogniwa w telekomunikacji, także w obiektach rekreacji i turystyce.

Literatura:

- [1]. Dreszer K., Michałek R., Roszkowski A. 2003. *Energia odnawialna – możliwości jej pozyskiwania w rolnictwie*. Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej. Kraków, Lublin, Warszawa.
- [2]. Lange J. 2001. *Energia słoneczna nie z tej ziemi*. Czysta energia nr 4. ABRYS, Poznań.
- [3]. Łupkowski P. 2003. *Ogniwa fotowoltaiczne*. Czysta energia nr 10, ABRYS, Poznań.
- [4]. Pietruszko St. 2001. *Fotowoltaiczne systemy wytwarzania energii elektrycznej – Stan obecny i oczekiwania*. Sympozjum Techniczne, ekologiczne i ekonomiczne aspekty energii odnawialnej, SGGW 2001, materiały z sympozjum.
- [5]. Wiśniewski G., Gołębiowski S., Gryciuk M. 1999. *Kolektory słoneczne, poradnik wykorzystania energii słonecznej* – książka. Centralny Ośrodek Budownictwa, Warszawa.

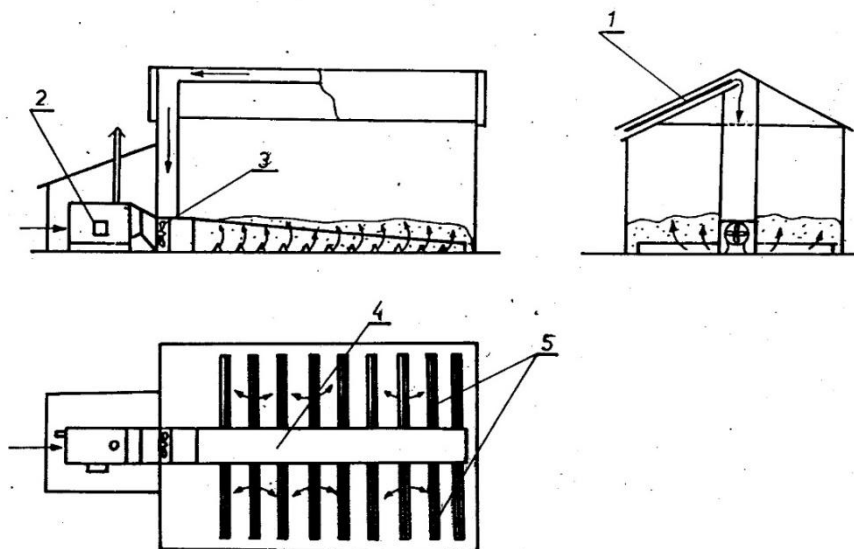
7. ZASTOSOWANIE KOLEKTORÓW SŁONECZNYCH W PRODUKCJI ROLNICZEJ I GOSPODARSTWACH DOMOWYCH

Potrzeba szerokiego stosowania kolektorów słonecznych w rolnictwie, uzasadniona jest z jednej strony zapotrzebowaniem na energię ciepłą, szczególnie niskotemperaturową w miesiącach letnich, z drugiej zaś dobrymi warunkami do ich instalowania. Sprzyja temu zarówno o wiele mniejsze zanieczyszczenie atmosfery niż w mieście oraz duża ilość znacznych powierzchni dachowych, umożliwiających instalowanie na nich kolektorów o dużych powierzchniach. Nie bez znaczenia jest również możliwość budowy kolektorów do podgrzewania powietrza systemem gospodarczym lub przez małe zakłady rzemieślnicze z uwagi na ogólnie dostępny materiał na ich budowę, oraz łatwość wykonania i montażu. W Austrii dzięki organizowaniu się lokalnych zespołów inicjatywnych, produkujących kolektory systemem gospodarczym, koszty ich wykonania tym sposobem były o ok. 50% niższe niż kolektorów wykonanych sposobem przemysłowym. Obecnie w Austrii energia uzyskana z odnawialnych źródeł energii stanowi ponad 20% ogólnych potrzeb energetycznych. Do działów produkcji rolniczej, w których kolektory znajdują szerokie zastosowanie należy zaliczyć: produkcję roślinną, zwierzęcą, przechowywanie produktów żywnościowych oraz gospodarstwa domowe.

7.1. Kolektory słoneczne w suszarnictwie produktów rolniczych

Oprócz podstawowego zaplecza suszarniczego, na które składają się suszarnie typu przemysłowego, np. komorowe do suszenia ziarna zbóż o przepustowości od kilku do kilkunastu t/h, w temperaturze czynnika suszącego 60 – 80°C, lub suszarki bębnowe do suszenia zielenek o przepustowości 4,0 – 6,0 ton na godzinę wilgotnej masy i w temperaturze czynnika suszącego 500°C – 600°C, bardzo ważne jest tzw. uzupełniające zaplecze suszarnicze złożone z suszarek podłogowo kanało-

wych, podłogowo rusztowych, suszarek sitowych oraz silosów zbożowych.



Rys. 7.1 Zastosowanie - płytowego kolektora słonecznego do suszenia ziarna zbóż na suszarce podłogowo - kanałowej; 1 - kolektor słoneczny, 2 - Podgrzewacz powietrza, 3 - wentylator osiowy, 4 - kanał główny, 5 kanały boczne rozpraszające powietrze [Pabis J. 1991].

W produkcji rolniczej, co roku suszy się ok. 5 mln ton ziarna zbóż, ok. 4,0 mln pasz zielonych, tytoniu, ziół, nasion warzyw i innych produktów rolnych. W ostatnich latach ze wzrostem zainteresowania wykorzystaniem biomasy (odpady drewna, wiklina i inne uprawy roślinne) na cele energetyczne powstała konieczność suszenia tych surowców przed dalszym ich przetwarzaniem, np. na brykiety lub pelety. Suszarnictwo rolnicze jest jednym z najbardziej energochłonnych procesów konserwacji produktów rolniczych, na które to zużywa się, co roku ok. 0,7 - 1,2 mln ton węgla. Dotychczasowe prace badawcze [Pabis J. 1967, 1980, 1987], [Pabis S. 1982], [Leszczyński M., Pabis J. 1980], [Riva G., Mazzotto Z. 1985], [Kozłowski 1987] wskazują, że zastosowanie do suszenia kolektorów słonecznych suszarkach podłogowych i silosach zbożowych umożliwia znaczne obniżenie zużycie paliwa (w granicach 20 - 25%), a stosowanie niższych temperatur czynnika suszącego umożliwia uzyskanie

lepszej jakości suszonych produktów. Ma to istotne znaczenie podczas suszenia materiałów nasiennych oraz ziół i tytoniu. Obniża to także emisję do atmosfery szkodliwych produktów spalania paliw tradycyjnych. Na rys. 7.1. pokazano zastosowanie płaskiego płytowego kolektora do suszenia ziarna zbóż w suszarce podłogowo kanałowej.

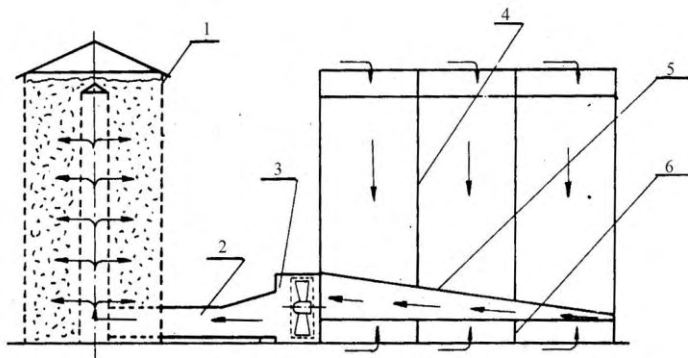
Kolektor słoneczny 1 o powierzchni 100 m^2 , zainstalowany jest na południowej połąci dachowej budynku. Powietrze z otoczenia zasysane jest przez wentylator i tłoczne poprzez podgrzewacz powietrza z wymiennikiem ciepła 2 do kanału 4, skąd systemem kanałów bocznych 5 przepływa przez warstwę suszonego ziarna. Powierzchnia czynna suszarki wynosi 60 m^2 , i zapewnia możliwość suszenia ok. 30 – 50 ton ziarna zbóż i innych nasion. Dla uniezależnienia się od warunków atmosferycznych, zainstalowano do suszarki podgrzewacz powietrza z wymiennikiem ciepła o mocy 60 kW opalany węglem. Ostatnio uruchomiono w Polsce produkcję przemysłową podgrzewaczy powietrza opalanych biomasą (zrębki drewna, słoma). Przy średniej gęstości strumienia ciepła $q = 400 \text{ W/m}^2$ uzyskiwanej z kolektora w miesiącach czerwiec – sierpień, można otrzymać przyrost temperatury powietrza w granicach od 6 do 8 K. Potrzebna moc cieplna dla uzyskania ww. parametrów wynosi ok. 40 kW . Podczas rocznej eksploatacji 200 – 300 godzin, można (bez podgrzewacza powietrza), uzyskać oszczędność 1,5 – 2,5 ton węgla. Jeżeli suszarka jest wykorzystywana w ciągu roku również do suszenia innych produktów rolniczych, oszczędność paliwa może znacznie wzrosnąć.

Kolektory słoneczne mogą być również stosowane do suszenia ziarna zbóż w różnego rodzaju suszarniczych silosach zbożowych. Suszarnicze silosy zbożowe, w odróżnieniu od silosów składowych, posiadają konstrukcję umożliwiającą równomierny przepływ powietrza przez warstwę ziarna o natężeniu przepływu w granicach 200 – 400 $\text{m}^3/\text{m}^3\text{h}$, (1 m^3 powietrza na 1 m^3 ziarna na godzinę), oraz źródło ciepła do podgrzewania powietrza.

Na rys. 7.2 pokazano układ 3 płytowych foliowych kolektorów o łącznej powierzchni 100 m^2 zainstalowanych na ścianie budynku magazynu zbożowego.

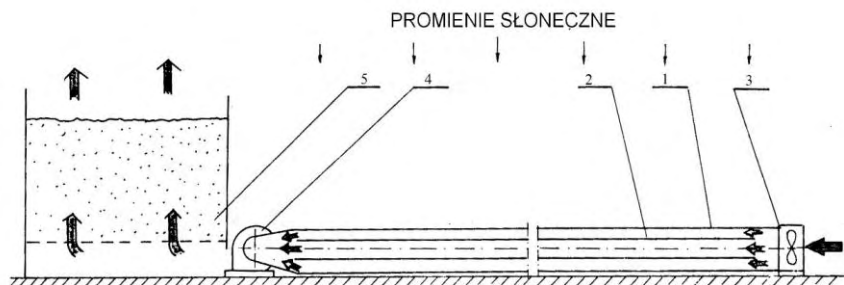
Silos zbożowy 1 o pojemności 30 ton wyposażony jest w kanał powietrzny 2 i wentylator 3. Absorber z czarnej folii osłonięty jest folią przezroczystą, składa się z trzech części: pionowej 4 na ścianie, zbieżnej 5 pomiędzy częścią pionową a częścią poziomą 6. Wentylator zasysa podgrzane powietrze z kolektora i tłoczy je do silosu zbożowego. Wyda-

tek powietrza wentylatora wynosi $9200 \text{ m}^3/\text{h}$. Przyrost temperatury powietrza podczas suszenia ziarna zbóż wnosił średnio 5 K . Masa odparowanej wody z objętości jednego m^3 ziarna w silosie wynosiła $0,92 \text{ kg}$ wody na godzinę przy szybkości suszenia $37,0 \text{ kg}$ wody/h. W ciągu całego sezonu oszczędność węgla wynosi $2,7 \text{ kg/h}$.



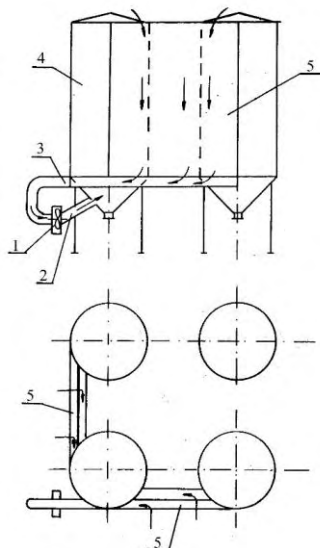
Rys. 7.2 Zastosowanie płaskiego płytowego foliowego kolektora słonecznego zainstalowanego na ścianie magazynu zbożowego do suszenia ziarna zbóż w silosie: 1 silos zbożowy o pojemności 30 ton, 2 – kanał powietrzny, 3 – wentylator, 4 – kolektor pionowy, 5 – kolektor ukośny, 6 – kolektor poziomy [Kulik T. 1987].

Na rys. 7.3 pokazano zastosowanie foliowego kolektora rurowego do suszenia pszenicy w silosie zbożowym o pojemności 10 ton.



Rys. 7.3 Zastosowanie rurowego foliowego kolektora słonecznego do suszenia ziarna zbóż w silosie zbożowym o pojemności 10 ton: 1 – przewód rurowy przezroczysty, 2 – przewód rurowy czarny (absorber), 3 – wentylator osiowy, 4 wentylator promieniowy, 5 – silos zbożowy [Pabis J. 1987].

Kolektor rurowy o średnicy 0,6 m, długości 25 m i powierzchni czynnej 20 m², zainstalowano na zewnątrz magazynu zbożowego. Przyrost temperatury powietrza otoczenia wynosił średnio 11 K przy średniej gęstości strumienia ciepłego 600 W/m². Inne zastosowania kolektora słonecznego do suszenia ziarna zbóż w silosach zbożowych pokazano na rys. 7.4.



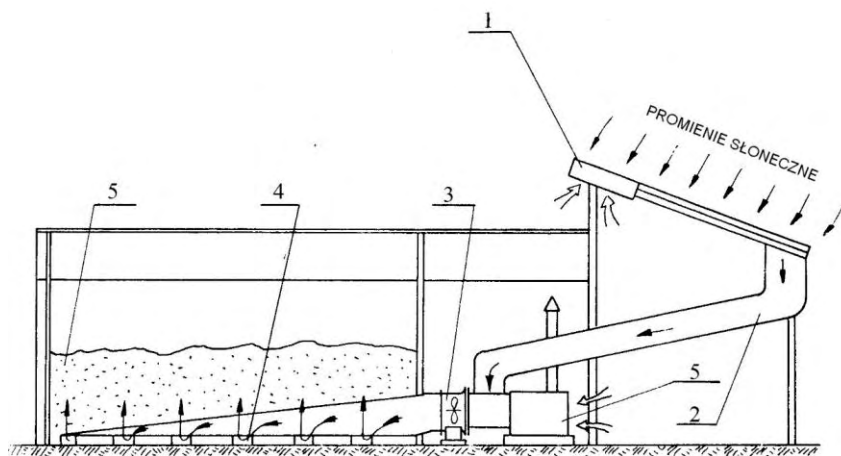
Rys. 7.4 Zastosowanie płytowych kolektorów słonecznych zainstalowanych na ścianach baterii 4 silosów zbożowych: 1 - wentylator, 2 - przewód tłoczący powietrze, 3 - przewód ssący podgrzane powietrze do silosów zbożowych z kolektorów, 4 - bateria silosów, 5 - kolektory słoneczne [Pabis J. 1987].

W baterii czterech silosów zbożowych typu PP - 1 (każdy o pojemności 30 ton) zainstalowano na dwóch ścianach bocznych dwa kolektory słoneczne o powierzchniach 20 m² każdy. Absorbery osłonięte folią przezroczystą wykonane są z blachy falistej pomalowanej na kolor czarny. Podczas suszenia ziarna zbóż w miesiącu sierpniu, średnia gęstość strumienia ciepła wynosiła 300 W/m² - powodując przyrost temperatury powietrza o 6 K. W ciągu roku oszczędność paliwa (węgla) wynosiła ok. 2000 kg. Z uwagi na zmienne warunki atmosferyczne, silosy zbożowe suszarnicze powinny jednak być wyposażone w podgrzewacze

powietrza opalane węglem, paliwem ciekłym lub w elektryczne podgrzewacze powietrza.

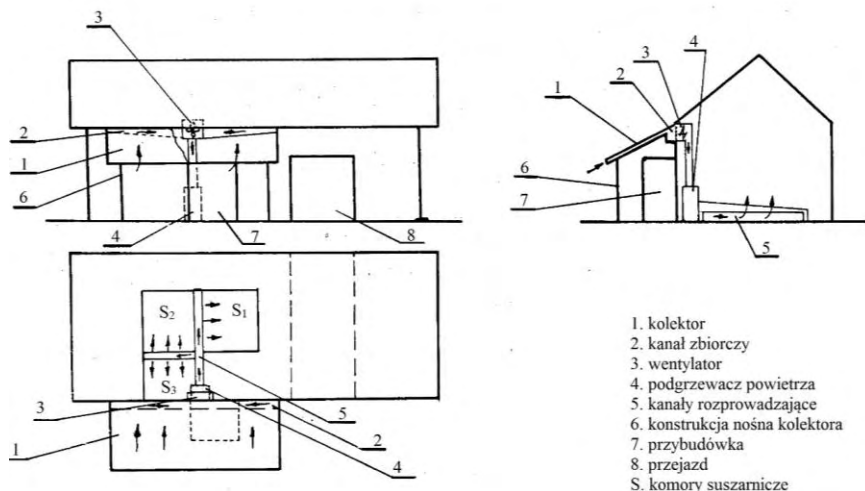
Dotychczasowe wyniki krajowych i zagranicznych badań kolektorów słonecznych stosowanych do suszenia ziarna zbóż w silosach zbożowych wskazują, że oszczędność energii cieplnej i paliw może wtedy wynosić 20 – 30%.

Na rys. 7.5 pokazano zastosowanie kolektora słonecznego do suszenia nasion warzyw i obsuszania cebuli po zbiorze na suszarce podłogowo – kanałowej o powierzchni 70 m².



Rys. 7.5 Zastosowanie kolektora słonecznego do suszenia nasion warzyw i obsuszania cebuli po zbiorze przed jej magazynowaniem: 1 – kolektor słoneczny, 2 – przewód powietrzny ssący podgrzane powietrze z kolektora, 3 – wentylator, 4 – suszarka podłogowo – rusztowa, 5 – podgrzewacz powietrza, 6 – suszone nasiona [Pabis J. 1987].

Powierzchnia kolektora wynosi 40 m². W czasie eksploatacji średnia gęstość strumienia ciepła wynosiła 400 W/m², przy przyroście temperatury powietrza o 8 – 12 K. Do suszenia ziarna zbóż, nasion warzyw i obsuszania cebulek kwiatowych po zbiorze oraz podkiełkowania ziemniaków przed sadzeniem, zastosowano kolektor słoneczny o powierzchni 144 m² pokazany na rys. 7.6.



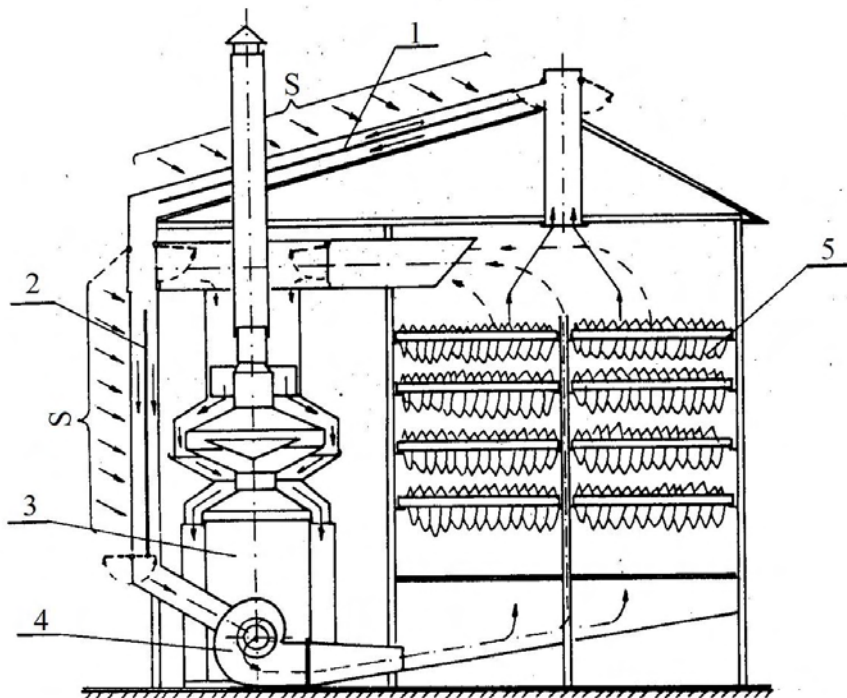
1. kolektor
 2. kanał zbiorczy
 3. wentylator
 4. podgrzewacz powietrza
 5. kanały rozprowadzające
 6. konstrukcja nośna kolektora
 7. przybudówka
 8. przejazd
- S. komory suszarnicze

Rys. 7.6 Zastosowanie kolektora słonecznego do suszenia ziarna zbóż, nasion warzyw, i obsuszania cebulek kwiatowych; 1 - kolektor słoneczny, 2 - kanał zbiorczy, 3 - wentylator, 4 - podgrzewacz powietrza, 5 - kanał powietrzny rozprowadzający, 6 - konstrukcja nośna kolektora, 7 - przybudówka, 8 - przejazd, S₁, S₂ - suszarki podłogowe [Pabis J. 2002].

Absorber kolektora wykonany jest z blachy falistej pokrytej czarną farbą osłonięty od góry szybami okiennymi. Kolektor zainstalowano na stalowej konstrukcji nad dachem przybudówki przechowalni warzyw, Powietrze podgrzane w kolektorze zasysane jest wentylatorem osiowym WO - 80 R o wydatku powietrza 22000 m³/h i tłoczone przez wymiennik ciepła podgrzewacza powietrza do kanałów suszarek podłogowych S₁, S₂ i S₃. Badania kolektora oraz kilkuletnia eksploatacja wykazała bardzo dobre wykorzystanie kolektora w ciągu roku wynoszące 800 - 1000 godzin.

W sezonie letnim średnia gęstość strumienia cieplnego uzyskanego z kolektora wynosi 400 - 430 W/m², powoduje w ciągu roku średni przyrost temperatury powietrza o 8 -10 K. W podczas suszenia ziarna zbóż w silosie oszczędność paliwa wynosi 12 - 15 ton węgla rocznie. Podgrzewacz powietrza, włączany jest w przypadku złej pogody lub w celu dogrzewania powietrza z kolektora, przy zbyt niskich temperaturach powietrza otoczenia.

Kolektory słoneczne mogą również znaleźć zastosowanie do suszenia tytoniu i zielonek wstępnie podsuszonych na pokosie. Na rys. 7.7 pokazano zastosowanie kolektora w suszarce tytoniu typu ST - 2.



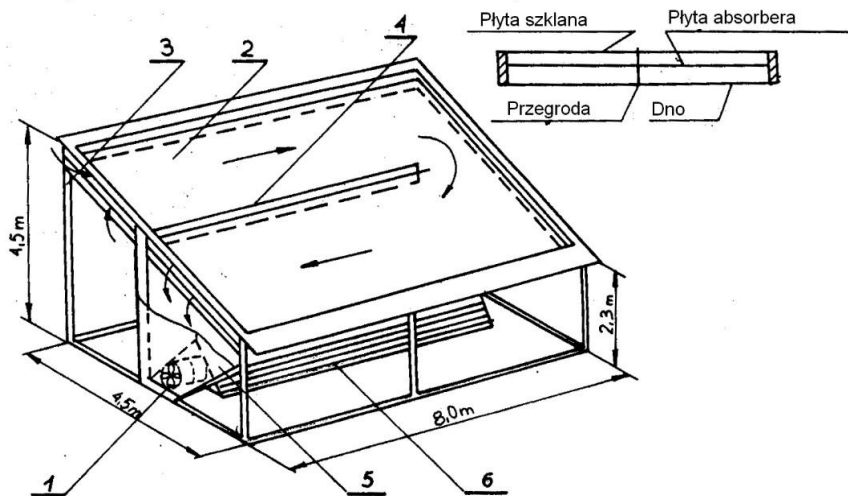
Rys. 7.7 Zastosowanie kolektora słonecznego współpracującego z podgrzewaczem powietrza do suszenia tytoniu, 1 - kolektor na dachu suszarki, 2 - kolektor na ścianie suszarki, 3 - podgrzewacz powietrza, 4 - wentylator, 5 - liście tytoniu [Pabis J. 1987].

Kolektor o powierzchni 35 m^2 został zainstalowany na dachu i na ścianie bocznej suszarki i współpracuje z podgrzewaczem powietrza, wyposażonym w wymiennik ciepła. Średnia gęstość strumienia ciepła wynosi 300 W/m^2 i umożliwia w sezonie suszarniczym oszczędność węgla ok. 700 - 800 kg.

W porównaniu do tradycyjnych metod suszenia zielonek na pokosie, kiedy to straty białka wynoszą 40 - 60%, suszenie zielonek wstępnie podsuszonych na pokosie od wilgotności względnej ok. 80% do 35 - 40%

w ciągu 1 - 2 dni, a następnie wysuszenie jej na suszarkach podłogowo-rusztowych powietrzem nieogrzewany z zastosowaniem wentylatorów osiowych, umożliwia obniżenie strat białka do ok. 15 - 20%. To prowadzi do zwiększenia plonu białka o 150 - 200 kg z 1 hektara i uzyskania zwiększenia produkcji mleka z 1 hektara o 1500 - 2000 litrów rocznie [Pabis S. 1965].

Zastosowanie kolektorów słonecznych w tej metodzie suszenia umożliwia znaczne skrócenie czasu suszenia z ok. 100 - 120 godzin nieogrzewany powietrzem do ok. 50 - 60 godzin, co pozwala na oszczędność ok. 500 - 600 kWh energii elektrycznej na napęd elektrycznego silnika wentylatora [Pabis J. 2002]. Na rys. 7.8 pokazano opracowany i wykonany w Instytucie Budownictwa Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa kolektor słoneczny o powierzchni 40 m².



Rys. 7.8 Zastosowanie kolektora słonecznego do suszenia zielonek przeznaczonych na siano: 1 - wentylator, 2 - kolektor słoneczny, 3 - konstrukcja nośna, 4 - przegroda, 5 - kanał pionowy, 6 - suszarka [Pabis J. 1987].

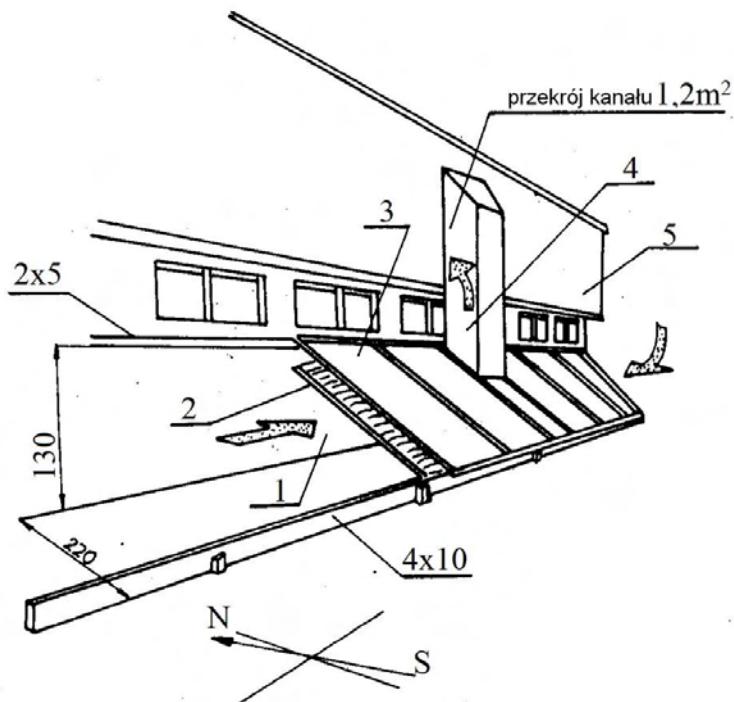
Kolektor zbudowany jest na drewnianej konstrukcji nośnej. Powietrze z otoczenia zasysane wentylatorem osiowym 1 pomiędzy absorberem pokrytym papą, osłoną szklaną, osłoną dolną i kanałem 5 tłoczone

jest do ażurowego kanału, 6 na który załadowuje się suszoną zielonkę. Średnia gęstość strumienia ciepłego uzyskanego z kolektora wynosiła 400 W/m^2 przy przyroście temperatury powietrza 7 K . W tabeli 7.1 przedstawiono porównanie efektów suszenia zielonek nieogrzewanym powietrzem z zastosowaniem kolektora słonecznego.

Tabela 7.1 Porównanie suszenia zielonek nieogrzewanym powietrzem i z zastosowaniem kolektora słonecznego [Pabis J. 1987].

Rodzaj suszonej zielonki	Sposób suszenia	Masa odparowanej wody			Zużycie energii elektrycznej	
		na 1 ha	na 1 m ²	na 1 t s. masy	na 1 kg H ₂ O	na 1 t s. siana
		(kg H ₂ O) / h	(kg H ₂ O) / (m ² h)	(kg H ₂ O) / (t.s.m.)	kWh / (kg H ₂ O)	kWh / (t.s.m.)
		W _j	W _F	W _{s.m.}	E _w	E _s
Lucerna Koniczyna Trawa	Powietrze nieogrzewane	17,2	0,27	3,14	0,27	108
Lucerna Koniczyna	Kolektor słoneczny	24,1	0,96	7,72	0,08	37,4

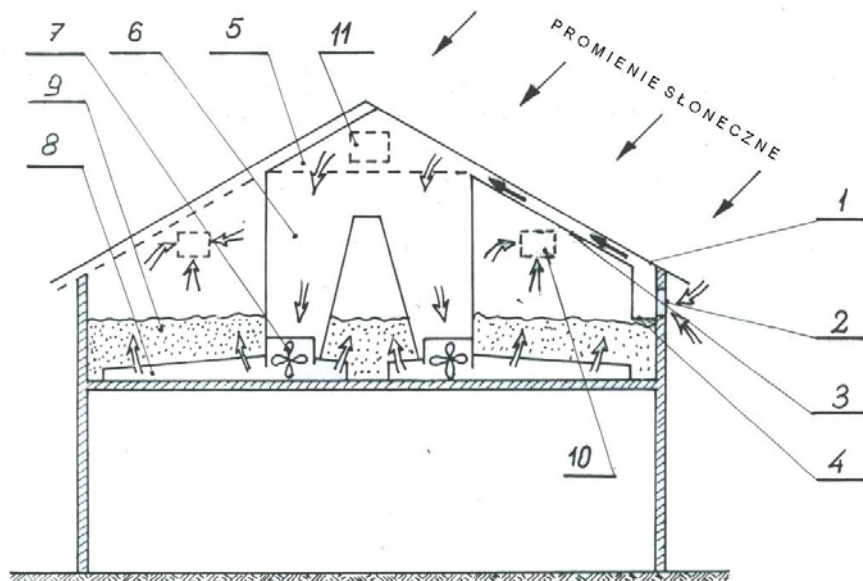
Jak wynika z tabeli, zastosowanie kolektora słonecznego pozwoliło na dwukrotne zwiększenie szybkości suszenia wyrażonej masą kilogramów odparowanej wody w ciągu godziny i ok. trzykrotne zmniejszenie zużycia energii elektrycznej [Pabis J. 1987] na napęd elektrycznego silnika wentylatora. W Instytucie Budownictwa Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa wykonano kilka różnych, kolektorów słonecznych, zastosowanych do suszenia zielonek. Na rys. 7.9 pokazano kolektor foliowy o uproszczonej budowie o powierzchni 80 m^2 , składający się z ram górnych obciążonych folią przezroczystą i dolnych ram obciążonych czarną folią będących absorberem.



Rys. 7.9. Kolektor słoneczny foliowy zastosowany do suszenia zielonek przeznaczonych na siano: 1 - ściana budynku, 2 - folia czarna, 3- folia przezroczysta, 4 - kanał pionowy [Pabis J. 1987].

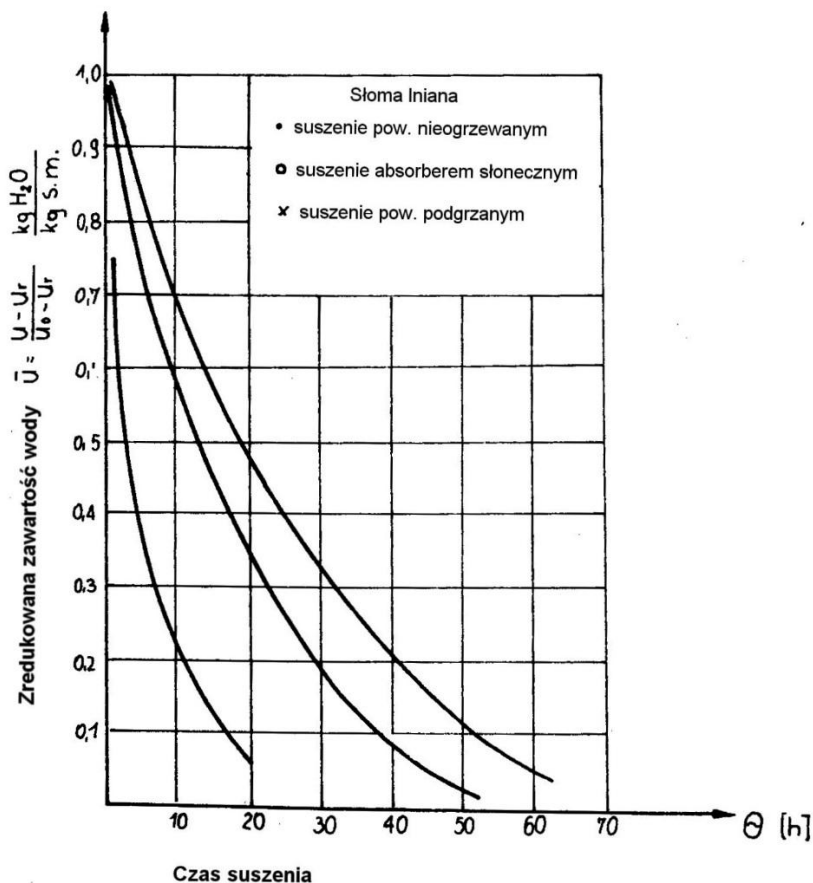
Kolektor oparty jest na ścianie budynku, w którym znajduje się suszarka podłogowo-rusztowa. Powietrze z otoczenia zasysane jest z dwu stron kolektora kanałem utworzonym z ram kolektora. Średnia gęstość strumienia ciepła wynosi. 200 - 250 W/m² przy średnim przyroście temperatury powietrza 3 - 4 K.

Na rys. 7.10 pokazano tzw. kolektor poddachowy o powierzchni 200 m². Absorberem kolektora jest dach obory pokryty blachą 1 pomalowaną czarną farbą.



Rys. 7.10 Kolektor słoneczny poddachowy zastosowany do suszenia zielonki przeznaczonych na siano: 1 - blacha dachowa koloru czarnego, 2 - otwory wlotowe powietrza, 3 - dno kolektora, 4 - kanał powietrzny wlotowy, 5 - kanał powietrzny zbiorczy, 6 - kanały powietrzne wlotu powietrza do wentylatora, 7 - wentylator, 8 - kanały boczne suszarki, 9 - warstwa suszonej zielonki, 10 - otwór wylotowy powietrza wilgotnego, 11 - otwór wentylacyjny [Pabis J. 1987].

Wewnątrz poddasza więźba dachowa z drewnianych belek pokryta jest płytą pilśniową. Powietrze z otoczenia przez otwory w ścianie pod okapem dachu 2 przepływa przez kanał pomiędzy dachem a płytą pilśniową 3 kanałem zbiorczym 5 oraz dwoma piecowymi kanałami 6 skąd zasysane jest dwoma wentylatorami osiowymi 7, a następnie tłoczone jest do dwóch suszarek podłogowo-rusztowych 8. Podczas suszenia uzyskuje się średnią gęstość strumienia ciepła ok. 250 W/m^2 przy przyroście temperatury powietrza otoczenia $3 - 4 \text{ K}$. Na wykresie rys. 7.11 przedstawiono, przebieg krzywych suszenia słomy lnianej nieogrzewanym powietrzem, z zastosowaniem kolektora słonecznego oraz podgrzewacza opalanego paliwem ciekłym.



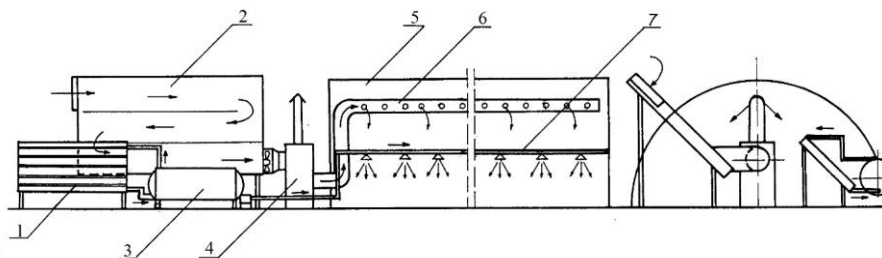
Rys. 7.11 Przebieg suszenia słomy Inianej powietrzem nieogrzewanym, z zastosowaniem kolektora słonecznego oraz powietrzem podgrzanym w podgrzewaczu opalanym olejem opalowym [Pabis J. 1987].

Jak widać z przebiegu krzywych, zawartość wody wynoszącą 0,1 wody/kg.s.m uzyskuje się po 52 godzinach, susząc powietrzem nieogrzewanym, po 38 godzinach z zastosowaniem kolektora słonecznego i po 17 godzinach susząc powietrzem podgrzanym podgrzewaczem powietrza opalanym olejem napędowym. W porównaniu do suszenia po-

wietrzem nieogrzewanym, zastosowanie kolektora słonecznego umożliwia skrócenie [Pabis J. 1987] czasu suszenia o ok. 25%.

7.2. Obliczanie podstawowych danych kolektorów słonecznych wykorzystanych w produkcji warzyw pod osłonami

Jednym z warunków opłacalności upraw warzyw w tunelach foliowych jest jak najwcześniejsze rozpoczęcie uprawy (pomidory, sałata – marzec, ogórki – kwiecień). Jest to możliwe tylko w ogrzewanych tunelach powietrza ze względu na wymaganą temperaturę w tunelu, która powinna wynosić 12 – 15°C, gdyż foliowy płaszcz tunelu nie chroni roślin przed ich przemarzaniem podczas wiosennych przymrozków. Ogrzewanie tuneli foliowych paliwem stałym, ciekłym lub gazowym jest drogie. Wysokie koszty wynikają także z dużych strat ciepła z wnętrza tunelu do otoczenia przez dużą powierzchnię płaszcza tunelu. Ilość ciepła dostarczanego do tunelu foliowego powinna pokryć straty ciepła do otoczenia oraz utrzymać wewnątrz tunelu temperatury wymagane dla produkcji warzyw. Taka ilość ciepła zależy, zatem od zewnętrznych temperatur, wielkości tunelu foliowego, powierzchni płaszcza foliowego oraz wymaganych temperatur uprawy. Z uwagi na uzależnienie osiągnięcia dobrych efektów energetycznych z kolektora słonecznego od warunków atmosferycznych powinno stosować się tradycyjne metody podgrzewania, a kolektor słoneczny byłby wtedy uzupełniającym źródłem energii cieplnej umożliwiającym [Leszczyński M., Pabis J. 1980] obniżenie zużycia tradycyjnych paliw o ok. 20 – 30%. W produkcji warzyw pod osłonami (szklarnie, tunele foliowe) kolektory słoneczne mogą znaleźć szerokie zastosowanie. Na rys. 7.12 pokazano zastosowanie kolektora słonecznego do ogrzewania tunelu foliowego powietrzem podgrzany w kolektorze oraz do podgrzewania wody przeznaczonej do podlewania roślin.



Rys. 7.12 Zastosowanie kolektora słonecznego do podgrzewania tunelu foliowego i podgrzewania wody do nawadniania roślin: 1 - kolektor do podgrzewania wody, 2 - kolektor do podgrzewania powietrza, 3 - akumulacyjny zbiornik wodny, 4 - podgrzewacz powietrza. 5 - tunel foliowy, 6 - przewód powietrzny foliowy do rozprowadzania podgrzanego powietrza w tunelu foliowym, 7 - urządzenie nawadniające [Pabis J. 1987].

Konstrukcja kolektorów została opracowana w Instytucie Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa w Warszawie [Leszczyński M., Pabis J. 1980].

Po wyborze rodzaju tunelu foliowego i określeniu jego wymiarów gabarytowych obliczamy objętość tunelu foliowego V_t z równania:

$$V_t = \frac{\pi D^2}{8} L, \text{ m}^3 \quad (7.1)$$

następnie powierzchnię płaszcza foliowego tunelu F_p :

$$F_p = \frac{\pi D}{2} L, \text{ m}^2 \quad (7.2)$$

gdzie:

D - bok tunelu foliowego, m ($1/2$ okręgu),

L - długość tunelu, m.

Dla znanej średniej temperatury powietrza otoczenia t_{p0} i wymaganej temperatury powietrza w tunelu foliowym t_{p1} przyrost temperatury powietrza powinien wynosić:

$$\Delta t = t_{p1} - t_{po}, \text{ K} \quad (7.3)$$

Straty ciepła przez płaszczyz foliowy tunelu do otoczenia obliczamy z równania:

$$Q_{st} = k \Delta t, \text{ W} \quad (7.4)$$

w którym to k współczynnik przenikania ciepła, $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$,

Zakładając n wymian powietrza w tunelu foliowym w ciągu godziny wydatek powietrza wentylatora V_w wyniesie:

$$V_w = V_t n, \text{ m}^3/\text{h} \quad (7.5)$$

a zapotrzebowanie ciepła na podgrzanie powietrza w tunelu wyznaczy równanie:

$$Q_p = 0,278 V_w \gamma_p c_p \Delta t, \text{ W} \quad (7.6)$$

w którym:

V_w - k wentylatora, m^3/h ,

γ_p - gęstość powietrza, kg/m^3 ,

c_p - ciepło właściwe powietrza, kJ/kgK ,

Δt - różnica temperatur, K .

W celu utrzymania wymaganej temperatury powietrza w tunelu foliowym należy powiększyć obliczone zapotrzebowanie ciepła Q_p o ciepło potrzebne na pokrycie strat ciepłych przez płaszczyz tunelu Q_{st} . Całkowite zapotrzebowanie ciepła będzie równe

$$Q_c = Q_{st} + Q_p, \text{ W} \quad (7.7)$$

Całkowite zapotrzebowanie ciepła na ogrzanie tunelu foliowego można również obliczyć przyjmując wg Skierkowskiego [1978], że na podniesienie temperatury w tunelu o jeden stopień należy zużyć 14 W, czyli wtedy:

$$Q_c = Q_j F_p \Delta t, W \quad (7.8)$$

gdzie:

Q_j - ciepło jednostkowe, na ogrzanie tunelu foliowego o $1^\circ\text{C} = 14\text{W}$,

F_p - powierzchnia płaszcza tunelu foliowego, m^2 ,

Δt - przyrost temperatury, K.

Wyniki zapotrzebowania ciepła na ogrzewanie tunelu foliowego, uzyskane przedstawionymi wyżej metodami obliczeniowymi są bardzo zbliżone. Natomiast wydaje się jednak, że metoda przedstawiona przez Zacharowa [1976] jest dokładniejsza, bowiem uwzględnia ona także współczynnik K_{inf} infiltracji powietrza przez nieszczelności w tunelu oraz, tzw. współczynnik kubatury y_k . W tym przypadku całkowite zapotrzebowanie ciepła wyraża równani:

$$Q_c = Q_g F_p \Delta t \gamma_k K_{inf}, W \quad (7.9)$$

w którym:

Q_g - ciepło tracone na ogrzanie podłoża w tunelu, W,

(przyjmuje się $Q_g = 7,8 \text{ W/m}^2$),

F_p - powierzchnia tunelu, m^2 ,

y_k - współczynnik kubatury, (przyjmuje się $y_k = 1,8$),

K_{inf} - współczynnik infiltracji, (przyjmuje się $K_{inf} = 1,2$),

Δt - przyrost temperatury, K.

Powierzchnię płaskiego płytowego kolektora słonecznego wolnostojącego oblicza się [Leszczyński M., Pabis J.1980] zakładając, że kolektor dostarczy 30% zapotrzebowania ciepła Q_c na ogrzewanie tunelu foliowego oraz, że gęstość strumienia ciepła w okresie od kwietnia do czerwca wynosi $q_c = 330 \text{ W/m}^2$.

Wobec tego powierzchnia F_k kolektora powinna być równa:

$$F_k = \frac{0,33Q_c}{q_c}, \text{ m}^2 \quad (7.10)$$

Dla założonej długości i szerokości kolektora powierzchnię poprzeczną kanałów wlotowych powietrza obliczamy z równania (5.27), a wysokość kanałów będących jednocześnie wysokością kolektora obliczamy z równania (5.28).

W celu równomiernego rozprowadzenia podgrzanego powietrza w tunelu foliowym konieczne jest zastosowanie odpowiedniej instalacji. Elastyczny przewód rurowy wykonany z czarnej folii podwieszony jest u góry wzdłuż osi tunelu foliowego w odległości 0,5 m od płaszcza tunelu. Podgrzane powietrze w kolektorze tłoczone jest wentylatorem do przewodu rurowego, skąd otworami rozmieszczonymi po bokach i wzdłuż przewodu wypływa do wnętrza tunelu. Dla obliczonego z równania (5.14) wydatku wentylatora V_w i przyjętej prędkości v_p przepływu powietrza w przewodzie równej 2,0 m/s, średnicę przewodu obliczamy z równania:

$$d_p = \sqrt{\frac{4V_w}{\pi v_p 3600}}, \text{ m} \quad (7.11)$$

Powierzchnię otworów bocznych w przewodzie rurowym odczytuje się z wykresu rys. 7.13 dla obliczonej wartości n wg wzoru

$$n = \frac{d_p L k}{c_p \gamma_p V_w} \quad (7.12)$$

w którym

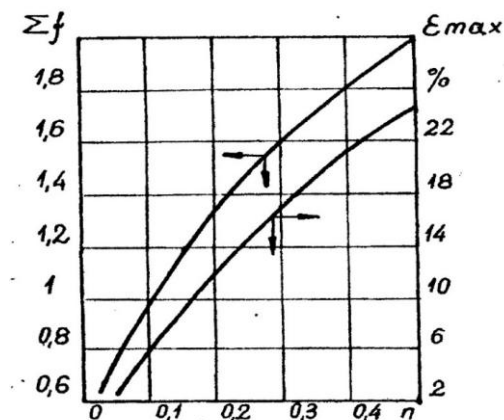
d – średnica przewodu, m,

L – długość przewodu, m,

k – współczynnik przenikania ciepła, kJ/m²K,

γ_p – gęstość powietrza, kg/m³,

V_w – wydatek wentylatora, m³/h.



Rys. 7.13 Wyznaczenie powierzchni otworów bocznych w przewodzie rurowym instalacji ogrzewania tunelu foliowego [Zacharow M. 1978].

Dla obliczonej z tego równania wartości n znajdujemy z wykresu sumaryczną powierzchnię otworów bocznych Σ_f , a następnie przyjmując średnicę przewodu równą $d = 0,02$ m z równania (7.13) obliczamy liczbę n otworów bocznych

$$n = \Sigma_f \left(\frac{dp}{d} \right)^2, \text{ otworów} \quad (7.13)$$

Σ_f - sumaryczna powierzchnia otworów bocznych, m^2 ,

d_p - średnica przewodu, m,

d - średnica otworu bocznego, m.

Kolektory słoneczne mogą znaleźć również zastosowanie do podgrzewania wody przeznaczonej do nawadniania gleby. Podlewanie roślin podgrzaną wodą o temperaturze $18 - 24^\circ\text{C}$ wpływa korzystnie na vegetację roślin, a tym samym na produktywność. Jednocześnie nawadnianie gleby ciepłą wodą powoduje ogrzanie gleby, magazynowanie ciepła w glebie i sprzyja kształtowaniu korzystnego mikroklimatu w sferze roślin. W tym celu, można zastosować płaski, kolektor wykonany z karbowanych rurek z polichlorku winylu o średnicy 20 mm,

zainstalowanych w formie wężownicy na płycie pomalowanej czarną farbą i przykrytych szybą szklarnią lub przezroczystą folią [Pabis J., Leszczyński M. 1980].

Dla znanego typu tunelu foliowego i powierzchni podłoża F_p oraz jednostkowego M_w zapotrzebowania wody do podlewania roślin (przyjmowanego od 6 - 12 l/m²dobę), całkowite liczbowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę wyniesie:

$$M_w = F_p m, l \quad (7.14)$$

gdzie:

F_p - powierzchnia podłoża w tunelu, m²,
 m - jednostkowe dobowe zapotrzebowanie wody, l.

Dla okresu wiosennego i wczesno jesiennego można przyjąć, że średnia dzienna suma całkowitego promieniowania słonecznego $q_d = 3,0$ kW/m²dobę. Zakładając temperaturę podgrzanej wody, sprawność cieplną kolektora i znając temperaturę zimnej wody z sieci oraz ciepło właściwe wody z 1 m² powierzchni kolektora ilość podgrzanej wody M_{wc} można obliczyć z równania:

$$M_{wc} = \frac{q_d \eta}{c_w (t_{w2} - t_{w1})}, l/m^2 \text{dobę} \quad (7.15)$$

w którym:

q_d - średnia dzienna suma promieniowania całkowitego,
kWh/m²dobę,
 η - sprawność cieplna kolektora, %,
 c_w - ciepło właściwe wody, kJ/kgK,
 t_{w1} - temperatura wody zimnej, °C,
 t_{w2} - temperatura wody cieplej, °C.

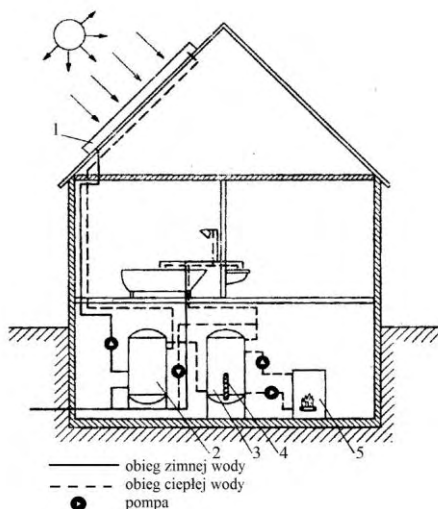
Powierzchnię kolektora obliczamy z równania:

$$F_k = \frac{M_{wc}}{M_w}, m^2 \quad (7.16)$$

Ciepła woda w obiegu wymuszonym zamkniętym, pompą wodną, tłoczona jest do izolowanego zbiornika akumulacyjnego (przeważnie o pojemności 2000 – 3000 l). Jak wynika z badań [Leszczyński M., Pabis J. 1980], w miesiącach kwiecień, maj, w ciągu dnia kolektorem o powierzchni 10 m² można podgrzać do temperatury 40 – 50°C wodę magazynowaną w zbiorniku akumulacyjnym o pojemności 2000 litrów. W ciągu nocy spadek temperatury wody wynosił 2 – 3 K. Przed podlewaniem roślin, ciepła woda ze zbiornika mieszana była z zimną wodą z sieci wodnej tak, by średnia temperatura wody do podlewania nie przekroczyła 20 °C.

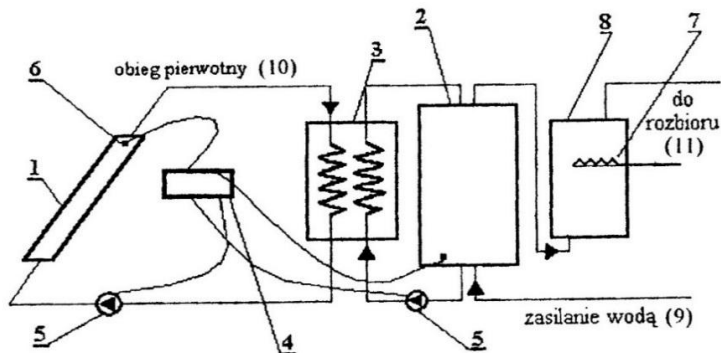
7.3. Zastosowanie kolektorów słonecznych w budynkach mieszkalnych

Najszerze zastosowanie kolektory słoneczne znalazły w budynkach mieszkalnych. Na rys. 7.14 pokazano zastosowanie kolektora do podgrzewania wody użytkowej do celów sanitarnych.



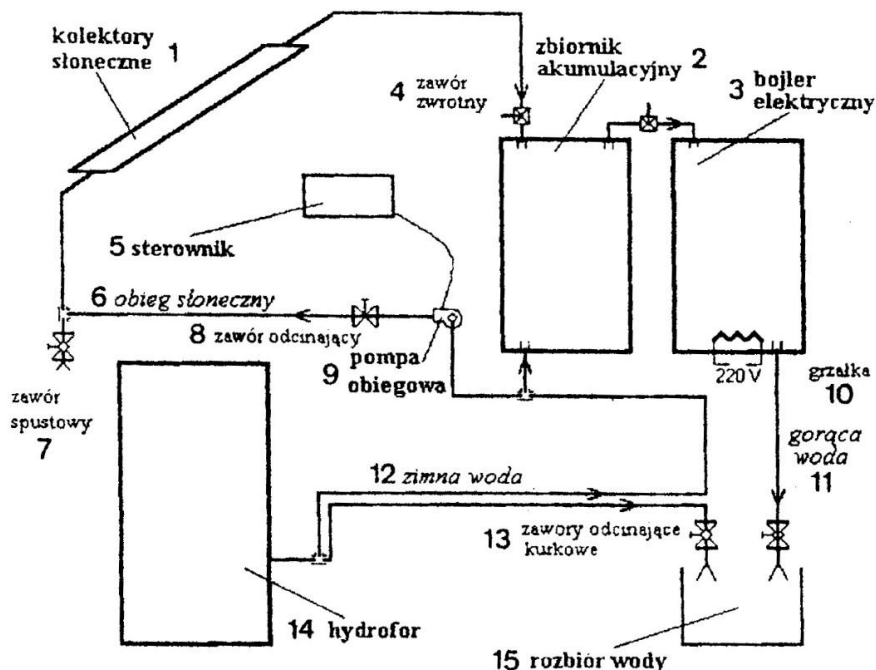
Rys. 7.14 Zastosowanie kolektora słonecznego do podgrzewania wody użytkowej do celów sanitarnych w budynku mieszkalnym: 1 – kolektor słoneczny, 2 – wodny zbiornik akumulacyjny, 3 – dodatkowy wodny zbiornik akumulacyjny z podgrzewaczem elektrycznym, 4 – podgrzewacz elektryczny, 5 – piec węglowy [Pabis J.1987].

Kolektor słoneczny połączony jest z akumulacyjnym zbiornikiem wodnym 2 i 3 wyposażonym w system ogrzewania elektrycznego 4 oraz kocioł opalany węglem 5. Jedno lub drugie źródło ciepła stosowane jest podczas niesprzyjającej pogody lub do dogrzewania wody podgrzewanej w kolektorze słonecznym. Na rys. 7.15 pokazano instalację słoneczną do podgrzewania wody użytkowej o obiegu zamkniętym.



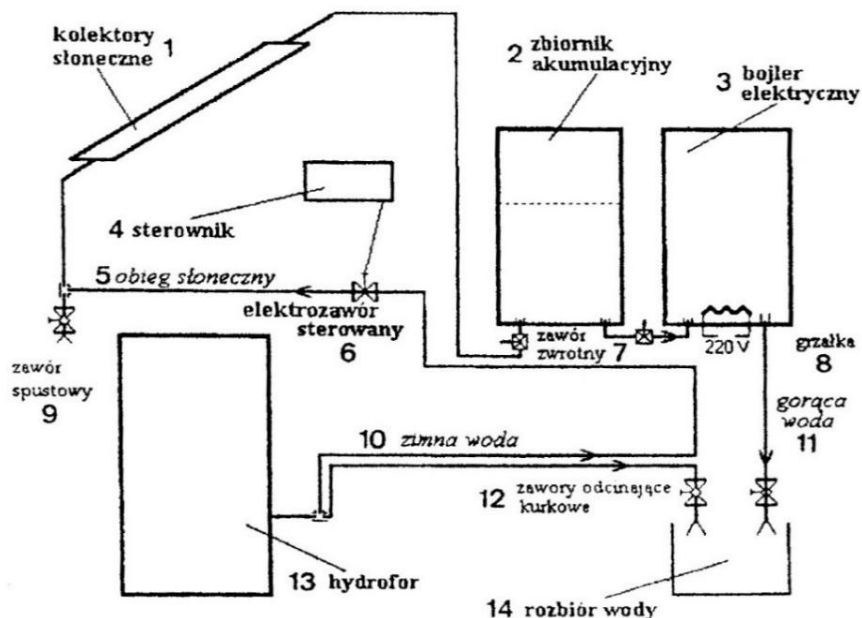
Rys. 7.15 Instalacja słoneczna do podgrzewania wody o obiegu zamkniętym: 1 - kolektor słoneczny, 2 - zbiornik wodny akumulacyjny, 3 - wymiennik ciepła, 4 - różnicowy regulator temperatury, 5 - pompa wodna, 6 - czujnik temperatury, 7 - grzałka elektryczna, 8 - zbiornik podgrzewacza [Chochowski A., Pabis J., Czekański D. 1996].

Sterowanie obiegiem cieczy roboczej w kolektorze 1 i w wymienniku ciepła 3 odbywa się za pomocą regulatora różnicowego temperatur 4, który uruchamia pompę cyrkulacyjną 5 wg wskazań czujników umieszczonych na wypływie wody z kolektora 6 i w zbiorniku akumulacyjnym 2. Korzystanie z wody w sposób ciągły wymaga zastosowania drugiego zbiornika wyposażonego w grzałkę elektryczną 3 połączoną szeregowo ze zbiornikiem akumulacyjnym 2. Inne rozwiązanie pokazane zostało na rys. 7.16 polega ono na zastąpieniu regulatora różnicowego zegarem czasowym, uruchamiającym pompę cyrkulacyjną wg zadanego harmonogramu.



Rys. 7.16 Instalacja słoneczna do podgrzewania wody o obiegu otwartym z porcjowym sposobem sterowania przepływem przez kolektor: 1 - kolektor słoneczny, 2 - zbiornik akumulacyjny, 3 - zbiornik z podgrzewaczem elektrycznym, 4 - zawór zwrotny, 5 - sterownik, 6 - obieg słoneczny, 7 - zawór spustowy, 8 - zawór odcinający, 9 - pompa obiegowa, 10 - grzałka, 11 - gorąca woda, 12 - zimna woda, 13 - zawory odcinające kurkowe, 14 - hydrofor, 15 - rozbiór wody [Chochoński A., Pabis J., Czekalski D. 1996].

Instalacja słoneczna pracuje w obiegu otwartym. Jeszcze inny system pokazano na rys. 7.17 polega on na zastąpieniu pompy cyrkulacyjnej elektrozaworem umieszczonym między szeregowo podłączonym kolektorem i zbiornikiem akumulacyjnym. Pracą elektrozaworu steruje zegar wg zadanego harmonogramu. Ta instalacja słoneczna również pracuje w obiegu otwartym (bez wymiennika ciepła w zbiorniku akumulacyjnym).



Rys. 7.17 Instalacja słoneczna o obiegu otwartym z porcjowym sposobem sterowania przepływem przez kolektor z zastosowaniem elektrozaworu: 1 - kolektor słoneczny, 2 - zbiornik akumulacyjny, 3 - zbiornik z podgrzewaczem elektrycznym, 4 - sterownik, 5 - obieg słoneczny, 7 - zawór zwrotny, 8 - grzałka, 9 - zawór spustowy, 10 - zimna woda, 11 - gorąca woda, 12 - zawory odcinające kurkowe, 13 - hydrofor, 14 - rozbiór wody [Chochowski A., Pabis J., Czekalski D. 1996].

Literatura:

- [1]. Chochowski A., Czekalski D. 1996. *Słoneczne instalacje grzewcze*. Centralny Ośrodek Informacji i Budownictwa. Warszawa.
- [2]. Chochowski A., Czekalski D., Pabis J. 1996. *Cieczowe instalacje grzewcze dla indywidualnych gospodarstw rolnych*. Problemy Inżynierii Rolniczej, nr 4.
- [3]. Kozłowski A. 1987. *Słoneczny kolektor płytowy o powierzchni 150 m²*. Sprawozdanie z badań. IBMER, CBR, 10,15, Warszawa.

- [4]. Leszczyński M., Pabis J. 1980. *Wykorzystanie kolektorów energii słonecznej w produkcji warzyw pod osłonami*. Sprawozdanie z badań IBMER XXXI/35, Warszawa.
- [5]. Pabis J. 1967. *Badania nad możliwością wykorzystania energii słonecznej do podgrzewania powietrza w urządzeniach suszarniczych*. Sprawozdanie z badań. IBMER, XXII/347, Warszawa.
- [6]. Pabis J. 1980. *Wykorzystanie energii słonecznej w rolnictwie*. Biuletyn Informacyjny IBMER nr 4, Warszawa.
- [7]. Pabis J. 1987. *Kolektory słoneczne uzupełniające źródło energii w rolnictwie*. broszura. IBMER, Warszawa.
- [8]. Rive G. Mazzotto F. 1985. *Construction aspects for solar plants for Forage drying installed in northern Italy*. Bulletin nr 7. FAO, CRNE.
- [9]. Zacharow A. 1976. *Primijenienie tiepla w sielskom chozajstwie*. KOŁOS, Moskwa.

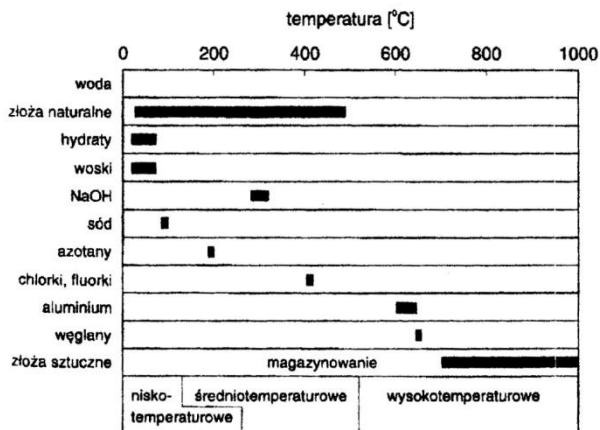
8. MAGAZYNOWANIE ENERGII CIEPLNEJ

Jednym z ważnych czynników, mających istotny wpływ na efektywność wykorzystania odnawialnych źródeł energii, jest sposób magazynowania energii cieplnej. Magazynowanie energii w okresie dużego nasłonecznienia umożliwia wykorzystanie ciepła w okresach niesprzyjających warunków atmosferycznych i w porze nocnej. Ma to szczególne znaczenie podczas podgrzewania wody użytkowej dla celów sanitarnych i technologicznych oraz ogrzewania budynków. Oprócz znanego od dawna krótkoterminowego magazynowania energii na kilka dni, obecnie stosuje się długoterminowe magazynowanie energii przez okres kilku miesięcy. Energia może być magazynowana w różnych formach np. w postaci energii mechanicznej, przez sprężone powietrze, koła zamachowe, energii potencjalnej, elektrycznej przez akumulatory ołowio-wo-kwasowe, energii elektromagnetycznej, elektromechanicznej, elektrochemicznej i innej. Rozróżniamy następujące rodzaje magazynowania energii cieplnej

- magazynowanie niskotemperaturowe do 100 – 120°C,
- magazynowanie średnotemperaturowe do 120 – 500°C,
- magazynowanie wysokotemperaturowe powyżej 500°C.

Na rys. 8.1 podano zakresy temperatur dla różnych materiałów wykorzystywanych do magazynowania energii cieplnej.

Dobry magazyn energii cieplnej powinien charakteryzować się dużą gęstością energii magazynowania (tj. ilość ciepła zmagazynowana w jednym kg masy materiału magazynującego), dobrymi warunkami wymiany ciepła, niskimi stratami ciepła oraz niskimi kosztami. W tabeli 8.1 podano gęstości energii magazynowanej w różnych materiałach.



Rys. 8.1 Zakres temperatur dla różnych materiałów do magazynowania ciepła [Gogół W. i in. 1993].

Tabela 8.1 Gęstość energii magazynowanej w różnych materiałach [Gogół i in. 1993].

Materiał lub sposób magazynowania	[kJ x kg ⁻¹]
Deuter (reakcja fuzji D - D)	9,5 x 10 ¹⁰
Wodór (s)	1,2 x 10 ⁵
Metan (s)	5,4 x 10 ⁴
Ropa naftowa (s)	4,2 x 10 ⁴
Węgiel (s)	3,2 x 10 ⁴
Suche drewno (s)	1,5 x 10 ⁴
Kondensacja pary H ₂ O	2,3 x 10 ³
Topnienie LiOH	1,0 x 10 ³
Ogrzewanie piasku (ΔT = 700K)	550
Akumulator Ag-Zn	440
Topnienie Al	395
Zamarzanie H ₂ O	334
Koła zamachowe	do 300
Ogrzewanie H ₂ O (ΔT = 70K)	300
Topnienie C ₂₆ H ₅₂	255
Ogrzewanie mieszaniny Dowtherm (ΔT = 100K)	250
Sublimacja jodu	240
Ogrzewanie mieszaniny Caloria HT - 43 (ΔT = 100K)	210
Sprężone powietrze	do 200
Ogrzewanie parafiny (ΔT = 100K)	175
Topnienie Ca(NO ₃) x 4H ₂ O	153
Akumulator Pb-kwas	120
Ogrzewanie skały (ΔT = 100K)	≈ 100
Kondensator elektryczny	0,016

s - procesy spalania

Energia ciepła pochodząca z odnawialnych źródeł energii może być magazynowana w różny sposób i w bardzo szerokim zakresie temperatur do 500 K i pojemności cieplnej do 400 tys. MJ/K. Najbardziej rozpowszechnione w praktyce jest magazynowanie ciepła wykorzystujące ciepło właściwe cieczy, złoża naturalne, tj. skały, piasek, kamienie, ziemia lub ciepło przemian fazowych. Energię ciepłą można magazynować przez okres trwający od kilku godzin do kilku miesięcy, a nawet jednego roku. Mówimy wtedy o krótko lub długoterminowym magazynowaniu energii. Przykładem substancji nadającej się do krótkoterminowego magazynowania jest ciecz, najczęściej woda, ciecze sztuczne niezamarzające oraz różnego rodzaju materiały stałe o dużej pojemności cieplnej jak, np. kamienie, ogrzewane skały, cegła, parafina i inne materiały budowlane. Wg Wołoszyna [1999] magazyn akumulacyjny magazynujący energię ciepłą dla domku jednorodzinny, pochodzącą z kolektora słonecznego o powierzchni 4,0 m² ma złoża kamienne o masie 15 - 150 ton w zależności od obliczonego czasu magazynowania i pojemności zasobnika. Najlepsze właściwości akumulacji energii cieplnej mają materiały akumulujące energię w postaci ciepła utajonego. Są nimi roztwory soli, parafina i wosk lub kwasy organiczne. Pod wpływem energii cieplnej uzyskanej, np. z kolektora słonecznego, ww. materiały podgrzewane są do temperatury topnienia. Podczas przechodzenia ze stanu płynnego w stały następuje spadek temperatury i oddawanie ciepła.

Obecnie wprowadza się do praktyki akumulatory ciepła wykorzystujące substancje chemiczne. Działają one na zasadzie reakcji endo i egzotermicznej. W akumulatorach cieplnych długoterminowych wykorzystuje się naturalne lub sztuczne zbiorniki wypełnione wodą lub złożem stałym, w których akumulacja ciepła odbywa się na zasadzie podwyższania temperatury dużych mas substancji stałych lub wody. Długoterminowe magazynowanie energii cieplnej wykorzystywane jest szeroko w budownictwie podczas ogrzewania lub chłodzenia budynków, w formacjach wodonośnych, wyrobiskach, jaskiniach i odwiertach skalnych. Przykładem akumulatora cieplnego jest tzw. staw słoneczny naturalny lub sztuczny, wypełniony solanką z chlorkiem sodu lub chlorkiem magnezu. Staw słoneczny sztuczny z osłoną szklaną lub z tworzywa sztucznego, głębokości złoża kilku metrów posiada dno pokryte substancją czarną, absorbującą promieniowanie słoneczne. Taki system spełnia rolę kolektora słonecznego i jednocześnie akumulatora energii cieplnej zmagazynowanej w solance. Ciepło oddawane jest na zewnątrz złoża akumulatora za pośrednictwem wymiennika rurowego ułożonego na dnie sta-

wu, w którym przepływa woda, połączonego z pompą ciepła lub za pomocą zwykłej pompy przetłaczającej wodę. Wg Gogóła [1993] instalacja słoneczna wyposażona w kolektor o powierzchni 4,0 m² i wodny zbiornik akumulacyjny o pojemności 200 – 300 l i zużyciu 200 l wody na dobę, może dostarczać w Danii energię cieplną wynosząc ok. 1520 kWh/rok, a w obszarze śródziemnomorskim, ok. 2329 kWh/rok.

8.1. Akumulatory wodne

Najprostszym akumulatorem energii cieplnej uzyskanej z kolektora słonecznego jest akumulator wodny. Ze względu na niskie temperatury panujące w okresie jesienno-zimowym i wczesnowiosennym, akumulator wodny powinien współpracować z kolektorem słonecznym o działaniu pośrednim, w którego kanałach i przewodach oraz spiralnym wymienniku ciepła umieszczonym w zbiorniku akumulatora, krąży płyn niezamarzalny, np. borygo lub glikol. Zakładając, że temperatura wody w całym zbiorniku akumulacyjnym jest taka sama, pojemność cieplną akumulatora pisuje równanie:

$$Q_w = V_a \gamma_w c_p \Delta t, \text{ kJ/K} \quad (8.1)$$

gdzie:

V_a – pojemność zbiornika akumulacyjnego, m³,

γ_w – gęstość wody, kg/m³,

c_p – ciepło właściwe, kJ/kgK,

Δt – różnica temperatur, K.

Zbiorniki akumulacyjne wykonywane są z blachy ocynkowanej. Mają kształt cylindra ustawionego w pozycji pionowej, przy czym stosunek wysokości do średnicy powinien wynosić 2,0 – 3,0. Zbiorniki izolowane są wełną mineralną lub pianką poliuretanową. W zbiorniku akumulacyjnym, temperatura wody nie jest jednakowa w całej objętości. W górnej części zbiornika temperatura wody jest wyższa niż w dolnej. Zjawisko to, wynikające z różnicy temperatur, nazywa się stratyfikacją termiczną. Stratyfikacja podczas magazynowania wody ma istotne znaczenie dla wzrostu sprawności słonecznej instalacji cieplnej w porównaniu do zbiornika akumulacyjnego, w którym w całej wysokości zbiornika panuje stała temperatura. Zanikanie stratyfikacji może być wywołane mieszaniem wody. Dla zmniejszenia zjawiska intensywności mieszania,

a tym samym utrzymania stratyfikacji, w części wylotowej zbiornika instaluje się specjalne króćce wlotu ciepłej wody. Zanikanie stratyfikacji termicznej zależy od wymiarów zbiornika i przewodzenia ciepła przez ściany zbiornika. Warunkiem zachowania stratyfikacji termicznej jest stosowanie zbiornika akumulacyjnego w kształcie cylindra zainstalowanego w pozycji pionowej, w którym stosunek wysokości do średnicy wynosi 2 – 3. Przy doborze objętości zbiornika akumulacyjnego przyjmuje się, że pojemność zbiornika powinna wynosić:

$$V_z = m_w F_k = (0,03 - 0,1) F_k, \text{ m}^3 \quad (8.2)$$

gdzie:

m_w – strumień objętości wody przepływającej przez kolektor, (0,03 – 0,1) m³/m²min,

F_k – powierzchnia kolektora, m².

Przyjmuje się, że optymalna pojemność wodnego akumulatora ciepła powinna wynosić 30 – 100 litrów wody na 1 m² powierzchni kolektora. Ze względu na zmiany pogody pojemność zbiornika akumulatora powinna odpowiadać dwu lub trzykrotnemu dobowemu zapotrzebowaniu na ciepłą wodę. W ciągu roku występują okresy, w których energia słoneczna nie jest w stanie zapewnić uzyskanie podgrzanej wody na stałym poziomie temperatury. Dlatego też koniecznym jest wtedy stosowanie dodatkowych źródeł ciepła, tj. grzejników elektrycznych, gazowych, kotłów gazowych lub olejowych. W kolektorach wodnych o układach pośrednich stosuje się w zbiornikach akumulacyjnych rurkowe spiralne lub płaszczowe wymienniki ciepła.

8.2. Magazynowanie ciepła w złożu kamiennym

Magazynowanie ciepła w złożu kamiennym jest znane i stosowane w praktyce od dawna. Do współpracy z kolektorami słonecznymi stosuje się złoża: kamiennie-wodne i kamiennie-powietrzne. W pierwszym złożu nośnikiem energii cieplnej jest woda, a w drugim powietrze. Wielkość akumulatora ze złoża kamiennego zależy od ilości energii cieplnej akumulowanej w złożu oraz od powierzchni kolektora słonecznego. Wg Wołoszyna [1991] przyjmuje się, że dla powierzchni 1 m² kolektora należy zgromadzić ok. 25 – 180 kg kamieni ma wpływ na wysokość złoża zależy od wielkości kamieni. Im wyższe jest złożo, tym kamienie po-

winy mieć większe wymiary. Dla złoża o wysokości jeden metr stosuje się kamienie o średnicy 2,5 – 5,0 cm, dla złoża o wysokości 2,5 m stosuje się kamienie o średnicy 5 cm, a dla złoża o wysokości 3,5 m kamienie o średnicy 5 – 10 cm. W procesie wymiany ciepła średnica kamieni ma istotne znaczenie, bowiem od tego zależy ich sumaryczna powierzchnia, co wpływa na zmiany powierzchni wymiany ciepła (nagrzewanie, chłodzenie) oraz na zmiany porowatości złoża (wolnej przestrzeni pomiędzy kamieniami w całym złożu). Ww. parametry mają również wpływ na zmiany oporów przepływu powietrza lub cieczy przez warstwę złoża. Złoże o objętości 1 m³ z kamieni o średnicy 2,5 cm ma powierzchnię właściwą 108 m², a z kamieni o średnicy 7,5 cm ma powierzchnię 54 m². W tabeli 8.2 przedstawiono pojemności cieplne materiałów stosowanych w akumulatorach ciepła.

Tabela 8.2 Pojemności cieplne materiałów stosowanych do akumulatorów ciepła [Wołoszyn M. A. 1991].

Materiał	Ciepło właściwe kJ/mg K	Masa właściwa kg/m ³	Pojemność cieplna	
			materiału jednorodnego kJ/m ³ K	z 30% pustką nie wykorzystaną kJ/m ³ K
Woda	4,185	1000	4185	2930
Złom żelazny	0,5	7853	3942	2760
Magnetyt (Fe ₃)	0,75	5128	3863	2700
Aluminium (w kawałkach)	0,96	2724	2620	1837
Beton	1,13	2144	2536	1775
Kamienie	0,83	2724	2395	1675
Cegła	0,84	2244	1880	1315

Na proces wymiany ciepła w złożu kamiennym wpływa natężenie przepływu strumienia powietrza przez przekrój poprzeczny złoża, średnica zastępcza kamieni w złożu, długość złoża oraz jego powierzchnia przekroju poprzecznego złoża. W tabeli 8.3 zestawiono właściwości fizyczne skał używanych, jako wypełnienie złoża.

Tabela 8.3 Własności fizyczne skał używanych jako wypełnienie złóż kamiennych [Smolec W. 2000].

Skala	Gęstość kg/m ³	Ciepło właściwe J/(kg K)	Współczynnik przewodzenia ciepła W/(m K)
Wapień zwykły	2000	920	1,15 - 140
	2500	920	1,70
Wapień porowaty	1400	920	0,64 - 0,76
	1700	920	0,92 - 1,15
Marmur	2600 - 2800	880 - 920	2,6 - 3,7
Piaskowiec	2200 - 2400	920 - 960	1,8 - 2,4
Dolomit	2700		1,7
Granit	2600 - 2800	880 - 920	2,5 - 3,8

Podobnie jak w silosach do przechowywania zboża, tak i w akumulatorach kamiennych, parametrami wypełnienia złoża są: średnica zastępcza kamieni wypełniających złożo, oraz porowatość złoża. Średnicę zastępczą [Pabis J. 1987], wyznacza się jako średnicę kuli o objętości równej średniej objętości danych kamieni w złożu:

$$d_z = \sqrt[3]{\frac{6M_k}{\pi\gamma_z n}}, \text{ m} \quad (8.3)$$

gdzie:

M_k - masa kamieni pobranych jako próbka, kg,

γ_z - gęstość kamieni. kg/m³,

n - liczba kamieni w próbie, szt.

Porowatość złoża określa stosunek objętości, jaką w warstwie kamieni złoża zajmuje powietrze wypełniające przestrzeń między kamieniami, do całkowitej objętości złoża:

$$p = \frac{(V_z - V_k)}{V_z} 100, \% \quad (8.4)$$

w którym:

V_z – objętość złoża (jako suma objętości kamieni w złożu i objętości przestrzeni między kamieniami w złożu, m³),

V_k – objętość kamieni w złożu, m³.

W procesie wymiany ciepła pomiędzy powietrzem będącym nośnikiem ciepła, a kamieniami w złożu istotną jest powierzchnia właściwa wypełnienia, F_w określaną jako stosunek sumarycznej powierzchni wszystkich kamieni wypełnienia złoża $\sum F_k$ do całkowitej objętości złoża V_z :

$$F_w = \frac{\sum F_k}{V_z}, \text{m}^2/\text{m}^3 \quad (8.5)$$

Ilość ciepła wymienionego pomiędzy powietrzem a wypełnieniem złoża kamiennego opisuje równanie:

$$q_z = h_v L_z F_w (t_p - t_z), \quad (8.6)$$

w którym wg Smolca [2000] objętościowy wymiennik wnikania ciepła h_v wyraża równanie:

$$h_v = 700 \left(\frac{G_p}{d_z} \right)^{0,76}, \text{W}/\text{m}^3 \text{K} \quad (8.7)$$

w równaniach (8.5), (8.6) i (8.7) oznaczają:

$\sum F_k$ – sumaryczna powierzchnię wszystkich kamieni wypełnienia złoża, m²,

V_z – objętość całkowita złoża, m³,

L_z – długość złoża, m,

t_p – temperaturę powietrza otoczenia, °C,

t_z – temperaturę złoża, °C,

G_p – masowe natężenie przepływu powietrza przez niezapełniony kamieniami przekrój pojemnika złoża, kg/ (m²s),

d_z – średnicę zastępczą kamieni, m.

Do prawidłowego doboru wentylatora przetłaczającego powietrza przez złożo kamienne, konieczna jest znajomość oporów przepływu powietrza. Wg Chandry i Willisa [1981] opory przepływu powietrza, wyrażone spadkiem ciśnienia można wyznaczyć z wzorów:

$$\Delta p = \frac{L_z \mu^2}{\gamma_p d_z^3 p^{2,6}} (185 \text{ Re} + 1,7 \text{ Re}), \text{ Pa} \quad (8.8)$$

$$\text{Re} = \frac{\gamma_p v_p d_z}{\mu} \quad (8.9)$$

w którym:

Re – liczba Reynoldsa,

L_z – długość złoża, m,

μ – współczynnik lepkości dynamicznej, kg/(ms),

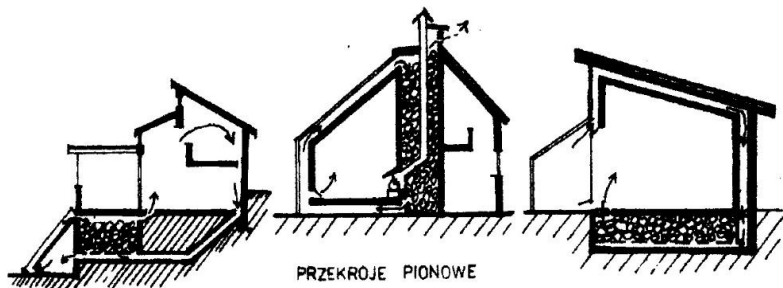
γ_p – gęstość powietrza, kg/ m³,

d_z – średnica zastępcza kamieni, m,

p_p – porowatość, %.

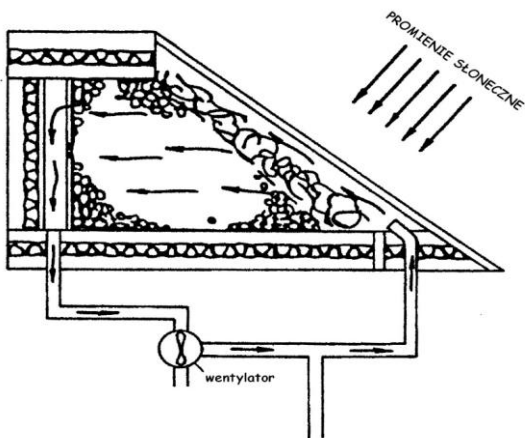
Opory przepływu powietrza zależą od prędkości jego przepływu przez złożo kamieni, grubości złoża, porowatości oraz rozmiarów kamieni.

Akumulatory kamienne znajdują zastosowanie do ogrzewania w budynkach mieszkalnych. Na rys. 8.2 Wg Wołoszyna [1992] pokazano warianty rozmieszczenia złóż kamiennych w domach jednorodzinnych.



Rys. 8.2 Sposoby rozmieszczenia złóż kamiennych w domach jednorodzinnych [Wołoszyn M. A. 1992].

W produkcji rolniczej akumulatory kamienne stosowane są do produkcji warzyw pod osłonami, w suszarnictwie produktów rolniczych i w produkcji zwierzęcej. Na rys. 8.3 pokazano Wg Huang i in. [1990] akumulator kamienny zastosowany do kształtowania mikroklimatu w budynkach inwentarskich z wykorzystaniem kolektora słonecznego o powierzchni $4,0 \text{ m}^2$.

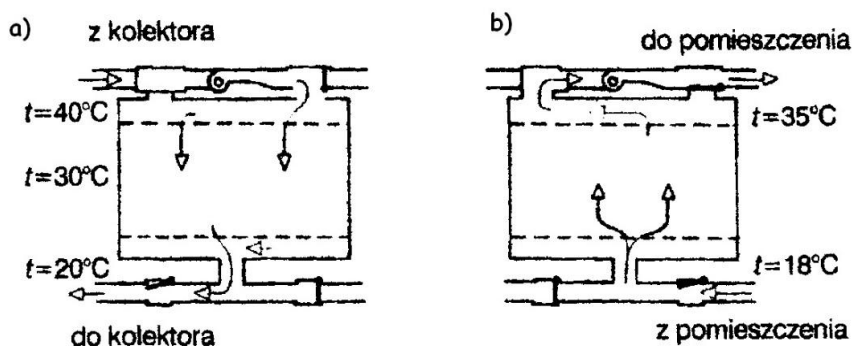


Rys. 8.3 Akumulator złoża kamiennego zastosowany do kształtowania mikroklimatu w budynkach inwentarskich z zastosowaniem kolektora słonecznego [Huang T. i in. 1990].

Objętość złoża o układzie poziomym i wysokości $1,0 \text{ m}$ była równa $2,0 \text{ m}^3$, przy średnicy zastępczej kamieni $3,0 \text{ mm}$ i porowatości złoża $p = 0,45$.

Natężenie przepływu powietrza przez złożę kamienne wynosiło 130 m^3 na 1 m^3 warstwy złoża. Po siedmiu godzinach ładowania akumulatora ciepłym powietrzem o temperaturze 22°C , różnica temperatury powietrza w nocy wynosiła $15,0 \text{ K}$.

Akumulatory ciepła budowane są jako zbiorniki o poziomych albo pionowych kształtach prostopadłościanów, albo walców wypełnionych kamieniami. Na rys. 8.4 [Wiśniewski i in. 2001] pokazano zasadę działania akumulatora kamiennego, współpracującego z kolektorem słonecznym, podczas ładowania (a) oraz w czasie oddawania ciepła do pomieszczenia (b).

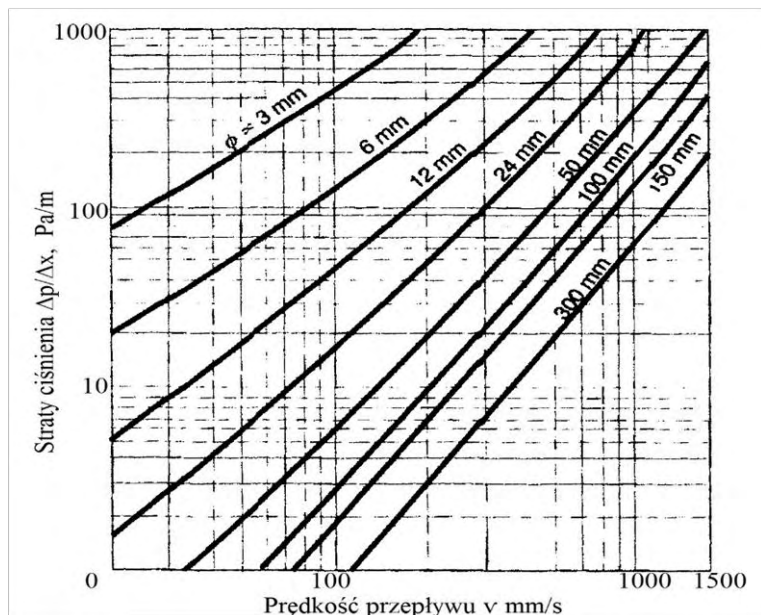


Rys. 8.4 Zasada działania akumulatora kamiennego i rozkład temperatur: a - ładowanie ciepłe akumulatora, b - oddawanie ciepła do pomieszczenia [Wiśniewski G. i in. 2001].

Istotnym parametrem w akumulatorach kamiennych jest pozorna prędkość przepływu powietrza (przez niezapełniony kamieniami zbiornik akumulatora). Od niej zależy bowiem proces wymiany ciepła i opory przepływu powietrza przez warstwę kamieni, które wpływają na zapotrzebowanie energii elektrycznej do napędu wentylatora. Zakres pozornych prędkości przepływu powietrza jest znaczny i wynosi $v_p = 0,5 - 2,0 \text{ m/s}$. Znając objęściowe natężenie przepływu powietrza przez akumulator $V_p, \text{m}^3/\text{s}$ można obliczyć pole poprzecznego przekroju złoża akumulatora:

$$Fa = \frac{V_p}{v_p}, \text{ m}^2 \quad (8.10)$$

Na wykresie rys. 8.5 Wg Parkera [1990], pokazano opory przepływu powietrza, w zależności od jego pozornej prędkości przepływu przez złożę kamienne o różnych wymiarach kamieni (średnicach zastępczych).

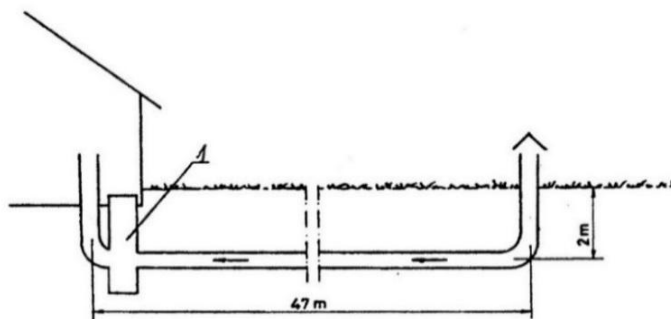


Rys. 8.5 Opory przepływu powietrza przez złożę kamienne w zależności od prędkości przepływu powietrza przez złożę kamienne [Parker B. 1993]

Inną formą długoterminowego magazynowania energii cieplnej jest magazynowanie energii w gruncie. Metoda ta jest rozpowszechniona w Zachodniej Europie, USA i w Kanadzie, stosowana w budownictwie domowym, ośrodkach rekreacji i wypoczynku, campingach i w rolnictwie. Magazynowanie ciepła w gruncie polega na instalowaniu w wywierconych otworach w gruncie przewodów rurowych, którymi ciepło odbierane z gruntu, przekazywane jest do ogrzewanego obiektu. Magazyny takie pracują w układach woda – woda i woda – powietrze.

Do magazynowania ciepła stosuje się również magazyny skalne. Budowa takich magazynów polega na wierceniu w skałach otworów na głębokość 30 – 200 m i średnicy 10 cm wypełnionych wodą. Zarówno magazyny gruntowe jak i skalne pracują przeważnie z zastosowaniem pomp ciepła. Na rys. 8.6 pokazano wykorzystanie ciepła akumulowane-

go w gruncie w celu kształtowania mikroklimatu w fermie świń [Karhunen 1990].



Rys. 8.6 Wykorzystanie ciepła magazynowanego w gruncie do kształtowania mikroklimatu w fermie świń [Karhunen J. 1990].

Na głębokości 2 m zainstalowano w gruncie przewód rurowy z PCV o średnicy 0,2 m i długości 47 m. Nośnikiem ciepła było powietrze o prędkości przepływu 6 m/s i oporze przepływu $\Delta_p = 200$ Pa. Sprawność cieplną gruntowego rurowego wymiennika ciepła opisuje równanie:

$$\eta = \frac{t_0 - t_w}{t_0 - t_g} \quad (8.11)$$

w którym:

t_0 – temperatura powietrza otoczenia °C,

t_w – temperatura powietrza wylotowego z wymiennika °C,

t_g – temperatura gruntu °C.

Badania wymiennika ciepła wykazały, że w zimie różnica temperatur pomiędzy temperaturą powietrza otoczenia, a temperaturą powietrza podgrzanego wynosiła 5 - 30°C, a w lecie 4 - 18°C [Karhunen 1990]. Ilość ciepła zakumulowanego w gruncie zależy od wilgotności względnej gruntu, i rośnie ze wzrostem wilgotności względnej gruntu.

W objętości jednego m^3 suchego gruntu, można zmagazynować ok. 8 kWh energii, a wilgotnym trzykrotnie więcej.

8.3. Akumulatory ciepła utajonego

W akumulatorach ciepła utajonego, przekazywanie i pobieranie energii cieplnej odbywa się podczas zmiany stanu skupienia ze stanu stałego w stan ciekły i na odwrót. Mogą być również stosowane substancje podlegające zmianie rodzaju stanu skupienia złoża akumulatora. Temperatura, przy której zachodzi zmiana stanu skupienia, uzależniona jest od rodzaju materiału, z którego jest wykonany akumulator ciepła. W akumulatorach ciepła utajonego podstawowymi parametrami są: temperatura i ciepło topnienia. Wykorzystuje się w nich różne substancje chemiczne, które pod wpływem podwyższonej temperatury ulegają przemianom fazowym. Akumulatory składające się z roztworów soli, wosku, parafiny lub kwasów organicznych, podgrzewane są do temperatury topnienia, a następnie podczas obniżenia temperatur, przechodząc ze stanu płynnego w stały, oddają ciepło. Jedną z najczęściej stosowanych substancji jest sól glauberska $\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10\text{H}_2\text{O}$ o temperaturze topnienia ok. 32°C i ciepłe topnienia 8100 kJ/kg . Dla zmagazynowania ciepła na okres kilku dni w budynku mieszkalnym masa akumulatora ciepła z soli [Wołoszyn 1991], wynosi od 3 ton do 10 ton. Są to pojemniki z tworzyw sztucznych.

Do długoterminowego magazynowania energii cieplnej stosuje się również różnego rodzaju zbiorniki wodne. Płytkie zbiorniki wodne o głębokości ok. 20 cm z dnem pokrytym czarną substancją, a od góry przykrytą powłoką przezroczystą (szkło, tworzywo sztuczne), spełniają jednocześnie rolę kolektora słonecznego i akumulatora ciepła. Innym rodzajem akumulatorów wodnych są tzw. stawy słoneczne, naturalne lub sztuczne o głębokości 2 – 7 m, wypełnione chlorkiem sodu lub chlorkiem magnezu. Wg Wołoszyna [1999] dla potrzeb grzewczych domu jednorodzinnego powierzchnia stawu powinna wynosić ok. 200 m^2 .

Literatura:

- [1]. Chandra D., Willi H. 1981. *Pressure drop and heat transfer characteristics of air rock bed thermal storage systems*. Solar Energy Nr 27.

- [2]. Gogół W., Skonieczny O., Zakrzewski L. 1997. *Niektóre zagadnienia wymiany ciepła w kolektorach energii promieniowania słonecznego*. Biuletyn informacyjny Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej.
- [3]. Gogół W., Chochowski A., Pabis J. Wiśniewski G. 1993. *Konwersja techniczna energii promieniowania słonecznego w warunkach krajowych*. Ekspertyza Komitetu Termodynamiki i Spalania PAN, Warszawa.
- [4]. Karhunen J. 1990. *Underground Pipe as Heat Exchanger. Energy Conservation in Animal Houses*, nr 11. FAO, Rome.
- [5]. Parker B. 1990. *Solar energy in agriculture*. Elsevier.
- [6]. Wołoszyn M. A. 1991. *Wykorzystanie energii słonecznej w budownictwie jednorodzinym*. Centralny Ośrodek Informacji Budownictwa. Warszawa.
- [7]. Smolec W. 2000. *Fototermiczna konwersja energii słonecznej*. PWN, Warszawa.
- [8]. Wiśniewski G., Gołębiowski S., Gryciuk M. 2001. *Kolektory słoneczne. Poradnik wykorzystania energii słonecznej*. Centralny Ośrodek Informacji Budownictwa. Warszawa.

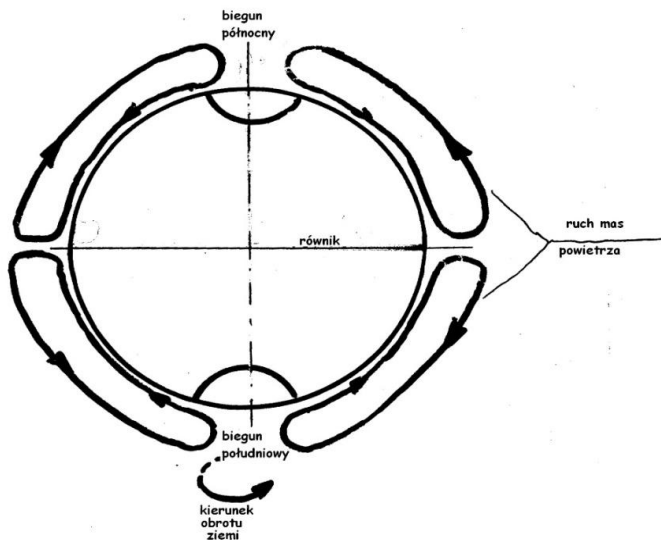
9. ENERGIA WIATRU

Słońce nierównomiernie ogrzewa masy powietrza atmosferycznego, co wywołuje ich przemieszczanie się na skutek wytwarzanej wtedy różnicy ciśnień. Ocenia się, że około 12% energii docierającej ze Słońca na Ziemię jest zamieniane na energię kinetyczną mas powietrza, Całkowitą energię ruchu mas powietrza dostarczaną na Ziemię przez promieniowanie słoneczne, szacuje się na ok. $9,6 \cdot 10^{22}$ J/rocznie, czyli ok. $2,7 \cdot 10^{16}$ kWh/rocznie. Jednak tylko 25% tej mocy przypada na warstwę atmosfery w bezpośredniej bliskości naszej planety [Fiszer 1998]. Przyjmuje się, że możliwa do praktycznego wykorzystania warstwa sięga do 100 m, ponad powierzchnię ziemi. Energia ta nie jest równomiernie rozłożona. Na nierównomierność rozłożenia mają wpływ takie czynniki jak:

- ruch obrotowy Ziemi (z zachodu na wschód, wywołując ruch mas powietrza przy powierzchni Ziemi ze wschodu na zachód, tzw. siła Coriolisa).
- promieniowanie słoneczne, pochłaniane w niejednakowym stopniu przez podłoże, powoduje powstawanie poziomego gradientu temperatur oraz związane z tym ruchy mas powietrza [Fiszer 1998]. Na rys. 9.1 pokazano zjawisko powstawania mas powietrza na globie ziemskim.

W miejscach o dużym nasłonecznieniu powietrze absorbuje energię podłoża, ogrzewa się i unosi, a w jego miejsce napływa powietrze chłodne. W ten sposób powstają wiatry, górne i dolne. Ponadto brane są pod uwagę czynniki lokalne, do których należą strefa graniczna lądu – morze oraz przeszkody terenowe. W pierwszym przypadku wiatr powstaje na skutek różnic temperatury wody i lądu, a dokładniej różnic szybkości absorpcji promieniowania cieplnego słońca. W dzień ląd, który szybciej się nagrzewa, oddaje ciepło powietrzu, to zaś unosi się do góry, a w jego miejsce napływa znad wody zimne powietrze, powodując powstawanie wiatru dziennego znad wody w kierunku lądu. W nocy, ze względu na szybsze ochładzanie się lądu sytuacja jest odwrotna, a zatem wiatr wieje znad lądu w kierunku wody. Na obszarach górzystych wy-

stępują wiatry o dobowym cyklu zmienności. Podczas nocy wieją wiatry od gór w kierunku równin, natomiast w dzień przeciwnie. Na powstawanie tych wiatrów, poza różnicami temperatury powietrza, znaczny wpływ mają różnice ciśnień powietrza na równinach i w górach. Wiatry nad morzem i w górach charakteryzuje gwałtowność i nieregularność.



Rys. 9.1 Mechanika powstawania mas powietrza na globie ziemskim [Fiszer P. 1988].

9.1. Rys historyczny

Pierwsze udane próby wykorzystania energii wiatru podjęto pięć tysięcy lat temu u wybrzeży Morza Śródziemnego. Tu stwierdzono istnienie pierwszych okrętów żaglowych. Najstarsze informacje pochodzenia sumeryjskiego o tzw. urządzeniach wietrznych, znaleźć można w kodeksie Hammurabiego (1750 r. p.n.e.). Heron z Aleksandrii (I wiek n.e.) zawarł w swych księgach rysunki pierwszych wiatraków na wiele wieków przed pojawieniem się dowodów ich istnienia. Natomiast hinduska księga Arthasatha ost Kantilya opisuje użycie wiatraków do pompowania wody. Pierwsze udokumentowane informacje o zbudowanych w Persji wiatrakach o pionowej osi obrotu, służących do mielenia ziarna, nawadniania gruntu oraz przecierania ryżu, pojawiły się u schyłku pierwszego tysiąclecia naszej ery. W 1105 roku we Francji, spotykamy

pierwszy opis konstrukcji wiatraka o poziomej osi obrotu. Ten typ wiatraka, upowszechniony w XIV wieku, okazał się znacznie wydajniejszy od perskiego wiatraka horyzontalnego [Romaniszyn 1998].

Przełom XIX i XX wieku zaznaczył się jako początek zaniechania budowy młynów wiatrowych. W połowie wieku dwudziestego zapoczątkowano teoretyczne rozważania możliwości wykorzystania wiatru, jako źródła energii elektrycznej. Prace te były prowadzone równolegle w Anglii, Danii, Niemczech i USA. Technologię współczesnej turbiny wiatrowej do wytwarzania prądu zmiennego opracował duński inżynier J. Juul.

Pierwsza wzmianka o najstarszym młynie wiatrowym na terenie dzisiejszej Polski pochodzi z zezwolenia na budowę takowych urządzeń, wydane w 1271 roku dla klasztoru w Białym Buku przez księcia Wiesława z Rugii. Następne wzmianki o wiatrakach dotyczą głównie klasztorów na Pomorzu. W roku 1377 wielki mistrz krzyżacki, co może świadczyć o doniosłości sprawy, wystawia zezwolenie na budowę dwóch wiatraków w pobliżu Chojnic. Na przełomie wieku XVIII na ziemiach polskich, pracowało ponad dwadzieścia tysięcy wiatraków. Z analizy danych o wiatrakach wynika, że na dzisiejszym terytorium Polski największymi skupiskami wiatraków charakteryzowały się Pomorze Zachodnie i Gdańskie, część Mazur, Warmii i Mazowsza, Ziemi Lubuskiej i Śląska oraz wschodnia i środkowa Wielkopolska. Wiatraki napędzały ok. 50% wszystkich młynów. Wiek XIX oraz początek XX przyniosły gwałtowny spadek zainteresowania wiatrakami. Były one wypierane przez maszyny parowe do napędu młynów. Po drugiej wojnie światowej zostało zniszczone wiele młynów. Dane z 1954 roku wymieniają 3280 zarejestrowanych wiatraków, spośród których tylko 63 włączono do państwowej lub spółdzielczej sieci zakładów przemysłu zbożowo-młynarskiego, pozostałe natomiast przeznaczono do likwidacji [Romaniszyn 1998].

Trzeba było czekać aż do roku 1991, by w polskim krajobrazie znów pojawiły się wiatraki, lecz już innej generacji pod względem wielkości, konstrukcji i sposobów ich wykorzystania.

9.2. Wpływ prędkości wiatru na wydajność energetyczną elektrowni wiatrowych

Podstawowym parametrami energetycznym wiatru są prędkość, droga i czas w jakim, poruszają się masy powietrza. Prędkości przepływu powietrza podlegają ciągłym zmianom pod względem wartości i kierunku, więc oprócz prędkości chwilowej, definiuje się prędkość

średnią okresową. Działania te mają na celu określenia optymalnej lokalizacji rotora siłowni wiatrowej. Zasadnicze znaczenie ma również wysokość masztu, od której zależy, prędkość wiatru nad danym obszarem. Wzajemne relacje pomiędzy wysokością masztu, a prędkością i energią wiatru ilustruje tabela.9.1.

Tabela 9.1 Wzajemne relacje pomiędzy wysokością masztu, a prędkością i energią wiatru [Machnikowski L. 1998].

Wysokość m.	Wzrost wiatru%	Wzrost energii wiatru%
9	0	0
12	4,2	13,1
15	7,5	24,5
18	10,4	34,6
21	12,9	43,8
24	15,0	52,2
27	17,0	60,0

Potencjał energetyczny wiatru jest funkcją jego prędkości do potęgi trzeciej. Oznacza to, że gdy prędkość wiatru wzrośnie dwukrotnie np., z 3,5 do 7,0 m/s, to energia wiatru wzrośnie ośmiokrotnie. Zasoby energetyczne wiatru poniżej prędkości 3,5 m/s są bardzo niskie, [Machnikowski 1998]. Z kolei przy bardzo silnym wietrze, zasoby energetyczne są tak duże, że turbina wiatrowa nie jest w stanie ich bezpiecznie przetworzyć, bez możliwości uszkodzenia konstrukcji.

Dwupłatowe śmigło o rozpiętości 4,6 m. pozwala przy prędkości wiatru 32 km/h generować ponad 2 kW mocy, a śmigło o rozpiętości 6,1 m wytwarza moc 3,7 kW. Najczęściej stosowane są śmigła dwu lub trójłopatowe. Z uwagi na zmienną prędkość wiatru oddziałującego na śmigło, na różnych jego wysokościach działają różne siły. Występuje też efekt „cienia”, kiedy łopatką śmigła mijają słup konstrukcji nośnej, zasłaniając część wiatru. Efektem tego są bardzo duże różnice sił powietrza działających na łopatkę śmigła, przenoszące się na układy łożysk [Chmielewski 1999].

W niektórych wiatrakach w celu utrzymywania stałych obrotów łopatek śmigła zmienia się automatycznie zależnie od prędkości wiatru. Utrzymywanie stałych obrotów jest jednak szczególnie ważne w przy-

padku współpracy elektrowni wiatrowej z siecią elektryczną, ponieważ częstotliwość generowanego napięcia musi być zsynchronizowana z siecią. Nie jest to rozwiązanie doskonałe, z uwagi na ograniczony zakres prędkości wiatru, przy których możliwa jest taka regulacja. Przy bardzo silnych wiatrach trzeba hamować obroty, uzyskując mniejszą moc. W przypadku siłowni wiatrowych, których śmigła wirują ze zmienną (zależnie od prędkości wiatru) prędkością, napięcie zmienne generowane przez prądnicę, jest najpierw przetwarzane na napięcie stałe, które następnie zostaje przetworzone na prąd zmienny o wymaganych parametrach. Tego rodzaju instalacje mają większą sprawność wykorzystania energii wiatru. Konstrukcję wiatraków w ciągu ostatnich dziesięciu lat znacznie udoskonalono, zwiększając ich sprawność i niezawodność. Prace rozwojowe trwają nadal [Chmielewski 1999].

Prąd z generatora, przekazywany jest kablem do własnej podstacji z transformatorem u podstawy masztu. Stamtąd wytwarzany prąd może być przekazywany za pośrednictwem transformatorów do sieci elektrycznej i dalej do odbiorców.

Elektrownie wiatrowe wymagają stosunkowo dużej przestrzeni na ziemi i z reguły są budowane z dala od większych osiedli. Przyjmuje się, że ferma wiatrowa o mocy 1 MW może być budowana na powierzchni ziemi około 1 km² [Tymiński 1997].

Szacuje się, że, średnie roczne zasoby energii wiatrów na całej kuli ziemskiej są ponad 1800 razy większe od energii wytwarzanej przez wszystkie elektrownie ciepłe oraz ponad 1200 razy większe od zasobów energii wód śródlądowych [Chmielewski 1999].

Konstruktorzy elektrowni wiatrowych wykorzystują doświadczenia z dziedziny aerodynamiki oraz stosują nowoczesne materiały i technologie. Wiele elementów konstrukcyjnych brano początkowo wprost z przemysłu lotniczego, jak np. wirniki helikopterowe czy też skrzydła szybowców wyczynowych. Okazuje się jednak, że warunki pracy łopaty śmigła w elektrowni wiatrowej są inne niż w skrzydłach czy śmigłach samolotów. Powodem tego jest tu sprzeczność występująca pomiędzy zmieniającą się w szerokich granicach prędkością wiatru, a pożądanym zachowaniem stałych obrotów generatora prądu. Tak szkodliwe, w przypadku skrzydła samolotu zjawisko „przeciągnięcia”, powodujące oderwanie strug powietrza od powierzchni skrzydła, może być korzystne dla śmigła elektrowni wiatrowej jako zapobiegające nadmiernemu nabieraniu obrotów.

Prąd elektryczny, wytwarzany przez elektrownię wiatrową, po dostosowaniu wymaganego standardu pod względem częstotliwości

napięcia, jest kierowany do transformatora głównego, a następnie do podstacji. Podstacja jest połączona z linią przesyłową wysokiego napięcia, rozprowadzającą energię elektryczną po kraju. Większość elektrowni wiatrowych pracuje w ciągu roku od 3000 do 5000 godzin. Kluczowe znaczenie dla jej sprawnego działania ma obsługa i właściwa konserwacja. Zapewnienie niezawodnej pracy wiatraka wymaga przeprowadzenia dwóch przeglądów mechanizmów w ciągu roku [Chmielewski 1999].

Zalety elektrowni wiatrowych są oczywiste, nie dymią i nie powodują zanieczyszczenia atmosfery tlenkami siarki czy azotu (będącymi sprawcami kwaśnych deszczów), ani nie wytwarzają ozonu. Ale są też i wady. Wirujące śmigła zabijają ptaki oraz wydają nieprzerwanie nużący szum.

9.3. Lokalizowanie elektrowni wiatrowych

Na podstawie doświadczeń zebranych w Instytucie Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa (IBMER) w Warszawie można stwierdzić, że przyczyną niskiej wydajności części elektrowni wiatrowych wybudowanych w Polsce, jest ich zła lokalizacja, [Fugiel 1995]. Sam proces wyboru właściwego miejsca pod budowę elektrowni nie jest jednak łatwy i wymaga stosownych znajomości danych klimatycznych, lokalnych przepływów mas powietrza oraz oddziaływania różnego typu przeszkód terenowych na ruch powietrza.

Elektrownie wiatrowe, będące źródłem energii dla gospodarstw rolnych lub budynków mieszkalnych, nie powinny być instalowane w bezpośrednim ich sąsiedztwie. Dotyczy to wszystkich siłowni wiatrowych szczególnie tych, które zostały wykonane systemem gospodarczym według własnego projektu przyszłego użytkownika. Ze względów bezpieczeństwa odległość elektrowni od budynków mieszkalnych powinna wynosić nie mniej niż 50 m, podobne odległości powinny być zachowane w stosunku do dróg publicznych, linii energetycznych, telefonicznych oraz torów kolejowych. Dodatkowym elementem przemawiającym za przestrzeganiem tej odległości są, w przypadku budynków mieszkalnych względy ergonomiczne. Elektrownia wiatrowa, jest źródłem hałasu. Jego natężenie zależy w znacznym stopniu od konstrukcji maszyny oraz panujących warunków atmosferycznych. Ciągły hałas, pochodzący głównie od pracującego wirnika i przekładni zębatej, może być uciążliwy dla ludzi.

Wskazane jest opracowanie, zasad wyznaczania terenów zakazanych dla lokalizacji wież wiatrowych w krajobrazie kulturowym zwłaszcza

cza we wsiach letniskowych, agroturystycznych, na terenach naturalnego krajobrazu i zabudowy historycznej. Opracowanie takie należy wykonać przy współpracy służb konserwatora zabytków, zaś lokalizacja wież wiatrowych powinna uwzględniać wymogi ustawy o ochronie dóbr kultury. W miejscowościach takich powinien być zachowany krajobraz naturalny, jak i lokalne wartości kulturowe. Każda propozycja budowy turbiny wiatrowej musi być rozważana indywidualnie. Warunki lokalizacji elektrowni wiatrowych na obszarach ważnych dla kultury powinny być przedmiotem ustaleń zawartych w studiach uwarunkowań i kierunków zagospodarowania oraz w miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego (Ustawa z 1994 roku) [Dziekońska 1998].

Zgodnie z obowiązującymi przepisami, dotyczącymi planowania przestrzennego, obowiązkowe jest uzgadnianie lokalizacji elektrowni wiatrowej z władzami lokalnymi (najczęściej gminnymi). Procedura uzgodnienia obejmuje następujące etapy, [Fugiel 1995]:

- wykonanie planu terenu, na którym ma być usytuowana elektrownia wiatrowa (w skali 1:500 – 1:2500) z proponowaną lokalizacją elektrowni wraz z przeprowadzeniem linii niskiego napięcia do punktu odbioru energii elektrycznej,
- wykonanie rysunków zestawieniowych elektrowni z podaniem podstawowych parametrów technicznych informacyjnych i dane techniczne,
- wykonanie uproszczonych obliczeń wytrzymałościowych wieży oraz obliczeń wydajności elektrycznej elektrowni w ciągu roku.

Warunki wiatrowe decydują o funkcjonowaniu elektrowni wiatrowej. Jeśli nie są stosownie spełnione, lepiej zrezygnować z budowy tego urządzenia. Informacje na temat warunków wiatrowych, panujących w miejscu planowanej budowy elektrowni wiatrowej, możemy uzyskać w najbliższej reprezentatywnej stacji meteorologicznej. Nawet na terenach płaskich warunki wiatrowe mogą się znacznie zmieniać w miejscach niezbyt od siebie odległych. Miejsca oddalone od siebie o 15-20 km, o ile teren jest dostatecznie płaski, zwykle mają zbliżone charakterystyki wiatru. Na obszarach pofałdowanych dane z określonej stacji nie są reprezentatywne nawet wówczas, jeżeli odległość pomiędzy nimi jest mała, rzędu kilku kilometrów, [Fugiel 1995]. Istnieje wiele innych, bardziej precyzyjnych metod pozyskiwania danych o warunkach wiatrowych panujących w danym obszarze. Wymagają one jednak zastosowania elektronicznych urządzeń do pomiaru prędkości i kierunku wiatru, co

wpływa na dodatkowy wzrost kosztów całej inwestycji i jest opłacalne jedynie w wypadku budowy dużych maszyn do współpracy z siecią energetyczną. W przypadku siłowni wiatrowych starszej generacji można we własnym zakresie dokonać pomiaru prędkości wiatru. Należy przy tym przestrzegać [Fugiel 1995] następujących zasad:

- pomiary powinny być dokonywane na wysokości, na jakiej zawieszony będzie wirnik elektrowni, dzięki temu uniknie się przeliczania wyników pomiarów, co jest zwykle źródłem błędów,
- okres trwania pomiarów powinien wynosić, co najmniej jeden pełny rok kalendarzowy,
- pomiaru prędkości (i ewentualnie kierunku) wiatru dokonuje się w miejscu, w którym zostanie wybudowana elektrownia wiatrowa,
- odczyty powinny być dokonywane co najmniej cztery razy na dobę o stałych godzinach. Nieprzestrzeganie tych zasad jest zawsze źródłem poważnych błędów pomiarowych.

Zebrane wyniki badań należy przedstawić w formie tabel lub wykresów dla poszczególnych miesięcy oraz zbiorczo całego roku.

Wartość tak uzyskanej średniorocznej prędkości wiatru może być podstawą podjęcia inwestycji, jaką jest budowa elektrowni wiatrowej [Fugiel 1995].

Wybór miejsca budowy elektrowni wiatrowej na terenie płaskim jest o wiele mniej skomplikowany niż na terenach górzystych czy pofałdowanych. Lokalizując elektrownie na płaskim terenie należy [Fugiel 1995] uwzględnić:

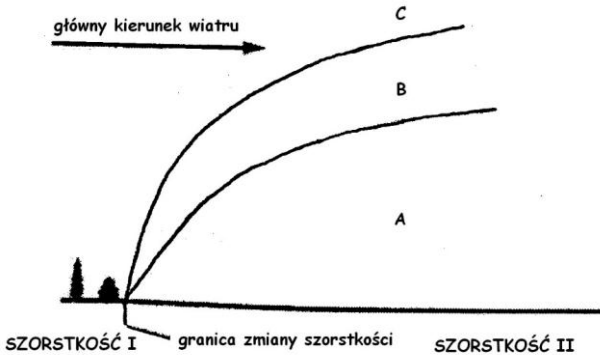
- wpływ szorstkości terenu na prędkość i kierunek wiatru,
- wpływ przeszkód terenowych (naturalnych i sztucznych) na przepływ wiatru i wydajność elektryczną elektrowni.

Szorstkość terenu jest odzwierciedleniem jego pokrycia. Im teren jest bardziej chropowaty, a więc porośnięty niejednorodną roślinnością różnej wysokości, tym bardziej wpływa na zatrzymanie mas powietrza w warstwie przyziemnej. Typowym terenem o jednolitej szorstkości jest płaski obszar porośnięty trawą. Jeżeli nie występują na nim inne przeszkody terenowe (wzgórza, drzewa, budynki), to prędkość wiatru na wybranej wysokości jest prawie jednakowa na całym obszarze.

W wypadku budowy elektrowni na terenie zalesionym, przechodzącym w duże obszary łąkowe, gwałtowna zmiana szorstkości będzie wpływała na zmianę pionowego profilu wiatru. Na takim obszarze występują trzy charakterystyczne strefy:

- jednolita strefa przyziemna dostosowana do nowej szorstkości terenu (A),
- strefa przejściowa, w której występują duże zmiany prędkości wiatru w kierunku pionowym i znaczne zawirowania (B),
- strefa niezakłócona, w której profil wiatru jest taki sam, jak przed zmianą szorstkości terenu.

Profil wiatru przy zmianie szorstkości terenu przedstawiono na rys. 9.2.



Rys. 9.2 Profil wiatru przy zmianie szorstkości terenu [Fugiel P. 1995].

Wybierając miejsce na budowę elektrowni należy wiedzieć, w której strefie znajdować się będzie wirnik elektrowni. Jeżeli będzie on w strefie przepływu laminarnego lub turbulentnego, to wydajność elektrowni będzie taka sama, jak gdyby pracowała ona na terenie o jednolitej szorstkości. Bardzo niekorzystna jest praca wirnika w strefie przejściowej, gdyż poddawany jest on dodatkowym obciążeniom aerodynamicznym.

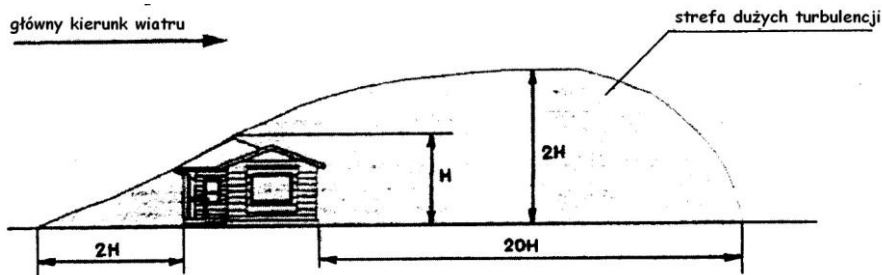
Przeszkody terenowe (budynki lub rzędy drzew), które znajdują się na drodze przesuwających się mas powietrza, powodują gwałtowne zmniejszenie prędkości wiatru i wzrost zawirowań w pobliżu elektrowni. Takie zaburzenia mają negatywny wpływ na trwałość konstrukcji elektrowni, dlatego też należy zdecydowanie unikać takich lokalizacji. Elektrownie (w szczególności małe, budowane przez indywidualnych inwesto-

rów) mogą być narażone na wpływ zaburzeń powstałych w wyniku oddziaływania budynków na przesuwające się strugi powietrza. Fakt ten ma decydujące znaczenie dla wydajności energetycznej małych elektrowni.

Strefa zawirowań za budynkiem bardzo szybko rozprzestrzenia się w kierunku pionowym, osiągając maksymalną wysokość $2H$ (H to wysokość przeszkody, w metrach). Poziomy wpływ przeszkody oddziałuje na odległość do $20H$, co przy wysokości budynku 6 m oznacza, że elektrownia powinna być zbudowana, co najmniej 120 m za przeszkodą. W wypadku lokalizacji elektrowni przed budynkiem, od strony przeważającego kierunku wiatru, jej odległość od niego powinna wynosić $2H$. Gdy elektrownia ma stanąć tuż za budynkiem, wysokość wieży nie powinna być mniejsza od $2H$, [Fugiel 1995].

Każde zaburzenie ruchów powietrza spowodowane przez budynek zależy od jego kształtu, otaczającego go terenu oraz innych przeszkód występujących w jego pobliżu.

Optyw budynku i rozprzestrzenienie się strefy turbulencji pokazano na rys. 9.3.



Rys. 9.3 Optyw budynku - rozprzestrzenienie się strefy turbulencji [Fugiel P. 1995].

Wybierając miejsce pod budowę elektrowni w pobliżu rzędów drzew lub pasów wysokiej zieleni należy, [Fugiel 1995] brać pod uwagę, że:

- wieża elektrowni powinna być dostatecznie wysoka, aby wirnik nie pracował w strefie zaburzonych mas powietrza (około $2 - 2.5H$),
- elektrownia powinna być zlokalizowana w dostatecznej odległości od przeszkody (około $5H$ przed przeszkodą, $15H$ za nią lub z boku), aby maksymalnie zminimalizować wpływ przeszkody. Jeżeli

wpływ przeszkody nie może być całkowicie wyeliminowany, należy dokładnie zbadać zaburzenia wywołane jej opływem i ewentualnie zastanowić się nad zmianą lokalizacji.

Wybierając miejsce pod budowę elektrowni wiatrowej, należy w pierwszej kolejności rozważyć wpływ ukształtowania terenu, potem przeszkody terenowe, a na końcu jego szorstkość.

Wśród terenów pofałdowanych wyróżniamy:

- tereny podwyższone góry, wzgórza, skarpy,
- zagłębienia terenowe doliny, niecki, przełęcze.

Korzystną lokalizacją elektrowni jest podłużne wzgórze. Wynika to z faktu, iż wtedy wyeliminowane są w dużym stopniu negatywne efekty gromadzenia się zimnego powietrza przy powierzchni ziemi. Podłużne wzgórze oddziałuje jako teren wyniesiony podobnie jak wysoka wieża, może zwiększać prędkość powietrza przepływającego nad nim, co z kolei dodatnio wpływa na podwyższenie mocy i wydajności elektrowni. Odnosi się to się nie tylko do podłużnych wzgórz, ale również do pojedynczych pagórków czy gór.

Bardzo ważny jest kształt wzgórza oraz jego usytuowanie względem przeważającego kierunku wiatru. Za optymalne uważa się wzgórze o przekroju pionowym zbliżonym do trójkątnego, ustawione prostopadle do głównego kierunku wiatru. Jednak, gdy mamy do wyboru dwa podłużne wzgórza jedno niższe, ale usytuowane prostopadle do kierunku wiatru, drugie wyższe o kilkadziesiąt metrów, ale ukierunkowane równoległe to wyższe będzie miało lepsze warunki wiatrowe. Wynika to z dużego wpływu wysokości na wzrost prędkości wiatru, [Fugiel 1995]. Ponadto, na pracę elektrowni wiatrowych wywierają wpływ czynniki klimatyczne występujące w terenie, na którym lokalizowana jest elektrownia wiatrowa. Mają one według, Fugla [1999] wpływ nie tylko na warunki eksploatacji elektrowni, ale i na jej wydajność. Do zmniejszania wydajności elektrowni wiatrowych może się przyczynić kilka czynników atmosferycznych, np.:

1. **Turbulencja**, czyli nagłe zmiany prędkości i kierunku wiatru, powodując znaczny spadek mocy wirnika i jego wibracje oraz nierównomierne obciążenie siłami aerodynamicznymi. Może to powodować uszkodzenie bądź zniszczenie wirnika.
2. **Nierównomierny rozkład prędkości wiatru**, co oznacza duże zmiany prędkości i kierunku wiatru na przestrzeni mniejszej, bądź

równej średnicy wirnika elektrowni. Powoduje to nierównomierne obciążenie skrzydeł wirnika, mogące wywołać zniszczenie elementów konstrukcji. Wiatry o bardzo dużej prędkości mogą doprowadzić do zniszczenia wirnika, bądź całej maszyny. Jeżeli elektrownia budowana jest w rejonach, w których występują silne wiatry, to jej konstrukcja musi być odpowiednio wzmocniona.

3. **Nadmierne oblodzenie i ośnieżenie elementów elektrowni** może również doprowadzić do jej zniszczenia. Bezpośrednią tego przyczyną może być niewyważenie wirnika na skutek zbierania się na nim lodu, a także wnikanie marznącej wody w szczeliny części mechanicznych (np. przekładni), powodując ich pęknięcie.
4. **Mikroskopijne kropelki wody morskiej**, przenoszone przez wiatr na odległość dochodzącą do 20 km w głąb lądu, mogą osadzać się na konstrukcji elektrowni, wywołując tym samym przyspieszoną korozję. W ekstremalnych wypadkach, gdy elementy metalowe są słabo zabezpieczone żywotność maszyny, może być skrócona nawet o połowę, podnosząc tym samym jednostkowy koszt wyprodukowanej energii elektrycznej.

9.4. Stan energetyki wiatrowej w Polsce

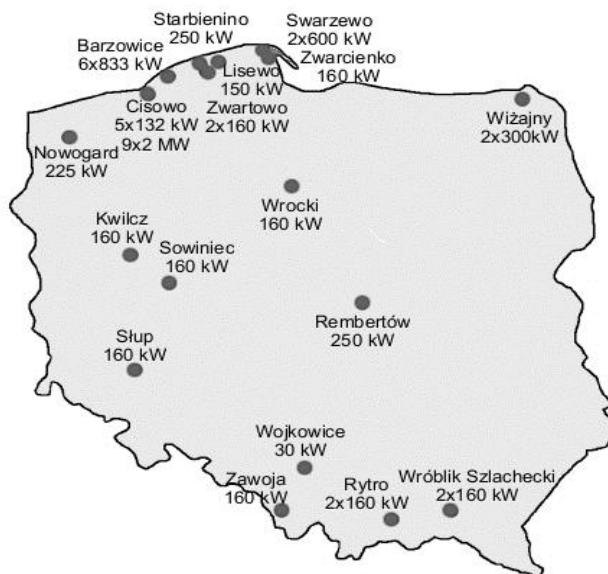
Polska, która stała się Stroną ramową Konferencji Narodów Zjednoczonych w sprawie Zmian Klimatu, zobowiązana jest do opracowania i wdrożenia stabilizacji oraz redukcji emisji gazów cieplarnianych i do oczekiwanych zmian klimatu działań gospodarki najbardziej zależnych od warunków klimatycznych. Polska emituje około 2% globalnej ilości CO₂, przede wszystkim w wyniku spalania węgla, a więc według Bartmańskiego [1999] problem redukcji emisji tego gazu ma poważne znaczenie gospodarcze.

Obecnie idea zrównoważonego rozwoju staje się wyznacznikiem przemian społeczno-ekonomicznych, jakie zachodzą w gospodarce polskiej. Jego realizacja, to szereg przedsięwzięć o charakterze strategicznym, od społeczno-politycznych do usprawnienia zarządzania ochroną środowiska i innymi dziedzinami. Jednym z działań gospodarki, który wywiera negatywny wpływ na środowisko, jest sektor paliwowo-energetyczny, w którym dominującym surowcem jest węgiel, który będzie jeszcze długo podstawowym nośnikiem energii w Polsce.

9.5. Aktualny stan i zlokalizowanie elektrowni wiatrowych w Polsce

W pierwszych latach XXI wieku nastąpił dynamiczny rozwój energetyki wiatrowej w Polsce. Moc zainstalowana wzrosła od 83,3 MW w 2005 roku do 3834 MW w 2014 roku. Według danych Urzędu Regulacji Energetyki na koniec 2014 roku w Polsce znajdowało się 902 instalacji wiatrowych (zarówno pojedyncze turbiny, jak i duże farmy) o łącznej mocy 3833,8 MW. W 2013 roku wiatraki wyprodukowały w Polsce 6027 GWh energii, czyli 3,66% całkowitej energii elektrycznej wyprodukowanej w kraju. W 2013 roku Polska znajdowała się na 9. miejscu spośród państw Unii Europejskiej pod względem mocy zainstalowanej w energetyce wiatrowej.

Według rządowych planów w 2020 ich moc ma wynosić 6650 MW. Lokalizację siłowni wiatrowych w Polsce pokazano na rys. 9.4.



Rys. 9.4 Lokalizacja elektrowni wiatrowych w Polsce [Lorenc H.1999].

W Tarczynie koło Warszawy w 1999 roku rozpoczął pracę „Zielony Wiatrak” firmy Van Melle Polska. Jest on największą turbiną wiatrową

w Polsce i wskazuje na to, że firma Van Melle konsekwentnie realizuje program ochrony środowiska. Wiatrak został postawiony w kwietniu 1997 roku w ramach proekologicznego programu tej firmy. Ma 50 m wysokości i średnio pokrywa 35% potrzeb energetycznych firmy. "Zielony Wiatrak" Van Melle ma moc 250 kW, co oznacza, że produkuje w ciągu roku 350 tys. kW mocy, czyli tyle ile zużyłoby 3 tys. przeciętnych domostw. Redukuje zatem szkodliwe produkty spalania pochodzące ze spalania węgla wynoszące rocznie 420 ton dwutlenku węgla, 2,7 ton tlenku azotu, 24 ton popiołu, pyłu i żużlu. Ciekawym rozwiązaniem są wiatraki o osi pionowej. Urządzenia te działają niezależnie od kierunku wiejącego wiatru. Nie mają żadnego steru kierunkowego. Dalszą korzyścią jest tu automatyczne regulowanie liczby obrotów, która jest proporcjonalna do prędkości wiatru. Przy słabnym wietrze, gdy liczba obrotów spada, łopaty wiatraka są ustawione w ten sposób, że zwiększa się ich powierzchnia. Stopniowe wzmaganie się wiatru powoduje rosnące obroty, a wtedy łopaty pod działaniem siły odśrodkowej odchylają się bardziej od siebie, zmniejszając się ich płaszczyzny robocze i zmienia się kąt natarcia wiatru. Rosnąca w dalszym ciągu siła wiatru powoduje zupełne zamknięcie się łopat. Łopaty wirnika prawie zupełnie przestają pracować, spadają obroty silnika, zmniejsza się siła odśrodkowa działająca na łopaty, które pod działaniem sprężyn na powrót odchylają się i obroty silnika stabilizują się. Siła wiatru, działająca bezpośrednio na dużą powierzchnię łopat, wytwarza duży moment obrotowy wirnika, umożliwiając połączenie przez przekładnię pasową prądnicy o znacznej mocy.

Silnik wiatrowy wybudowany w Posadzie koło Rymanowa, wytwarza 700 W energii elektrycznej przy prędkości przepływu powietrza 8 – 10 m/s. Właściciel urządzenia, zgromadzoną w akumulatorach energię oświetla domek letniskowy.

Do budowy wież stosowano najczęściej kątowniki, rury stalowe bądź całe dźwigary. Na łopaty i ster boczny stosowano blachę aluminiową, płaskowniki stalowe a czasem połówki rur PCV [Skrzypczyk 1998]. Konstrukcję wiatraka o osi pionowej pokazano na rys. 9.5.



Rys. 9.5 Konstrukcja wiatraka o osi pionowej.

Wykaz siłowni wiatrowych zainstalowanych w Polsce ilustruje tabela 9.2.

Tabela 9.2 Wykaz siłowni wiatrowych w Polsce [Szpryngiel M. 2011].

Lp.	Miejsce zainstalowania	Ilość szt.	Moc elektrowni (kW)	Moc farmy (MW)	Producent	Użytkownik	Rok startu
1.	Lisewo / woj. Pomorskie	1	150	0,15	Nordtank	Elektrownia Żarnowiec	1991
2.	Swarzewo / woj. Pomorskie	1	95	0,095	Folkecenter	Energia – Gdańsk	1991
3.	Zawoja k. Bielsko-Białej	1	160	0,16	Nowomag	Klasztor	1995
4.	Wrocki	1	160	0,16	Nowomag	prywatny	1995
5.	Kwilicz / woj. Wielkopolskie	1	160	0,16	Nowomag	gmina	1996
6.	Słup k. Legnicy	1	160	0,16	Nowomag	gmina	1997
7.	Rembertów / woj. Mazowieckie	1	250	0,25	Lagerway	Van Melle – Poland	1997

8.	Starbiewo / woj. Pomorskie	1	250	0,25	Nordex	Kaszubski Uniwer. Ludowy	1997
9.	Swarzewo / woj. Pomorskie	2	600	1,2	Tacke	WestWind - Poland	1997
10.	Rytno k. Nowego Sącza	1	160	0,16	Nowomag	prywatny	1994
11.	Cisowo k. Darłowa	5	132	0,66	SeeWind	prywatny	1999
12.	Rymanów k. Krosna	2	160	0,32	Nowomag	gmina	2000
13.	Nowograd	1	255	0,255	Vestas	gmina	2000
14.	Barzkowice	6	850	5,1	Vestas	prywatny	2001
15.	Cisowo k. Darłowa	9	2 MW	18	Vestas	prywatny	2001
16.	Wizajny k. Suwałk	2	300	0,6	Vestas	gmina	2002
17.	Dukla / woj. Podkarpackie	1	160	0,16	Nowomag	gmina	2002
18.	Zagórze	15	2 MW	30	Vestas V80	TAURON Ekoenergia	2003
19.	Płock	3	160	0,48	Nowomag	gmina	2003
20.	Mszczonów	5	160	0,8	Nowomag	gmina	2004
21.	Będkowo	2	160	0,32	Nowomag	gmina	2004
22.	Lisewo	17	600	10,8	Enercon	Gren Bear Corporation	2005
23.	Tymień	25	2 MW	50	Vestas V80	Invenergy	2006
24.	Gnieźdźewo k. Pucka	11	2MW	22	Gamesa	PGE Ener- gia	2006
25.	Kisielice	43	1,5-2 MW	154	Eolica, Vestas V80	PGE Ener- gia	2007- 2014
26.	Jagniątkowo (Lake Ostrowo)	17	1,5-2 MW	30,6	Vestas V90	PGE Ener- gia	2007
27.	Kamieńsk	25	1,2 MW	30	Enercon E70	PGE Ener- gia	2007
28.	Malbork (Sztum)	12	1,5 MW	18	Vestas V90	PGE Ener- gia	2007
29.	Łebicz I k. Pucka	4	800	3,2	Enercon E48	Eurowind	2007
30.	Łebicz II k. Pucka	4	2 MW	8	Vestas V80	E.ON Climate	2008
31.	Zajączkowo	24	2 MW	24	Vestas V80	Windpol	2008
32.	Karścino-Mołtowo	17	4,5 MW	90	Vestas V90/3000	Dong Energy	2008
33.	Krzęcin	7	850	6	Gamesa	RWE	2008
34.	Darżyno	6	2 MW	12	Enercon E82		2008

ENERGIA WIATRU

35.	Śniatowo	16	2 MW	32	Vestas V90	Power4all	2008
36.	Inowrocław	16	2 MW	32	Vestas V90	Vortex Energy	2008
37.	Hnatkowice-Orzechowce k. Przemyśla	6	2 MW	12	Gamesa G87		2009
38.	Łęki Dukielskie	5	2 MW	10	Repower MM92		2009
39.	Suwałki	18	2,3 MW	41	Simens SWT-2,3	RWE Polska	2009
40.	Tychowo-Noskowo	20	2,5 MW	50	Nordex N90	RWE	2009
41.	Margonin	60	2 MW	120	Gamesa G90	EDO Renovaveis	2010
42.	Karnice	13	2,3 MW	31	Simens SWT-2,3	PGE Energia Natury	2010
43.	Karcino	17	3 MW	51	Vestas V90		2010
44.	Farma Wiatrowa Piecki k. Suwałk	16	2 MW	32	Gamesa G90	RWE Polska	2011
45.	Farma Wiatrowa Korsze	35	2 MW	70	Gamesa G90	EDP Renovaveis	2011
46.	Tychowo	35	1 MW	35	Nordex N90, Simens SWT	RP Global RWE	2011
47.	Lipniki	15	2 MW	30	REpower MM92	Tauron Ekoenergia	2011
48.	Farma Wiatrowa Łukaszów	17	2 MW	34	Vestas V90		2011
49.	Farma Wiatrowa Modlikowice	12	2 MW	24	Vestas V90		2011
50.	Taciewo	15	2 MW	30	Gamesa G90	RWE Polska	2012
51.	Pagów	17	3 MW	51	Vestas V112-3,0	GDF Suez	2012
52.	Elektrownia Wiatrowa Nowy Tomysl	2	2,5 MW	5	Fuhrlander FL-2500		2012
53.	Farma Wiatrowa Krobia	11	3 MW	33	AW 3000		2012
54.	Taczalin Farma Wiatrowa	22	2 MW	45,1	REpower MM92	WSB Neue Energien GmbH	2013
55.	Ilza	27	2 MW	54	Vestas V90		2014
	Razem	659	-	1340,14	-	-	-

Przy omawianiu aktualnego stanu energetyki wiatrowej w Polsce oraz przyszłych zamierzeniach, dotyczących budowy siłowni wiatrowych, nie sposób pominąć jedynej w Polsce Nowosądeckiej Fabryki Urządzeń Górniczych NOWOMAG S.A. w Nowym Sączu. Fabryka ta zajmuje się energetyką wiatrową. Opracowano tam i wykonano, przy współfinansowaniu przez Komitet Badań Naukowych, prototyp elektrowni wiatrowej o mocy 100 kW w dwóch wersjach pierwszej pracującej na sieć wydzieloną, i drugiej, współpracującej z siecią energetyki krajowej. W oparciu o doświadczenia zebrane z pracy elektrowni prototypowej, opracowano i wprowadzono ww. fabryce do seryjnej produkcji elektrownie wiatrowe typu EW 100-22-30 oraz EW 160-22-30 o mocy 100 i 160 kW

Są to elektrownie z trójłopatowym wirnikiem o średnicy 22 m i wysokości osi wirnika 30 m nad gruntem. Elektrownie te sterowane są komputerem z zastosowaniem trójpoziomowego systemu zabezpieczeń awaryjnych. Komputer sterujący pozwala na realizację zdalnego nadzorowania oraz pracę elektrowni w systemie farmowym [Ząber 1999].

Pierwsze elektrownie typu EW 160-22-30 NOWOMAG pracują już w miejscowościach Wrocki, województwo toruńskie i Zawoja w województwie bielskim. W produkcji są następne elektrownie tego typu, trwają przygotowania do ich instalacji w terenie. Współczesne elektrownie wiatrowe to złożone maszyny (budowle). Ich konstrukcja, zasada działania oraz poziom automatyzacji powoduje, że potencjalny inwestor porównując oferty różnych firm musi się liczyć z cenami zakupu i montażem elektrowni wiatrowej oraz jej eksploatacją.

Na polskim rynku brak jest odpowiedniej literatury omawiającej w przystępny sposób zagadnienia współczesnej energetyki wiatrowej. Dlatego często mamy do czynienia z błędnymi poglądami potencjalnych inwestorów [Ząber 1999]. Ten sam egzemplarz elektrowni wiatrowej usytuowany w różnych warunkach otoczenia da produkcję od 100%, do 30% swoich maksymalnych technicznych możliwości. Będzie to wynik uwarunkowań w pełni i rzetelnie przeanalizowanych lub decyzji pochopnej, nie opartej na prawidłowej analizie.

Gwarantowana roczna produkcja energii, wynikająca z pełnej analizy możliwych wariantów wyboru budowy elektrowni wiatrowej, stanowi ważny czynnik w zagranicznych kontraktach na ich budowę. Ponieważ elektrownie wiatrowe pracują z różną intensywnością przy poszczególnych prędkości wiatru, producenci dążą do uzyskania jak najwyższej sprawności dla tych prędkości wiatru, które najczęściej występują. W tym zakresie krzywe mocy w poszczególnych typach elek-

trowni bardzo się zbliżają do siebie, dając porównywalne charakterystyki.

9.6. Warunki wiatrowe Polski

Szacując energię wiatru należy określić takie parametry, jak prędkość wiatru (użyteczna jest zawarta w przedziale od 3,5 do 18 m/s) i wysokość masztu (wykorzystywana do 100 m). Nie bez znaczenia jest średni rozkład dobowy prędkości wiatru, gdyż produkcja energii elektrycznej w elektrowniach wiatrowych nie jest dyspozycyjna w stosunku do zapotrzebowań szczytowych. Dlatego też oszacowano, że udział elektrowni wiatrowych do produkcji energii elektrycznej w ogólnej sieci nie może przekraczać 10% [Fiszer 1998].

Rozkład przestrzenny czasu trwania prędkości wiatru z zakresu 4 – 16 m/s wykazuje, że na około 75% obszaru kraju wiatr energetycznie użyteczny wieje powyżej 40% czasu w ciągu roku.

Badania wykazały, że najczęściej, bo aż 75-90% ciągłego czasu ciszy, trwa od jednej do trzech godzin, zaś dłuższe występują sporadycznie. Procentowy udział ciszy w ciągu roku przedstawia się następująco, [Fiszer 1998].

- cisze 1 – godzinne 25 – 79%,
- cisze 2 – godzinne 14 – 22%;
- cisze 3 – godzinne 3 – 15%, w zależności od rejonu Polski.

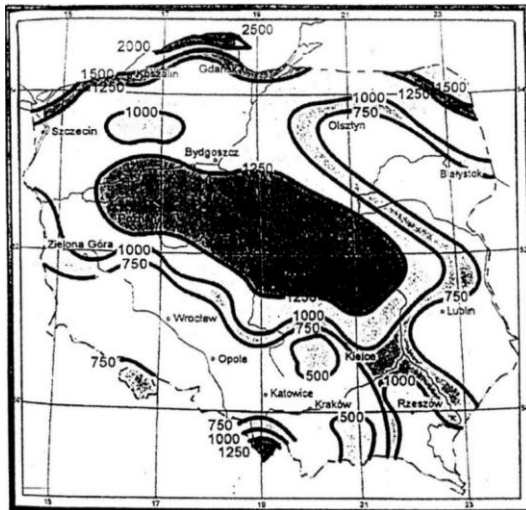
Podstawową wielkością, przybliżającą w dużym stopniu możliwość oceny warunków wiatrowych na danym obszarze, jest średnia roczna lub średnia sezonowa prędkość wiatru. Należy przyjąć, że użyteczna dla potrzeb energetycznych jest prędkość wiatru co najmniej 5 – 8 m/s.

W oparciu o 30-letnie obserwacje prędkości wiatru (1966-1995) z 60 stacji meteorologicznych opracowano mapę średnich rocznych prędkości wiatru na obszarze Polski. Ich zmienność przestrzenną przedstawiono na rys. 9.6.



Rys. 9.6 Średnie roczne prędkości wiatru w m/s na wys. 30 m n.p.g. dla terenu o klasie szorstkości wiatru „O” (bez szczytowych partii gór) [Lorenc H., Bartmański M. 1999].

Średnie roczne prędkości wiatru w m/s na wysokości 30 m n.p.gr. (nad poziom gruntu) dla terenu o klasie szorstkości „O” pokazano na rys. 9.7.



Rys. 9.7 Energia użyteczna wiatru (w Kw./ m²/rok) na wys. 30 m n.p.g. dla terenu o klasie szorstkości „O” [Lorenc H., Bartmański M. 1999].

Optymalną do usytuowania na maszcie wirników siłowni jest wysokość 30 m. Szorstkość terenu określono wg przyjętej skali zamieszczonej w tabeli 9.3.

Tabela 9.3 Klasy szorstkości terenu [Lorenc H., Bartmański M. 1999].

Klasa szorstkości	Opis terenu
0	Płaski teren otwarty, na którym średnia wysokość jakichkolwiek obiektów jest mniejsza niż 0,5 m.
1	Teren otwarty z nielicznymi, niskimi przeszkodami, może być nieznacznie pofałdowany. Mogą znajdować się luźne, niskie zabudowania lub pojedyncze drzewa o dużych odległościach od siebie.
2	Mogą znajdować się drzewa lub grupy drzew, lecz w znacznej od siebie odległości, oraz niska luźna zabudowa.
3	Teren z przeszkodami. Należą tu tereny zalesione, przedmieścia dużych miast, małe miasta i tereny podmiejskie, a także tereny przemysłowe luźno zabudowane.
4	Teren z licznymi przeszkodami położonymi blisko siebie, skupiska drzew lub budynków, lecz w odległości, co najmniej 300 m od miejsca obserwacji.
5	Teren z licznymi, dużymi przeszkodami położonymi blisko siebie, obszary leśne, śródmieścia dużych miast i obszary zurbanizowane.

Średnie prędkości wiatru na obszarze Polski w poszczególnych porach roku na wysokości 30 m n.p.gr. kształtują się następująco [Lorenc, Bartmański 1999]:

- wiosna (III - V) 2,0 - 6,2 m/s,
- lato (VI - VIII) 2,3 - 5,6 m/s,
- jesień (IX - XI) 2,0 - 7,1 m/s,
- zima (XII - II) 2,2 - 7,2 m/s.

Jak widzimy na rys. 9.6 prędkości wiatru wykazują zróżnicowanie przestrzenne na obszarze Polski. Wyróżnia się np. wyciszone pod względem prędkości wiatru duże kotliny śródgórskie, takie jak: Jeleniogórska, Nowosądecka, Tarnowska, Kotlina Raciborska.

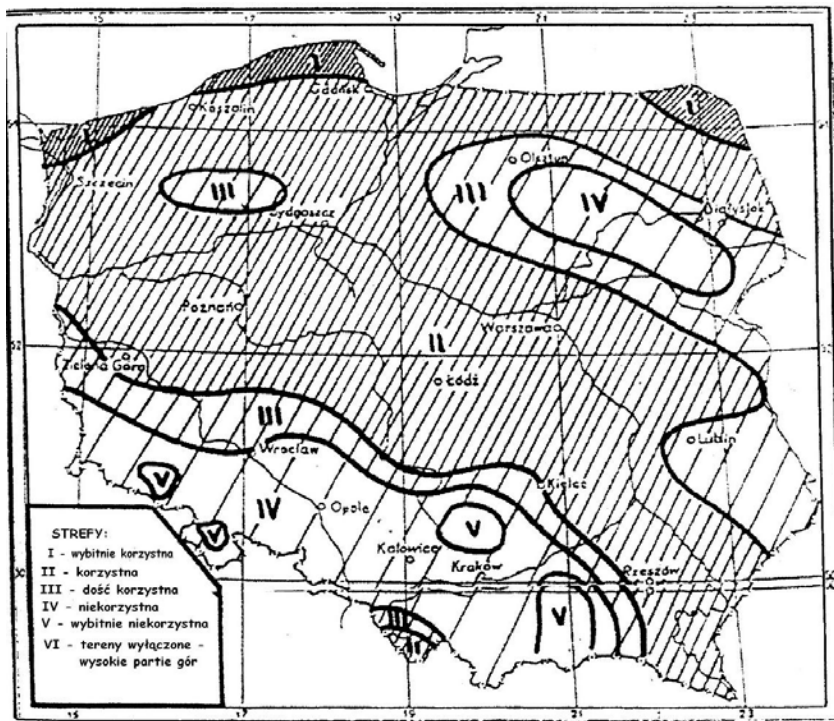
Regionami kraju o wzmożonych prędkościach wiatru są:

- Pobrzeże Słowiańskie i Kaszubskie,

- Beskid Śląski i Żywiecki,
- dolina Sanu od granic państwa po Sandomierz.

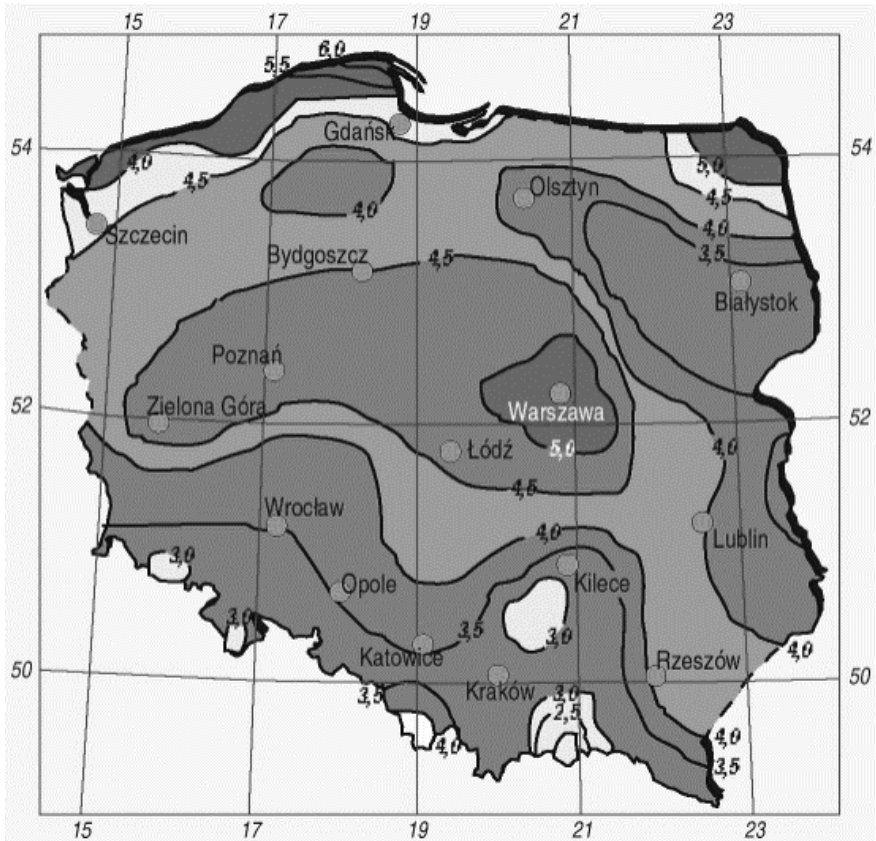
W tych rejonach, średnie roczne prędkości wiatru przekraczają 4 m/s, a w rejonie wybrzeża nawet 6 m/s. Najmniejszymi prędkościami wiatru charakteryzuje się w zasadzie cała wyżynna część Polski. O ile w wyższych partiach wyżyn (tj. powyżej 300 m) prędkość wiatru się wzmacnia, o tyle wszelkie obniżenia między wysoczyznami, głównie w kierunku N – S, są obszarami wyciszonymi.

Na mapie (rys. 9.8) nie uwzględniono szczytowych partii gór, gdzie lokalizacja siłowni byłaby wielkim ryzykiem (w naszych warunkach klimatycznych), ze względu na przeciążenie śmigieł i konstrukcji siłowni śniegiem, szadzią lub gołoledzią (łamiących je), a także zamrażaniem części siłowni.



Rys. 9.8 Mezoskalowa rejonizacja Polski pod względem zasobów energii [Lorenc H., Bartnański M. 1999].

W rejonie obu masywów górskich tj. Sudetów i Karpat, oprócz przyrostu wiatru z wysokością występującą także często, szczególnie w zimie wiatry lokalne typu fen i halny o bardzo dużych prędkościach (powyżej 35 m/s). Wiatry takie są chaotyczne w przepływie, z krótkotrwałymi przyrostami prędkości w porywach, co nie sprzyjałoby pracy siłowni i niszczyłoby jej konstrukcję. Wielkość użytecznej energii wiatru w kWh/m²/rok [powierzchni wyznaczonej przez obracający się wirnik] na wysokości 30 m n.p.gr. na obszarze Polski w klasie szorstkości „0” (bez szczytowych partii gór) przedstawia rysunek 9.8. Mezoskalową rejonizację Polski pod względem zasobów wiatru przedstawia rysunek 9.9.



Rys. 9.9 Mezoskalowa rejonizacja Polski pod względem zasobów energii wiatru (Lorenc H. 1999)

Analizując prezentowane mapy (rys. 9.7 i 9.8.) można zauważyć „uprzywilejowane” pod względem zasobów energii wiatru następujące rejonu kraju:

- środkowa, najbardziej wysunięta na północ części wybrzeża od Koszalina po Hel oraz wyspa Wolin wraz z terenami przyległymi do Zalewu Szczecińskiego,
- Suwalszczyzna,
- środkowa Wielkopolska i Mazowsze: Beskid Śląski i Żywiecki,
- Bieszczady i Pogórze Synowskie,
- dolina Sanu od granicy państwa po Sandomierz.

W wymienionych rejonach kraju, zasoby energii wiatru w skali roku wynoszą, co najmniej 100 kWh z 1m² powierzchni wirnika siłowni. Analiza kierunków wiatru wykazuje, że na obszarze Polski przeważającym kierunkiem wiatru jest wiatr zachodni. Rozkład przestrzenny wiatru z kierunków południowych jest o tyle charakterystyczny, że największy jego udział, bo ponad 30%, występuje w całej północnej części Polski, głównie w rejonie wybrzeża. Następne rejonu występowania tego wiatru to: północno wschodnie, zachodnie i południowo zachodnie tereny Polski. Ogólnie, kierunek południowy zaznacza się w skali kraju, jako drugi pod względem częstości występowania wszystkich kierunków, ze zdecydowanym maksimum w rejonie Wybrzeża. Układ przeważających kierunków wiatru z południa na obszarze wybrzeża jest istotny w swoich skutkach, ponieważ w rejonach tych można mówić o tzw. „powrotnym” kierunku wiatru, powstałym w wyniku, „odbijania” się strug powietrza od wzniesień morenowych Pojezierza Zachodniego oraz Wzniesień Elbląskich. Tego rodzaju prawidłowości należy brać pod uwagę przy podejmowaniu decyzji o lokalizacji siłowni wiatrowych.

Najrzadziej występuje w Polsce wiatr z kierunku północnego od 10 do 20%, a najbardziej uprzywilejowanymi pod względem tego kierunku są rejonu północno-wschodniej części kraju, okolice Gorzowa Wielkopolskiego i południowa część Niziny Śląskiej (Racibórz, Opole).

Udział wiatrów z kierunku wschodniego jest podobny, natomiast najczęściej pojawia się on w centralnych i środkowo-zachodnich dzielnicach kraju oraz w środkowej części wybrzeża. Wiatr z kierunku zachodniego stanowi od 20 do 40% ogólnej liczby kierunków. Jego dwa maksima częstości występowania przypadają na obszar północnej części Niziny Śląskiej oraz na obszar południowo wschodniej Polski. Na pozostałym

obszarze kraju udział wiatrów z kierunku zachodniego kształtuje się od 25 do 35%.

Taki rozkład kierunku wiatru ściśle zależy od ogólnej cyrkulacji atmosfery nad Polską oraz oddziaływań regionalnych (w mniejszym lub większym stopniu warunków fizyczno-geograficznych). Panująca w niektórych kręgach decydenckich opinia, że w naszym kraju nie może być mowy o wykorzystaniu wiatru, jako źródła energii, jest błędna i niczym nie uzasadniona. W Polsce istnieją obszary, gdzie energia wiatru może być wykorzystywana i dla energetyki użyteczna. Obszary te szacuje się na około 40% powierzchni kraju, przy założeniu kryterium opłacalności 1000 kWh/m²/rocznie na wysokości 30 metrów nad powierzchnią gruntu, w terenie o klasie szorstkości „0” [Bartmański 1999]. Energie wiatru należy uwzględnić w planach strategicznych naszego kraju, jako energię czystą, nie zanieczyszczającą środowiska [Lorenc, Bartmański 1999].

9.7. Ekologiczne uwarunkowania budowy elektrowni wiatrowych

W Polsce, pomimo z jednej strony bardzo wysokiego poziomu emisji zanieczyszczeń do atmosfery, z drugiej zaś wysoce niekorzystnej struktury wytwarzania energii elektrycznej, do lat osiemdziesiątych nie przywiązywano wagi do wykorzystania odnawialnych źródeł energii. Energetyka oparta była na paliwach kopalnych. Mylne oszacowanie zasobów energetycznych wiatru na terenie Polski, wynikające bardziej z niechęci decydentów do energetyki, innej niż konwencjonalna (pomimo licznych opracowań naukowych prof. Haliny Lorenc z Państwowego Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Warszawie, wykonywującego pomiary wiatru od wielu dziesiątków lat). Oszacowanie możliwego udziału aeroenergetyki w bilansie elektroenergetycznym Polski do roku 2030 pokazano w tabeli 9.4, a redukcję emisji zanieczyszczeń do atmosfery ilustruje tabela 9.5.

Tabela 9.4 Oszacowanie możliwego udziału aeroenergetyki w bilansie energetycznym Polski do 2030 [Machnikowski L. 1999].

	2005	2010	2020	2030
Moc zainstalowana w [MW] - prognoza	450	1100	3000	5000
Moc całkowita zainstalowana w kraju [MW] - prognoza	37750	42570	52800	60000
Udział mocy zainstalowanej w siłowniach wiatrowych w całkowitym bilansie krajowym mocy zainstalowanej w [%]	1,2	2,6	5,7	8,3

Tabela 9.5 Regulacja emisji zanieczyszczeń do atmosfery w wyniku rozwoju energetyki [Machnikowski L. 1999].

Redukcja emisji zanieczyszczeń do atmosfery w [t]	SO ₂	NO _x	CO ₂	Pyły i żużle
2000	361	271	45000	3185
2005	5499	4180	693000	48510
2010	13388	10175	1687000	118090
2020	36496	27739	4599000	321930
2030	60827	46231	7665000	536550

Zużycie energii elektrycznej i ciepłej jest zmienne w ciągu dnia, tygodnia (dni robocze, dni świąteczne), miesiąca, roku (sezonowość, okresy urlopowe). Szczególnie w krótkich okresach dzień, tydzień trudno jest zmieniać w szerokim zakresie podaż energii elektrycznej, a musimy być gotowi na zaspokojenie potrzeb szczytowych, godząc się na straty i zanieczyszczenie środowiska w godzinach poza szczytowych, kiedy produkujemy nikomu nie potrzebną energię elektryczną emitując przy tej okazji znaczne ilości, CO₂, SO₂, NO_x i innych odpadów [Sułkowski 1999]. Obecnie zgodnie z prawem energetycznym (Dz. U. 2000 Nr 85 poz. 957), przedsiębiorstwo energetyczne, na którego obszarze działania, zlokalizowana jest elektrownia wiatrowa ma obowiązek przyłączenia jej do sieci elektroenergetycznej. W Polsce około 75% energii uzyskujemy ze spalania węgla, który powoduje największe zanieczyszczenie środowiska (w porównaniu z innymi paliwami kopalnymi). Kraje wyżej rozwinięte,

produkują tylko około 10% energii z węgla. Z tego też powodu w Polsce zapylenie wynosi 6,2 t/km² rocznie, a produkcja tlenku siarki, sięga rocznie ponad 10 t / km².

9.8. Ekonomiczne aspekty wykorzystania energii wiatru

Użytkownicy kilkudziesięciu zbudowanych i działających w Polsce elektrowni wiatrowych, powołali Polskie Towarzystwo Energetyki Wiatrowej. Skupia ono właścicieli i budowniczych kilku pierwszych (w tym prywatnych) elektrowni wiatrowych, podłączonych do krajowej sieci energetycznej, sprzedających tę energię terenowym zakładom energetycznym. Członkami stowarzyszenia są także konstruktorzy elektrowni wiatrowych, naukowcy, producenci. Celem stowarzyszenia jest wymiana doświadczeń i obrona interesów właścicieli i twórców. Niebagatelne znaczenie ma również przenoszenie na grunt Polski ustaleń i dyrektyw międzynarodowych organizacji działających w dziedzinie energetyki wiatrowej.

W Polsce, w pierwszej fazie rozwoju tej energetyki, wykorzystane zostaną zapewne najlepsze tereny z punktu widzenia zasobów energetycznych wiatru, tj. klasa I wg. klasyfikacji prof. Haliny Lorenc, obejmująca Pomorze oraz północno-wschodnią część Suwalszczyzny. W północnym pasie Pomorza, zwłaszcza w strefie przybrzeżnej oraz północno-wschodniej części Suwalszczyzny, podstawowe parametry wiatru, czyli średnia roczna prędkość wiatru i jej rozkład, niczym nie ustępują najlepszym lokalizacjom niemieckim, gdzie średnia roczna prędkość wiatru na poziomie 50 metrów ponad poziom terenu osiąga wartość 7 m/s (północna część województw: zachodnio-pomorskiego, pomorskiego i warmińsko-mazurskiego). To naturalne bogactwo północnej Polski może być eksploatowane już bardzo szybko. Jedynym warunkiem jest właściwa regulacja prawna, występująca już niemal we wszystkich państwach Europy Zachodniej. Obecnie powstają projekty pilotażowe, dotyczące wykorzystania ekologicznie czystej energii, produkowanej przez siłownie wiatrowe dla potrzeb samorządów lokalnych, służące obniżeniu nakładów ponoszonych przez gminy województwa zachodniopomorskiego przy współpracy z sejmikiem województwa. Dochody czerpane ze sprzedaży energii elektrycznej, wytworzonej przez elektrownie wiatrowe, będą zasilają budżet gminy. W ten sposób pomniejszone będą wydatki ponoszone przez gminę na energię elektryczną oraz na zapotrze-

bowanie w energię podmiotów zarządzanych przez gminę: placówek służby zdrowia, szkół, zakładów budżetowych. Elektrownia wiatrowa może być potraktowana, jako uzupełnienie zadania inwestycyjnego gminnej oczyszczalni ścieków i w ogólnym rozrachunku przyczynić się do obniżenia kosztów eksploatacji oczyszczalni. Elektrownia wiatrowa jest źródłem czystej energii, bez powstawania szkodliwych produktów ubocznych i kłopotliwych odpadów. Wzrost udziału energii uzyskiwanej ze źródeł odnawialnych w bilansie energetycznym gminy poprawia stan środowiska naturalnego i jakość życia mieszkańców. Budowa systemu turbin wiatrowych, to także nowe miejsca pracy dla mieszkańców gminy. Proces projektowania prac przygotowawczych budowy, a następnie dozoru nad prawidłową pracą siłowni, może być szansą dla lokalnych przedsiębiorstw na poszerzenie zakresu swojej działalności, na kontakt z nowoczesną technologią. Również władze gminy mogą wyróżnić aspekt nowoczesnych technologii i przedstawiać region, jako wykorzystujący najnowsze osiągnięcia techniczno-organizacyjne dla dobra mieszkańców gminy. Należy dodatkowo podkreślić możliwość marketingowego wykorzystania elektrowni wiatrowych przy budowaniu wizerunku gminy „przyjaznej środowisku”, co ma szczególne znaczenie dla gmin czerpiących swoje dochody z turystyki.

9.9. Uwarunkowania prawne

Doświadczenia ostatnich lat wykazały, że rynek odnawialnych źródeł energii może być szybko rozszerzony. Konieczne jednak jest, stworzenie w tym celu odpowiednich ram prawnych. Kluczowymi składnikami tworzenia rynku odnawialnych źródeł energii są dostęp do sieci energetycznej z optymalną ceną, początkową pomocą finansową w postaci subsydiów i zachęt podatkowych oraz dostępnością kapitału.

W Polsce aktualnie uchwalona została Ustawa o odnawialnych źródłach energii z dnia 25.02.2015 r. z mocą obowiązywania od 1.01.2016 r. W myśl tej Ustawy indywidualny wytwórca energii ze źródeł odnawialnych będzie mógł jej nadwyżki sprzedawać do sieci energetycznej po uprzednim zgłoszeniu do Urzędu Regulacji Energetyki. Ceny energii będą zależne od ilości dostarczonej mocy.

W przypadku elektrowni wiatrowej, lub farmy wiatrowej o mocy powyżej 1 MW wytwórca musi wystąpić do Departamentu Taryf w URE z wnioskiem o zatwierdzenie proponowane przez niego ceny energii, po której zakład energetyczny będzie ją kupował, wraz z uzasadnieniem

i wyliczeniem tej ceny. Wytwórca będzie mógł wystawić swoją energię na giełdzie towarowej i sprzedawać po wynegocjowanych cenach.

Nie istnieją szczegółowe rozwiązania normatywne dotyczące budowy stacjonarnych urządzeń energetycznych, wykorzystujących energię wiatru. Należy więc stosować powszechnie obowiązujące przepisy prawne czyli prawo budowlane (opublikowane w Dz. U. nr 89/1994 poz. 414), a w nim następujące artykuły dotyczące tej tematyki:

- art. 3 pkt 3 obiekty służące do wytwarzania ww. energii są tzw. budowlami. Oznacza to, że ich wykonanie, eksploatacja oraz rozbiorka wymagają spełnienia wszystkich wymagań dotyczących procesu inwestycyjnego.
- art. 34 ust. 3 do wniosku o pozwolenie na budowę obiektów, które zawierają nowe, nie sprawdzone w krajowej praktyce rozwiązania praktyczne nie znajdujące podstaw w przepisach i Polskich Normach, należy dołączyć specjalistyczną opinię wydaną przez osobę fizyczną lub jednostkę organizacyjną wskazaną przez właściwego ministra.
- art. 59 ust. 1 organ nadzoru budowlanego w pozwoleniu na budowę może nałożyć obowiązek uzyskania przez inwestora tzw. pozwolenia na użytkowanie (obiektu budowlanego). Przesłanką do jego uzyskania jest zgodność wykonania obiektu zgodnie z warunkami zabudowy i zagospodarowania terenu.
- art. 56 ust. 1 poz. 1 inwestor powinien zawiadomić o zakończeniu budowy i zamiarze przystąpienia do jego użytkowania m.in. właściwy organ Państwowej Inspekcji Ochrony Środowiska.

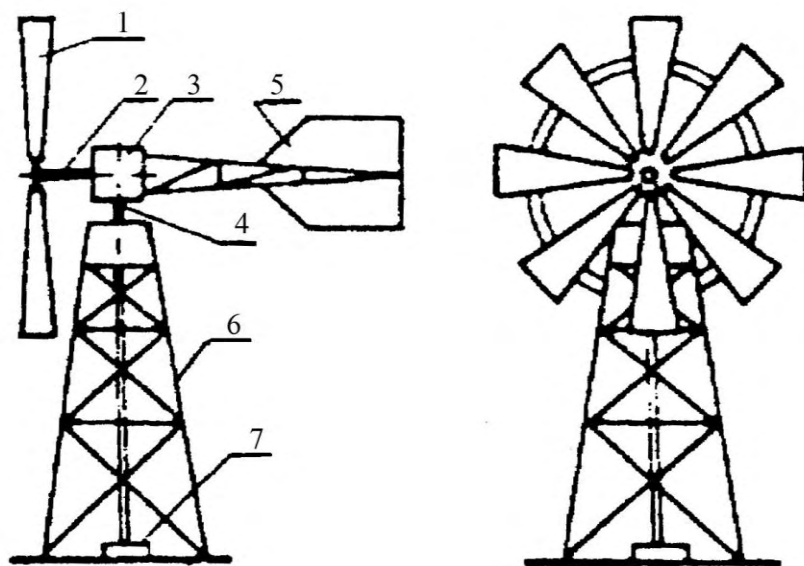
Literatura:

- [1]. Bartmanski M. 1998. *Możliwości rozwoju energetyki wiatrowej w Polsce*. Materiały międzynarodowego sympozjum pt. „Odnawialne źródła energii w strategii rozwoju zrównoważonego”. EC BREC, IBMER, Warszawa.
- [2]. Chmielewski J. 1999. *Pomyślnie wiatry. Materiały konferencyjne. Ogólnopolskie Forum Odnawialnych Źródeł Energii*, Gdańsk.
- [3]. Dziekańska B. 1998. *Problemy przestrzenne wykorzystywania energii odnawialnej* Ogólnopolskie Forum Wykorzystania Odnawialnych Źródeł Energii. Warszawa.

-
- [4]. Dudek R. 1999. *S.A Bank Ochrony Środowiska*. Lublin.
- [5]. Fiszer T. 1998. *Wiatr, jako źródło energii*. Ogólnopolskie Forum „Odnawialne Źródła Energii”, Gdańsk.
- [6]. Figiel P. 1994. *Techniczne aspekty lokalizacji siłowni wiatrowych*. Materiały z seminarium „Wykorzystanie energii wiatrowej w rolnictwie”, IBMER, Warszawa.
- [7]. Figiel P. 1995. *Jak wykorzystać wiatr*. Murator, nr 6,7, Warszawa.
- [8]. Figiel P. 1996. *Lokalizacja siłowni wiatrowych – poradnik*. IBMER, Warszawa.
- [9]. Internet. 2000. *Projekt Elektrownie wiatrowe na potrzeby gmin*.
- [10]. Jagodziński W. 1979 *Silniki wiatrowe* PWN. Warszawa.
- [11]. Konieczny S. 1997. *Sztuka inwestowania w aeroelektrownie*. Materiały z konferencji „Możliwości rozwoju energetyki wiatrowej w Polsce”, Gdańsk.
- [12]. Lorenc H., Bartmański M. 1999. *Stan i perspektywy rozwoju energetyki wiatrowej w Polsce*, Fundacja Ecobaltic, Gdańsk.
- [13]. Machnikowski L. 1998. *Koncepcja – budowa – zastosowanie*. Małe elektrownie wiatrowe. Energia, nr 7.
- [14]. Majka K. 1993. *Aspekty techniczno – ekonomiczne wykorzystania energii wiatru w rolnictwie*. Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej nr 3.
- [15]. Mikielwicz J. 1999. *Potencjał, technologie, prognozy energetyki odnawialnej w Polsce*. Komisja Ochrony Środowiska, Warszawa.
- [16]. Romaniszyn W. 1998. *Energia siły wiatru*. Ogólnopolskie Forum Odnawialnych Źródeł Energii, Gdańsk.
- [17]. Skrzypczyk J. 1998. *Wiatrak na osi pionowej*. AURA, nr 6.
- [18]. Sułkowski W. 1999. *Recykling tworzyw polimerowych jako możliwe źródło zaspokojenia potrzeb energetycznych*. Ogólnopolskie Forum Odnawialnych Źródeł Energii, Warszawa.

10. ELEKTROWNIE I SIŁOWNIE WIATROWE

Silniki wiatrowe, to urządzenia, które wykorzystują energię kinetyczną poziomych ruchów powietrza i zamieniają je bezpośrednio na energię mechaniczną. Schemat silnika wiatrowego (wiatrak klasyczny) przedstawia rys. 10.1.

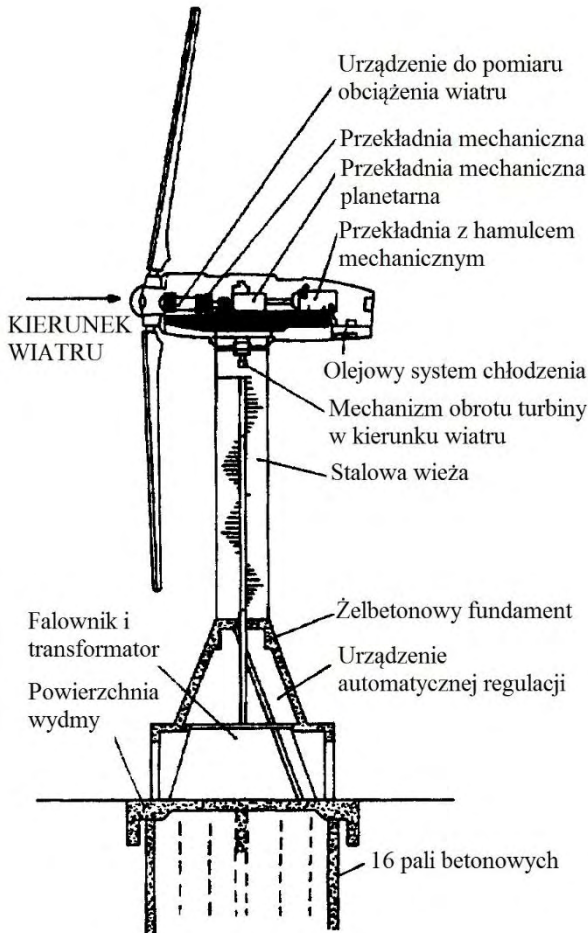


Rys. 10.1 Silnik wiatrowy: 1 - koło wiatraka, 2 - wał główny, 3 - przekładnia stożkowa, 4 - wał pionowy przekazania napędu, 5 - ster kierunkowy, 6 - wieża, 7 - zespół przekładnia 9 - generator prądu elektrycznego [Praca zbiorowa 1999].

Koło wiatraka składa się z dwu lub większej liczby łopatek umieszczonych na poziomym, a czasem lekko pochylonym wale. Z niego napęd przenoszony jest do przekładni stożkowej i dalej na wał pionowy, który

napędza maszynę roboczą (np. pompę). Koło wiatraka utrzymywane jest w osi wiatru za pomocą steru wiatrowego.

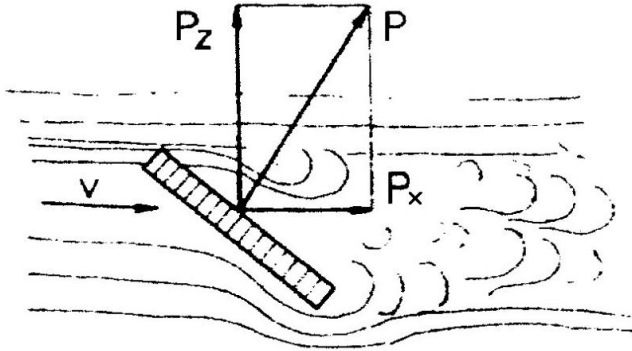
Nowoczesny silnik wiatrowy nieco różni się od klasycznego i jest obecnie budowany w ten sposób, że wszystkie mechanizmy wraz z generatorem prądu, stanowią zwarty zespół umieszczony w tzw. głowicy. Głowica umieszczona jest na wieży i bezpośrednio sprzężona z 2 lub 4 łopatomym wirnikiem (rys. 10.2).



Rys. 10.2 Budowa nowoczesnej siłowni wiatrowej konstrukcji holenderskiej [Szumanowska M., Szumanowski A. 1997].

10.1. Zasada działania silników wiatrowych

Zasada działania silników wiatrowych opiera się na wykorzystaniu sił oddziaływania wiatru na łopatki koła wiatraka. W wyniku tego działania powstają na łopatkach siły aerodynamiczne powodujące obrót koła i na wale tworzy się moment obrotowy przekazywany przez przekładnię na wał pionowy siłowni. Powstawanie i działanie siły aerodynamicznej ilustruje rys. 10.3.



Rys. 10.3 Schemat powstawania siły nośnej na nieruchomej łopatkce koła wirnika. [Jagodziński W. 1979].

Na łopatkę umieszczoną w strumieniu powietrza i pochyloną pod pewnym kątem α do jego kierunku napływający wiatr wywiera działanie, wyrażające się zwiększeniem ciśnienia powietrza na dolną powierzchnię łopatki oraz zmniejszonym ciśnieniem na powierzchnię górną. Różnica ciśnień jest przyczyną powstania sił skierowanych ku górze. Ich wypadkową jest siła P , którą można rozłożyć na dwie składowe: wiatrową skierowaną do kierunku napływającej strugi powietrza zwaną siłą nośną P_z oraz składową równoległą do kierunku napływającej strugi powietrza zwaną siłą oporu P_x . Siła oporu, przenoszona jest przez konstrukcję siłowni wiatrowej. Siły P_z i P_x , tworzone przez ciśnienie dynamiczne wiatru na powierzchnię płata, oblicza się z następujących wzorów:

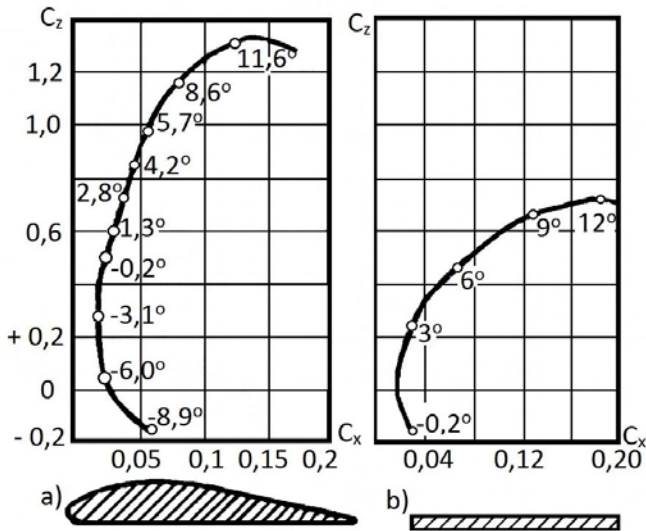
$$\text{- siła oporu} \quad P_x = C_x \frac{A \gamma_p v^2}{2}, \text{ N} \quad (10.1)$$

$$\text{- siła nośna} \quad P_z = C_z \frac{A \gamma_p v^2}{2}, \text{ N} \quad (10.2)$$

gdzie:

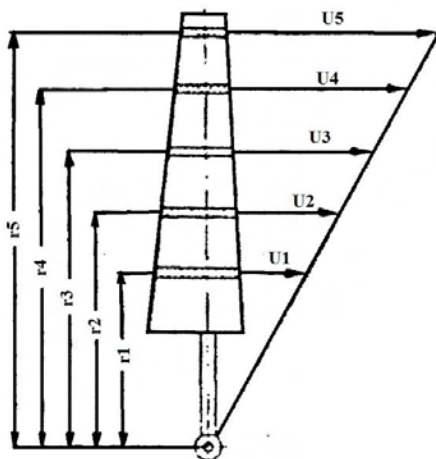
C_x i C_z – współczynnik siły oporu i siły nośnej,
 γ_p – gęstość powietrza, kg/m^3 ,
 A – powierzchnia, m^2 ,
 v – prędkość przepływu powietrza, m/s .

Siły te zależą od kwadratu prędkości powietrza pola powierzchni płata oraz wartości współczynnika C_x , C_z . Na wielkość sił wiatrowych ma także wpływ kształt łopatki oraz kąt natarcia α . Na rys. 10.4. przedstawiono krzywe biegunowe łopatek, umożliwiające dobór najczęściej spotykanych łopatek (opływowej, płytkowej) i dobór kąta α .



Rys. 10.4 Krzywe biegunowe dla łopatki: a - opływowej, b - płytkowej (dla prędkości $u > 3$ m/s) [Jagodziński W. 1979].

Liczby podane obok punktów wiatrowych określają kąt natarcia α . Porównując wykresy charakteryzujące oba profile łopatek przy tej samej prędkości wiatru i powierzchni płytki, siła unoszenia P_z płytki opływowej jest znacznie większa niż dla płytki płaskiej. O jakości profilu świadczy wielkość ilorazu współczynników C_z/C_x . Im jest on większy, tym profil jest doskonalszy i uzyskuje się lepsze efekty praktyczne. W rzeczywistości, wyznaczenie siły nośnej i siły oporu na koła wiatraka jest bardziej skomplikowane, bowiem w czasie obrotu koła na łopatkę działa również siła obwodowa (unoszenia) v co powoduje, że wektory sił zmieniają zarówno swój kierunek jak i wielkość. Rozkład prędkości unoszenia v na łopaty wirnika (śmigła) obrazuje rys. 10.5.



Rys. 10.5 Rozkład wektorów prędkości unoszenia na łopacie wirnika.

Prędkość unoszenia na końcu łopat wirnika wyznacza równanie:

$$v = \frac{\pi r n}{30}, \text{ m/s} \quad (10.3)$$

w którym:

r - odległość przekroju łopatki od środka wirnika, m,

n - liczba obrotów wirnika 1/min.

10.2. Wydajność energetyczna elektrowni wiatrowych

Powietrze o masie m poruszające się z prędkością v posiada energię kinetyczną określoną wzorem (10.4):

$$E_k = \frac{mv^2}{2}, \text{ J} \quad (10.4)$$

Energia ta może zostać oddana urządzeniu przekształcającemu ją w inną formę energii, np. elektrowni wiatrowej. Jeżeli strumień masy wiatru o gęstości ρ przepływa z prędkością v_1 przez powierzchnię prostopadłą A jego teoretyczna moc wynosi:

$$P_t = \frac{A\rho v_1^3}{2}, \text{ W} \quad (10.5)$$

Z powyższego równania wynika, że teoretyczna moc strumienia wiatru zależy w sposób liniowy od gęstości powietrza oraz powierzchni. Natomiast decydujący wpływ na wartość mocy ma prędkość strumienia wiatru, która występuje we wzorze w trzeciej potęgze. Ma to duże znaczenie praktyczne, co ilustruje tabela 10.1.

Tabela 10.1 Względna teoretyczna zmiana oraz stosunek mocy oddanej przy różnych prędkościach wiatru do $v = 5 \text{ m/s}$ [Fugiel P. 1996].

Prędkość wiatru [m/s]	Względna zmiana mocy w odniesieniu do mocy przy $v = 5 \text{ m/s}$ [%]	Stosunek mocy w odniesieniu do mocy przy $v = 5 \text{ m/s}$
1	-99	0,008
2	-94	0,064
3	-78	0,216
4	-48	0,512
5	0	1,000
6	+72	1,728
7	+174	2,744
8	+309	4,096
9	+483	5,832
10	+700	8,000

Małe zmiany prędkości wiatru pociągają za sobą duże różnice w oddawanej przez elektrownię mocy, a co za tym idzie i zmiany jej wydajności energetycznej. W przypadku, gdy prędkość strumienia powietrza v zmienia się w czasie, możemy określić średnią teoretyczną moc strumienia ze wzoru:

$$P_{t\ \acute{s}r} = \frac{\mathcal{W}_1^3}{2}, \text{ W} \quad (10.6)$$

gdzie:

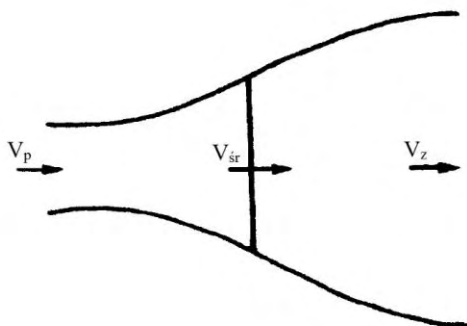
v_1 – prędkość przepływu powietrza, m/s.

$$v_1 = \int v_1^3 P(v) \cdot dv, \text{ m/s} \quad (10.7)$$

Względną teoretyczną zmianę oraz stosunek mocy oddawanej przy różnych prędkościach wiatru do $v_1 = 5 \text{ m/s}$ ilustruje tab.10.1.

10.3. Maksymalna teoretyczna sprawność wirnika

Teoretyczna ilość energii, jaką niesie ze sobą strumień wiatru, nie może być w całości przekazana elektrowni. Gdyby tak było, to prędkość wiatru za wirnikiem musiałaby wynosić zero, co fizycznie jest niemożliwe. Istnieje zatem pewna ograniczona wartość energii jaką można uzyskać z wiatru.



Rys. 10.6 Prędkość przed i za tarczą [Jagodziński W. 1979].

Rozważmy tarczę reprezentującą wirnik elektrowni wiatrowej. Prędkość wiatru przed tarczą wynosi v_1 , przy przejściu przez tarczę wynosi v_2 , a za tarczą v_3 (rys. 10.6). Jeżeli przez m oznaczymy masę powietrza przepływającą przez tarczę w jednostce czasu, to zmianę energii kinetycznej możemy zapisać jako:

$$\frac{m(v_1^2 - v_3^2)}{2} = m (v_1 - v_3) \quad (10.8)$$

Z równania powyższego otrzymujemy średnią prędkość:

$$v_{sr} = \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (10.9)$$

przekazywana wirnikowi wynosi:

$$P_t = \gamma \cdot \frac{A \cdot v^3}{4} \cdot (1 + \alpha) \cdot (1 - \alpha^2), W \quad (10.10)$$

gdzie:

- γ - gęstość powietrza, kg/m^3 ,
- A - powierzchnia tarczy, m^2 ,
- α - kąt pochylenia łopatki, stopnie.

Maksimum P_e odpowiada wartości $\alpha = 1/3$ i wynosi:

$$P_e = \gamma A v_1^3 \cdot \frac{8}{21} = 0,593 \cdot P_t, W \quad (10.11)$$

Z powyższego równania wynika, że idealny wirnik elektrowni nie może mieć większej sprawności niż ok. 60%. W praktyce będzie ona niższa ze względu na straty aerodynamiczne i tarcie. Sprawność określa się mianem współczynnika mocy (lub współczynnika wykorzystania energii wiatru) C_p . Ogólny wzór na moc przekazywaną wirnikowi ma postać:

$$P_e = 1/8 \cdot \gamma \cdot A \cdot v_\infty^3 \cdot C_p, W \quad (10.12)$$

Współczynnik mocy C_p zmienia się w zależności od chwilowej szybkości wirnika. Szybkobieżność jest to stosunek liniowej prędkości końcówki skrzydła do prędkości strugi nie zakłóconej:

$$Z = \frac{\omega R}{v_1}, \text{ rad} \quad (10.13)$$

gdzie:

ω – prędkość kątowna wirnika, rad/s,

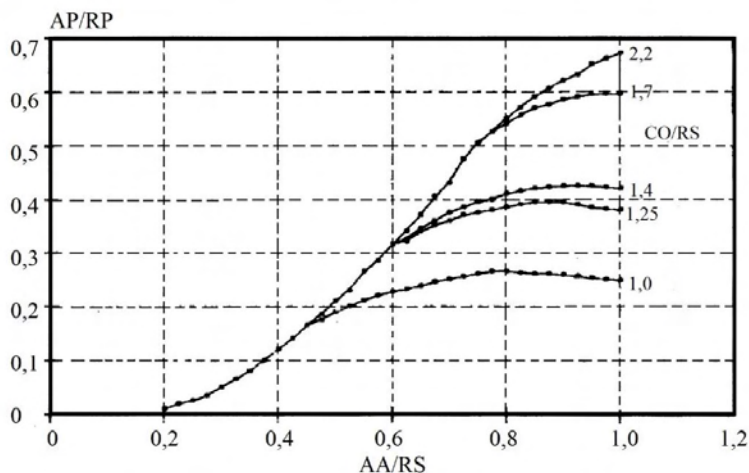
R – długość skrzydła wirnika, m,

v_p – prędkość wiatru przed wirnikiem m/s.

Ponieważ chwilowa szybkobieżność wirnika zależy od prędkości kątowej oraz prędkości wiatru przed wirnikiem, dlatego większość wirników pracuje przy zmiennym współczynniku C_p . Możliwe jest utrzymanie stałej maksymalnej wartości współczynnika C_p podczas pracy elektrowni, poprzez zmianę prędkości kątowej wirnika podczas zmian prędkości wiatru tak, aby ich stosunek pozostał stały [Fugiel 1996].

10.4. Mapy wiatrowe

Szybkim sposobem oceny energetycznej wydajności elektrowni wiatrowych jest wykorzystanie przygotowanych przez IMGW map wiatrowych Polski rys. 10.7.



Rys.10.7 Nomogram dla wyznaczenia wydajności elektrowni wiatrowych [Miszczak M., Waszkiewicz Cz. 1998].

Dla obliczenia rocznej produkcji energii E_n należy znać powierzchnię określoną skrzydłami wirnika A oraz ogólną sprawność elektrowni η :

$$E_n = K_e A \eta, \text{ kWh/rok} \quad (10.14)$$

gdzie:

K_e – potencjał energetyczny znajdujemy z mapy (rys.3.4) kWh/m²rok,

A – powierzchnia określona skrzydłami wirnika: $A = \frac{\pi D^2}{4}$, m²,

D – średnica wirnika, m,

η – sprawność całkowita elektrowni ($\eta = 0,2$ dla starszych typów oraz $\eta = 0,25$ dla nowoczesnych elektrowni).

10.4.1. Nomogramy

Podane niżej nomogramy zostały opracowane na podstawie obliczeń teoretycznych. Założono, że wykres zewnętrzny mocy oddawanej przez elektrownie składa się z krzywej nieliniowej w przedziale od prędkości rozruchowej do znamionowej, a dalej do prędkości maksymalnej na poziomie mocy znamionowej jest stały. Rozkład prawdopodobieństwa występowania poszczególnych prędkości wiatru jest opisany przy pomocy rozkładu Rayleigh'a szczególnego przypadku rozkładu Waibulla dla $k = 2$.

Metoda ta wymaga posiadania podstawowych informacji dotyczących elektrowni i miejsca lokalizacji, a mianowicie

RS – znamionowej prędkości wiatru, przy której elektrownia osiąga moc znamionową, m/s,

RP – mocy znamionowej elektrowni, kW,

RS_{\max} – maksymalna (wyłączeniowa) prędkość wiatru, m/s,

AA – średniorocznej prędkość wiatru w miejscu lokalizacji na wysokości wirnika, m/s.

W celu skorzystania z wykresu (rys. 10.7) należy wyznaczyć następujące ilorazy:

CO/RS i AA/RS

następnie znaleźć na wykresie odpowiadający im iloraz:

$$AP/RP$$

gdzie: AP – średnia moc elektrowni w roku, kW.

Wydajność energetyczna opisana jest poniższym wzorem:

$$EP = 8760 AP, \text{ kWh/rok} \quad (10.15)$$

10.5. Rodzaje silników wiatrowych

Silniki wiatrowe, w zależności od położenia osi obrotu ich elementu roboczego można podzielić na

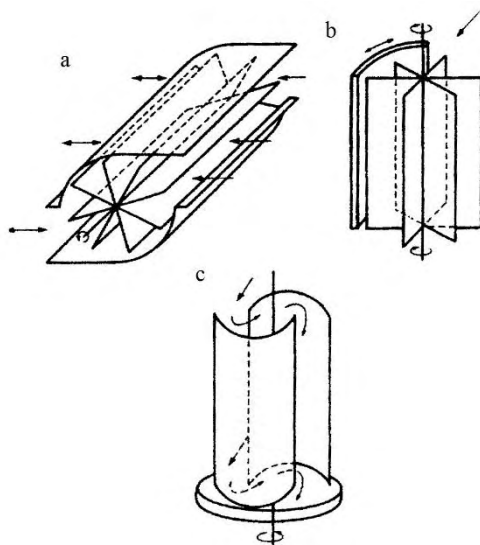
- silniki z poziomą osią obrotu,
- silniki z pionową osią obrotu.

Innym kryterium podziału silników wiatrowych jest ich szybkobieżność. Miarą szybkobieżności jest tzw. moduł wiatraka Z (wyróżnik szybkobieżności), wzór 10.14.

W zależności od tego parametru silniki wiatrowe dzielimy na:

- - wolnobieżne o $Z \leq 1,5$,
- - średnobieżne o $1,5 < Z \leq 3,5$,
- - szybkobieżne o $Z > 3,5$.

Do pierwszej grupy silników wiatrowych (wolnobieżnych) należą silniki bębnowe, karuzelowe i rotorowe (rys. 10.8).



Rys. 10.8 Schemat silników wolnoobrotowych: wolnoobrotowy – bębnowy, karuzelowy – rotorowy [Jagodziński W. 1979].

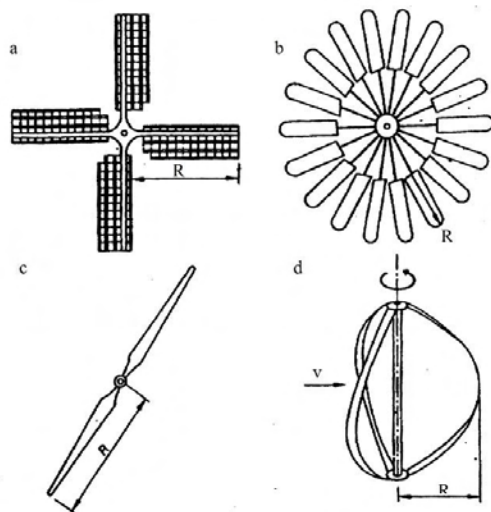
Silniki z tej grupy mają duże momenty obrotowe, jednak ze względu na małe prędkości obrotowe znalazły zastosowanie do napędów mechanicznych.

Silniki bębnowe mają 4 – 8 łopatek umieszczonych na poziomej osi obrotu, przy czym część wirnika jest osłonięta przed naporem wiatru. W efekcie takiego rozwiązania silnik ten może pracować jedynie w przypadku czołowego naporu wiatru na łopaty wirnika.

Silniki karuzelowe przypominają w swojej budowie silniki bębnowe, a jedyną różnicę stanowi położenie osi obrotu wirnika, która w silnikach karuzelowych jest osią pionową. Takie usytuowanie osi uniezależnia pracę tego silnika od kierunku wiatru. Silniki bębnowe i karuzelowe nie znalazły do tej pory szerszego zastosowania.

W silnikach rotorowych obrót wirnika jest wywołany, naporem wiatru na jego powierzchnie czynne, przy czym następuje tu dwukrotna zmiana względnego kierunku wiatru. Podstawowymi zaletami tych silników jest ich niewrażliwość na zmiany kierunku wiatru oraz niski koszt budowy. Najbardziej rozpowszechnionym przykładem silnika rotorowego jest silnik Savoniusa, który wykorzystuje się do napędu pomp, urzą-

dzeń irygacyjnych i grzewczych itp. Do grupy silników średniobieżnych zalicza się silniki wielołopatowe i wiatraki rys. 10.9.



Rys. 10.9 Wirniki silników średniobieżnych i szybkobieżnych: a - wiatrak, b - wielołopatowy, c - śmigłowy, d - pneumon, (silnik Darrieus'a) [Jagodziński W. 1979].

Silniki wielołopatowe mają wirniki zbudowane z 12 do 40 łopat prostych lub profilowanych, które połączone ze sobą w sposób sztywny tworzą koło łopatowe. Silniki tego typu służą do napędu pomp oraz urządzeń nawadniających na pustynnych obszarach Ameryki i Afryki, a także do napędu maszyn w małych zakładach rzemieślniczych, położonych w dużej odległości od ośrodków energetycznych.

Wiatraki najczęściej mają wirniki czteroskrzydłowe o skrzydłach prostych wykonanych z drewnianych listew. Ze względu na ich niską sprawność oraz prymitywną budowę w stosunku do możliwości dzisiejszej techniki, wiatraki to silniki należące już do historii.

Ostatnia grupa silników wiatrowych to silniki szybkobieżne. Należą do nich silniki śmigłowe oraz tzw. pneumony, czyli szybkoobrotowe silniki wiatrowe o pionowej osi obrotu rys. 10.9. Silniki śmigłowe są silnikami o poziomo usytuowanej osi obrotu wirnika, który w zależności od rozwiązania konstrukcyjnego może mieć trzy, dwie lub jedną łopatkę. Silniki z wirnikami trójłopatowymi mają najniższy wyróżnik szybko-

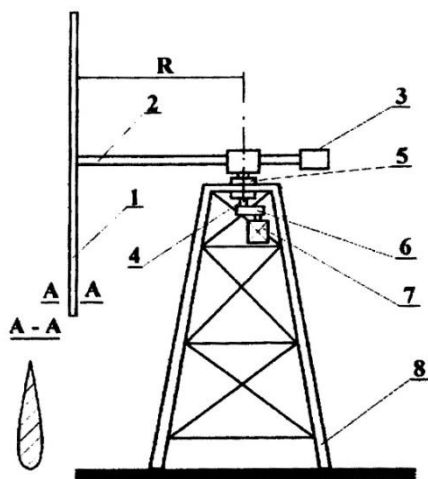
bieżności od 3,5 do 8, dwułopatowe 8 – 12, natomiast jednołopatowe od 12 do 18 [Miszczak, Waszkiewicz 1988].

Ze względu na ustawienia wirnika wobec kierunku wiatru w stosunku do położenia masztu, silniki śmigłowe można, również podzielić, np. „up-wind” i „down-wind”. System down-wind jest niezbyt popularny, gdyż należy liczyć się ze stratami spowodowanymi częściowym (choć chwilowym) osłonięciem wirnika przez konstrukcję siłowni od wiatru.

Do pneumonów zaliczamy silnik Darrieus’a oraz odmianę tego silnika H-Darrieusa. Silnik Darrieus’a ma dwie lub trzy łopaty w postaci eliptycznie wygiętych płatów, sprzężonych bezpośrednio z pionowym wałem.

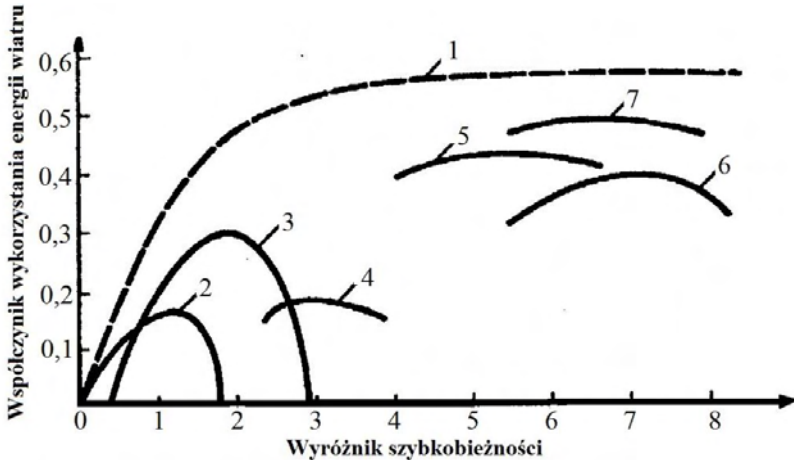
Wirnik silnika H-Darrieus zbudowany jest z trzech lub więcej prostych łopat o właściwym im profilach aerodynamicznych, rozmieszczonych na powierzchni walca, rzadziej stożka. Łopaty te połączone są z pionowym wałem za pomocą promienistych ramion [Miszczak, Waszkiewicz 1988].

Do silników szybkobieżnych należy zaliczyć skonstruowany przez Turowskiego i Nowowiejskiego jednoskrzydłowy silnik o pionowej osi obrotu rys. 10.10.



Rys. 10.10 Schemat elektrowni wiatrowej z jednoskrzydłowym silnikiem o pionowej osi obrotu: 1 – skrzydło napędowe, 2 – rama skrzydła, 3 – przeciwwaga i hamulec hydrauliczny, 4 – wał napędowy, 5 – łożysko główne, 6 – multiplikator, 7 – prądnicą elektryczna, 8 – maszt [Miszczak M., Waszkiewicz Cz. 1998].

Silniki szybkoobrotowe charakteryzują się wysokimi sprawnościami aerodynamicznymi oraz stosunkowo dużymi prędkościami obrotowymi. Ponadto są znacznie lżejsze i tańsze od pozostałych silników wiatrowych. Z grupy silników szybkoobrotowych należy wyróżnić silniki śmigłowe, które posiadają największy współczynnik wykorzystania wiatru rys.10.11.



Rys. 10.11 Przebieg współczynnika wykorzystania energii w zależności od typu silnika i wyróżnika szybkoobrotowości: 1 - silnik idealnie sprawny, 2 - silnik savoniusa, 3 - silnik wielołopadkowy, 4 - wiatrak typu holenderskiego, 5 - silnik śmigłowy jednołopatowy, 6 - silnik Darriusa, 7 - silnik śmigłowy dwułopatowy [Jagodziński W. 1979].

Z tego względu wydają się one być optymalnymi silnikami do napędu generatorów prądowców [Miszcak, Waszkiewicz 1988].

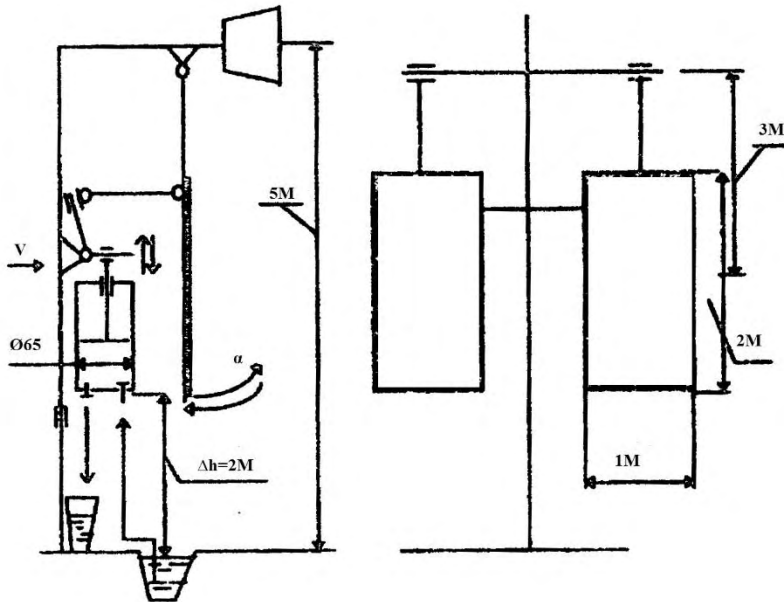
Osobną grupę silników wiatrowych stanowią silniki wychyłowo-zwrotne. Wykorzystują one energię porywów wiatru dzięki płatom, które mogą się odchylać o kąt 90° .

Silniki te dzielimy na :

- sprężynowe i grawitacyjne,
- z ruchem wahadłowym i złożonym,
- z poziomą i pionową osią wychyłną,
- górnym i dolnym usytuowaniem osi,
- zamykające się i otwierające,

- z pojedynczym płatem i grupowe.

Silniki wychyłowo-zwrotne można zastosować do dotleniaania lub przepompowywania wody, wentylowania pomieszczeń, dosuszania ziarna lub odstraszenia zwierząt [Pudlik 1998]. Na rys. 10.12 pokazano silnik wychyłowo-zwrotny służący do przepompowywania wody.



Rys. 10.12 Układ silnik wychyłowo-zwrotny - maszyna służący do przepompowywania wody [Pudlik 1998].

10.6. Sterowanie silnikami wiatrowymi

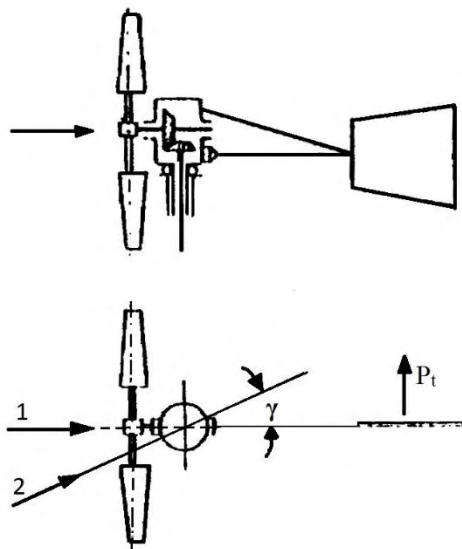
Urządzenia regulacyjne silników wiatrowych mają na celu ustawienie wirnika prostopadle do kierunku wiatru, utrzymanie stałych obrotów wirnika przy zmiennej prędkości wiatru oraz zabezpieczenie wirnika i całej konstrukcji wiatraka przed niszczącym działaniem wiatrów burzowych.

Nastawianie wirnika do kierunku wiatru. Silniki wiatrowe o poziomej osi obrotu dla swej właściwej pracy wymagają odpowiedniego

ustawienia względem kierunku wiatru. Nowoczesne silniki wiatrowe zaopatruje się w urządzenia do samoczynnego nastawiania ich pod wiatr. Urządzenia te możemy podzielić na cztery grupy, w zależności od sposobu dokonywanej regulacji. Ustawianie pod wiatr odbywa się za pomocą:

- steru,
- bocznych (nastawczych) silników wiatrowych,
- odpowiedniego rozmieszczenia elementów elektrowni,
- silnika elektrycznego.

Nastawianie sterem. Stosuje się w siłowniach wiatrowych małej i średniej mocy. Ustawienie wirnika pod wiatr za pomocą steru pokazano na rys. 10.13.



Rys. 10.13 Ustawienie silnika pod wiatr za pomocą steru [Jagodziński W. 1979].

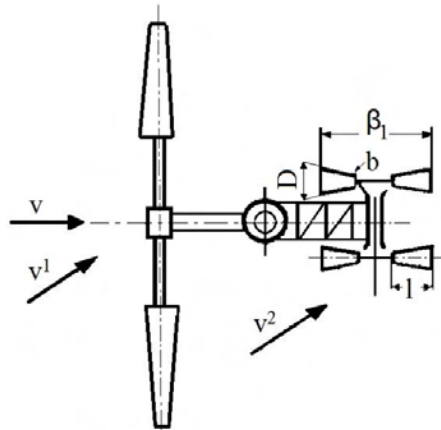
Gdy koło wiatrowe jest ustawione prostopadłe do kierunku wiatru, to ster tylny jest ustawiony do niego równoległe i nie działa na niego żadna siła boczna. Przy zmianie kierunku wiatru na ster zacznie działać siła

boczna P_t , która dzięki temu, że ster jest połączony z głowicą, spowoduje obrót w odpowiednim kierunku do ponownego ustawienia koła wiatrowego do wiatru.

Zalety tego typu regulacji to

- prosta zasada działania,
- duża podatność urządzenia na szybkie zmiany kierunku wiatru,
- możliwość łatwego ustawienia wirnika równoległe do wiatru np. w celu wyłączenia podczas silnych wiatrów (przegubowe połączenie steru z głowicą i zastosowanie odpowiednich ściegów).

Zastosowanie bocznych silników wiatrowych. Polega to na tym, że w odpowiedniej odległości za kołem wiatrowym umieszczone są dwa nastawcze koła wiatrowe o płaszczyznach obrotu prostopadłych do płaszczyzny koła głównego rys. 10.14.



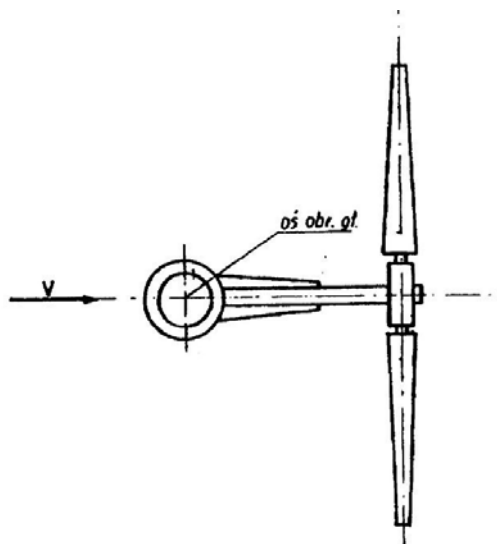
Rys. 10.14 Regulacja bocznymi silnikami wiatrowymi. [Jagodziński W. 1979].

Koła nastawcze są osadzone na wspólnym wale, który za pośrednictwem przekładni jest sprzężony z wieńcem zębatym osadzonym na obrotnicy. Istnieją rozwiązania konstrukcyjne z jednym nastawczym kołem wiatrowym. Gdy kierunek wiatru zmieni się i nie jest prostopadły do wirnika, to wywołuje wtedy obrót wirników nastawczych, w wyniku czego głowica silnika zostanie odpowiednio obrócona do pozycji, gdy koło główne

ustawi się na pozycję prostopadłą do wiatru. W silnikach nastawczych, ze względu na duży moment rozruchowy stosuje się wirniki wielołopatowe.

Regulacja przez zmianę miejsca rozmieszczenie elementów wirnika. Jest to najprostszy sposób nastawiania wirnika na wiatr, polegający na umieszczeniu koła wiatrowego za osią obrotu głowicy w stosunku do kierunku wiatru rys. 10.15.

W tym sposobie regulacji wirnik sam spełnia rolę elementu nastawczego. System ten mimo swojej wielkiej zalety, jest rzadko stosowany ze względu na skłonność koła wiatrowego do drgań z powodu pracy łopatek w cieniu aerodynamicznym wieży oraz oddziaływanie dużych sił w łożyskach obrotnicy (przesunięcie środka ciężkości od osi obrotu) i dużą prędkość obrotu głowicy i związane z nią duże momenty żyroskopowe.



Rys. 10.15 Regulacja rozmieszczenia elementów roboczych (wirnik) [Jagodziński W. 1979].

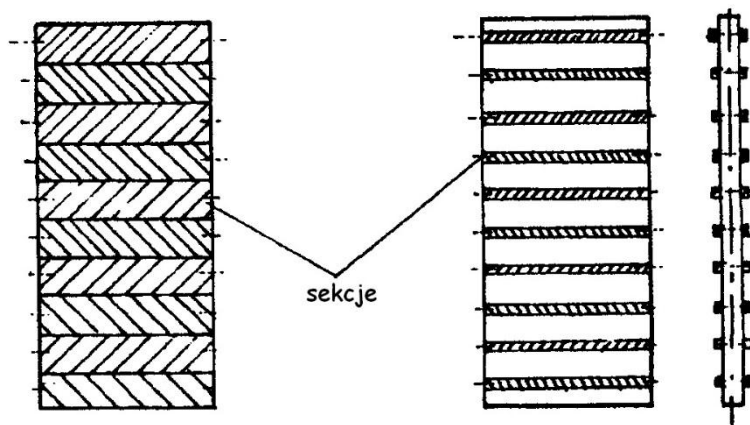
Regulacja silnikiem elektrycznym. Sposób ten jest stosowany wyłącznie w siłowniach wiatrowych dużej mocy o średnicy koła wiatrowego powyżej 30 m. Działanie urządzenia tego typu polega na zastosowaniu chorągiewki nastawczej, umieszczonej np. na głowicy silnika, która odpowiednio do położenia względem swej podstawy włącza lub wyłącza silnik elektryczny dokonuje on obrotu głowicy. Zaletą tego systemu jest

zastąpienie innych sposobów regulacji (np. ster tylny), które w przypadku tak dużych silników musiałyby mieć duże rozmiary elementów. Inną ważną zaletą jest możliwość kontrolowania i doboru prędkości obrotowej głowicy (odpowiednie przekładnie, dobór prędkości obrotowej silnika elektrycznego) w celu ograniczenia momentów żyroskopowych. Do wad należą złożoność konstrukcji i konieczność dodatkowego źródła energii do napędu silnika, [Pietrzycki 1993, Jagodziński 1979].

Regulacja prędkości obrotowej i mocy silników wiatrowych.

Współpraca silników wiatrowych z urządzeniami wymagającymi stałych obrotów: np. z prądnicami, przy zmiennych prędkościach wiatru wahaających się w dość szerokim zakresie, wymaga zastosowania urządzeń stabilizujących prędkość obrotową, a w razie potrzeby wyłączając silnik z pracy, chroniąc w ten sposób przed zniszczeniem. Regulacji tych dokonuje się różnymi sposobami, w zależności od konstrukcji siłowni wiatrowych.

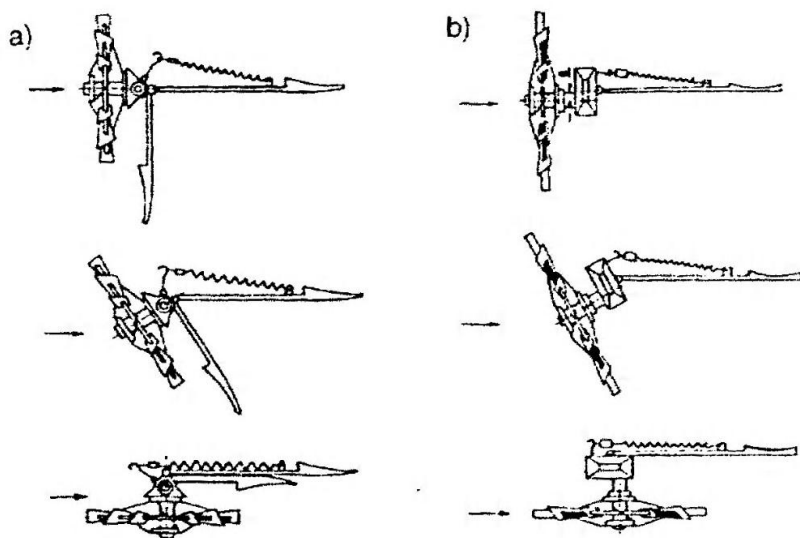
Regulacja przez zmianę powierzchni czynnej skrzydeł. Jest to najstarszy sposób regulacji, polegający na ręcznym zmniejszeniu deskowego lub płóciennego poszycia, w przypadku gdy prędkość obrotowa mogłaby przekroczyć dopuszczalną zakładaną pewną wartość. W nowszych rozwiązaniach powierzchnie skrzydeł są dzielone na sekcje, które mogą zmieniać swoje położenie względem osi poprzecznych do ramion skrzydeł. Przekręcanie sekcji dokonuje się samoczynnie przy wykorzystaniu siły odśrodkowej rys. 10.16.



Rys. 10.16 Działanie sekcji: a – położenie normalne sekcji, b – sekcje w czasie regulacji.

Wadą tego typu regulacji jest niemożliwość nadania skrzydłom profili opływowych i wynikające z tego duże straty aerodynamiczne oraz złożona budowa skrzydeł.

Regulacja przez zmianę położenia koła wiatrowego. Regulację mocy dokonuje się przez wychylenie wirnika z płaszczyzny prostopadłej do kierunku napływającego powietrza. Rozwiązanie to jest znane pod nazwą „eclipse”. Wyróżniamy dwie odmiany tej regulacji przez zastosowanie steru regulacyjnego lub z mimośrodowym zawieszeniem wirnika rys. 10.17.



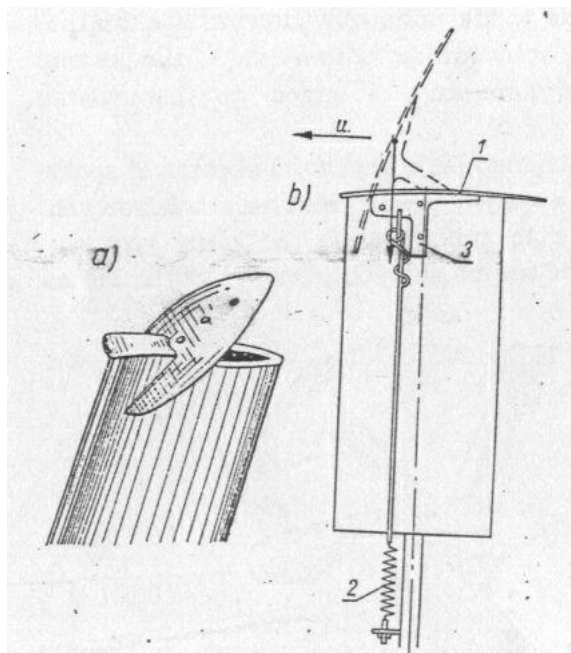
Rys. 10.17 Schemat regulacji prędkości obrotowej wirnika: a - ze sterem regulacyjnym, b - z mimośrodowym umocowaniem wirnika [Jagodziński W. 1979].

W rozwiązaniu pierwszym zmiana położenia wirnika względem kierunku wiatru następuje pod wpływem naporu powietrza na ster regulacyjny, który wystaje poza obrys średnicy wirnika i ustawiony jest prostopadłe do wiatru. Napór wiatru na ster regulacyjny równoważą sprężyna umożliwiająca powrót wirnika do położenia pierwotnego. W celu pełnego wyłączenia wirnika odłącza się za pomocą linki ster regulacyjny od steru kierunkowego, przez co wirnik ustawia się prostopadłe do kierunku

ku wiatru. W rozwiązaniu drugim pozioma oś obrotu wirnika jest przesunięta względem pionowej osi obrotu głowicy silnika. Napór wiatru na wirnik, działający na ramieniu, o wielkości wynikającej z konstrukcji mimośrodowo, równoważony jest siłą sprężyny. Przy zwiększonym naporze wiatru płaszczyzna wirnika ustawia się pod pewnym kątem, wskutek czego liczba obrotów może pozostawać na stałym poziomie niezależnie od wzrostu prędkości wiatru, [Pietrzycki 1993, Jagodziński 1979].

Regulacja przez obrót łopat względem ich osi. Regulacja prędkości obrotowej wirnika następuje tu przez obrót łopatek wokół ich osi podłużnej wywołując zmianę kąta natarcia łopatek. Dzięki temu rozwiązaniu: rozruch silnika, można przeprowadzić nawet przy małych prędkościach wiatru, możliwa jest regulacja mocy silnika, wirnik można unieruchomić nawet przy dużych prędkościach wiatru. Rozwiązań konstrukcyjnych wykorzystujących wyżej wymieniony sposób jest bardzo wiele. Jednym z przykładów jest sposób wykorzystany w siłowni AWEU6-4M. Zmiana kąta natarcia następuje pod wpływem działania siły odśrodkowej na ciężarki umocowane między piastą a łopata. Innym rozwiązaniem jest układ Opti Tip firmy Vestas. Mechanizm regulacji tego układu znajduje się w piąście wirnika i składa się z oddzielnych siłowników hydraulicznych dla każdej łopaty. Stanowi on jednocześnie potrójny system hamulców bezpieczeństwa. System Opti Tip ustawia płaty w celu optymalnego wykorzystania turbiny i zarazem minimalizacji hałasu oraz wyłączenia podczas silnych wiatrów. Ten sposób regulacji stosowany jest w najnowszych konstrukcjach silników wiatrowych szybkoobrotowych, [Bajkowski 2001].

Regulacja hamowaniem aerodynamicznym. Polega na sztucznym zwiększaniu aerodynamicznych oporów wirników w miarę zwiększania prędkości obrotowej. Jedno z rozwiązań tego typu przedstawia rys. 10.18. Działanie tego systemu polega na tym, że na końcach łopat zamocowane są ruchome „klapki”, które w położeniu spoczynkowym przylegają do końca łopat. Po przekroczeniu założonej prędkości obrotowej zmieniają swoje położenie (odchylają się) pokonując naciąg sprężyny, zwiększając tym samym opory aerodynamiczne. Wadą tego systemu jest wrażliwość na oblodzenie, które zmniejsza efekty jego działania oraz niemożliwość wyłączenia przy silnych wiatrach [Pietrzycki 1993, Jagodziński 1979].



Rys. 10.18 System regulacji PERLI [Pietrzycki M. 1993].

Regulacja prędkości obrotowej obciążeniem użytecznym. Sposób ten polega na zmianie rezystancji stanowiącej obciążenie. W ten sposób punkt pracy siłowni przemieszcza się z jednej charakterystyki mechanicznej na inną, bardziej korzystną dla aktualnie panujących warunków pogodowych (prędkość i kierunek wiatru). Zmiana rezystancji musi odbywać się łagodnie, zbyt gwałtowny wzrost momentu obciążenia mógłby spowodować uszkodzenie turbiny, wału lub łożysk [Bajkowski 2001, Pietrzycki 1993].

10.7. Generatory

Do wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach wiatrowych mogą być zastosowane prądnice prądu stałego lub prądu przemiennego. Zastosowanie prądnic prądu stałego ogranicza się na ogół do układów zasilania skojarzonego z prądnicą odbiornika, np. grzejny lub do magazynowania energii w akumulatorach. Do zasilania lokalnej sieci elektro-

energetycznej stosowane są prądnice synchroniczne prądu przemiennego, a do współpracy z systemem elektroenergetycznym najczęściej prądnice asynchroniczne, które nie wymagają synchronizacji z systemem energetycznym [Majka 1993].

10.8. Wieże (maszty)

Wysokość H wieży siłowni wiatrowej zależy od średnicy wirnika silnika wiatrowego i od miejsca lokalizacji urządzenia. Wysokość umieszczenia wirnika powinna odpowiadać ogólnej zasadzie, że tworzą ją suma trzech wysokości przeszkody terenowej i połowy średnicy wirnika. Odległość od przeszkody terenowej powinna być równa jej dwudziestokrotności. Rozstaw nóg wieży dla $H < 10$ wynosi około $0,3H$, natomiast dla $H > 10$, od $0,22$ do $0,25H$. Przy ustawianiu kilku silników wiatrowych obok siebie, odległość między nimi nie powinna być mniejsza niż $15 D$ średnic wirnika.

Wieże oblicza się ze względu na wytrzymałość pod obciążeniem wiatru przy jego prędkości na moment skracający i napór wiatru na wirnik, wyłączony z pracy podczas burzy czy huraganu.

Napór wiatru P_w wynosi:

$$P_w = \delta_h \cdot K \cdot \rho_d \cdot A, \text{ Pa} \quad (10.19)$$

P_d – ciśnienie dynamiczne wiatru, kg/m^2 ,

γ – gęstość powietrza, kg/m^3 ,

v – prędkość wiatru, m/s ,

A – powierzchnia wirnika, m^2 ,

K – współczynnik opływu, zależy od rodzaju konstrukcji wieży, ($K = 1,2 - 1,4$),

δ_h – współczynnik poprawkowy dobierany ze względu na wysokość umieszczenia wirnika. Dla $H < 10$ m $\delta_h = 1,0$; dla $H = 10 \div 20$ m $\delta_h = 1,35$.

W celu obliczenia momentu skracającego wieżę, nieodzowna jest znajomość położenia środka naporu wiatru. Dla maszty o konstrukcji kratownicowej i o podstawie kwadratowej środek taki znajduje się na wysokości:

- 0,43 H w stosunku do powierzchni ziemi: dla konstrukcji o podstawie trójkątnej,
- 0,32 H natomiast dla konstrukcji pełnej rurowej,
- 0,5 H pełnej czworokątnej,
- 0,3 H pełnej stożkowej.

Aby przedsięwzięcie było opłacalne, średnioroczna prędkość wiatru dla elektrowni wiatrowych sieciowych (WES) powinna wynosić, co najmniej 5,5 m/s na wysokości wirnika. Dla pozostałych siłowni (WEA, WP, SW) stosowne warunki wietrzne ocenia się na co najmniej 4 m/s, w zależności od rozwiązania konstrukcyjnego [Fugiel 1994, Kukła 1997].

Elektrownie sieciowe wiatrowe pracują na potrzeby ogólnej sieci elektroenergetycznej lub sieci lokalnej, służą do zasilania energią elektryczną w sposób zdecentralizowany pewnej grupy odbiorców. Są to elektrownie wiatrowe o dużych mocach jednostkowych lub farmy wiatrowe.

10.9. Sposoby wykorzystania energii wiatru

Silniki wiatrowe mogą być wykorzystywane do bezpośredniego napędu maszyn roboczych, układów magazynujących energię mechaniczną lub do wytwarzania energii elektrycznej z przeznaczeniem jej na:

- zasilanie odbiorników skojarzonych z prądnicą,
- zasilanie odbiorników w lokalnej sieci elektroenergetycznej z magazynowaniem energii w celu zapewnienia ciągłości zasilania,
- współpracę z innymi źródłami energii elektrycznej w celu osiągnięcia ciągłości zasilania w lokalnej sieci elektroenergetycznej,
- przekazywanie w całości lub tylko nadmiaru do systemu elektroenergetycznego.

Ze względu na sposób wykorzystania siłowni wiatrowych dzielimy je na:

- elektrownie wiatrowe sieciowe „WES”,
- elektrownie wiatrowe autonomiczne „WEA”,
- pompownie wiatrowe „WP”,
- siłownie wiatrowe uniwersalne „SW”.

Dla pozostałych siłowni (WEA, WP, SW – nazwy elektrowni przyjęte z języka angielskiego) warunki wietrzne ocenia się na, co najmniej 4 m/s, w zależności od rozwiązywania konstrukcyjnego [Fugiel, 1994, Kukla 1997].

Elektrownie autonomiczne wiatrowe zasilają energią elektryczną pojedynczych odbiorców np. gospodarstwo rolne. Elektrownie takie mogą być również podłączone do sieci elektroenergetycznej w celu eliminowania niedoboru energii elektrycznej [Burzyński i in. 2000]. Pompownie wiatrowe wykorzystywane są do wspomagania systemów odwadniających tereny depresyjne na Żuławach [Turowski, Nowowiejski 1998] rekultywacji i przywracania życia biologicznego w końcowych odcinkach kanałów melioracyjnych, gdzie w celu dostatecznego jej natlenienia samoistny ruch wody jest niewystarczający. Innym sposobem wykorzystywania pompowni wiatrowych może być ich zastosowanie do uzupełniania oraz dodatkowego natleniania wody w stawach hodowli ryb [Turowski, Konieczny 2001]. Ponadto możliwe jest tradycyjne wykorzystanie pompowni do pompowania wody dla celów hodowli zwierzęcej, produkcji roślinnej i celów bytowych [Tymiński 1997].

Siłownie uniwersalne wiatrowe można w zależności od ich konstrukcji wykorzystać w wielu dziedzinach rolnictwa. W produkcji rolniczej, przetwórstwie rolno-spożywczym, drobnym przemyśle zlokalizowanym na terenach wiejskich oraz w gospodarstwach domowych, energia wiatru wytwarzana jest przez uniwersalne siłownie wiatrowe.

Energia ta może być wykorzystana do:

- ogrzewania i oświetlenia pomieszczeń inwentarskich, produkcyjnych i domowych,
- podgrzewania wody technologicznej i dla potrzeb bytowych,
- napędu urządzeń technologicznych i innych, np. wentylatorów do suszenia ziarna, siana i innych produktów rolnych, urządzeń do przygotowywania pasz, urządzeń do natleniania gnojowicy, itp.
- napędu pomp wodnych dla pozyskiwania wody, nawadniania, odpompowywania wód depresyjnych ,itp. napędu kompresorów, aeratorów do natleniania (napowietrzania) powierzchniowego i nad dennego w zbiornikach chowu ryb, w jeziorach i innych ujęciach wodnych, [Kukla 1997a, 1997b].

Literatura:

- [1]. Bajkowski M. 2001. *Badania eksploatacyjne siłowni wiatrowej o mocy 4 kW*. Praca magisterska wykonana na Wydziale Techniki Rolniczej, Akademii Rolniczej w Lublinie pod kierunkiem M. Szpryngiela,
- [2]. Burzyński R., Mickiewicz P., Wiśniewski G. 2000. *Aspekty ekonomiczne wykorzystania energii odnawialnej w Polsce problemy inwestorów w przygotowaniu i realizacji inwestycji w świetle doświadczeń EC BREC, IBMER, „Elektrownie wiatrowe 2000 Kolobrzeg”*.
- [3]. Fugiel P. 1994. *Techniczne aspekty lokalizacji siłowni wiatrowych*. Materiały konferencyjne „Wykorzystanie energii wiatrowej w rolnictwie”, IBMER, Warszawa.
- [4]. Fugiel P. 1996. *Lokalizacja siłowni wiatrowych* Poradnik. IBMER, Warszawa.
- [5]. Jagodziński W. 1979. *Silniki wiatrowe*. PWN, Warszawa.
- [6]. Kukła T. 1997. *Siłownie wiatrowe na terenach rolniczych*. Technika rolnicza nr 6.
- [7]. Kukła T. 1997. *Wykorzystanie siłowni wiatrowych na terenach rolniczych*. „Wykorzystanie energii odnawialnej w rolnictwie”. Materiały konferencyjne. IBMER, Warszawa.
- [8]. Majka K., 1993. *Aspekty techniczno ekonomiczne wykorzystania energii wiatru w rolnictwie*. Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej. Nr 3.
- [9]. Miszczak M. Waszkiewicz Cz. 1998. *Energia słoneczna ,wiatru i inne*. Instytut Wydawniczy Nasza Księgarnia, Warszawa.
- [10]. Pietrzycki M. 1993. *Analiza i projekt siłowni wiatrowej o mocy 1 kW*. Praca magisterska wykonana na Wydziale Techniki Rolniczej Akademii Rolniczej w Lublinie pod kierunkiem M. Szpryngiela.
- [11]. Pudlik M., 1998. *Osnowy pnieazowania energii porywow wietra na bazie odłoneienia wietrodwigatielej*. Naukowe rozprawy monografie nr 26, Uniwersytet Opolski, Opole.
- [12]. Turowski S. Nowowiejski R. 1998. *Wykorzystanie energii wiatru do odwadniania terenów depresyjnych*. Materiały z II Międzynarodowej Konferencji „Wykorzystanie energii odnawialnej w rolnictwie”, IBMER, Warszawa.
- [13]. Turowski S, Konieczny R. 2001. *Wykorzystanie energii wiatru w gospodarce wodnej*. Materiały XI Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Problemy Inżynierii na progu III tysiąclecia: technika – środowisko – człowiek”. Instytut Inżynierii Rolniczej AR w Szczecinie.

- [14]. Tymiński J. 1997. *Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w Polsce do 2030 r. – aspekty energetyczne i ekologiczne*. IBMER, Warszawa.
- [15]. Ząber Z. 1999. *Elektrownie wiatrowe produkcji Nowomag S. A. Materiały seminaryjne*. IBMER, Warszawa.
- [16]. Żurawiński J. 1972. *Obciążenia wiatrem budowli i konstrukcji*. ARKADY, Warszawa.

11. ZASOBY I POTENCJAŁ ENERGETYCZNY BIOMASY W POLSCE

Biomasę można zdefiniować, jako materię pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, która ulega biodegradacji. Są to substancje pochodzące z różnych odpadów i pozostałości z produkcji rolnej lub leśnej, a także przemysłu przetwarzającego ich produkty oraz inne części odpadów, które ulegają biodegradacji. Biomasa pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego można wykorzystać na cele energetyczne przez spalanie, fermentację metanową (biogaz), produkcję biopaliw albo produkcję nawozów przez kompostowanie. Potencjalne zasoby biomasy przeznaczonej na cele energetyczne można podzielić na pochodzące z roślin uprawowych.

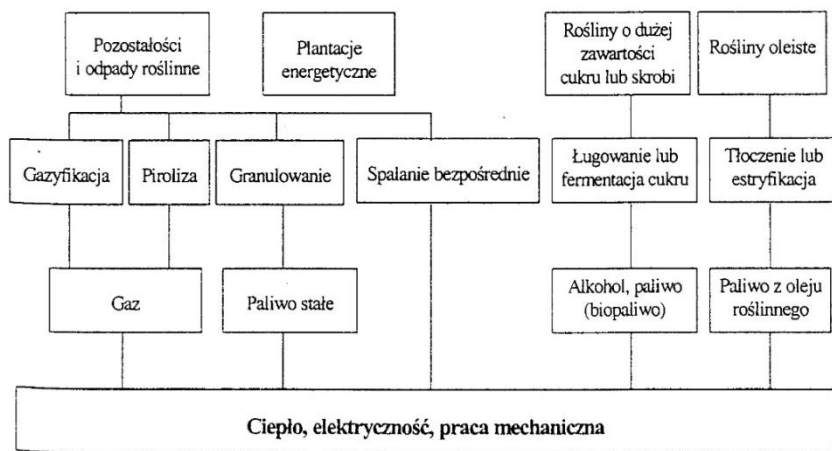
Plantacje roślin uprawowych, takich jak zboża, rzepak, ziemniaki, upraw szybko rosnących drzew i traw, oraz z takich organicznych pozostałości jak:

- pozostałości roślin uprawowych, np. słoma, osadki kukurydzy,
- odpady w produkcji leśnej i w przemyśle drzewnym,
- odpady zwierzęce, odchody, gnojowica,
- odpady organiczne, komunalne.

Na rys. 11.1 wskazano, możliwości wykorzystania surowców roślinnych na cele energetyczne.

Surowce z biomasy przetwarzane są na paliwa na przez rozdrabnianie, brykietowanie, granulowanie, prasowanie i rolowanie. Polska posiada znaczny potencjał energetyczny w zasobach z biomasy. Szacuje się [Grzybek 2004], że potencjał techniczny biomasy wynosi ok. 684,6 PJ, z czego na paliwa stałe przypada 407 PJ w skali roku. Na nadwyżki pozyskiwanej z biomasy w rolnictwie przypada 195 PJ, w leśnictwie 101 PJ, w sadownictwie 57,6 PJ zaś na odpady z przemysłu drzewnego 53,9 PJ. Podczas cięcia rębnego w drzewostanach sosnowych, prowadzanych, co roku na powierzchni ok. 25 tys. ha, można pozyskać na cele energetyczne drewno o masie 540 tys. ton (432 tys.m³) drobnicy gałęziowej i 590 tys. ton (472 tys.m³) chrustu, łącznie ok. 1,0 mln m³.

W produkcji roślin zbożowych z 1,0 ha można uzyskać 10 - 14 t/ha suchej masy słomy, ok.15,0 t/ha suchej masy siana z traw i ok. 12 - 30 t/ha trzciny pospolitej. Najważniejszymi czynnikami decydującymi o celowości wykorzystania biomasy są: niskie koszty nośników energii, lokalne pozyskiwanie biomasy i uniezależnienie się od paliw kopalnianych, jak też zmniejszenie wydalenia do atmosfery emisji szkodliwych produktów spalania paliw tradycyjnych. Jest to również szansa racjonalnego zagospodarowania pozostałości z upraw i przetwórstwa rolno - spożywczego, zagospodarowanie nieużytków poprzez nasadzenia tzw. roślin energetycznych oraz stworzenie dodatkowych miejsc pracy.



Schemat możliwości wykorzystania surowców roślinnych na cele energetyczne

Rys. 11.1 Możliwości produkcji ciepła z surowców roślinnych [Grzybek A. i in. 2004].

11.1. Drewno

W krajach rozwiniętych wykorzystanie drewna do spalania nie przekracza 3,0%. Wyjątek stanowią kraje skandynawskie, w których spala się ok. 10 - 15% drewna. Wg Kozłowskiego [Kozłowski 1999] potencjał, zasobów drewna wynosi w Polsce ok. 4,3 mln m³ przy technicznych możliwościach zwiększenia zasobów do 5,0 mln m³ rocznie, co jest równoważne spalaniu 3,33 mln ton węgla o wartości opałowej 24 kJ/kg. Grzybek [2002] uważa, że potencjał zasobów drewna wynosi 9,4 mln m³

rocznie. Drewno jest dobrym nośnikiem energii cieplnej, bowiem spalanie 1 tony węgla równoważne jest spalaniu 1,6 tony drewna z sosny 2 – 2,3 m³ drewna.

Drewno jest substancją chemiczną niejednorodną, składającą się z celulozy, hemiceluloz i ligniny. Drewno opałowe twarde i miękkie, uzyskuje się z pni drzew, gałęzi i korzeni pociętych na kawałki o średnicy 5 – 10 cm i długości 15 – 35 cm. Oprócz pociętych części drzewa stosuje się i inne formy drewna, tj. zrębki, trociny, korę, brykiety i pelety. Na proces spalania drewna, a szczególnie na sprawność cieplną kotłów, masę odpadów paleniskowych oraz emisję do atmosfery szkodliwych produktów spalania, mają wpływ także właściwości fizyczne i cieplne drewna jak:

- skład chemiczny,
- wilgotność względna,
- gęstość właściwa,
- wartość opałowa,
- stopień rozdrobnienia,
- temperatura zapłonu,
- temperatura spalania.

W tabeli 11.1 zestawiono skład chemiczny drzewa liściastego, iglastego oraz węgla brunatnego.

Tabela 11.1 Skład chemiczny drewna [Kozłowski R. 1999].

Materiał, paliwo	Skład chemiczny suchego materiału					
	Popiół	C	H	O	N	S
Drewno						
- liściaste	0,5	48,8	6,0	44,3	0,1	-
- iglaste	0,5	52,1	6,2	42,6	0,1	-
Węgiel brunatny (porównanie)	12,2	63,5	2,4	79,9	0,6	1,68

Bardzo istotną właściwość drewna opałowego stanowi masa zawartej w nim wody. Po ścięciu drewna miękkich gatunków drzew liścia-

stych, wilgotność względna drewna wynosi 40 – 50%, a z gatunków drzew twardych 35 – 45%. Po wysuszeniu naturalnym w okresie letnim wilgotność względna może zmniejszyć się do ok. 15%. Wilgotność względna ma znaczny wpływ na dolną wartość opałową, tzn. taką, która oznacza ilość ciepła uzyskaną ze spalania 1 kg paliwa przy założeniu, że para wodna podczas spalania uchodzi bez skraplania, a więc oddaje swe ciepło. Woda zawarta w paliwie ulega podczas spalania wtedy odparowaniu. Dlatego też całkowite ciepło, uzyskane podczas spalania, pomniejszone jest o ilość energii cieplnej potrzebnej do skroplenia spalin. Wg Hansa Falstera in., [Falster 2001] wartość opałową można wyznaczyć z równania:

$$W_{dm} = W_{ds} \left(\frac{100 - w}{100} \right) - \frac{2,442w}{100}, \text{ GJ/t} \quad (11.1)$$

gdzie:

W_{dm} – wartość opałowa drewna mokrego, GJ/tonę masy całkowitej,

W_{ds} – wartość opałowa drewna suchego, GJ/tonę masy całkowitej,

w – wilgotność względna, %,

2,442 GJ/tonę – ciepło z parowania wody o temperaturze 25°C.

Wartość opałowa wyznacza się z równania:

$$W_d = W_g (w + 9H), \text{ MJ/kg} \quad (11.2)$$

w którym:

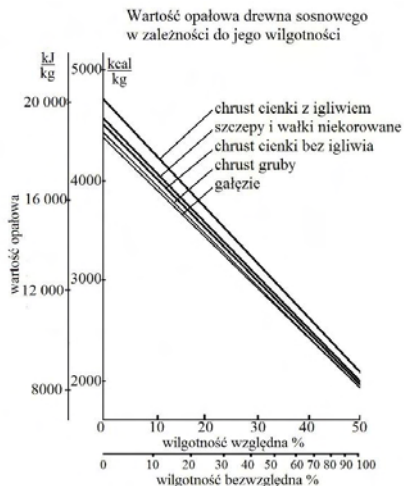
W_g – ciepło spalania, MJ/kg,

r – ciepło parowania wody, MJ/kg,

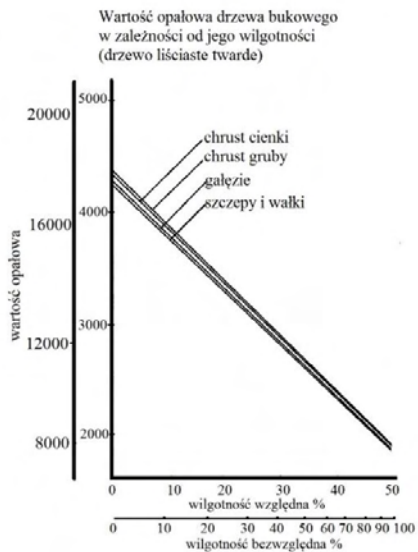
w – wilgotność względna paliwa, %,

H – zawartość wodoru, %.

Na wykresach rys.11.2 i 11.3 przedstawiono wg Kozłowskiego [1999] wpływ wilgotności względnej na wartość opałową drewna sosnowego i bukowego dla różnych form drewna.



Rys.11.2 Wpływ wilgotności względnej na wartość opałową drewna sosnowego [Kozłowski R. 1999].



Rys.11.3 Wpływ wilgotności względnej na wartość opałową drewna bukowego [Kozłowski R. 1999].

Wykresy te wskazują, że wartość opałowa tego samego gatunku maleje wraz ze wzrostem wilgotności, a wilgotność nieznacznie zmienia się w zależności od formy drewna. W tabeli 11.2 zestawiono równoważniki paliw kopalnianych z jednej tony drewna sosnowego, a w tabeli 11.3 porównanie wielkości emisji produktów spalania z węgla kamiennego i z drewna.

Tabela 11.2 Równoważnik paliw kopalnianych dla 1 t drewna sosnowego powietrznie suchego [Kozłowski R. 1999].

Rodzaj paliwa	Wilgotność [%]	Średnia wart. opał.		Ilość ciepła z 1 t paliwa [MJ]	Równoważnik 1 t drewna
		[kcal/kg]	[kJ/kg]		
Drewno sosnowe	17,7	3,750	15,675	4,361	1,00
Torf	25	3,369	14,105	3,919	1,11
Węgiel brunatny	50	2,669	11,175	3,105	1,40
Węgiel kamienny zaw. pop. 10%	4,0 – 8,0	5,900	24,662	6,862	0,63

Tabela 11.3 Porównanie wielkości emisji dla węgla kamiennego i drewna [Kozłowski R. 1999].

Rodzaj zanieczyszczenia	Wielkość emisji [g/h]			
	dla kotłowni porównawczej przy opalaniu		przy spalaniu 1 kg paliwa	
	węglem	drewnem	węgla	drewna
Pył	198	28	35	3
CO	256	185	17	19
CO ₂	12816	9288	2248	978
SO ₂	114	brak	20	brak
N ₂ O ₅	8,6	0,6	1,5	0,06

Dane liczbowe zestawione w tych tabelach wskazują, że w celu uzyskania energii cieplnej równoważnej energii ze spalania 1 tony węgla kamiennego, należy spalić 1,6 tony drewna sosnowego (2,2 - 2,3 m³). W tabeli 11.4 zestawiono fizyczne właściwości różnych postaci drewna, a w tabeli 11.5 charakterystykę zrębków drewna [Gradziuk 2002]. Oprócz drewna pozyskiwanego z produkcji leśnej, od wielu lat w krajach europejskich, a szczególnie w krajach skandynawskich rozwija się uprawa drzew i krzewów w tzw. lasach energetycznych. Uprawy te zlokalizowano na gruntach zdegradowanych, odłogach lub miejscach narażonych na erozję. W lasach tych przeważnie uprawiana jest topola i wierzba krzewiasta. W ciągu pierwszych 4 - 6 lat uprawy uzyskują rocznie się plon 5 - 6 ton suchego drewna w dalszych latach 10 - 20 ton rocznie. Podczas zbioru wilgotność względna zrębków drewna topoli wynosi 40 - 60% zrębków o masie usypowej 160 kg/ m³ i wartości opałowej 16 - 18 MJ/kg. Przy spalaniu drewna topoli z powierzchni z jednego hektara uzyskuje się średnio energię cieplną równoważną ok. 150 - 160 GJ. Sprawność cieplna pieców i kotłów, w których spala się zrębki drewna zależy od ich wilgotności. Dlatego też zarówno obniżenie wilgotności zrębków od 60% do 15 - 20% podczas ich naturalnego lub sztucznego suszenia, jak też sposób przechowywania mają istotny wpływ na jakość paliwa.

Tabela 11.4 Fizyczne właściwości różnych postaci drewna [Gradziuk P. i in. 2002].

Postać materiału	masa usypowa kg/m	Wartość opałowa MWh/m
Drewno:		
- szczapy	200 - 500	0,86 - 2,15
- wióry	200 - 300	0,86 - 1,29
- trociny	150 - 200	0,65 - 0,86
- brykiety	600 - 800	2,53 - 3,44

Tabela 11.5 Charakterystyka zrębków drzewnych, wartości opałowe zrębków drzewnych przy różnych wartościach wilgotności i zagęszczenia [Gradziuk P. i in. 2002].

Wilgotność	Gęstość zrębków				Użyteczna wartość opałowa	
	zagęszczonych		niezagęszczonych		zagęszczonych	niezagęszczonych
%	kg s.m./m ³	kg / m ³	kg s.m./m ³	kg / m ³	MWh/m ³	MWh/m ³
0	450	450	180	180	2,4	0,96
0	400	400	160	160	2,13	0,85
30	450	600	180	243	2,1	0,82
30	400	520	160	208	1,81	0,73
40	450	630	180	252	1,83	0,73
40	400	560	160	224	1,62	0,65
50	450	675	180	270	1,55	0,62
50	400	600	160	240	1,38	0,55

s.m. = sucha masa (1kg s.m. = 2kg świeżego drewna o wilgotności 50%, 1m³ zagęszczonych = 2,5 m³ zrębków niezagęszczonych)

Źródło BAPE S.A. 1999; Racjonalizacja przetwarzania i użytkowania energii. Wskaźniki techniczno-ekonomiczne i środowiskowe. Poradnik dla użytkowników energii.

Wg Sztybera [2001] przechowywanie zrębków drewna w dużych przyzmach o objętości od kilku do kilkudziesięciu tysięcy m³ i wysokości 10 - 12 m jest niewskazane, bowiem wewnątrz przyzm zachodzi proces samozagrzewania często do temperatur 50 - 70°C, czemu towarzyszy rozwój pleśni i grzybów oraz wtórne nawilgacanie się warstw powierzchniowych zrębków. Zjawisko to występuje przy różnych postaciach rozdrobnionego drewna, nawet przy stosowaniu wymuszonego przepływu nieogrzewanego powietrza przez składowane przyzmy zrębków. Dlatego też należy suszyć zrębki w mniejszych przyzmach o wysokości 1,5 - 2,0 m, najlepiej powietrzem podgrzany o temperaturze 3 - 6°C powyżej temperatury powietrza otoczenia (Podwyższenie temperatury powietrza o jeden stopień Kelwina powoduje wtedy obniżenie wilgotności względnej powietrza o ok. 6%). Szybkość i jakość suszonych zrębów zależy od temperatury i prędkości przepływu powietrza przez warstwę zrębów w przyzmie, wysokości warstwy, rodzaju drewna, rozdrobnienia i jednorodności.

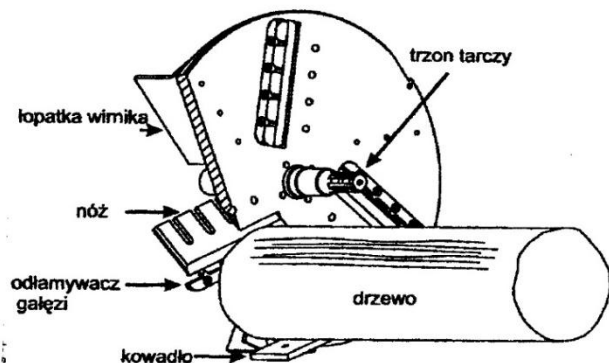
Proces wymiany ciepła i masy (wody) podczas suszenia zrębków drewna zależy również od stanu powierzchni ich cięcia [Szyber 1976]. Wynika to z anizotropii drewna, w którym ruch wody na zewnątrz, jak też i nawilgacanie wzdłuż włókien jest znacznie większe niż w poprzek włókien. Zgniecenie powierzchni drewna podczas cięcia tępym narzędziem zaślepia kapilary i utrudnia usuwanie wody ze zrębków. Produkcja zrębków drzewnych na cele energetyczne odbywa się podczas:

- trzebień w drzewostanach drewna miękkiego,
- zmiany gatunków drzew w drzewostanach,
- czyszczenia lasu z odpadów leśnych po wycince.

Trzebień drzewostanów drewna miękkiego przeprowadzane jest w celu przyspieszenia wzrostu drzew, zwiększenia plonu. Zmiana gatunku odbywa się w celu uzyskania miejsca na nasadzenie nowych gatunków drzew o wysokiej jakości i szerszym zakresie wykorzystania w przemyśle drzewnym, jak niekiedy również do celów rekreacyjnych. Podczas wyrębu drzew pozostaje w lasach znaczna masa gałęzi i wierzchołków drzew utrudniających ponowne zalesianie oraz transport w obrębie lasu. Ścięte drzewa pozostają w miejscu ścięcia przez okres letni w celu wyschnięcia i oddzielenia się igieł i liści od gałęzi. W tym okresie wilgotność drewna zostaje obniżona z ok. 55% do ok. 40%. W jesieni zrębkowanie drewna odbywa się rębarkami stacjonarnymi zawieszanymi i napędzanymi od ciągnika rębarkami samojezdnymi składającymi się z dźwigu, urządzenia do rozdrabniania, kabiny z urządzeniami sterującymi, oraz z zaczepianego zbiornika na zrębki. Wg Serupa [Serop 2001] ze względu na Rębarki dzielą się na:

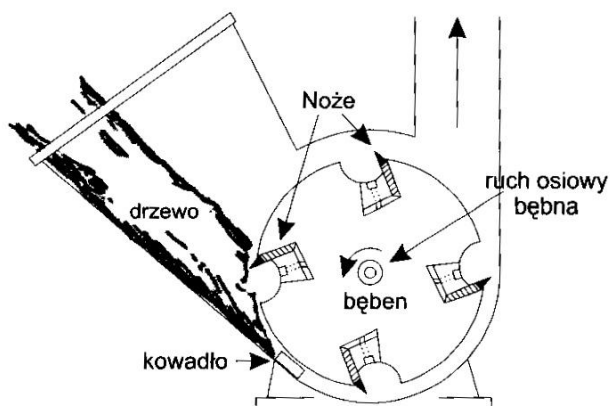
- rębarki tarczowe,
- rębarki bębnowe,
- rębarki wkrętowe.

Na rys. 11.4. pokazano budowę i działanie rębarki tarczowej, a na rys. 11.5. rębarki bębnowej.



Zasada rębarki tarczowej zapewnia, że produkowane zrębki są raczej tej samej wielkości.. podczas gdy kąt wejścia w stosunku do włókien jest taki sam, bez względu na grubość drzewa.

Rys. 11.4 Zasada działania rębarki tarczowej [Serup H. 2001].



Rys. 11.5 Zasada działania rębarki bębnowej [Serup. H. 2001].

Rębarki tarczowe przeznaczone są do rozdrabniania drewna na stosunkowo niewielkie kawałki o wymiarach 12 - 35 cm (drewno opałowe), zaś rębarki bębnowe stosowane są do rozdrabniania całego drzewa. W pozyskiwaniu zrębków o wymiarach 5 - 50 mm, bardzo istotny jest ich transport do miejsca ich składowania w sterty, które po-

winny mieć wysokość 5 – 7 m, oraz transport drogowy kołowy przewożący zrębki w kontenerach, z miejsca składowania w lesie do kotłowni. Innym sposobem przetwarzania biomasy drzewnej jest produkcja peletów i brykietów z wiórów i trocin. Pelety w formie wycinków walca mają średnicę 8 – 12 mm. Zaletą peletów jest łatwość ich transportu i składowania oraz załadunku do kotłów i pieców. Poza tym są one jedyną formą paliwa drzewnego, które może być spalane w kotłowniach i piecach węglowych. Oprócz zrębków, brykietów i peletów wykorzystuje się do spalania korę z drzew, trociny i wióry. Paliwo z drzewa spalane jest w kotłach i piecach z ręcznym załadunkiem oraz w kotłach z automatycznie sterowanym załadunkiem. W ciągu ostatnich kilku lat udoskonalono konstrukcję pieców i kotłów z automatycznym sterowaniem załadunkiem paliwa. Obecnie większość nowych kotłów i pieców posiada sprawność cieplną 75 – 90%, przy jednoczesnym obniżeniu emisji do atmosfery szkodliwych produktów spalania, głównie pyłu i tlenku węgla, co jest również wynikiem automatycznej kontroli procesu spalania. Wg Serupa [2000] kotły załadowywane ręcznie powinny być tak dobrane do ogrzewania pomieszczeń, by w najzimniejszych miesiącach moc nominalna kotłów była 2 – 3 krotnie wyższa od jej zapotrzebowana. Kotły te powinny być wyposażone w wodne zbiorniki akumulacyjne. W kotłach sterowanych automatycznie moc nominalna nie może przekraczać maksimum zapotrzebowania na ciepło w miesiącach zimowych. Przekroczenie mocy nominalnej wpływa na pogorszenie procesu spalania i trwałość kotłów.

11.2. Wierzba i trawy

W ostatnich latach, podczas poszukiwaniu innych paliw stałych niż drewno z lasów, odpadów z przemysłu drzewnego i biomasy słomy, zwrócono uwagę na wierzbę. Wierzba charakteryzuje się dziesięciokrotnie szybszym wzrostem masy niż, np. sosna. Wierzbę wykorzystuje się ponadto w powstrzymywaniu erozji gleby, rekultywacji gleby i umacniania gruntu. Ma ona także korzystny wpływ na środowisko (biodegradacja metali z osadów ściekowych, ochrona cieków wodnych). Na świecie występuje ok. 300 – 500 gatunków wierzby, w tym w Polsce 28 gatunków. Najpopularniejszymi gatunkami przeznaczonymi na cele energetyczne są gatunki: *Salix viminalis* i *Salix purpura* (wierzba konopiana). Wierzbę zbiera się co 2 – 5 lat, przy czym po dwu latach cykl uprawy prowadzi się co 3 lata. Plon suchej masy drewna w zależności od gatun-

ku, cyklu uprawy i wilgotności względnej, wynosi od 14,7 – 21,5 t/ha rok, średnio ok. 17 t/h. Wysokość wierzby krzewiastej po drugim roku uprawy osiąga 2,6 – 3,0 m i dochodzi do wysokości ok. 6,0 m w następnych latach. Z jednej karpki wierzby uzyskuje się ok. 1,0 kg suchej masy, a zatem z zalecanej uprawy 30 tys. karpk z ha uzyskuje się ok. 30 ton suchej masy. Wartość opałowa wierzby podobnie jak z drzew liściastych i iglastych, zależy także w dużym stopniu od jej wilgotności względnej. Podczas zbioru wierzby o wilgotności ok. 50 – 60% jej wartość opałowa wynosi ok. 8 – 10 MJ/kg, a po wysuszeniu do wilgotności ok. 15 – 18% ok. 15-18 MJ/kg [Dubas 2004]. Wartość energetyczna z jednej tony suchej masy drewna wynosi ok. 4,5 MWh, co odpowiada wartości opałowej podczas spalania 1 tony miału węglowego albo 500 litrów oleju opałowego, [Smolec 1955]. Zarówno sadzenie jak i zbiór wierzby może odbywać się ręcznie lub w sposób zmechanizowany. Do sadzenia stosuje się sadzarki produkowane w Polsce lub w Danii, sadzarki szwedzkiej firmy Salixmaskiner AB o wydajności jednego ha/h, albo też adaptowane czterorzędowe sadzarki ogrodnicze. Ręczny zbiór wierzby jest bardzo pracochłonny i wymaga ok. 80 – 150 roboczogodzin na 1 ha przy zatrudnieniu 16 osób przy 9 godzinnym dniu pracy. Najwyższą wydajność zbioru i jednocześnie zrębkowania wynoszącą ok. 5 – 8 ha dziennie, uzyskuje się przy zbiorze kombajnem firmy Claus – Jaguar lub kombajnem J/S Kepler, zmodyfikowanymi i przerobionymi z kombajnów do zielonek i kukurydzy. Po zbiorze (ręcznym lub kosiarkami) wierzba cięta jest na krótkie odcinki o długości 2 – 150 cm na tzw. sieczkę. Rozdrobnioną wierzbę przechowuje się w przyzmach lub kontenerach, gdzie odbywa się naturalne suszenie. Jest to możliwe tylko podczas dobrych warunków atmosferycznych, kiedy wilgotność względna powietrza otoczenia nie przekracza 80 – 90% i wysokościach przyzma nie przekraczających 2,5 m [Szyber 2001].

Na cele energetyczne można również wykorzystać rośliny wieloletnie z rodziny krzewów ślázowatych jak, np. ślázowiec pensylwański oraz słonecznik bulwiasty oraz topinambur z rodziny astrowatych. Spośród wieloletnich traw najbardziej do celów energetycznych przydatny jest miskant olbrzymi, miskant cukrowy, spartina preriowa oraz palczatka. Miskant olbrzymi osiąga wysokość 2 – 3 m, zaś miskant cukrowy 1 – 4 m. Spartina preriowa tworzy kępy o wysokości ok. 2 m. palczatka również tworzy kępy o wysokości źdźbeł 1 – 2,5 m. Ze względu na wysokie plony wynoszące rocznie ok. 20 t suchej substancji z hektara na rok i długotrwałość plantacji mającej ok. 20 lat, najszerze zastosowanie do celów energetycznych znalazł miskant olbrzymi. Ze względu na dużą

zawartość celulozy i ligniny znajduje on również zastosowanie w przemyśle papierniczym, przemyśle chemicznym i budownictwie. Zbiór miskanta odbywa się kosiarkami rotacyjnymi, prasami zwijającymi i kombajnami. Podczas zbioru prasami zwijającymi wydajność, wynosi ok. 0.9 ha/ h, a podczas zbioru miskanta o wilgotności względnej 15 – 24% kombajnami wynosi ok. 0,6 ha/ h. Warunkiem bezpiecznego przechowywania zebranego miskanta jest jego wilgotność względna w granicach 18 – 20%. Powyżej tej granicy wilgotności, miskantus powinien być wysuszony podgrzewanym powietrzem w suszarkach podłogowo – rusztowych lub podłogowo – kanałowych. Wartość opałowa miskantusa o wilgotności ok. 18,0% wynosi 15 – 17 MJ/kg. Spalanie miskanta, zebranego z powierzchni jednego ha, przy plonie 30 ton suchej masy, równoważne jest spalaniu 20 ton węgla o wartości opałowej 25 MJ/kg.

11.3. Słoma

W produkcji ziarna zbóż i roślin oleistych oraz strączkowych uzyskuje się w Polsce ok. 30 mln ton słomy. Do niedawna słoma używana była w rolnictwie jako materiał ściółkowy w chowie zwierząt i jako składnik pasz. Począwszy od lat osiemdziesiątych nastąpił spadek zapotrzebowania na słomę w produkcji zwierzęcej i na cele nawozowe. Szacuje się, że nadwyżki słomy w ostatnich latach wynoszą średnio 10 – 14 mln ton. Od wielu lat w krajach zachodniej Europy słoma uznana jest za pełnowartościowy surowiec, który może być wykorzystany do spalania. Bogate doświadczenie w tym zakresie posiada Dania, Austria i Niemcy, gdzie słoma wykorzystywana jest w dość szerokim zakresie do spalania w lokalnych kotłowniach. Spalanie 1,5 tony słomy odpowiada spalaniu jednej tony węgla. Przy produkcji ok. 30 mln ton rocznie jej wartość energetyczna wynosi ok. 490 PJ. Przy wykorzystaniu tylko 10% tej masy słomy na cele energetyczne pozyskuje się ok. 49 PJ rocznie, co jest równoznaczne ze spalaniem ok. 2,0 mln ton węgla. Słoma zbożowa lub rzepakowa zebrana z jednego ha przy plonie 3,5 – 3,8 t/ha umożliwia uzyskanie energii cieplnej równoważnej spalaniu 1,5 tony węgla. Masa słomy zbożowej zbieranej z powierzchni 5 ha umożliwia ogrzanie jednorodzinnej domu wiejskiego w okresie zimowym. Do istotnych cech termofizycznych charakteryzujących słomę zalicza się:

- wartość opałową,

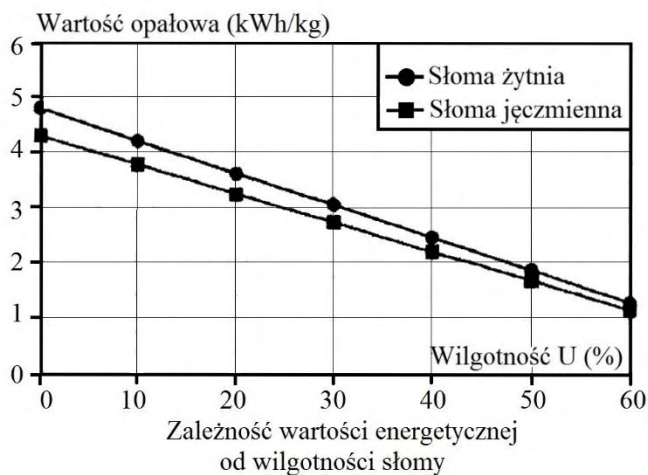
- ciepło spalania,
- gęstość usypową,
- wilgotność względną.

W tabeli 11.6 zestawiono wilgotności względne i wartości opałowe słomy zbożowej, rzepakowej i kukurydzy.

Tabela 11.6 Wartości opałowe słomy [Tyminski J. 1997].

Rodzaj słomy	Wartość opałowa słomy suchej, MJ/kg	Zawartość wilgoci w słomie świeżej, %	Wartość opałowa słomy świeżej, MJ/kg
pszenna	17,3	12 - 22	12,9 - 14,9
jęczmienna	16,1	12 - 22	12,0 - 13,9
kukurydziana	16,8	50 - 70	3,3 - 7,2

Wartość opałowa suchej słomy wynosi 16 - 17 MJ/kg. Na wykresie rys. 11.6 pokazano wpływ względnej wilgotności słomy na wartość opałową dla słomy żytniej i jęczmiennej.



Rys. 11.6 Zależność wartości opałowej od wilgotności słomy [Grzybek A. i in. 2001].

Za optymalną wilgotność słomy, jako paliwa, uważa się wilgotność względną 18 - 20%. Nadmierna wilgotność słomy nie tylko ma wpływ na obniżenie się wartości opałowej, ale wpływa również na proces spalania i wzrost emisji zanieczyszczeń w spalinach. Słoma zawiera znaczne ilości chloru i azotu, a więc pierwiastków, które w procesie spalania emituje tlenki azotu NO_x , a zawartość krzemu i potasu powoduje w paleniskach pieców i kotłów zapiekanie rusztów żużlem oraz powstawanie korozji na elementach metalowych. Emisje tlenków azotu są wyższe niż podczas spalania węgla. Z właściwości fizykochemicznych słomy, zrębów oraz paliw kopalnianych, zestawionych w tabeli 11.7 wynika, że skład chemiczny słomy żółtej i tzw. słomy szarej poddanej na polu zmiennym warunkom atmosferycznym różnią się. Wymywane na polu związki chloru, potasu i krzemu sprawiają, że słoma szara posiada znacznie lepsze właściwości jako paliwo niż słoma żółta. Słoma może być spalana w postaci sieczeni, sprasowanych balotów. oraz w postaci granulatu (peletów).

Tabela 11.7 Porównanie właściwości słomy z innymi paliwami [Wichrowski R. 1994].

Parametr	Jednostka	Słoma żółta	Słoma szara	Węgiel	Gaz	Zrębki drzewne
Wilgotność	% wag.	15	15	12	0,00	40
Zawartość popiołu	% s.m.	4	3	12	0,00	0,6 -1,5
Zawartość węgla	% wag.	42	43	59	75	50
Zawartość tlenu	% wag.	37	38	7,3	0,9	43
Zawartość wodoru	% wag.	5	5,2	3,5	24	6
Zawartość chloru	% wag.	0,75	0,2	0,08	-	0,02
Zawartość azotu	% wag.	0,35	0,41	1	0,9	0,3
Zawartość siarki	% wag.	0,16	0,13	0,8	0	0,05
Składniki lotne	% wag.	70	73	25	100	70
Wartość opałowa	MJ/kg	14,4	15	25	48	10,4
Ciepło spalania	MJ/kg	18,2	18,7	32	48	19,4
Temperatura mięknięcia popiołu	°C	950	1100	1175	-	
Temperatura kuleczkowania popiołu	°C	1050	1150	1225	-	
Temperatura płynięcia popiołu	°C	1150	1250	1275	-	

11.4. Spalanie biomasy

Paliwo składa się wtedy z substancji palnej i balastu. Substancjami palnymi są węgiel C, wodór H, siarka S i inne pierwiastki ulegające spalaniu, balastem zaś składniki, które nie biorą bezpośredniego udziału w procesie spalania, np. woda i popiół w paliwach stałych. Dla drewna opałowego temperatura zapłonu wynosi ok. 350 °C, [Pabis J. 1987]. Spalanie może być całkowite lub niecałkowite oraz zupełne i niezupełne. Spalanie całkowite i zupełne odbywa się wtedy, gdy cały węgiel (pierwiastek) zawarty w paliwie spala się na CO₂, wodór na H₂O, a siarka na SO₂ lub SO₃. Spalanie niecałkowite ma miejsce wtedy, gdy ciała stałe, będące produktami spalania, zawierają w sobie nie spalone składniki substancji palnej, takie jak sadza, koksik lotny i węgiel zawarty w żużlu. Spalanie niezupełne ma miejsce wówczas, gdy gazy spalinywe zawierają takie składniki, które mogą ulec dalszemu spalaniu. Technologia spalania paliw stałych, np. drewna, jest znacznie bardziej złożona, niż spalanie gazu lub paliw ciekłych. Proces spalania drewna odbywa się na trzech etapach:

- ogrzewania i suszenia,
- gazyfikacji i spalania właściwego,
- dopalanie się węgla drzewnego.

W czasie ogrzewania drewna następuje proces wymiany ciepła i masy (wody). Woda gromadzona na powierzchni drewna zostaje pod wpływem temperatury zmieniona w parę wodną. Zachodzi tu również proces gazyfikacji. Gaz spalany jest ponad paliwem, a uzyskane tą drogą ciepło wykorzystane jest do podtrzymania gazyfikacji i odparowywania wody. Jako pozostałość zgazowania drewna tworzy się węgiel drzewny, który spala się w temperaturze ok. 800°C. Temperatura zapłonu dla drewna twardego wynosi ok. 300°C. Dla drewna o dużej zawartości żywicy temperatura zapłonu jest znacznie niższa i wynosi ok. 180 - 200°C. Bardzo istotnym czynnikiem mającym wpływ na proces, a szczególnie na prędkość spalania, ma rozmiar cząstek rozdrobnionego drewna lub innego paliwa z biomasy. Wybór techniki i technologii spalania w dużym stopniu zależy od stopnia rozdrobnienia. W miarę rozdrobnienia rośnie powierzchnia właściwa cząstek w tej samej masie drewna. Stwarza to bardzo dobre warunki do szybkiego ich nagrzewania do temperatury zapłonu i całkowitego ich spalania, co ma wpływ na sprawność cieplną pieców. Przykładem rozdrobnionego drewna są zręb-

ki oraz odpady z przemysłu drzewnego (trociny, wióry) przetworzone na brykiety. Drewno pozyskiwane z lasów, plantacji drzew energetycznych, plantacji upraw wierzby, z sadów owocowych i odpady drewna z przemysłu drzewnego, spala się w postaciach:

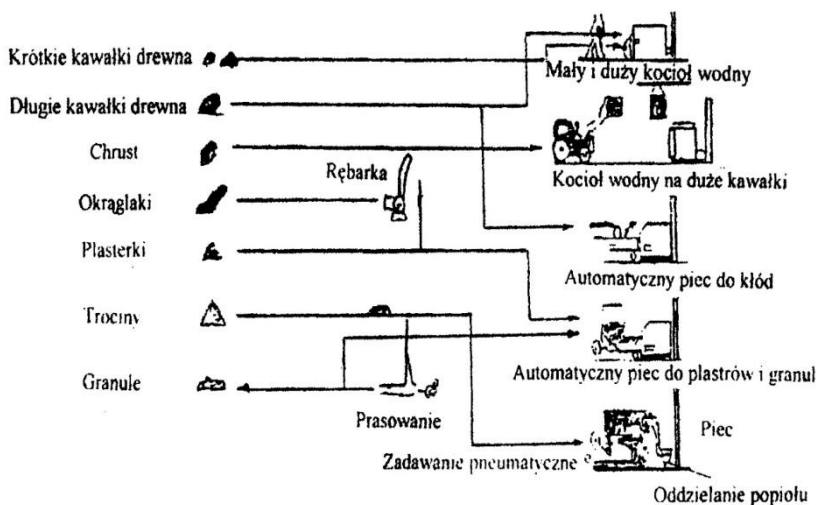
- krótkich kawałków (gałęzie, zrębki),
- długich kawałków (gałęzie i zrębki),
- drewno w wiązkach,
- drobne odpadki drewna,
- drewno w plastrach,
- trocin,
- kory,
- brykietów i peletów.

W tabeli 11.8 przedstawiono właściwości termofizyczne różnych postaci słomy i zrębków drewna jako paliwa.

Tabela 11.8 Fizyczne właściwości z biomasy [Tyminski J. 1997].

Postać materiału	Masa usypowa kg/m ³	Wartość opałowa MWh/m ³
Słoma:		
- luźna	20 - 50	0,07 - 0,16
- pocięta	40 - 60	0,13 - 0,19
- duże bele prostokątne	70 - 130	0,23 - 0,43
- duże bele okrągłe	60 - 90	0,19 - 0,29
- małe bele wys. zgniotu	50 - 110	0,16 - 0,36
- brykiety	300 - 450	0,99 - 1,48
Drewno:		
- szczapy	200 - 500	0,86 - 2,15
- wióry	200 - 300	0,86 - 1,29
- trociny	150 - 200	0,65 - 0,86
- brykiety	600 - 800	2,53 - 3,44

Dla spalania poszczególnych postaci drewna stosuje się różne rodzaje pieców. Do spalania długich i krótkich kawałków drewna stosuje się małe i duże kotły wodne oraz piece do ogrzewania pomieszczeń mieszkalnych. Drewno w długich kawałkach i w wiązkach spalane jest w piecach z mechanicznym załadunkiem, w postaci peletów i brykietów, z automatycznym załadunkiem i sterowaniem procesem spalania. Na schemacie rys. 11.7 przedstawiono wielowariantowy schemat spalania różnych postaci drewna, [Stehler 1989].



Rys. 11.7 Wielowariantowy schemat spalania drewna [Stehler A. 1984].

W odróżnieniu od pieców opalanych węglem lub koksem, piece opalane drewnem wymagają znacznie większych powierzchni rusztów i objętości komór spalania oraz ich wysokości. Wyższe wysokości komór spalania wynikają ze spalania długim płomieniem znacznych zawartości części lotnych spalających się. W tabeli 11.9 podano natężenie ciepłe rusztów q_r (wyraża ono ilość ciepła uzyskaną ze spalania 1 kg paliwa na powierzchni rusztu 1 m^2 w ciągu godziny) i natężenia komór spalania q_v dla pieców bezpośredniego spalania węgla, drewna i torfu.

Tabela 11.9 Natężenie cieplne rusztu i komór spalania w piecach bezpośredniego ogrzewania [Pabis J. 1983].

Rodzaj paleniska i paliwa	Cieplne natężenie rusztu q_r , kJ/(m ² h)	Cieplne natężenie komory spalania q_v , kJ/(m ³ h)
Palenisko rusztowe poziome - drewno, torf w kawałkach, - węgiel kamienny o grub. 125 mm, - antracyt w warstwie o grub. 80 mm.	2500 – 3350 2000 – 2500 2000 – 2500	830 – 1050 1050 – 1300 1050 – 1300
Paleniska rusztowe nachylone - opiłki i odpadki pilowanego drewna, - paździerze.	1300 – 2000 830 – 1500	
Paleniska łańcuchowe - szczapy, - węgiel kamienny.	2900 – 3350 2500 – 2900	

Na podstawie danych zawartych w tabeli, można obliczać powierzchnie rusztu i objętość komory spalania. Dla dowolnego pieca, znając natężenie cieplne rusztu i komory spalania i wartość opałową paliwa, można orientacyjnie obliczyć, jaką masę paliwa można spalić w piecu [Pabis J. 1987]. Powierzchnię rusztu F_r określa wzór:

$$F_r = \frac{BW_d}{q_r}, \text{ m}^2 \quad (11.5)$$

a skład masy spalanej paliwa:

$$B = \frac{q_{rr} F_r}{W_d}, \text{ kg/h} \quad (11.6)$$

w których:

B – masa paliwa, kg,

W_d – wartość opałowa paliwa, kJ/kg,

q_r – cieplne natężenie rusztu, kJ/kg,

Objętość komory spalania można obliczyć z wzoru:

$$V_k = \frac{BW_d}{q_v}, \text{m}^3 \quad (11.7)$$

w którym:

q_v – jest natężeniem cieplnym komory spalania, $\text{kJ}/(\text{m}^3\text{h})$.

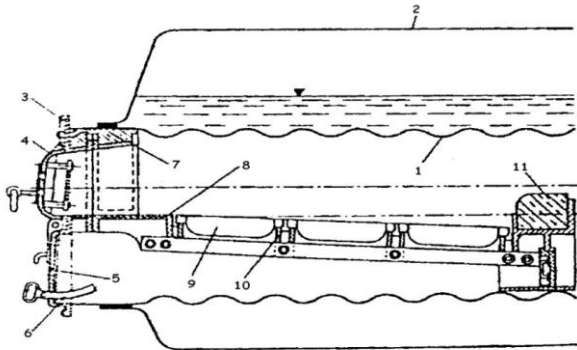
Masę spalonego paliwa wyznacza równanie:

$$B = \frac{V_k}{q_v}, \text{kg/h} \quad (11.8)$$

W podgrzewaczach powietrza i kotłach stosowane są ruszty:

- poziome,
- pochyłe schodkowe,
- pochyłe z mechanizmem posuwisto zwrotnym,
- mechanicznym taśmowym.

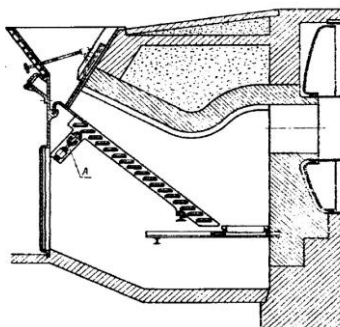
Na rys. 11.8 pokazano palenisko z rusztem płaskim i załadunkiem ręcznym.



Rys. 11.8 Palenisko z rusztem płaskim i ręcznym załadunkiem [Orłowski P. i inni 1979].

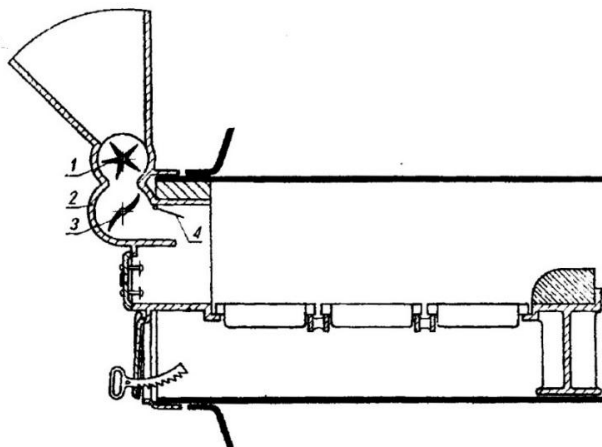
Tego rodzaju ruszty stosowane są w kotłach pionowych, płomieniowych oraz w małych kotłach wodno-rurkowych. Kąt pochylenia rusztu zależy od rodzaju spalanej biomasy. Dla trocin i drewna wynosi on

40°, przy grubości warstwy paliwa 200 – 700 mm. Na rys. 11.9 pokazano palenisko z rusztem schodkowym. Spalane są w nich trociny, kora, granule drzewne, torf i węgiel brunatny.

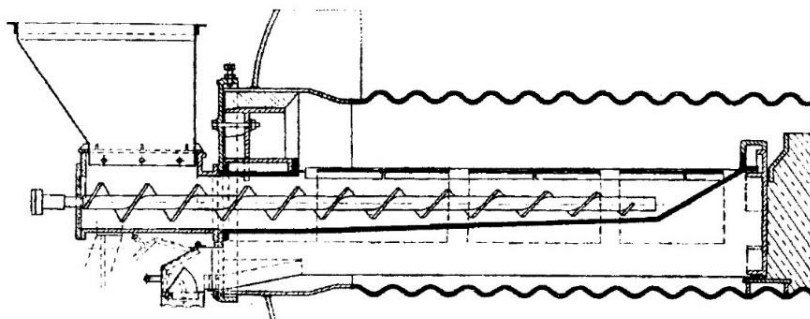


Rys. 11.9 Palenisko z rusztem schodkowym [Orłowski P. i in. 1979].

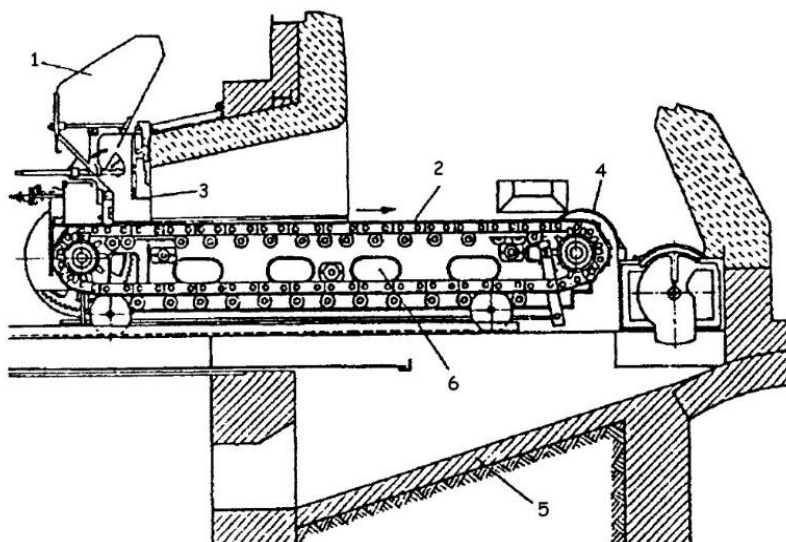
Znacznie lepsze są paleniska z mechanicznym załadunkiem komory spalania. Na rys. 11.10 i 11.11 pokazano palenisko z rusztem płaskym i mechanicznym podawaniem paliwa, palenisko z rusztem płaskim i dozownikiem ślimakowym na rys.11.12 palenisko z rusztem ruchomym gąsienicowym.



Rys. 11.10 Palenisko z rusztem płaskim i mechanicznym podawaniem paliwa: 1 - dozownik, 2 - obudowa, 3 - wyrzutnik dwuskrzydłowy, 4 - kłapa regulacyjna [Orłowski P. i in. 1979].



Rys. 11.11 Paleniska z rusztem płaskim i dozownikiem ślimakowym [Orłowski P. 1979].



Rys. 11.12 Palenisko z rusztem ruchomym gąsienicowym: 1 - zasobnik, 2 - ruszt gąsienicowy, 3 - warstwownica, 4 - ruszt, 5 - przesłona regulacyjna, [Orłowski P i in. 1979].

Przykład

W kotle do ogrzewania pomieszczeń opalonym węglem spala się $B_h = 13,4$ kg/h węgla kamiennego o wartości opałowej $W_d = 25$ MJ/kg.

Powierzchnia rusztu płaskiego wynosi $F_r = 0,1 \text{ m}^2$. Należy sprawdzić czy w kotle można również spalać drzewo o wartości opałowej $W_d = 16 \text{ MJ/kg}$. Jaka jest objętość komory spalania V_k i moc cieplna Q dla kotła opalanego węglem, a jaka opalanego drewnem

Objętość V_k komory spalania wyniesie:

$$V_k = \frac{B_h W_d}{q_v} = \frac{13,4 \cdot 25000}{1200} = 0,279 \text{ m}^3$$

Ciepłne natężenie komory spalania q_v będzie równe 1200 kJ/m^3

Moc cieplna Q wyniesie:

$$Q = \frac{B_h}{W_d \eta} = \frac{13,4}{25 \cdot 0,8} = 418,7 \text{ MJ}$$

Przy ciepłym obciążeniu rusztu $q_r = 3000 \text{ kJ/m}^2\text{h}$ można w kotle spalić masę drewna równą:

$$B_h = \frac{F_r q_r}{W_d} = \frac{0,1 \cdot 3000}{16} = 18,75 \text{ kg/h}$$

gdzie:

$$F_r = 0,1 \text{ m}^2,$$

$$q_r = 3000 \text{ kJ/m}^2\text{h},$$

$$W_d = 16 \text{ MJ/kg}.$$

Moc cieplna Q kotła podczas spalania drewna wyniesie:

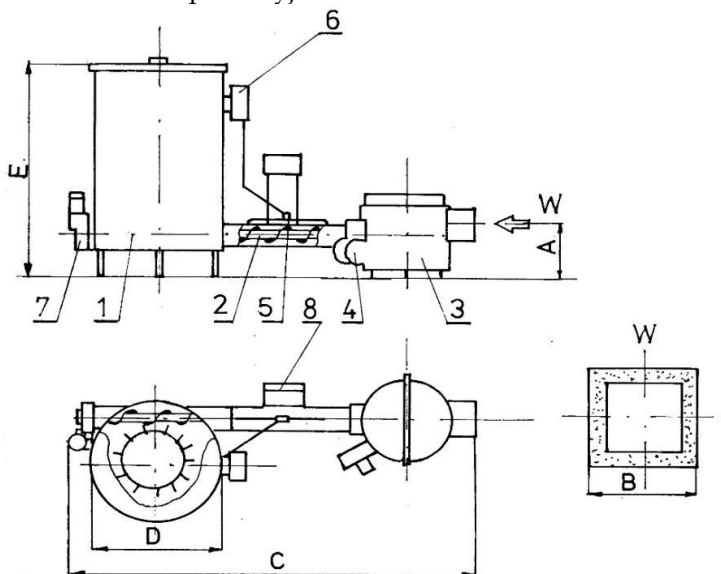
$$Q = \frac{B_h}{W_d \eta} = \frac{18,75}{16 \cdot 0,8} = 375,0 \text{ MJ}$$

a objętość V_k spalania:

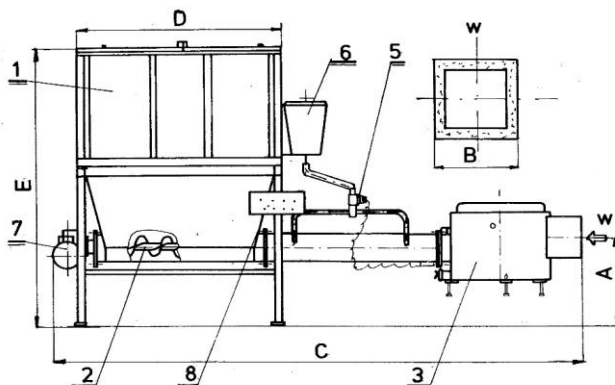
$$V_k = \frac{B_h W_d}{q_v} = 0,29 \text{ m}^3$$

Jak wynika z obliczeń w kotle można spalać zarówno węgiel jak i drewno. Należy się jednak liczyć z tym, że podczas spalania drewna uzyskuje się niższą moc cieplną przy większej masie spalanego drewna.

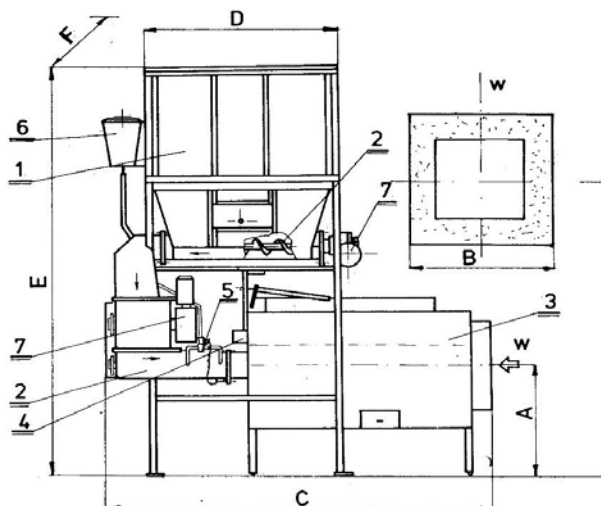
Na schematach rys. 11.13, 11.14 i 11.15 pokazano trzy konstrukcyjne wersje automatycznego zespołu spalania odpadów AZSO produkcji Zakładów Maszynowych HAMECH w Hajnówce, a w tabeli 11.10 parametry techniczne i eksploatacyjne.



Rys. 11.13 Automatyczny zespół spalania odpadów AZSO - 25, 50, 100: 1 - zbiornik paliwa, 2 - transporter ślimakowy, 3 - przedpalenisko, 4 - wentylator nadmuchu, 5 - zastaw termostacyjny z czujnikiem p. poż., 6 - zbiornik wody gaśniczej, 7 napęd transportera, 8 - sterownik, [Prospekt „Automatyczny zespół spalania odpadów AZSO” Zakłady Mechaniczne HAMECH w Hajnówce].



Rys.11. 14 „Automatyczny zespół spalania odpadów AZSO - 100 ze zbiornikiem kwadratowym”: 1 - zbiornik paliwa, 2 - transporter ślimakowy, 3 - przedpalenisko, 4 - wentylator nadmuchu, 5 - zestaw termostaticzny z czujnikiem p. poz., 6 - zbiornik wody gaśniczej, 7 - napęd transportera, 8 - sterownik, [Prospekt „Aromatyczny zespół spalania odpadów AZSO” Zakłady Mechaniczne HAMEGH w Hajnówce].



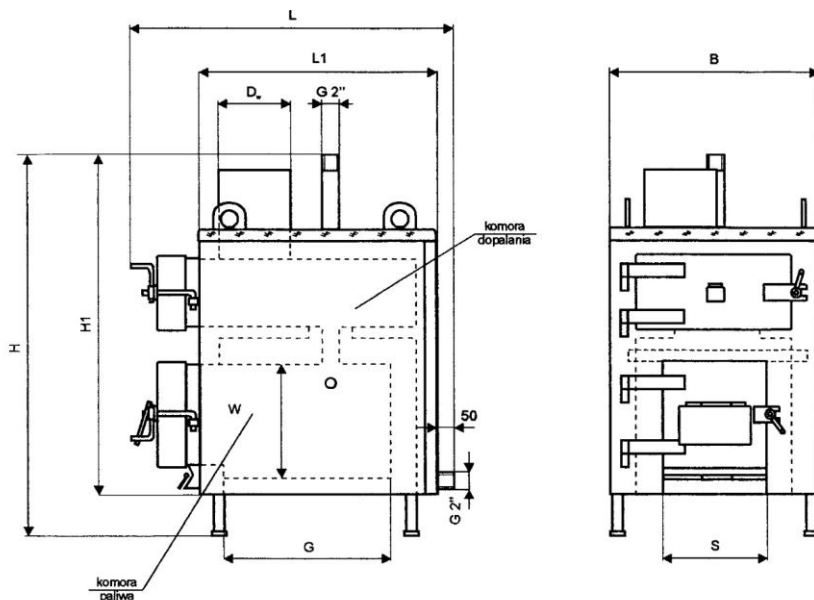
Rys.11. 15 Automatyczny zespół spalania odpadów AZSO - 250: 1 - zbiornik paliwa, 2 - transporter ślimakowy, 3 - przedpalenisko, 4 - wentylator nadmuchu, 5 - zestaw termostaticzny z czujnikiem p. poz., 6 - zbiornik wody gaśniczej, 7 - napęd transportera [Prospekt Automatyczny zespół spalania odpadów AZSO” Zakłady maszynowe HAMEH w Hajnówce].

Tabela 11.10 Parametry techniczne i eksploatacyjne automatycznego zespołu spalania, [konspekt Zakładów Maszynowych HAMECH w Hajnówce].

Lp	Parametr		AZSO-25	AZSO-50	AZSO-100	AZSO-250	AZSO-500
1	Nominalna moc cieplna	KW kcal/h	25 21500	50 43000	100 86000	250 215000	500 430000
2	Zużycie paliwa (przy mocy nominalnej)	kg/h mp/dob	12 1,4	25 2,4	50 4,8	123 11,8	250 24
3	Pojemność zbiornika	m ³	0,65	0,65	0,65 lub 1,5	2,3	2,3
4	Zapotrzebowanie mocy	kW	0,6	0,6	0,6	2 x 0,6	2 x 0,6
5	Napięcie zasilania	V	220/380	220/380	220/380	220/380	220/380
6	Powierzchnia mieszkalna możliwa do ogrzewania	m ²	160	320	640	1600	3200
7	Temp. spalin na wylocie z AZSO	°C	1000	1000	1000	1000	1000
8	Temp. (zalecana) za kotłem (wyminiakiem)	°C	200 – 250	200 – 250	200 – 250	200 – 250	200 – 250
9	Sprawność urządzenia (z kotłem)		0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
10	Powierzchnia kotła (wyminiaka) współpracującego z AZSO	m ²	2 – 4	6 – 8	10 – 16	32 – 36	50 – 56
11	Rodzaj kotła		Wodny o analogicznej mocy cieplnej.				
12	Sterowanie procesem spalania		automatycznie				
13	Ciężar urządzenia	kG	280	320	450	2300	3500

AZSO przeznaczony jest do spalania rozdrobnionych odpadów drzewnych, zrębków, wiórów, trocin i kory o granulacji max. 30 mm i wilgotności względnej do 50%. Zespół ten może współpracować z kotłem do ogrzewania pomieszczeń mieszkalnych, szklarni, tuneli folio-

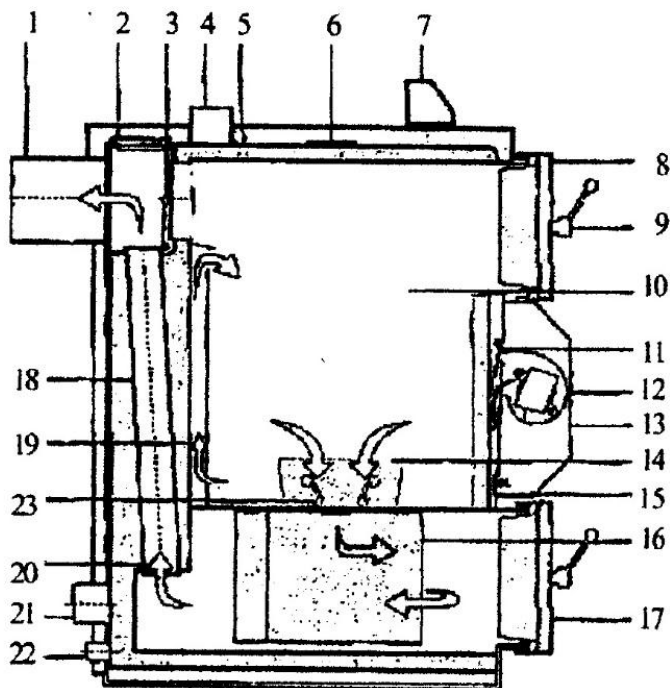
wych, pomieszczeń warsztatowych, suszarek produktów rolniczych. Paliwo ze zbiornika 1 przenośnikiem ślimakowym 2 dozowane jest do przed paleniska 3 gdzie następuje zgazowanie paliwa i spalanie w czopuchu pieca. Na rys. 11.16 pokazano schematycznie kotły centralnego ogrzewania BLOWAT, produkcji METALURG w Ścinawie Polskiej k. Oławy, w których spala się drewno i słomę.



Typ kotła	L	B	H	L1	H1	D _w	Komora paliwa			Ciężar [kg]	Ogrzewana powierzchnia [m ²]	Cena	
							G	W	S				Pojemność [l]
D100	1102	792	1298	832	950	200	550	426	440	100	620	100	4 150
U245	1470	898	1482	1200	1135	250	926	530	546	245	1000	200	5 500
U300	1525	898	898	1325	1135	250	1050	530	546	300	1100	250	5.700
U360	1795	898	1482	1525	1135	250	1250	530	546	360	1250	280	6 000
S4	1470	1402	1892	1200	1545	250	926	934	1050	4 kostki słomy	1800	200	6 900
S6	1870	1402	1892	1600	1545	250	1326	934	1050	6 kostek słomy	2200	250	7 800

Rys. 11.16 Kocioł centralnego ogrzewania firmy BLOWAT opalane drewnem i słomą [Projekt].

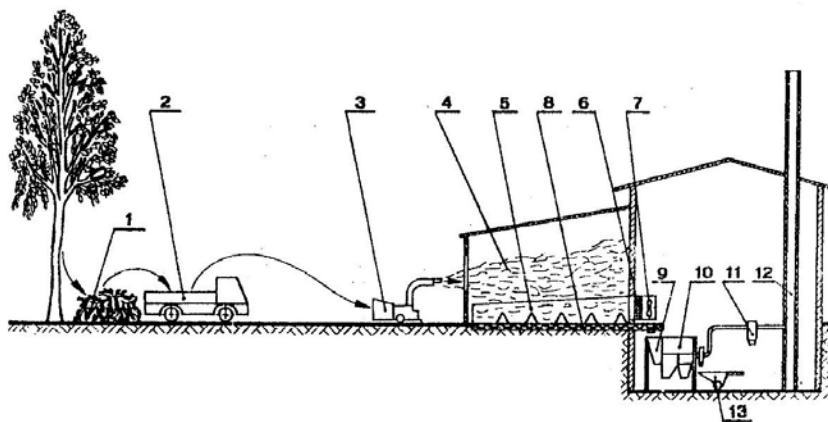
Kocioł D 100 opalany jest drewnem, kotły U - 360, 300 i U - 245 również drewnem i pomocniczo słomą, a kotły S 4 i S 6 opalane są słomą i drewnem. Innym piecem, również ze zgazowaniem drewna, jest kocioł VIGAS produkcji słowackiej, pokazany na rys. 11.17.



Rys. 11.17 Kocioł VIGAS produkcji słowackiej ze zgazowaniem drewna: 1 - ujęcie kominowe, 2 - wieko wymiennika, 3 - kłapa kominowa, 4 - ujęcie wody wypustowej, 5 - awaryjny termostat, 6 - termometr, 7 - regulacja, 8 - górne drzwiczki, 9 - uchwyt zamykania/ otwierania drzwiczek, 10 - komora zgazowania 11 - kłapa wentylatora, 12 - wentylator, 13 - obudowa wentylatora, 14 - dysza z betonu ogniotrwałego, 15 - regulowana osłona wtórnego powietrza, 16 - komora spalania [Gradziuk P. i in. 2002].

Kotły produkowane są o mocach cieplnych 25,40,60, i 80 kW. W kotle mogą być spalane polana drewna, zrębki, wióry i trociny. Kocioł wyposażony jest w urządzenie sterujące z mikroprocesorem, co wpływa na bardzo dobre spalanie paliwa i uzyskiwanie sprawności cieplnej

ok.85%. Na rys. 11.18 pokazano schematycznie sposób spalania zrębków drewna w kotle fluidalnym opracowanym w ECBREC, IBMER. Zrębki drewna pozyskiwane były z pielęgnacji terenów zieleni miejskiej w Otwocku i spalane w piecu fluidalnym o mocy 150 kW, zlokalizowanym w ZOM (Zakład Oczyszczenia Miasta, Otwock), zastosowanym do ogrzewania szklarni o powierzchni 300 m².

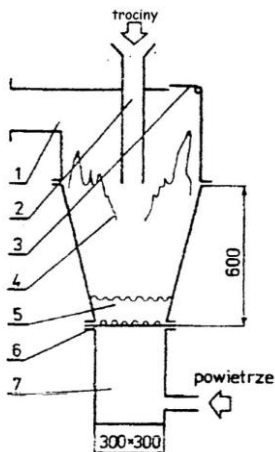


Rys. 11.18 Technologia spalania zrębków drewna w kotle fluidalnym: 1 - odpady z pielęgnacji drzew, 2 - transport kołowy, 3 - rębarka, 4 - zrębki, 5 - suszarka podłogowo-kanalowa, 6 - podgrzewacz powietrza, 7 - wentylator, 8 - przenośnik ślimakowy, 9 - zasobnik pieca, 10 - piec fluidalny, 11 - cyklon, 12 - komin, 13 - wózek [ECBREC, IBMER,2002].

Odpady z pielęgnacji drzew 1 transportem kołowym 2 dostarczane były do rębarki 3. Po rozdrobieniu drewna, zrębki 4 transportowane były do suszarki podłogowo-kanalowej 5 będącej jednocześnie magazynem zrębków o powierzchni 50 m². W suszarce zrębki suszone były powietrzem niepodgrzany i podgrzany 6 (w zależności od pory roku i warunków atmosferycznych) tłoczonym wentylatorem 7. Wysuszone zrębki przenośnikiem ślimakowym 8 transportowane były do zasobnika pieca 9. Zrębki spalane były w piecu fluidalnym 10 zaś spaliny cyklonem 11 i kominem 12 wydane na zewnątrz budynku. Popiół wywożony jest wózkiem 13. W ostatnich latach zaczęto wprowadzać do praktyki kotły oparte na procesie fluidyzacji. Zjawisko fluidyzacji polega na nadaniu,

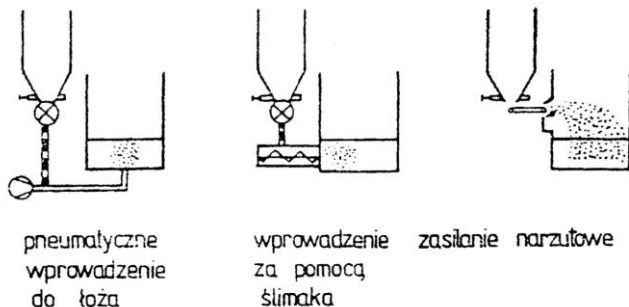
pod wpływem przepływającego od dołu przez warstwę cząstek strumienia powietrza o odpowiedniej prędkości i ciśnieniu, warstwie rozdrobnionych cząstek paliwa znajdujących się w komorze spalania cechu gęstości. W takich warunkach warstwa cząstek ulega spulchnieniu i intensywnemu mieszaniu, co w rezultacie powoduje znaczne zwiększenie powierzchni cząstek omywanych przez powietrze. Proces fluidyzacji umożliwia więc znaczny wzrost intensywności spalania, przy jednoczesnym zmniejszeniu objętości komory spalania w porównaniu do kotłów tradycyjnych.

W paleniskach fluidalnych proces spalania zachodzi przy niskich temperaturach, ok. 800 – 900°C, co wpływa w efekcie na znaczne zmniejszanie się masy groźnych dla środowiska tlenków azotu podczas spalania biomasy. Zachodzące podczas spalania słomy reakcje chemiczne, wykorzystywane są do wiązania siarki zawartej w paliwach poprzez reakcję SO_2 z tlenkiem wapnia uzyskanym ze zmielonego kamienia wapiennego, dodawanym do paleniska [Tymiński 1997]. Intensywne mieszanie cząstek paliwa z powietrzem w złożu fluidalnym, jak też niska temperatura złoża, (niższa od temperatury topnienia popiołu), umożliwia spalanie niskokalorycznych paliw z biomasy o wartości opałowej począwszy od 6 MJ/kg i wilgotności względnej poniżej 70% (świeżo zebrana słoma z kukurydzy, wierzba wiciowa, spartina preriowa, róża wielokwiatowa miskant olbrzymi) o wilgotności względnej podczas zbioru od 30 do 60%) [Tyminski 1999, Lisowski 2010]. W piecach z paleniskiem fluidalnym, uzyskuje się sprawności spalania ok. 98%. Zaletą pieców fluidalnych jest możliwość spalania różnych paliw i odpadów z biomasy, np. trocin, odpadków drewna, wierzby, słomy, łętów ziemniaczanych, strąków fasoli, zepsutego ziarna zbóż, wytlóków z buraków i nasion roślin oleistych oraz innych odpadów z produkcji rolniczej. Ważnym elementem prawidłowej eksploatacji stosowania pieców fluidalnych jest dobre przygotowanie surowców do spalania, tj. przechowywanie ich z możliwością suszenia, rozdrabniania, transportu i zasilania paleniska pieca. Na rys. 11.19 pokazano palenisko do spalania odpadów drewnianych.



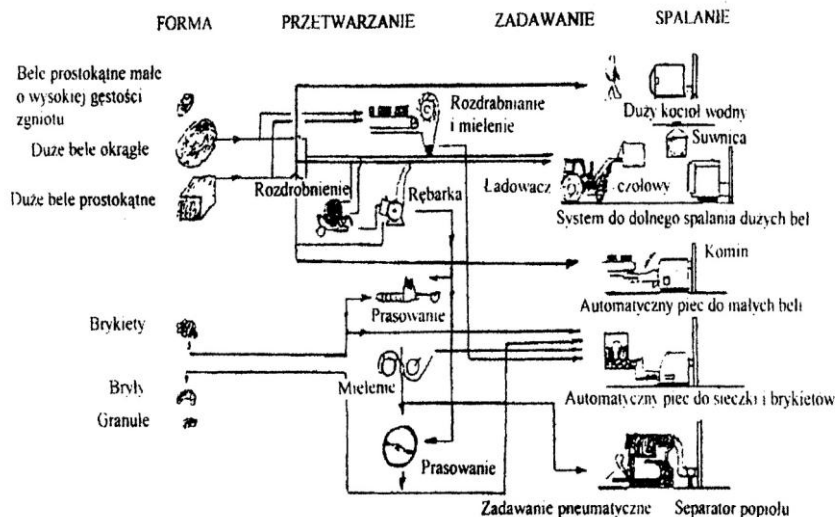
Rys. 11.19 Technologia spalania zrębków drewna w kotle fluidalnym: 1 - wylot spalin, 2 - rura zasypowa, 3 - kłapa przeciwybuchowa, 4 - płomień, 5 - złożo piaskowe fluidalne, 6 - dno sitowe, 7 - komora podsitowa [Tyminski J. 1997].

Do komory spalania o kształcie stożkowym od góry podawane są trociny. Powietrze z wentylatora tłoczone jest od dołu poprzez dno sitowe do złoża trocin. Spaliny odprowadzane są z komory spalania przewodem rurowym w górnej części komory. Warunkiem uzyskania prawidłowego procesu fluidyzacji jest dobór odpowiedniej pozornej prędkości przepływu powietrza (odniesionej do niezapełnionego paliwem dna komory spalania), statycznego ciśnienia strumienia powietrza. Na rys. 11.20 pokazano sposoby zasilania paliwem komory spalania



Rys. 11.20 Sposoby zasilania paliwem pieców z paleniskiem fluidalnym [Tyminski J. 1997].

Na rys. 11.21 pokazano wielowariantowy schemat spalania słomy.



Rys. 11.21 Wielowariantowa technologia spalania słomy [Stehler A. 1984].

Spalanie słomy podobne jest do spalania węgla i drewna. W pierwszym okresie spalania słomy wydziela się z niej woda i substancje lotne, a w drugim okresie odbywa się bezpłomieniowe spalanie związków węgla. Duża objętość słomy, w odniesieniu do jednostki energetycznej, wysoki stopień niejednorodności pod względem wilgotności, zawartości substancji mineralnych oraz części lotnych sprawiają, że słoma jest paliwem trudnym do spalania. Znaczna zawartość części lotnych wpływa na powstawanie palnych gazów i niedopalonych części paliwa, które muszą być dopalane w temperaturze ok. 800°C. Podczas spalania słomy powstają duże ilości popiołu, 10 – 20 razy większe niż podczas spalania paliw kopalnianych o tendencjach do zapiekania się na rusztach i elementach konstrukcji pieców. Obecnie w praktyce stosuje się trzy grupy kotłów [Tymiński 1997].

- kotły wsadowe do okresowego spalania całych balotów słomy,
- kotły do spalania słomy rozdrobnionej,
- kotły do ciągłego, tzw. „cygarowego” spalania belc słomy.

W tabeli 11.11. zamieszczono ocenę techniczną spalania słomy.

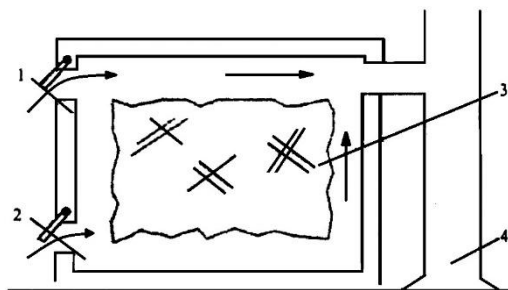
Tabela 11.11 Ocena techniczna spalania słomy [Hejft H. 1994].

Wyszczególnienie	Słoma cięta	Bele małe duży zgniot	Bele duże		Brykiety
			okrągłe	prostokątne	
Gęstość usypowa (kg / m ³)	40 - 60	70 - 120	60 - 90	60 - 160	300 - 600
Masa jednostkowa (kg)	-	8 - 25	300 - 400	200 - 600	0,02 - 0,2
Średnia objętość magazynowania (m ³ /60000 kWh)	250 - 370	125 - 215	170 - 250	90 - 250	25 - 50
Transport: - krótki odcinek	2	4	5	5	5
- długi odcinek	1	2	3	4	5
Załadunek materiału do pieca	ciągły	okresowy	okresowy	okresowy	ciągły okresowy
Automatyzacja załadunku	5	2	2	3	5
Możliwość regulacji mocy cieplnej	5	4	4	4	5
Korzystne systemy spalania	piec z pneumatycznym lub mechanicznym zadawaniem	piec z dolnym paleniskiem z komorą dopalania			

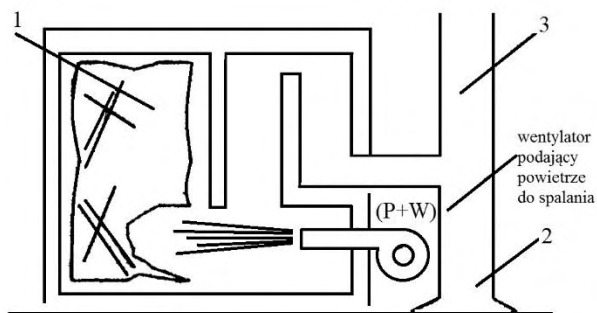
Proces spalania słomy wymaga:

- odpowiedniego doboru współczynnika nadmiaru powietrza, w zależności od formy w jakiej znajduje się słoma,
- zapewnienia intensywnego mieszania tlenu z powietrza z częściami lotnymi,
- odpowiedniego doboru wymiarów konstrukcyjnych komory spalania w zależności od rodzaju słomy.

Spalanie słomy w celach energetycznych rozpoczęto w Polsce w latach 90-tych w oparciu o technologię duńską. Rozpoczęto też produkcję kotłów o mocach cieplnych od 30 – 500 kW z załadunkiem ręcznym o działaniu okresowym z automatycznym lub pół automatycznym sterowaniem. Są to kotły wsadowe z przepływowym i przeciwprądowym systemem spalania. Zasadę działania tych kotłów pokazano na rys. 11.22 i 11.23.



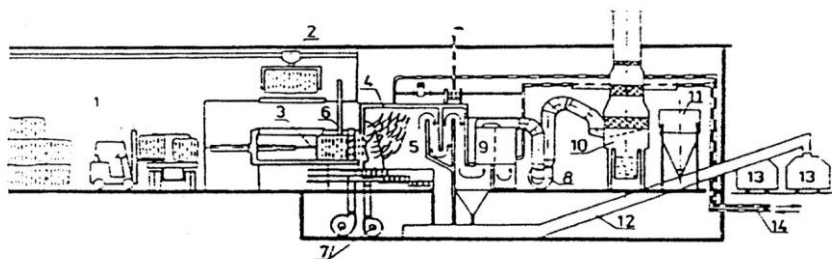
Rys. 11.22 Kocioł wsadowy z przepływowym systemem spalania słomy: 1 - biała słomy, 2 - powietrze pierwotne, 3 - powietrze wtórne, 4 - komin [Grzybek A. i in. 2001].



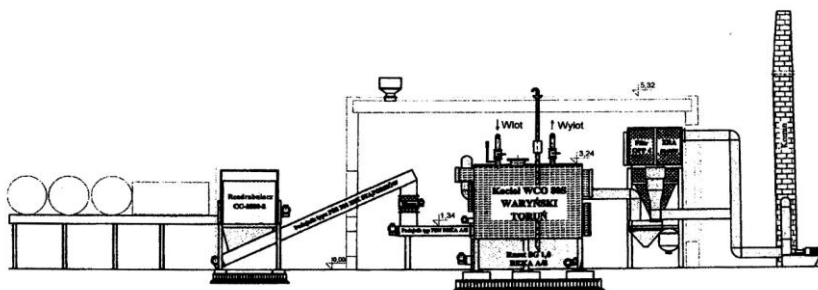
Rys. 11.23 Kocioł wsadowy z przeciwprądowym systemem spalania słomy: 1 - biała słomy, 2 - wentylator tłoczący powietrze do komory spalania, 3 - komin.[Grzybek A. i in. 2001].

W kotłach przepływowych powietrze z zewnątrz dostające się do komory spalania, opływa palący się balot słomy. Spaliny z komory spalania poprzez wymiennik ciepła odprowadzane są do komina. Kotły tego typu posiadają niską sprawność cieplą, rzędu 35 – 40% i emitują do at-

mosfery duże ilości tlenku węgla. Kotły o działaniu przeciwaprądowym osiągają wyższe sprawności cieplne, 70 – 75% i emisji tlenku węgla od 1000 do 4000 mg/m³ przy niższej zawartości związków organicznych w spalinach. Kotły przeciwaprądowe posiadają dwie komory. W pierwszej następuje zgazowanie słomy a w drugiej spalanie lotnych składników gazu. Na rys. 11.24 pokazano schemat kotłowni duńskiej firmy REKA A/S opalanej słomą ciętą, a na rys. 11.25 schemat kotłowni do „cygarowego” spalania całych balotów słomy firmy duńskiej VOLUND.



Rys. 11.24 Kotłownia opalana słomą w Lubaniu na licencji duńskiej firmy REKA [Denisiuk W. 2002].



Rys. 11.25 Kotłownia do cygarowego spalania całych balotów słomy duńskiej firmy VOLUND DANSTOKER A/S [Denisiuk W. 2002].

W Europie najwięcej kotłowni opalanych słomą znajduje się w Danii. Jest tam około 70 kotłowni o mocach 1,5 – 9, 0 MW i ponad 20 tys. małych kotłowni o mocach od 35 do 700 kW w których spala się ponad 0,5 mln ton słomy rocznie.

11.5. Biogaz

W odróżnieniu od wykorzystania różnych rodzajów masy roślinnej takich, jak drewno, słoma, wierzba i trawy i innych rodzajów biomasy w postaci stałej, wilgotnej lub płynnej, którymi są odchody zwierzęce, ścieki komunalne i przemysłowe oraz różne odpady roślinne z produkcji roślinnej i uprawy roślinnej. Są one wykorzystywane do produkcji gazu metanowego zwanego biogazem. Biogaz otrzymuje się na drodze fermentacji metanowej. Proces ten występuje w przyrodzie samorzutnie i znany był człowiekowi dawno jako gaz gnilny, błotny, ściekowy lub kopalniany. Proces fermentacji biomasy zachodzi w dwóch jednocześnie występujących etapach, a mianowicie fermentacji kwaśnej oraz fermentacji metanowej. Proces ten przebiega przy udziale dwóch różnych rodzajów bakterii. Najistotniejszym dla produkcji metanu produktem fermentacji kwaśnej są kwasy organiczne o niskiej masie cząsteczkowej. W procesie fermentacji metanowej, bakterie metanotwórcze rozkładają produkty fermentacji kwaśnej na metan i dwutlenek węgla, oraz na małe ilości innych gazów. Intensywność procesu fermentacji uzależniona jest od wzrostu ilości bakterii, a ten z kolei zależy od pochodzenia i stanu substratu, temperatury i czasu fermentacji. Fermentacja metanowa odbywa się w temperaturach od 4°C do 70°C. Efektywność rozwoju mikroorganizmów rośnie ze wzrostem temperatury. W krajach europejskich w instalacjach biogazowych, fermentacja przebiega w temperaturach 30 - 40°C bez potrzeby dodatkowego ogrzewania złoża biomasy. Innym czynnikiem fizycznym, mającym wpływ na przebieg fermentacji odpadów płynnych, jest mieszanie złoża, co eliminuje tworzenie się na dnie zbiornika osadów oraz na wierzchu złoża tzw. kożucha. Mieszanie wpływa jednocześnie na równomierny rozkład temperatury złoża. Dalejszymi istotnymi czynnikami mającymi wpływ na fermentację są czynniki chemiczne tj. odczyn pH, potencjał redox i stosunek węgla do azotu. Fermentacja metanowa odbywa się w odczynie obojętnym w zakresie $\text{pH} = 6 - 8$. Powyżej i poniżej tego zakresu intensywność fermentacji maleje. Potencjał redox jest złożoną funkcją rozpuszczonych składników. Produkcja gazu powinna odbywać się w niskim potencjale redox wynoszącym 250 mV lub niższym. Redox jest tworzony przez pary metanu CH_4 , dwutlenku węgla CO_2 oraz protonu H^+ i wodoru H_2 . Warunkiem rozmnażania się bakterii metanowych w procesie fermentacji jest stosunek węgla do azotu, który nie powinien przekraczać 100 do 300.

Do fermentacji metanowej mogą być wykorzystane prawie wszystkie organiczne odpady produkcji rolniczej.

W tabeli 11.12 pokazano przebieg rozkładu odpadów produkcji zwierzęcej w procesie fermentacji, a w tabeli 11.13 zawartość suchej pozostałości organicznej w odpadach produkcji rolniczej, stosowanych w fermentacji metanowej.

Tabela 11.12 Przebieg procesu rozkładu różnych materiałów znajdujących się w odpadach produkcji zwierzęcej [Romaniuk W. 1992].

Pochodzenie odpadów	Prędkość rozpadu w trakcie procesu fermentacji metanowej		
	szybko		wolno
Pasze	skrobia, cukry, kwasy tłuszczowe, białka, aminokwasy, witaminy, antybiotyki	celuloza, hemiceluloza, pentozany, pektyna, chityna, tłuszcze, oleje	materiały zdrewniałe (lignina), słoma, kreatyna (włosy), kutyna, suberyna, woski
Z ciała zwierzęcego	śluz, krew, komórki z ciała zwierząt, enzymy, hormony		
Mikroflora w odchodach	biomasa		
Produkty powstające przejściowo oraz produkty końcowe fermentacji	kwasy organiczne, alkohol	indol, skatol, fenole, polisacharydy	związki ligninowo - białkowe, ciała próchnicze

Tabela 11.13 Orientacyjna zawartość suchej pozostałości (S,P) i suchej pozostałości organicznej (SPO) w odpadach produkcji rolnej, używanych w fermentacji metanowej [Steppa M. 1992].

Rodzaj odpadów	Producent zawartości w świeżej masie	
	SP	SPO
Odchody bydła	11	9
Gnojowica bydłęca	6,5 - 10,5	4,8 - 8,0
Odchody trzody	8,5	6,5
Gnojowica trzody	1,8 - 8,0	1,4 - 5,8
Odchody drobiu	22	17
Obornik	20	18

W tabeli 11.14 zestawiono, średnią produkcję odchodów wydalanych przez zwierzęta, a w tabeli 11.15 przedstawiono, procentową zawartość składników biogazu.

Tabela 11.14 Średnia produkcja odchodów wydalanych przez zwierzęta [Steppa M. 1992].

Gatunek zwierząt	Średnia produkcja 1/szt. na dobę
Bydło:	
cielęta do 1 roku	10 – 16
młodzież 1 – 2 lata	16 – 20
bukaty	18 – 34
krowy mleczne	30 – 45
Trzoda chlewna:	
maciory i knuty	10 – 16
tuczniki 80 kg	3 – 5
prosięta do 60 dni	2 – 3
Kury nioski	6,6*
Średnia produkcja obornika z obory krów mlecznych	49 kg/d

* w przeliczeniu na 100 kg żywej wagi zwierząt.

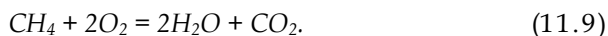
Tabela 11.15 Procentowa zawartość składników biogazu [Steppa M. 1992].

Składnik	Zawartość	
	zakres%	średnio%
Metan CH ₄	52 – 85	65
Dwutlenek węgla CO ₂	14 – 48	34,8
Siarkowodór H ₂ S	0,08 – 5,5	0,2
Wodór H ₂	0 – 5	ślady
Tlenek węgla CO	0 – 2,1	ślady
Azot N ₂	0,6 – 7,5	ślady
Tlen O ₂	0 – 1	ślady

W tabeli 11.16 zestawiono właściwości biogazu i spalanie metanu opisuje równanie:

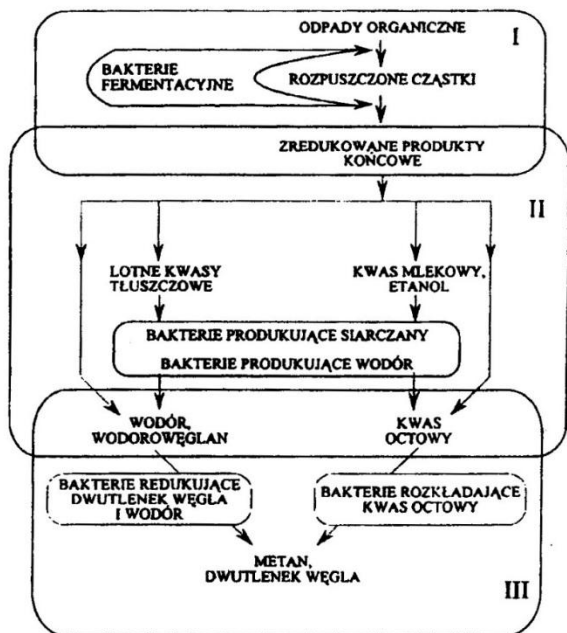
Tabela 11.16 Właściwości biogazu i jego składników [Steppa M. 1992].

Własność	Jednostka	Wartość
Wartość opałowa	MJ/m ³	23
Temperatura zapłonu	°C	650 - 750
Prędkość płomienia	cm/s	43
Granica wybuchowości	% CH ₄ w powietrzu	5,4 - 13,9
Gęstość	kg/m ³	1,2
Ciśnienie krytyczne:		
CH ₄	MPa	4,6
CO ₂	MPa	7,5
H ₂ S	MPa	8,9
Temperatura krytyczna:		
CH ₄	°C	-82,5
CO ₂	°C	31
H ₂ O	°C	100



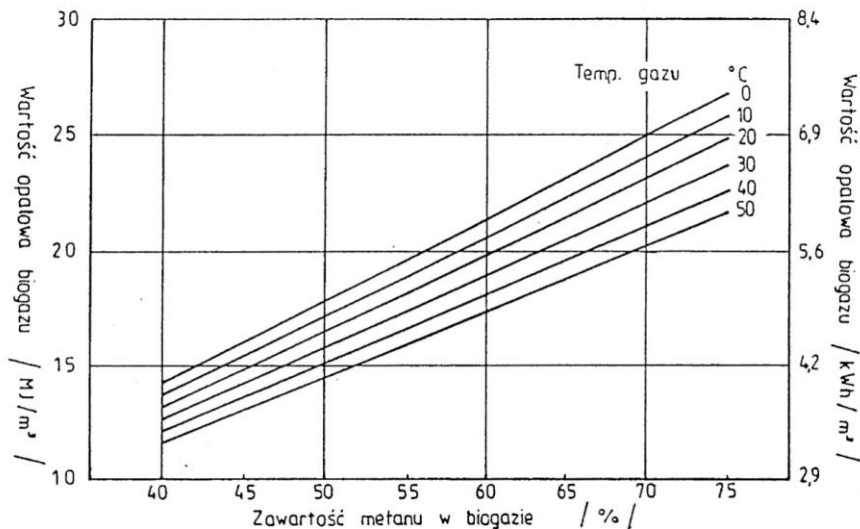
Do spalania 1m³ metanu potrzeba 2 m³ tlenu, czyli ok. 10 m³ powietrza. Z kilkunastu rodzajów fermentacji metanowych w rolnictwie, stosowane są trzy, a mianowicie: fermentacja okresowa, fermentacja przemienna i ciągła. Dotychczas najbardziej popularna jest fermentacja okresowa, polegająca na kilkumiesięcznym składowaniu odpadów w komorze fermentacyjnej. W tej fermentacji odpady powinny mieć konsystencję stałą. Fermentacja jest zmienna w czasie produkcji biogazu, wysoka na początku fermentacji i malejąca na końcu. Fermentacja przemienna odbywa się w dwóch zbiornikach fermentacyjnych napełnianych przemiennie. Proces fermentacji trwa od kilku tygodni do kilku miesięcy. Obecnie w rolnictwie wprowadza się fermentację ciągłą, stosowaną od dawna w oczyszczalniach ścieków przemysłowych i komunalnych. W tej technologii produkcji biogazu odpady w sposób ciągły są doprowadzane i odprowadzane z komory fermentacyjnej. Odpady z oczyszczalni powinny mieć konsystencję ciekłą lub półciekłą. Niedo-

skonałością tej metody jest wypłukiwanie ze złoża aktywnej masy biologicznej, co wpływa ujemnie na produkcję biogazu. Przefermentowana masa odpadów właściwościami fizycznymi i chemicznymi jest zbliżona do nawozów kompostowych, o znacznym zredukowaniu w okresie fermentacji mikroorganizmów chorobotwórczych, przy jednoczesnym pozbawieniu jej nieprzyjemnych zapachów. Technologie wytwarzania biogazu z odpadów organicznych pochodzenia rolniczego przedstawiono na rys. 11.26



Rys. 11.26 Technologia wytwarzania biogazu z odpadów organicznych pochodzenia rolniczego [Romaniuk W. 1998].

Jak już wspomniano, wartość opałowa biogazu zależy od temperatury w zbiorniku fermentacyjnym. Na rys. 11.27 pokazano wpływ zawartości metanu w biogazie produkowanym w różnych temperaturach, na jego wartość opałową.



Rys. 11.27 Wpływ zawartości metanu na wartość opalową biogazu [Steppa M. 1992].

Podstawowym produktem fermentacji metanowej jest biogaz palny, Po pozostałym produktem procesu fermentacji jest przefermentowana gnojowica. Ma ona znacznie lepsze właściwości, jako nawóz niż jako gnojowica surowa. Podczas fermentacji nie występują straty azotu, zmniejszeniu ulega zawartość substancji organicznej (20 – 30%). Fosfor i potas występujący w przefermentowanej gnojowicy jest przyswajalny przez rośliny, oraz zredukowana jest znacznie ilość bakterii chorobotwórczych. Zawarte w gnojowicy nasiona niektórych chwastów i innych roślin w procesie fermentacji ulegają zniszczeniu.

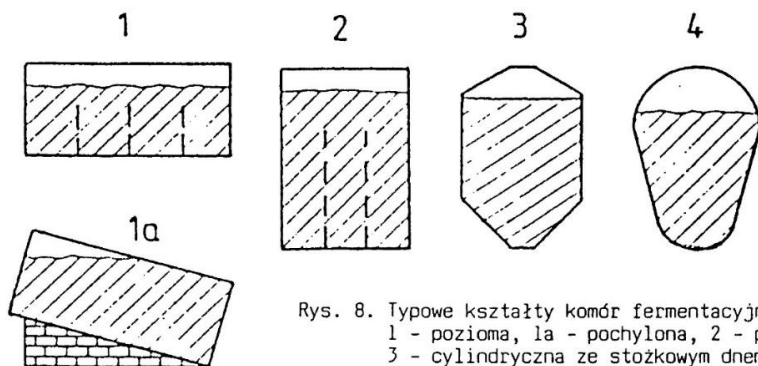
11.5.1. Budowa i działanie biogazowni

Biogazownia składa się z kilku zespołów:

- instalacji zasilającej,
- komory fermentacyjnej,
- zbiornika na gaz.

Instalacja zasilająca służy do magazynowania i transportu surowca z miejsca składowania do biogazowni oraz załadunku komory fermentacyjnej. Pojemność zbiornika do magazynowania gnojowicy powinna dwukrotnie przewyższać objętość gnojowicy produkowanej w ciągu doby. Transport gnojowicy lub innych odpadów płynnych, wymieszanych w zbiorniku, odbywa się za pomocą pomp.

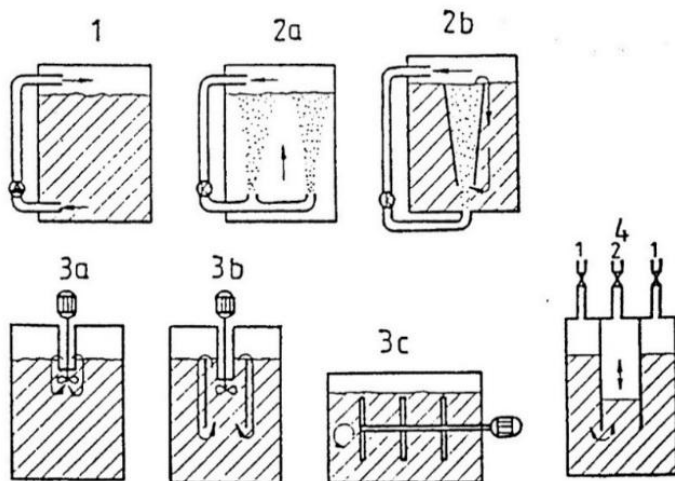
Komory fermentacyjne są to zbiorniki zamknięte, izolowane cieplnie i stanowiące integralną część biogazowni o przekroju kwadratowym lub okrągłym. Mogą one być niezagłębione w podłożu, częściowo zagłębione i podziemne. Na rys. 11.28 pokazano najczęściej stosowane rodzaje komór fermentacyjnych.



Rys. 8. Typowe kształty komór fermentacyjnych:
1 - pozioma, 1a - pochylona, 2 - pionowa,
3 - cylindryczna ze stożkowym dnem
i stropem, 4 - jajowata

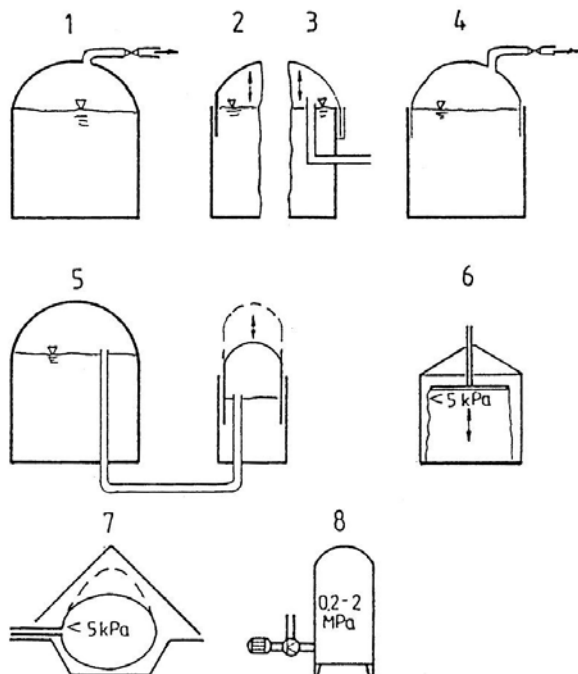
Rys. 11.28 Kształty komór fermentacyjnych [Steppa M. 1992].

Mogą one być usytuowane poziomo, jako pochylone, pionowo, o kształcie cylindrycznym ze stożkowym dnem oraz o kształcie jajowatym. Są one wykonywane z blachy stalowej, żelbetu lub tworzyw sztucznych. Komory fermentacyjne, wyposażone są w urządzenia do mieszania, pokazane na rys. 11.29.



Rys. 11.29 Instalacje do mieszania komory: 1 - pompa 2 a, 2 b - sprężarka do gazu, 3 a, 3 b - mieszadło szybkoobrotowe, 3 c - mieszadło wolnoobrotowe, 4 - wykorzystanie ciśnienia wytwarzającego się biogazu [Steppa M. 1992].

Elementem mieszającym może być pompa, sprężarka do gazu, mieszadło (wolno lub szybkoobrotowe). Można ją również wykorzystać do wymuszonej recyrkulacji gazu z nad złoża do wtłaczania go do warstwy złoża od dołu zbiornika. Utrzymanie w zbiorniku fermentacyjnym stałej temperatury wymaga stosowania urządzeń grzewczych. W procesie produkcji biogazu energię cieplną dostarcza się do wstępnego podgrzewania surowca oraz pokrycia strat ciepłych przez ściany komory fermentacyjnej. W tym celu stosuje się wymienniki rurowe instalowane na ścianach i podłogach komór, wymienniki płaszczowe na ścianach komór oraz wymienniki instalowane na zewnątrz komór. Wytworzony biogaz jest, częściowo magazynowany w zbiornikach, służących jednocześnie do wyrównania wahań poboru biogazu. Pojemność zbiorników jest tak dobierana, aby wystarczyła na jednodobową produkcję biogazu. Na rys. 11.30 pokazano zbiorniki biogazu.



Rys. 11.30 Zbiorniki do magazynowania biogazu: 1 - sprężanie magazynowanego gazu bezpośrednio w komorze fermentacyjnej, 2,3 - komora fermentacyjna z zamknięciem wykonanym z materiału elastycznego, 5 - wydzielony zbiornik "mokry" 6 - zbiornik z materiału elastycznego, 7 - zbiornik typu „poduszka”, 8 - zbiornik wysokociśnieniowy [Steppa M. 1992].

W praktyce stosuje się najczęściej dwa rodzaje zbiorników, a mianowicie: zbiorniki niskociśnieniowe, tzw. mokre, pracujące przy ciśnieniu wymaganym w sieci gazowej i zbiorniki wysokociśnieniowe, pracujące przy ciśnieniu 0,2 - 2,0 MPa. W rolnictwie stosuje się zbiorniki niskociśnieniowe. Zbiorniki biogazu, wyposażone są w odsiarczalniki wypełnione rudą darniową. Są one potrzebne w biogazowniach, w których produkuje się biogaz z surowców zawierających znaczne ilości białka, bowiem podczas fermentacji takich surowców powstaje doż toksycznego siarkowodoru. W tabeli 11.17 podano, zużycie biogazu w różnych odbiornikach.

Tabela 11.17 Zużycie biogazu i minimalne średnice połączeń różnych odbiorników [Step-pa M. 1992].

Rodzaj odbiornika lub zużycie biogazu do określonego celu	Zużycie gazu o wartości opałowej 21,5 MJ/m ³	Minimalna średnica połączenia (mm)
Palnik normalny kuchenny (m ³ /h)	0,2 - 0,45	15
Kuchnia z 3 lub 4 palnikami i piekarnikiem (m ³ /h)	2,0 - 2,5	20
Grzejnik wody, bojler 80 l (m ³ /h)	1,2	15 - 20
Grzejnik wody przepływowej (m ³ /h)	2,0 - 6,0	25
Zużycie do napędu silnika spalinowego (m ³ /kMh)	0,5	-
Zużycie do napędu agregatu prądotwórczego o mocy 16 - 20 kW (m ³ /h)	9 - 12	-

Małe biogazownie mogą być zbudowane systemem gospodarczym. Przystępując do budowy biogazowni należy dokonać uproszczonych obliczeń. Podstawowe dane do obliczeń, podane przez Romaniuka [1992] przedstawiono w tabeli 11.18.

Tabela 11.18 Produkcja dobową gnojowicy z jednego tuczniaka [Romaniuk W. 1992].

Rodzaj surowca	Zawartość suchej masy %	Czas fermentacji doby	Produkcja gazu w m ³ na 1 kg dodanej suchej masy m ³ /kg	Produkcja gazu w m ³ na dużą jednostkę przeliczeniową m ³ /SD ^x d	Zawartość metanu %
Gnojowica					
- trzody	6 - 8	10 - 15	0,4 - 0,7	1,8	69
- bydła	5	15 - 30	0,19 - 0,25	-	55 - 65
- bydła	8 - 11	15 - 30	0,3 - 0,45	1,5	55 - 65
- drobiu	4	20 - 40	0,48 - 0,7	2,5	69
- drobiu	6,5	20 - 40	0,35	-	69
- drobiu	12,5	20 - 40	0,30	-	69
Obornik	-	-	0,5	1,0	-

SD^x - Sztuka Duża o masie 500 kg

Przy użyciu preparatów biotechnologicznych typu Szembek-6 produkcja biogazu może być zwiększona dwukrotnie.

Przyjmując produkcję dobową gnojowicy z jednego tuczniaka równą m_{jg} i odnosząc ją do liczby tuczniaków w chlewni gospodarstwa rolnego obliczamy produkcję dobową gnojowicy ze wzór:

$$M_g = m_{jg} n_t, \text{ kg/dobę} \quad (11.10)$$

w którym:

m_{jg} – masa odchodów z jednego tuczniaka, kg/dobę,
 n_t – ilość tuczniaków w chlewni, szt.

Przyjmując, że gęstość gnojowicy γ_g jest zbliżona do gęstości wody, dobową objętość gnojowicy wynosi:

$$V_g = \frac{M_g}{\gamma_g}, \text{ m}^3 \quad (11.11)$$

Dla danych zestawionych w tabeli 11.18 wyznaczamy ze wzoru (11.18) dobową produkcję suchej masy organicznej gnojowicy:

$$M_{sg} = 0,065 M_g, \text{ kg/dobę} \quad (11.12)$$

w którym:

M_g – dobową produkcja suchej masy z organicznej gnojowicy, kg/dobę.

Przyjmując z tabeli 11.18 czas fermentacji gnojowicy z trzody chlewnej równy 10 dób i produkcję biogazu z 1 kg suchej masy gnojowicy objętość użyteczna komory fermentacyjnej V_{kf} będzie równa:

$$V_{kf} = T_f V_g, \text{ m}^3/\text{d} \quad (11.13)$$

gdzie:

T_f – czas fermentacji, doby,

V_g – objętość biogazu z jednego kg suchej masy gnojowicy, m^3 , a produkcja dobową biogazu V_{dg} wyniesie:

$$V_{dg} = M_{sg} V_g, \text{ m}^3/\text{dobę} \quad (11.14)$$

Dla instalacji grzewczej do podgrzewania świeżej gnojowicy, załadowanej do zbiornika fermentacyjnego i utrzymania stałej temperatury w komorze podczas fermentacji, należy sformułować [Steppa 1992] założenia do obliczeń, np.

- stała temperatura gnojowicy w komorze fermentacyjnej $t_{pg} = 35^{\circ}\text{C}$,
- temperatura powietrza otoczenia w okresie zimowym $t_{pz} = 20^{\circ}\text{C}$,
- temperatura surowej gnojowicy $t_{sg} = 8^{\circ}\text{C}$,
- średnia temperatura powietrza otoczenia w pozostałych okresach roku $t_{ps} = 3^{\circ}\text{C}$,
- temperatura nieprzetworzonej gnojowicy w pozostałych okresach roku $t_{sgs} = 14^{\circ}\text{C}$,
- powierzchnia ścian komory fermentacyjnej F_{kf} m².

Dobowe zapotrzebowanie ciepła dla biogazowi obliczamy, jak podaje Buraczewski i Batroszek 1990] z bilansu cieplnego komory fermentacyjnej:

$$Q_d = Q_{sg} + Q_{kf} \text{ kJ} \quad (11.15)$$

w tym wzorze

Q_{sg} to ilość ciepła potrzebna do ogrzania surowej gnojowicy, kJ, a Q_{kf} to ilość ciepła potrzebna do utrzymania stałej temperatury w komorze fermentacyjnej, kJ, Ilość ciepła potrzebna do podgrzania w ciągu doby surowej gnojowicy wynosi:

$$Q_{sg} = M_{sg} (t_{pg} - t_{sg}) c_{wg}, \text{ kJ/dobę} \quad (11.16)$$

gdzie:

c_{wg} – ciepło właściwe gnojowicy, kJ/kg K, (4,19 kJ/kg K).

Zapotrzebowanie dobowe ciepła dla biogazowi w okresie zimowym:

$$Q_{cz} = k F_{sk} a (t_{pg} - t_{pz}), \text{ kJ/dobę} \quad (11.17)$$

a – stopień wymieszania gnojowicy w zbiorniku,

t_{pg} – temperatura gnojowicy w komorze fermentacyjnej, (35°C),

t_{pz} – temperatura powietrza otoczenia w okresie zimowym, (-20°C).

Ilość ciepła Q_r dostarczana w ciągu roku do biogazowni

gdzie:

k – współczynnik przenikania ciepła przez ściany zbiornika,
W/m²K,

F_{sk} – powierzchnia ścian zbiornika, m²,

$$Q_r = n_1 Q_{sg} + n_2 Q_{cz}, \text{ kJ/rok} \quad (11.18)$$

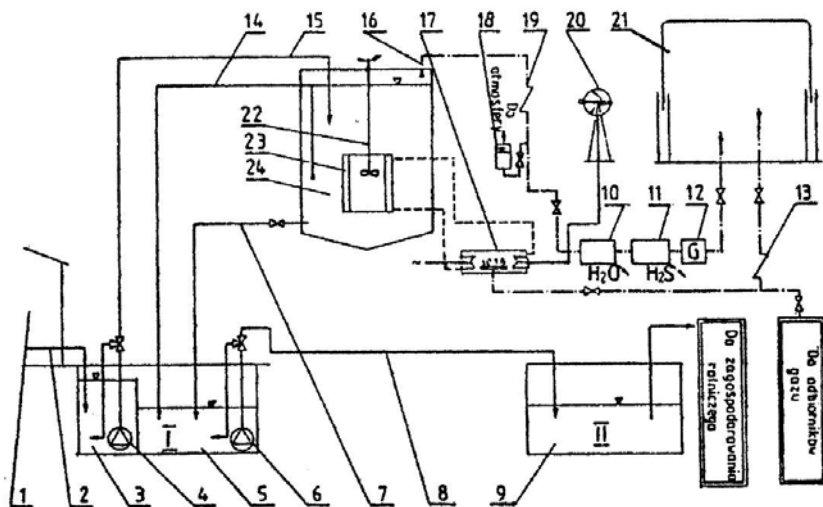
gdzie:

n_1 – to liczba dni o temperaturze t_{pg} a n_2 to liczba dni temperaturze t_{pz} °C.

W Instytucie Budownictwa Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa. opracowano kilka rodzajów biogazowni rolniczych. Są to biogazownie z komorami fermentacyjnymi stalowymi o pojemnościach 25 m³ i 2 x 25 m³, przeznaczone dla gospodarstw rolnych o obsadzie zwierząt 20 – 50 SD, biogazownie z komorą fermentacyjną żelbetową o pojemności 100 m³, jej wielokrotnością 2 x 100 m³ i 3 x 100 m³ przeznaczoną dla gospodarstw o obsadzie 80 – 100 SD oraz biogazownie z komorą fermentacyjną o pojemności 200 i 500 m³ i jej wielokrotnością. Na rys. 11.31 pokazano proces technologiczny produkcji biogazu i zagospodarowania przefermentowanej gnojowicy.

Gnojowica z budynku inwentarskiego transportowana jest w systemie grawitacyjnym do zbiornika wstępnego, gdzie poddawana jest mieszaniu za pomocą pompy wirowej i następnie transportowana do komory fermentacyjnej zasilanej 2 – 4 razy dziennie. Umieszczony w komorze fermentacyjnej rurociąg przelewowy zapewnia odprowadzenie przefermentowanej gnojowicy do zbiornika magazynującego taką samą ilość, jaką została zasilona komora fermentacyjna. W zbiorniku zainstalowany jest system hydraulicznego mieszania pompą, a w dnie zbiornika rurociąg spustowy umożliwiający opróżnienie komory fermentacyjnej do zbiornika magazynującego gnojowicę przefermentowaną. Gaz wytworzony w komorze fermentacyjnej odprowadzany jest na zewnątrz komory rurociągiem do odsiarczalnika i do odwodnienia skroplonej w zbiorniku pary. Gaz magazynowany jest w zbiorniku dzwonowym. Do prawidłowego działania instalacji biogazowej wymagane jest ciśnienie 1500 – 2000 Pa. Część pozyskanego gazu, zużyta jest na podgrzanie wody w kotle, niezbędnej do wykorzystywania w systemie wymiennika rurowego do podgrzewania gnojowicy i utrzymania jej stałej temperatu-

ry. Odpady pochodzenia zwierzęcego i roślinnego, jako surowiec do produkcji biogazu charakteryzują się stosunkowo niską wydajnością biogazu.



Rys. 11.31 Proces technologiczny produkcji biogazu i zagospodarowania przefermentowanej gnojowicy (projekt IBMER): 1 - budynek inwentarski, 2 - kanał, 3 - zbiornik wstępny, 4 - pompa do gnojowicy, 5 - zbiornik gnojowicy przefermentowanej, 6 - pompa do gnojowicy, 7 - rurociąg spustowy, 8 - rurociąg gnojowicy przefermentowanej, 9 - dodatkowy zbiornik gnojowicy, 10 - odwadniacz, 11 - odsiarczacz, 12 - gazomierz, 13 - przerywacz płomienia, 14 - rurociąg przelewowy, 15 - rurociąg świeżej gnojowicy, 16 - rurociąg gazu, 17 - kocioł, 18 - bezpiecznik cieczowy, 19 - przerywacz płomienia, 20 - dodatkowe źródło energii (wiatrak), 21 - zbiornik gazu [Romaniuk W. 2002].

11.6. Biodiesel

W ostatnich latach wzrosło w świecie zainteresowanie wykorzystaniem biopaliw płynnych jako paliw alternatywnych i proekologicznych o parametrach porównywalnych z olejem napędowym. Najszerzej stosowane jest przetwarzanie nasion roślin oleistych (rzepak, słonecznik, soja) na paliwo płynne oraz przetwarzanie surowców roślinnych (zboża, buraki cukrowe) na alkohol. Polska jest liczącym się producentem rzepaku w Europie. Potencjał techniczny produkcji rzepaku w Polsce wynosi ok. 1,6 mln ton rocznie, co pozwala na produkcję ok. 630 tys. ton biopaliwa. Wynosiłoby to ok. 7% rocznego zapotrzebowania na olej

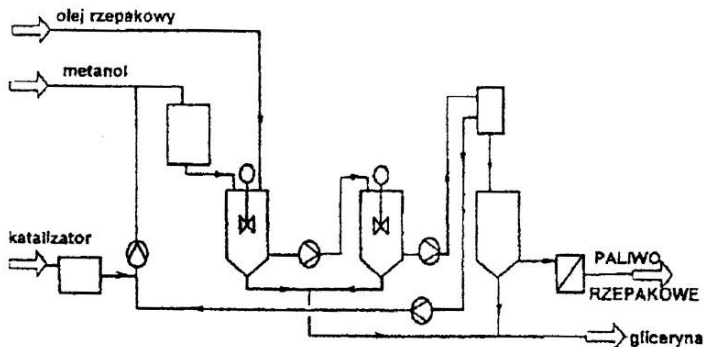
napędowy. Z jednej tony rzepaku można uzyskać ok. 400 kg biopaliwa. Z jednego ha upraw rzepaku można przy plonie 2,1 t/ha otrzymać:

- oleju ok. 810 l,
- biopaliwa 690 l,
- śruty rzepakowej 1,3 t,
- słomy rzepakowej 2 t.

W praktyce stosowane są dwie technologie produkcji biopaliwa:

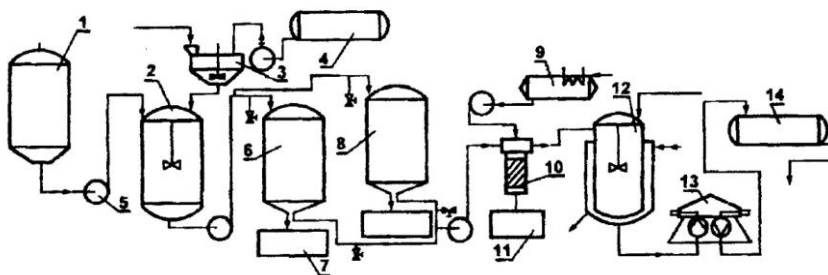
- beciśnieniowa (zimna), w której proces estryfikowanych olejów rzepakowych odbywa się w temperaturze 20 – 70°C pod ciśnieniem atmosferycznym. Stosuje się również katalizatory alkaliczne, w wyniku czego, powstaje ester metylowy (etylowy) i frakcja glicerynowa.
- ciśnieniowa (gorąca), w której proces otrzymywania estrów kwasów tłuszczowych odbywa się w sposób ciągły w temperaturze 240°C przy ciśnieniu ok. 10 MPa. W wyniku procesu powstaje ester i frakcja glicerynowa.

Technologie drugą stosuje się w przemysłowych metodach produkcji. Wymaga ona znacznych nadmiarów metanolu w stosunku do oleju, który może być ponownie kierowany do procesu. W Polsce istnieją dwa rodzaje produkcji biopaliw z estryfikowanego oleju rzepakowego. Jeden z nich zakłada produkcję czystego estru jako substytutu oleju napędowego, drugi zakłada mieszanie go z olejem napędowym. Produkcja czystego estru może odbywać się w zakładach chemicznych posiadających odpowiednie linie produkcyjne. Natomiast produkcja estryfikowanego oleju rzepakowego, dodawanego do oleju napędowego, jest możliwa także w rolnictwie, w niewielkich zakładach produkcyjnych, zwanych agrorafineriami o możliwościach produkcji od 100 – 300 ton biopaliwa rocznie. Na rys. 11.32 pokazano schemat estryfikacji oleju rzepakowego metodą beciśnieniową.



Rys. 11.32 Instalacja do wytwarzania oleju napędowego z oleju rzepakowego metodą bezcieniową [Tymiński J. 1997].

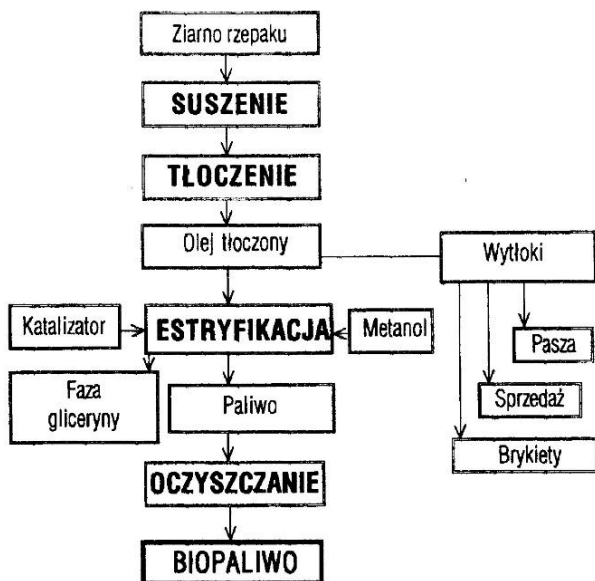
Pierwsza w Polsce agrorafineria zbudowana została przy współdziałaniu IBMER w Mochelku k. Bydgoszczy. Agrorafineria ta może przetwarzać od 100 do 500 kg/h nasion rzepaku, co odpowiada produkcji oleju od 37 - 167 kg/h. Schemat linii technologicznej agrorafinerii w Mochelku przedstawiono na rys. 11.33.



Rys. 11.33 Linia technologiczna estryfikacji oleju rzepakowego w agrorafinerii w Mochelku: 1 - zbiornik magazynowy oleju, 2 - reaktor, 3 - zbiornik mieszaniny katalizacyjnej, 4 - zbiornik metanolu, 5 - pompa, 6, 8 - odстойniki, 7, 11 - ekokontenery, 9 - bojler elektryczny, 10 - myjka wodna, 12 - adsorber, 13 - wirówka, 14 - zbiornik na paliwo, [Tymiński J. 1987].

Nasiona ze zbiornika operacyjnego transportowane są przenośnikami do wstępnej operacji czyszczenia na separatorze sitowym, a następnie do

prasy głównej. Makuchy z prasy odbierane są poprzez zasobnik maku-
chów, na zewnątrz obiektu do środków transportu kołowego, a olej zbie-
rany jest do zbiornika operacyjnego z którego poprzez filtry kierowany
jest do zbiornika magazynowego. Ze zbiornika olej kierowany jest do
reaktora estryfikatora współpracującego z mieszalnikiem katalizatora
i metanolu i dalej do specjalnych odstojników, pomp i wirówki do od-
dzielenia adsorbentu, a następnie do zbiornika na biopaliwo. Podczas
produkcji biopaliwa powstają produkty uboczne, tj. makuchy, zawiera-
jące 8 - 10% oleju, oraz faza glicerynowa, zawierająca 40 - 45% czystej
gliceryny. Makuchy rzepakowe mogą być wykorzystane w zakładach
produkcji pasz, zaś frakcja glicerynowa może być przetwarzana w tym
samym zakładzie produkcyjnym na gliceryny techniczne i farmaceu-
tyczne. Na rys. 11.34 przedstawiono schematycznie technologię produk-
cję biopaliwa i wykorzystanie rzepaku, a w tabeli 11.19 klasyfikację insta-
lacji do produkcji biopaliwa i zapotrzebowanie na rzepak w zależności
od typu instalacji.



Rys. 11.34 Technologia produkcji biopaliwa i wykorzystanie frakcji rzepaku. [Grzybek A. 2000].

Tabela 11.19 Klasyfikacja instalacji do produkcji biopaliwa [Grzybek A. 2002].

Lp.	Nazwa instalacji	Wydajność roczna t	Wydajność dobowa t	Wydajność godzinowa t
1	Instalacja gospodarska	300	1,0	0,04
2	Instalacja mała	5000	16,66	0,694
3	Instalacja duża	20000	66,66	2,77
4	Instalacja przemysłowa	100000	333,33	13,88

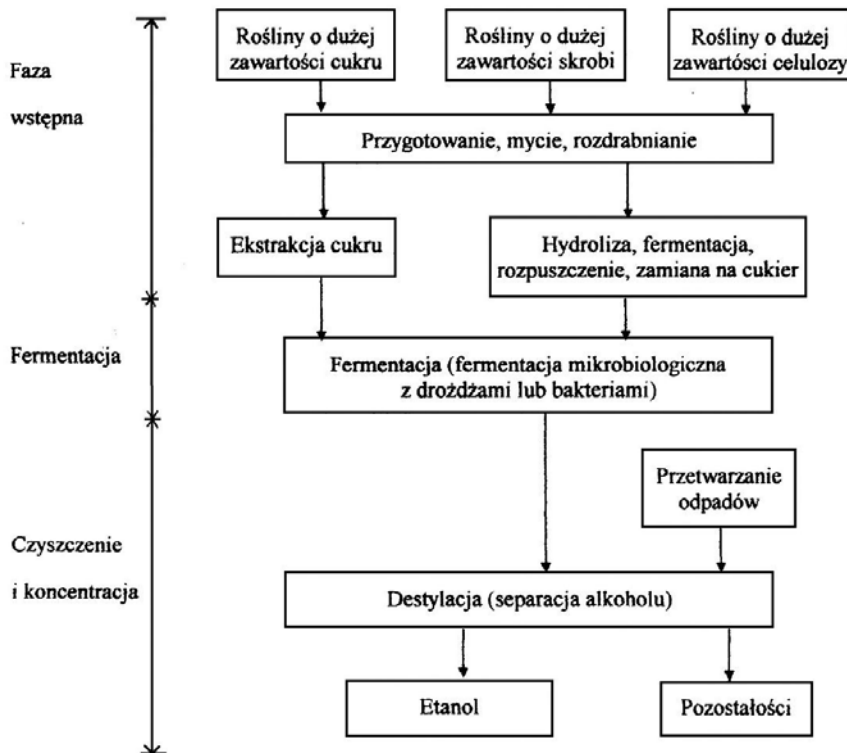
11.7. Bioalkohole

Etanol (spirytus odwodniony) dodawany do benzyn silnikowych zwiększa efektywność spalania, ogranicza emisję tlenków węgla, tlenków azotu i węglowodorów w spalinach oraz obniża stężenie CO w spalinach. Alkohole, charakteryzując się wyższymi od większości składników węglowodorowych liczbami oktanowymi, obniżają znacznie udział takich składników spalin jak czteroetylek ołowiu i węglowodory aromatyczne [Dreszer i in. 2003]. W Polsce dodawanie spirytusu odwodnionego do benzyn rozpoczęto już ponad 70 lat temu. Pierwszą produkcję przemysłową spirytusu odwodnionego rozpoczęto w Kutnie w 1928 r. W Polsce jakość paliwa z dodatkiem etanolu określa ustanowiona w 1992 r. Polska Norma PN - 92/C - 096025, zezwalająca na dodawanie do benzyn 5% objętości etanolu. Taka ilość etanolu poddyktowana była przestarzałą jeszcze konstrukcją samochodów. W miarę doskonalenia silników samochodowych norma ta może być powiększona do 10%. Na świecie produkcja etanolu stale rośnie. W USA produkcja etanolu wynosi ok. 2 mld litrów rocznie a w Brazylii 4,6 mld litrów. W krajach Unii Europejskiej produkuje się już znaczne ilości biopaliwa. We Francji ok. 300 tys. ton, we Włoszech 600 tys. ton w Niemczech 300 tys. ton, w Belgii 600 tys. ton, w Danii 400 tys. ton i w Czechach 50 tys. ton. Produkcję odwodnionego alkoholu przeprowadza się dwuetapowo:

- odwodnienie etanolu,

- produkcję alkoholu gorzelnianego.

Produkuje się alkohol gorzelniany o zawartości 97,2% objętości etanolu. Na schemacie rys. 11.35. przedstawiono schemat produkcji alkoholu z różnych roślin, charakteryzujących się dużą zawartością cukrów, skrobi i celulozy.



Rys. 11.35 Technologia produkcji alkoholu [Tymiński J. 1997].

We wstępnej fazie przygotowania do produkcji surowce poddane są myciu i rozdrabnianiu. Następnie w zależności od rodzaju surowca następuje proces ekstrakcji surowca, hydrolizy lub mikrobiologicznej fermentacji z drożdżami lub bakteriami. W fazie czyszczenia i koncentracji następuje destylacja (oddzielenie alkoholu i pozostałości).

Wyprodukowany alkohol tworzy z wodą mieszaninę o składzie 97,1% objętości etanolu i 2,8% objętości wody. Taki alkohol nie może jeszcze być stosowany jako dodatek do benzyn. Do odwodnienia alkoholu stosuje się benzen, benzynę wysokofrakcyjną, wapno palone, gips i inne związki wchłaniające wodę. Polska posiada duży i niewykorzystany potencjał produkcji alkoholi. Zakłady Przemysłu Spirytusowego są w stanie wyprodukować w ciągu roku ok. 40 mln litrów spirytusu odwodnionego, pozwalającą na zaspokojenie potrzeb przemysłu rafineryjnego produkującego benzynę silnikowe. Ilość wytworzonego bioetanolu zależy od zawartości w roślinach cukru i skrobi.

Literatura:

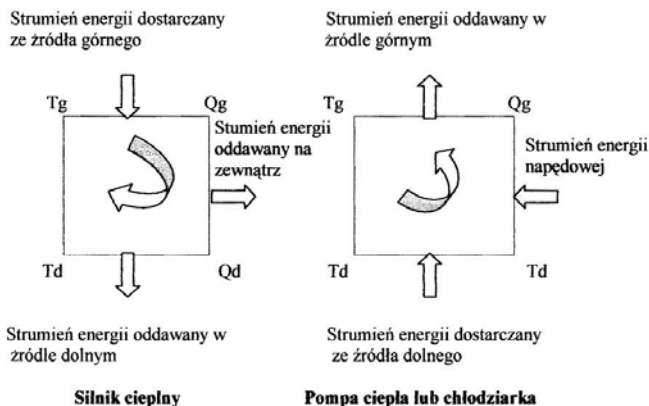
- [1]. Denisiuk W. 1998. *Analiza technologiczna, organizacyjna i finansowa kotłowni opalanej słomą, na przykładzie AGM Zielonki*. „Wykorzystanie energii odnawialnej w rolnictwie”, Materiały konferencyjne IBMER, Warszawa.
- [2]. Dreszer K., Niedziółka I. J. 2002, *Energetyka rolnictwa, wybrane zagadnienia*, Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Lublin.
- [3]. Dubas J., Grzybek A., Kotowski W., Tomczyk A., 2003. *Wierzb energetyczna – uprawa i technologia przetwarzania*. Wyższa Szkoła Ekonomii i Administracji, Bytom.
- [4]. Falster H. 2001 *Energetyczne wykorzystanie drewna. Technologia – Środowisko – Gospodarka*. The Centre for Biomass Technology. PRO – DRUK, Józefów k, Warszawy.
- [5]. Glijer L. 1992. *Technika i gospodarka ciepła w przemyśle drzewnym*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- [6]. Grzybek A., 2001. *Biopaliwa płynne*. Czysta Energia, nr 3, ABRYS, Poznań.
- [7]. Grzybek A., Gradziuk P., Kowalczyk K. 2001 *Słoma energetyczne paliwo*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Lublin.
- [8]. Grzybek A., Kowalczyk K. Kościak B. 2002. *Biopaliwa*. Akademia Rolnicza w Lublinie, IBMER, Warszawa.
- [9]. Grzybek A. 2002. *Biomasa jako alternatywne źródło energii*. WODR (Wojewódzki Ośrodek Doradztwa Rolniczego), Warszawa.
- [10]. Hejft H. 1999. *Słoma jako surowiec energetyczny*. Problemy Inżynierii Rolniczej nr 2, IBMER, Warszawa.

- [11].Hejft H., Konopko H, 1994. *Brykiety najkorzystniejsza forma opał z słomy*. Materiały konferencyjne, Olsztyn.
- [12].Kozłowski R. 1999. *Drewno, jako surowiec energetyczny w gospodarstwie domowym*. Wieś Jutra, nr 1
- [13].Romaniuk W. i in. 1992. *Biogazownie rolnicze. Projekty, prace badawcze* IBMER, Warszawa.
- [14].Romaniuk W., Głaszczka A. 1996. *Pozyskiwanie biogazu i produkcja biogazu*. Ekopartner, Fundacja Greek Park, Warszawa.
- [15].Romaniuk W., Głaszczka A. 1995. *Utylizacja gnojowicy przez jej kompostowanie z odpadami organicznymi*. Problemy Inżynierii Rolniczej nr 3.
- [16].Romaniuk W. 2000. *Ekologiczne systemy gospodarki obornikiem i gnojowicą* [sprawozdanie z badań]. IBMER
- [17].Serrup H. 2001. *Energetyczne wykorzystanie drewna*. Technologia – Środowisko – Gospodarka. Centr for Biomass Technology (Raport), Dania.
- [18].Steppa M. 1992. *Biogazownie rolnicze* [raport]. IBMER, Warszawa.
- [19].Stehler A. 1984. *Utylization of wood for heat generation in rural areas* CNRE [European Cooperative Networks on Rural Energy] nr 5.
- [20].Szyber. J.2001. *Zagadnienia zrębków drzewnych opałowych*. pt. „Techniczne i ekologiczne aspekty energetyki odnawialnej. SGGW, Materiały konferencyjne, Warszawa.
- [21].Tymiński J. 1997 *Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w Polsce do 2030 r aspekty energetyczne i ekologiczne*. IBMER, Warszawa.
- [22].Tymiński J., Pabis J., Rogulska M. 1988. *Integrated energy system two Polish farm. Integrated enrgy system deesign and assessment aplication to farms* (Raport). FAO.
- [23].Wichrowski R. 1994. „*Wykorzystanie słomy jako źródło energii odnawialnej w rolnictwie na przykładzie Danii*”. Wykorzystanie energii odnawialnej w rolnictwie. Seminarium IBMER, Warszawa.

12. POMPY CIEPŁA

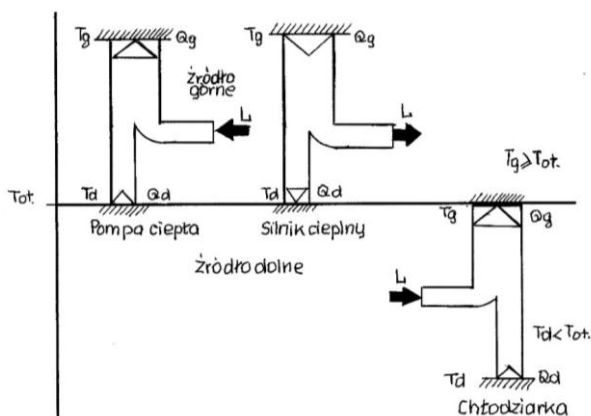
W przyrodzie znajdują się źródła ciepła o stosunkowo niskich temperaturach, które można wykorzystywać. Jeżeli temperatura źródła ciepła nie jest wysoka, rzędu 10 – 30°C, np. temperatura wody w morzach, rzekach, jeziorach, ziemi, powietrza otoczenia, powietrza w budynkach inwentarskich, temperatura podczas chłodzenia mleka, w przetwórstwie rolno-spożywczym w szklarniach, to ciepło zawarte w tych źródłach zamiast je tracić można częściowo odzyskać za pomocą pomp ciepła. Pompy ciepła znane są od kilkudziesięciu lat, a pierwsze zaczęto realizować w latach trzydziestych. Podstawy teoretyczne działania pomp ciepła opracował i przedstawił w 1852 r. Wiliam Thompson znany jako Lord Kelvin. Nazwa pompa ciepła została utworzona przez analogię do nazwy pompa wodna, która za pomocą energii dostarczonej z zewnątrz może przekazywać ciecz z niższego poziomu na poziom wyższy. Zasada działania pompy ciepła jest analogiczna do działania chłodziarki. Pompa ciepła i chłodziarka realizują ten sam obieg termodynamiczny zwanym „lewobieźnym”, w odróżnieniu od silnika cieplnego pracującego w obiegu „prawobieźnym”. Różnica pomiędzy pompą ciepła a chłodziarką polega na sposobie przenoszenia ciepła. Zadaniem chłodziarki jest przenoszenie ciepła z układu o temperaturze niższej od temperatury otoczenia do układu o temperaturze wyższej od temperatury otoczenia kosztem energii doprowadzonej z zewnątrz. Zadaniem pompy ciepła jest pobieranie ciepła ze źródła o niższej temperaturze, co wymaga doprowadzenia energii w celu wykonywania stosownej pracy. Obieg taki pozwala na podwyższenie temperatury czynnika krążącego w obiegu oraz wykorzystanie ciepła, które może być odebrane przy temperaturze wyższej od temperatury otoczenia.

W praktyce, stosowane są pompy sprężarkowe i absorpcyjne. Na rys. 12.1a przedstawiono, zgodnie z obiegiem termodynamicznym Carnota, prawobieźny obieg „a” silnika cieplnego oraz lewobieźny obieg „b” pompy ciepła i chłodziarki.



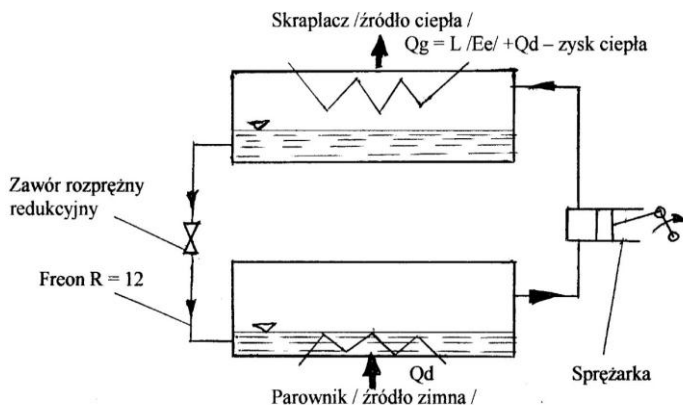
Rys. 12.1 Obieg termodynamiczny Carnota: a – silnika cieplnego, b – pompy ciepła i chłodziarki [Brodowicz K., Dyakowski T. 1984].

Pompa ciepła i chłodziarka przedstawiona rys. 12.1b, pobiera energię cieplną ze źródła dolnego. Ciepło ze źródła dolnego przekazywane jest do źródła górnego. Silnik cieplny rys. 12.1a, z ciepła dostarczanego ze źródła górnego przekazuje na zewnątrz energię mechaniczną i ciepło odprowadzane do źródła dolnego. Na rys. 12.2 przedstawiono dla porównania zasadę działania pompy ciepła i chłodziarki z silnikiem cieplnym.

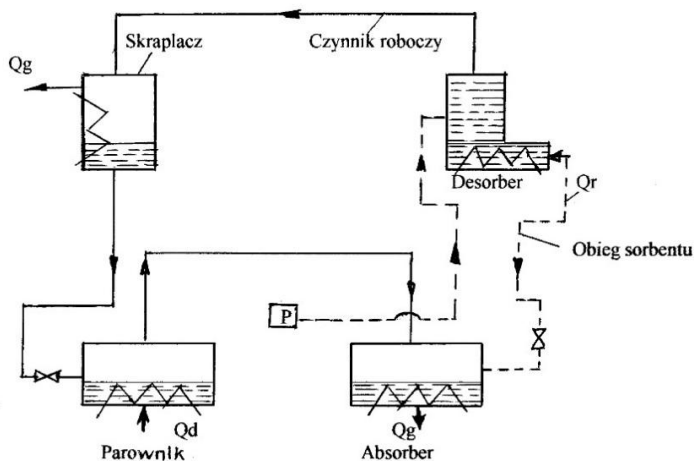


Rys. 12.2 Porównanie zasady działania pompy ciepła z silnikiem cieplnym i chłodziarką [Brodowicz K., Dyakowski T. 1984].

W praktyce stosuje się pompy ciepła sprężarkowe i absorpcyjne. Różnica pomiędzy nimi polega na budowie instalacji realizującej obieg, sposobie doprowadzenia z zewnątrz i rodzajem czynników realizujących obieg. Na rys. 12.3 pokazano schematycznie działanie sprężarkowej pompy ciepła, a na rys. 12.4 sorpcyjnej pompy ciepła.



Rys. 12.3 Zasada działania sprężarkowej pompy ciepła [Brodowicz K., Dyakowski T. 1984].



Rys. 12.4 Zasada działania sorpcyjnej pompy ciepła [Brodowicz K. Dyakowski T., 1984].

Ciepło ze źródła niskotemperaturowego (dolnego) doprowadzone jest do pompy ciepła za pośrednictwem instalacji do pozyskiwania ciepła. Czynnik roboczy doprowadzony do parownika ulega odparowaniu w warunkach obniżonego ciśnienia. Parownik będący przeponowym wymiennikiem ciepła może być instalowany razem z pompą ciepła w wodzie, gruncie, albo na powietrzu. Z parownika para wpływa do sprężarki napędzanej silnikiem elektrycznym. Po sprężeniu para wpływa do skraplacza, będącego ujęciem górnego źródła pompy ciepła. W skraplaczu czynnik roboczy przekazuje ciepło do instalacji cieplnej. Para po skondensowaniu w skraplaczu w stałym ciśnieniu i temperaturze, jako ciecz ulega rozprężaniu w zaworze rozprężnym a następnie wpływa do parownika i dalej do sprężarki.

Obecnie w sprężarkowych pompach ciepła stosuje się jako czynnik roboczy amoniak lub freon R 22. Z uwagi na niekorzystne zmiany, jakie freon powoduje w środowisku naturalnym, polegające na potęgowaniu efektu cieplarnianego, sprężarka w absorpcyjnych stosuje się amoniak pompach ciepła, zostaje zastąpiona zespołem złożonym z wężownicy i absorbera, w których znajduje się woda nasycona amoniakiem. Zespół ten ogrzewany jest ciepłem dostarczanym z zewnątrz w postaci gorącej wody, pary lub spalin. W wężownicy powstaje para z łatwo wrzącego amoniaku, która skrapla się w skraplaczu, oddając ciepło do czynnika grzewczego. Skroplony amoniak za pośrednictwem zaworu dławiącego przepływa do parownika, gdzie na skutek parowania pobiera ciepło ze źródła o niskiej temperaturze. Z parownika amoniak przepływa do absorbera i nasyca roztwór amoniaku powracający z wężownicy. W czasie nasycenia powstaje ciepło absorpcji, które odprowadzane jest do czynnika grzewczego. O efektywności pracy pompy ciepła decyduje temperatura dolnego i górnego źródła ciepła. Efektywność ta określana jest współczynnikiem wydajności cieplnej lub wydajności cieplnej, COP (Coefficient of Performance) opisanym równaniem:

$$COP = \frac{Q_2}{E_e} > 1 \quad (12.1)$$

gdzie:

Q_2 - ciepło oddawane do źródła górnego, J,

E_e - energia elektryczna do napędu sprężarki, J.

lub równaniem

$$COP = \frac{Q_2}{Q_2 - Q_1} > 1 \quad (12.2)$$

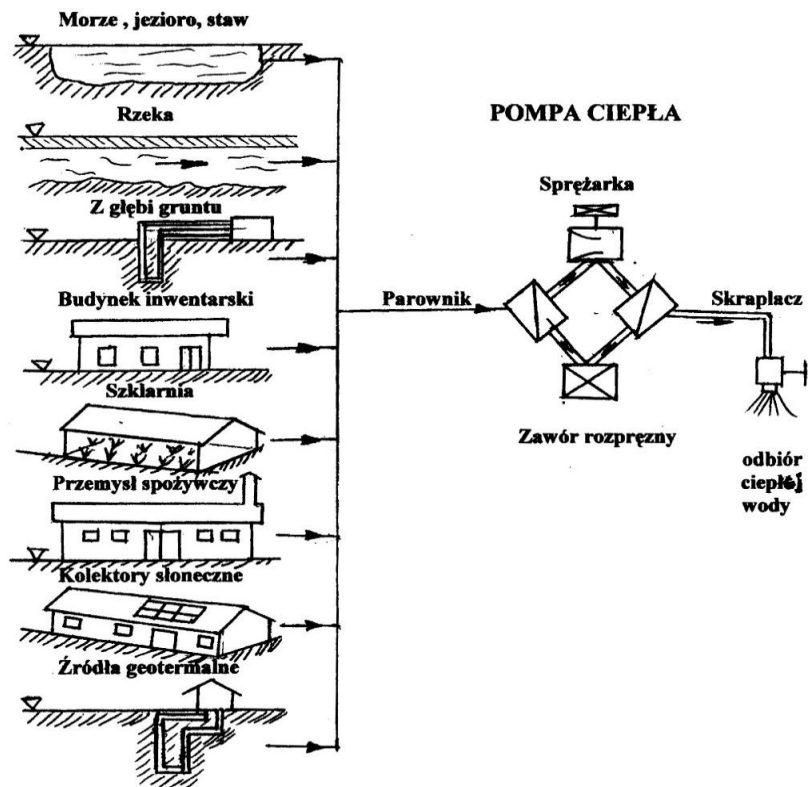
w którym: Q_1 to ciepło z dolnego źródła, J.

Podczas stosowania pomp ciepła, temperatura źródła dolnego nie powinna być wyższa niż 25°C a górnego niż 57°C. Współczynniki wydajności cieplnej pomp sprężarkowych wynoszą od 2,5 do 6,0. Natomiast współczynniki pomp absorpcyjnych są znacznie niższe i wynoszą od 1,3 do 1,7. W praktyce najczęściej stosowane są następujące pompy ciepła:

- woda - woda (W - W),
- woda - powietrze (W - P),
- powietrze - woda (P - W),
- powietrze - powietrze (P - P).

Pompy ciepła współpracują z wewnętrznymi i zewnętrznymi wymiennikami ciepła. Wewnętrzne wymienniki ciepła instalowane są wewnątrz budynku i przeznaczone do przekazywania ciepła wewnątrz budynku lub wymianę ciepła. Zewnętrzne wymienniki ciepła przeznaczone są do przekazywania ciepła ze źródła znajdującego się na zewnątrz budynku. W układzie woda - woda ciepło pobierane z wody w obiegu pompy ciepła przekazywane jest do wody w instalacji grzewczej. Woda w rzekach, jeziorach, morzu lub woda gruntowa także stanowi źródło ciepła. Na głębokości 12 - 30 metrów temperatura średnioroczna wody wynosi od + 6 do - 10°C, a temperatura wody gruntowej na głębokości 3 - 6 m wynosi średnio w ciągu roku 8 - 10°C. W układzie woda - powietrze, ciepło pobierane jest z wody i przekazywane za pośrednictwem pompy ciepła do instalacji grzewczych, ogrzewania pomieszczeń, klimatyzacji i ogrzewania wody użytkowej. W ukła-

dzie powietrze – woda, ciepło przekazywane jest z powietrza otoczenia lub z wnętrza budynków za pośrednictwem pompy ciepła do instalacji grzewczych, stosowanych do ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń, ogrzewania wody użytkowej. W układzie powietrze – powietrze, ciepło z powietrza otoczenia lub z wnętrza budynków przekazywane jest za pośrednictwem pompy ciepła do instalacji grzewczych, stosowanych do ogrzewania pomieszczeń, chłodzenia wewnątrz budynków i ogrzewania wody użytkowej. Pompy ciepła wykorzystywane są do odzysku ciepła z gruntu za pośrednictwem rurowych wymienników ciepła zagłębionych w ziemi. W sezonie letnim, na głębokości ok. 3 m średnie temperatury wynoszą 7 – 14°C. Pompy ciepła stosowane są również do współpracy z instalacjami geotermalnymi, kolektorami słonecznymi oraz z zintegrowanymi systemami energetycznymi. W produkcji rolniczej szerokie zastosowanie znajdują pompy ciepła do chłodzenia mleka [Pabis J. i in. 1989]. Pompy ciepła mogą pracować w różnych układach, np. monowalentnym, biwalentnym, biwalentnym – równoległym i alternatywnym. W układzie monowalentnym pompa ciepła stanowi jedyne źródło ciepła o stałej i wysokiej temperaturze zasilając instalację grzewczą. W układzie biwalentnym pompa ciepła współpracuje z innymi urządzeniami grzewczymi. W biwalentnym – równoległym pompa ciepła współpracuje również z innymi urządzeniami grzewczymi. Jeżeli pompa ciepła nie jest w stanie zapewnić uzyskania wymaganej temperatury, to wtedy pompa ciepła współpracuje z innymi urządzeniami grzewczymi. W układzie alternatywnym w zależności od przeznaczenia pompa ciepła, może pracować jako urządzenie grzewcze i urządzenie chłodnicze. Pompy ciepła mogą więc znaleźć w produkcji rolniczej szerokie zastosowanie. Podczas chłodzenia mleka poudojowego od temperatury 37 do 4,0°C w schładzarkach nurnikowych oraz w zbiornikach, odbiera się z każdego litra mleka około 130 kJ energii. Na rys. 12.5 pokazano możliwości wykorzystania pompy ciepła w rolnictwie i produkcji rolniczej, oraz odzysku ciepła ze zbiorników wodnych i rzek.

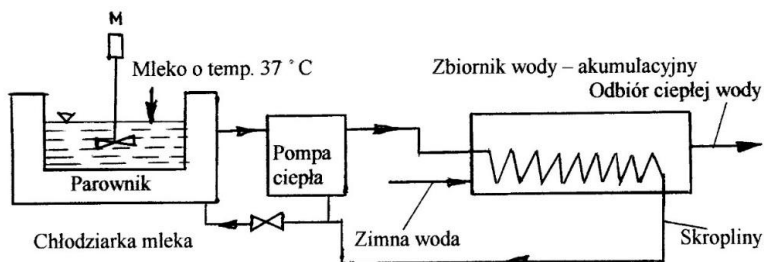


Rys. 12.5 Przykłady wykorzystania pompy ciepła w rolnictwie pracującej w układach: woda - woda i powietrze - woda do współpracy z różnymi źródłami ciepła.

Jak podaje Orliński i Piechocki [2000] podczas schładzania 1000 litrów mleka pompa ciepła o mocy 12,2 kW i poborze mocy przez silnik sprężarki 2,7 kW może odzyskać ponad 34 GJ ciepła w roku. Wykorzystując ciepło do podgrzewania użytkowej wody uzyskuje się przeciętnie z jednego litra schłodzonego mleka 0,6 litra podgrzanej wody do temperatury 45 - 50°C. Na rys. 12.6 pokazano wykorzystanie pompy ciepła do schładzania mleka i podgrzewania wody użytkowej, a w tabeli 12.1 pokazano masę podgrzanej wody do temperatury 50°C, podczas jednego udoju dla różnej liczby krów.

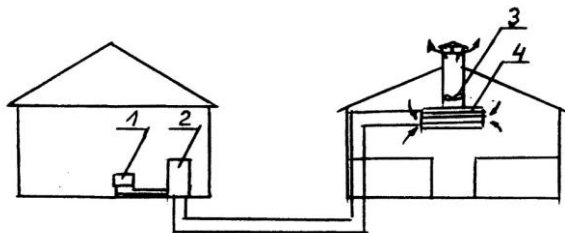
Tabela 12.1 Ilość ciepłej wody z jednego udoju o temperaturze 50°C w zależności od liczby krów [Piechocki J., Orliński J. 2000].

Liczba krów	20	30	40	60	80	100
Ilość ciepłej wody z jednego udoju o temperaturze 50°C	112	168	224	336	448	560



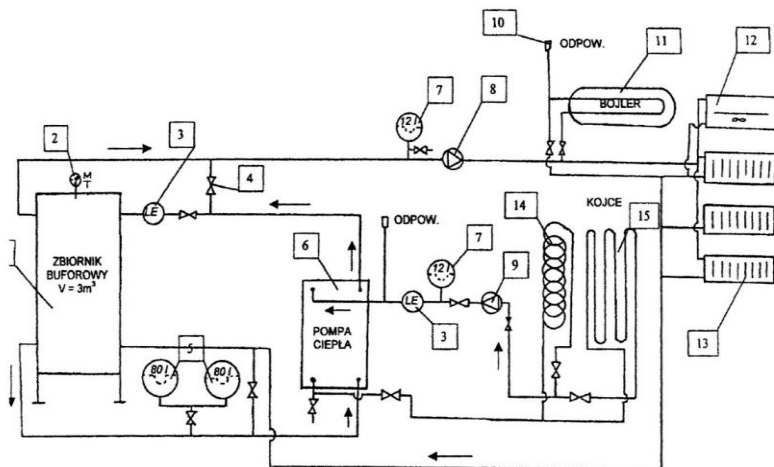
Rys. 12.6 Zastosowanie pompy ciepła do podgrzewania wody użytkowej podczas chłodzenia mleka [Pederson S. 1988].

Zastosowanie pomp ciepła w systemie wentylacyjnym w szklarniach, umożliwiło uzyskanie ok. 20% oszczędności energii cieplnej, tj. około 13 kg oleju opałowego na 1 m² powierzchni szklarni, a w produkcji pieczarek zastosowanie dwóch pomp ciepła, każda o mocy 4,0 kW, współpracujących z podgrzewaczem opalonym olejem opałowym, umożliwiło obniżenia zużycia oleju opałowego z 30000 litrów/rocznie do 13000 litrów/rocznie, przy okresie amortyzacji 4,5 roku. Na rys.12.6 pokazano zastosowanie pompy ciepła pracującej w układzie powietrze – woda. do odzysku ciepła z powietrza wewnątrz budynku inwentarskiego. Uzyskiwana energia cieplna zużywana jest na podgrzewanie wody użytkowej, [Pedersen 1990]. W budynkach inwentarskich zwierzęta wydzielają znaczne ilości ciepła, z którego część zużywana jest na utrzymanie odpowiedniego mikroklimatu, a część tracona jest podczas wentylacji pomieszczeń. W budynkach inwentarskich, oprócz ciepła zawartego w powietrzu pomieszczeń, można również odzyskać znaczne ilości ciepła z głębokiej ściółki. Na rys. 12.7 przedstawiono opracowany przez Nawrockiego [2004] i przebadany w IBMER w Strzeszynie system odzysku ciepła z głębokiej ściółki, zastosowany do kształtowania mikroklimatu w chlewni.



Rys. 12.7 Wykorzystanie pompy ciepła systemu woda - woda w budynku inwentarskim [Pedersen S. 1990].

Pompa ciepła współpracuje z rurowymi wymiennikami ciepła umieszczonymi w warstwie ściółki. Pompy ciepła mogą współpracować z wieloma odnawialnymi źródłami energii, np. siłowniami wiatrowymi, biogazowniami, źródłami geotermalnymi, urządzeniami grzewczymi do spalania biomasy oraz tradycyjnymi urządzeniami grzewczymi. Na rys. 12.8 pokazano schematycznie instalację pompy ciepła współpracującą z kolektorem słonecznym.



Rys. 12.8 Zastosowanie pompy ciepła do odzysku ciepła z głębokiej ściółki do kształtowania mikroklimatu w chlewni: 1 - zbiornik buforowy, 2 - manometr, 3 - licznik energii, 4 - zawór ulowy, 5 - naczynie ciśnieniowe, 6 - pompa ciepła, 7 - naczynie ciśnieniowe, 8 - pompa obiegowa I, 9 - pompa obiegowa II, 10 - odpowietrznik, 11 - bojler ciepłej wody użytkowej, 12 - klimakonwektor, 13 - grzejniki, 14 - wężownica spiralna, 15 - wężownica równoległa [Nawrocki J. 2004].

Kolektor słoneczny podgrzewa wodę magazynowaną w zbiorniku akumulacyjnym, w którym ta podgrzana woda stanowi dla pompy dolne źródło ciepła. Pompa ciepła dogrzewa wodę ze zbiornika akumulacyjnego do ok. 50-60°C, z którego jest kierowana do zbiornika wodnego, stąd może być wykorzystana do celów sanitarnych i ogrzewania podłogowego. Część podgrzanej wody z pompy ciepła, wraca do zbiornika akumulacyjnego, w celu wyrównania dziennych wahań temperatury. W celu regulacji temperatury wody pobieranej ze zbiornika zastosowano opalany gazem podgrzewacz wody z wymiennikiem ciepła. Opisany wyżej system umożliwia pokrycie ok. 60% rocznego zapotrzebowania na ciepło.

W praktyce często zachodzi potrzeba obliczenia energetycznych efektów pompy ciepła. Znając temperaturę dolnego źródła ciepła t_0 i górnego t_1 oraz moc silnika napędowego sprężarki N_s , ciepło uzyskane z pompy ciepła oblicza się z równania:

$$Q = \frac{T + t_1}{t_1 - t_0} E_e, \text{ J} \quad (12.3)$$

gdzie:

E_e – energia elektryczna do napędu sprężarki, J,

T – temperatura bezwzględna, K,

t_0 – temperatura dolnego źródła ciepła, °C,

t_1 – temperatura górnego źródła ciepła, °C,

Iloraz $(T+t_1)/(t_1 - t_0)$ nazywa się współczynnikiem wydajności cieplnej i oznacza się go przez COP.

Ciepło uzyskane z pompy ciepła można także wyrazić równaniem:

$$Q = \frac{T+t_1}{t_1-t_0} N_s k_p, \text{ kJ} \quad (12.5)$$

w którym:

N_s – moc silnika napędowego sprężarki, kW,

k_p – cieplny równoważnik pracy. 1 kW = 3600 J.

Podobnie, znając masę wody M_w w zbiorniku akumulacyjnym, ciepło właściwe wody c_p oraz temperatury dolnego t_0 i górnego źródła

ciepła t_1 można także w inny sposób obliczyć ciepło Q_c uzyskane z pompy ciepła:

$$Q_c = M_w c_w (t_0 - t_1), \text{ kJ} \quad (12.6)$$

gdzie:

M_w – masa wody w zbiorniku akumulacyjnym, kg,

c_w – ciepło właściwe wody, kJ/kg K.

Energia dostarczona do napędu pompy wynosi:

$$E_e = N_s t k_p, \text{ kJ} \quad (12.7)$$

gdzie:

N_s – moc silnika napędowego sprężarki, kW,

t – czas pracy pompy, h,

k_p – cieplny równoważnik pracy kW = 3600 kJ.

Współczynnik wydajności cieplnej pompy opisuje równanie:

$$COP = \frac{Q_c - Q_s}{Q_s} 100\% \quad (12.8)$$

Pompa pracuje w układzie powietrze – woda. Ciepło przekazane pompie ciepła z powietrza przez parownik i od silnika elektrycznego można obliczyć z równania:

$$Q_p = v_p \gamma_p F_p c_p t [t_1 - t_2], \text{ kJ} \quad (12.9)$$

w którym:

v_p – prędkość przepływu powietrza, m/s,

γ_p – gęstość powietrza, kg/m³,

t – czas pracy pompy, s,

F_p – pole powierzchni parownika, m²,

c_p – ciepło właściwe powietrza, kJ/kg C,

t_1 – temperatura powietrza przed parownikiem, °C,

t_2 – temperatura powietrza za parownikiem, °C.

Masa wody, jaką można ogrzać ciepłem odebrany z powietrza Q_p dzięki pracy silnika elektrycznego Q_s przy znanej różnicy temperatury wody będzie równa:

$$M_w = \frac{Q_p + Q_s}{c_w \Delta t}, \text{ kg} \quad (12.10)$$

gdzie:

c_w ciepło właściwe wody, kJ/kg K,

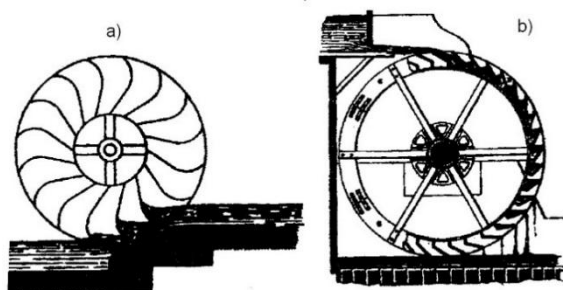
Δt – różnica temperatur wody, K.

Literatura:

- [1]. Brodowicz K., Dyakowski T. 1984. *Przykłady zastosowania pomp ciepła w przemyśle spożywczym*. „Wykorzystanie niekonwencjonalnych źródeł energii w rolnictwie”. Materiały konferencyjne IBMER, Warszawa.
- [2]. Czekalski D. 1985. *Możliwości stosowania pomp ciepła w produkcji rolniczej*. Postępy Nauk Rolniczych, nr 5.
- [3]. Nawrocki L. 2003. *Wpływ odzyskiwanie energii cieplnej z głębokiej ściółki na kształtowanie mikroklimatu w chlewni*, Rozprawa habilitacyjna. IBMER, Warszawa.
- [4]. Nicolaus A. 1998. *Head Pump. Energy conservation and renewable energy for greenhouse heating*. FAO, CNRE, Technical Series nr 3.
- [5]. Orliński J., Piechocki J. 2000. *Możliwości zastosowania pomp ciepła w rolnictwie* „Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w rolnictwie”. Materiały konferencyjne IBMER, Warszawa.
- [6]. Pabis J. i in. 1987. *Opracowanie wytycznych do konstrukcji pomp ciepła dla rolnictwa*. IBMER, Warszawa.

13. ELEKTROWNIE NA MAŁYCH CIEKACH WODNYCH

Energię wody wykorzystywano już w starożytnej Grecji w drugim wieku oraz w Babilonie i w Rzymie. Koła wodne o osi pionowej, były wprawiane w ruch pod ciśnieniem strumienia wody, działającym na łopatki umieszczone na osi koła. Bardziej doskonałymi kołami wodnymi były koła zwane podsiębiernymi. Zanurzone w strumieniu przepływającej wody, wykonywały ruch obrotowy, napędzając różne urządzenia. W pierwszym wieku p.n.e w Imperium Rzymskim wprowadzono do użytku koła wodne zwane nasiębiernymi. Koła te wprawiane były w ruch strumieniem wody spadającej z pewnej wysokości na łopatki koła. Instalowane w system różnych przekładni, stosowane były do napędu kamieni młyńskich. Spadek strumienia, uzyskiwano na powstawanie różnicy poziomów ciek wodnego budowanej grobli przegradzającej ciek wodny. Różnice poziomów cieków wodnych wynosiły od 3 m do kilkunastu metrów. W średniowieczu koła wodne dostarczały energię do młynów zbożowych, do zakładów produkcji sukna do spłisniania (folusze), w kuźniach, tartakach i innych procesach produkcyjnych. Na rys. 13.1 pokazano zasadę działania koła wodnego a) podsiębiernego i b) nasiębiernego



Rys. 13.1 Zasada działania koła wodnego a - podsiębiernego, b - nasiębiernego [Lewandowski M. 2002].

Obecnie na świecie wykorzystuje się ok. 23% potencjału hydroenergetycznego. W Polsce wykorzystuje się go w 11% [Krzyżanowski 1994].

W okresie międzywojennym w Polsce istniało 6500 różnego rodzaju zakładów wykorzystujących energię wodną. W 1954 r. czynnych było 6330 zakładów, z czego po likwidacji w następnych latach, pozostało tylko 650. Ostatnio cieszą się dużym zainteresowaniem małe elektrownie wodne zwane MEW (małe elektrownie wodne) w odróżnieniu od dużych elektrowni wodnych. Określenie małe elektrownie wodne stosuje się do obiektów o zainstalowanej mocy do 5,0 kW. Elektrownie MEW dzielą się na:

- mikro elektrownie wodne,
- mini elektrownie wodne,
- małe elektrownie wodne.

W zależności od warunków eksploatacji [Gołębiowski, Krzemień 1998] wyróżniają trzy rodzaje eksploatacji MEW:

- współpraca hydrozespołu wyłącznie z siecią państwową. W układzie tym elektrownie pracują równolegle z siecią energetyczną, która decyduje o wielkości napięcia i częstotliwości,
- praca samotna hydrozespołu na wydzieloną część energetyczną, zwaną siecią lokalną (praca MEW w tym układzie charakteryzuje się dużą zmiennością w czasie),
- współpraca z państwową siecią energetyczną oraz rezerwowe zasilanie wydzielonego sektora sieci lokalnej w przypadku braku napięcia w sieci państwowej.

W Polsce większość MEW pracuje z siecią państwową. Po roku 1981 zgodnie z uchwałą Rady Ministrów nr 192 nastąpił rozwój MEW. Po roku 1981 uruchomiono kilkadziesiąt MEW, a pod koniec 1995 r. pracowało 107 MEW będących własnością energetyki i 264 MEW będących własnością prywatną lub spółek i spółdzielni. W tabeli 13.1 przedstawiono potencjał hydroenergetyczny Polski.

Tabela 13.1 Potencjał zasobów wodno-energetycznych w Polsce [Tymiński J. 1997].

Lp.	Wyszczególnienie	% zasobów
1	Wisła	45,2
2	w tym: dolna	33,6
3	środkowa	7,8
4	górna	3,8
5	Dunajec	6,0
6	San	5,2
7	Pilica	1,2
8	Bug	2,3
9	Narew	1,3
10	pozostałe rzeki dorzecza Wisły	6,7
11	DORZECZE WISŁY	67,9
12	Odra	9,3
13	w tym: dolna	1,8
14	środkowa	4,4
15	górna	3,1
16	Nysa Kłodzka	1,0
17	Bóbr	2,3
18	Warta	2,6
19	pozostałe rzeki dorzecza Odry	2,4
20	DORZECZE ODRY	17,6
21	RZEKI PRZYMORZA	2,0
22	MAŁA ENERGETYKA	12,5
23	RAZEM krajowe zasoby wodno-energetyczne	100,0

Potencjał ten nie jest wysoki, ocenia się go na ok. 23000 – 25000 GWh/rok.

Wynika to z niskich opadów i nizinnego położenie Polski. Energia potencjalna strumienia wody zależy od wysokości spadku wody. Opisuje to równanie (13.1):

$$E_p = m_w g H_s, \text{ kW} \quad (13.1)$$

gdzie:

m_w – wieloletni przepływ średni wody, kg/h
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, przyspieszenie ziemskie,
 H_s – wysokość spadku wody, m.

Teoretyczną moc koła wodnego opisuje równanie:

$$N_t = g V_s \gamma_w H_s, \text{ kW} \quad (13.2)$$

w którym:

V_s – objętościowe natężenie przepływu wody, m^3/s ,
 γ_w – gęstość wody, kg/m^3 ,

Część energii tracona jest na pokonanie oporów przekładni mechanicznych i oporów przepływu wody w układzie doprowadzającym wodę. Uwzględniając sprawność urządzenia wyrażoną to stosunkiem mocy rzeczywistej N_z do mocy teoretycznej N_t , otrzymamy:

$$\eta = \frac{N_z}{N_t} < 1 \quad (13.3)$$

Moc znamionową elektrowni wodnej opisuje równanie:

$$N = g V_t \gamma_w H_s \eta, \text{ kW} \quad (13.4)$$

w którym dodatkowo:

γ_w – gęstość wody, kg/m^3 ,
 η – sprawność, %.

Dla wybranego odcinka cieku wodnego uzyskana energia wyniesie:

$$E_{\dot{s}_r} = 8760 N_{\dot{s}_r}, \text{ kWh.} \quad (13.5)$$

W tabeli 13.2. przedstawiono według Lewandowskiego, [2002] warunki stosowania kół wodnych.

Tabela 13.2 Zakres stosowania kół wodnych [Lewandowski J. B. 2002].

Rodzaj koła	Przepływ V_t	Spad H_s	Sprawność η	Moc kW
	m^3/s	m	%	kW
Przedsiębierne	5,0	0,1	0,2	0,98
Śródsiębierne	5,0	0,2 - 0,3	0,25	3,7
Nasiębierne	0,8	3,0 - 10	0,7 - 0,8	16 - 63

Warunki stosowania tych kół to:

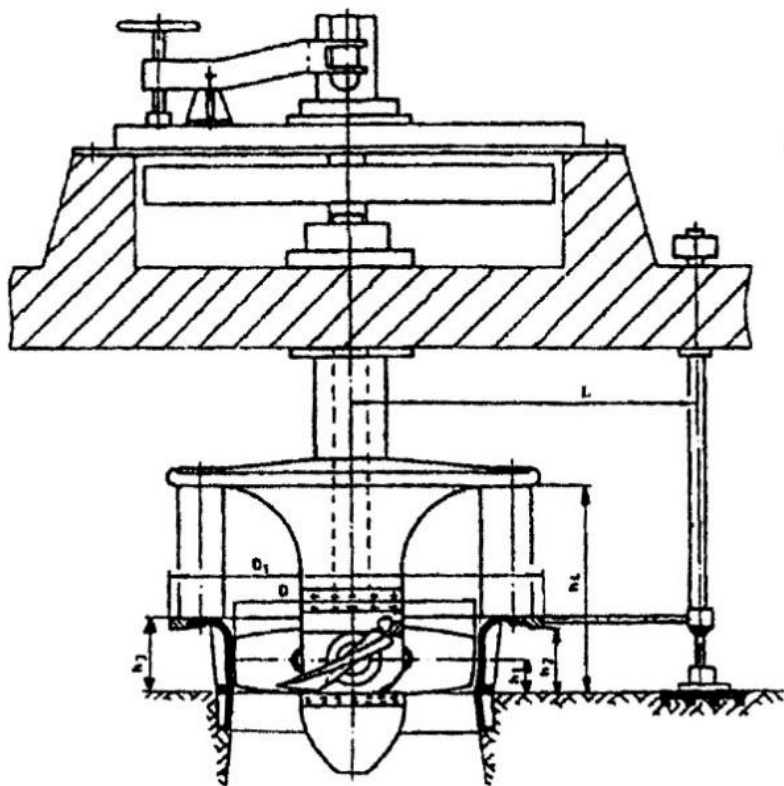
- nierównomierność naturalnych przepływów wody,
- naturalna zmienność spadów wody,
- warunki terenowe,
- pobór wody dla celów nie energetycznych,
- sprawność urządzeń,
- zmienność spadków wody wynikającej z gospodarki wodnej w zbiornikach,
- zapewnienie minimalnego przepływu wody w korycie rzeki poza elektrownią.

Dalszy rozwój silników opartych na kołach wodnych doprowadził do utworzenia turbiny wodnej, w której w przewodzie rurowym był zainstalowany wirnik turbiny, przez który przepływała woda. Turbiny wodne dzielą się na turbiny akcyjne i turbiny reakcyjne.

Pierwszą reakcyjną turbiną wodną była turbina zwana również młynkiem Segnera, zbudowana w 1750 r. Turbina akcyjna została zbudowana w 1880 r. przez Peltona. W praktyce podział turbin przyjęto wg nazwisk ich twórców.

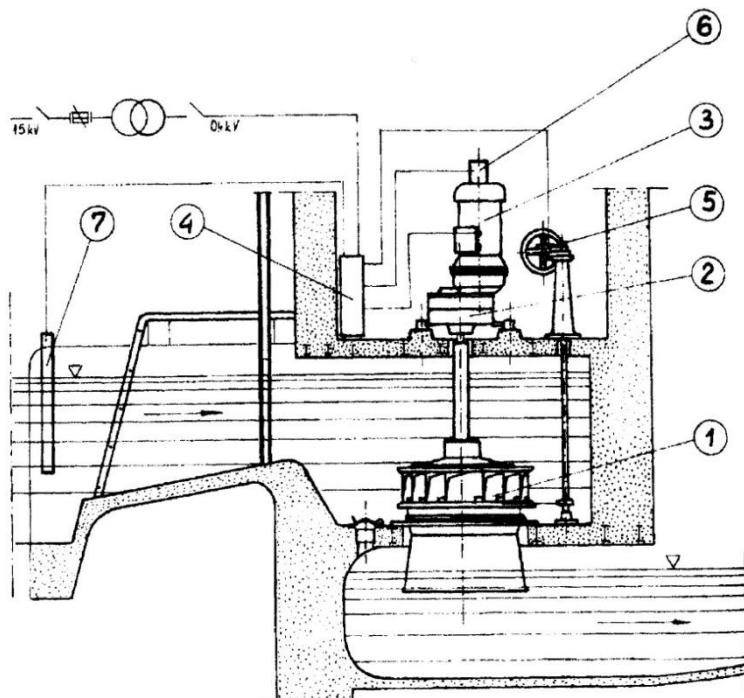
Turbiny Kaplana. Jest stosowana przy niskich spadkach wody. Na rys. 13.2 pokazano zasadę dziania turbiny Kaplana.

Turbina posiada wirnik o łopatkach otwartych. Mechanizm zmiany ustawienia łopatek, w zależności od obciążenia turbiny, umieszczony jest w rurowym wale wirnika. Podwójna regulacja ustawienia łopatek wirnika i kierownicy pozwala na uzyskiwanie sprawności powyżej 90%. Odmianami opisanej turbiny jest turbina śmigłowa z pojedynczą regulacją łopatek wirnika lub kierownicy oraz turbina rurowa o osi poziomej, ukośnej lub pionowej.



Rys. 13.2 Zasada działania wodnej turbiny Kaplana typu TW 1550 produkcji Mechtron [Gołębiowski S., Krzemień Z. 1998].

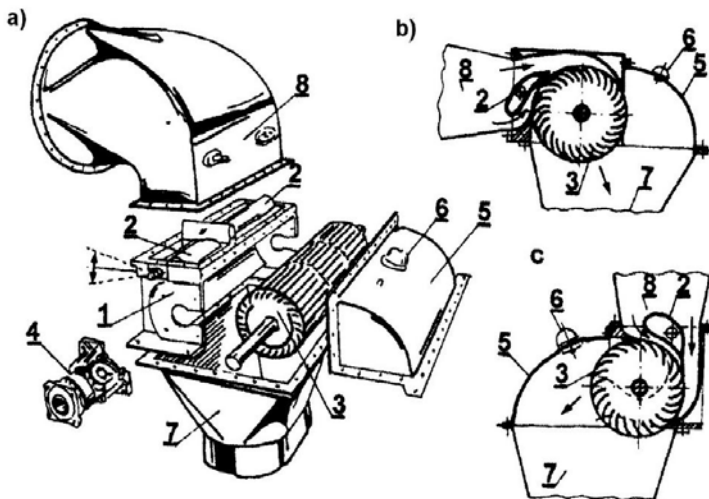
Turbiny Francisa. Turbiny te stosowane są od 1855 r. do dnia dzisiejszego. Zasadę działania turbiny pokazano na rys. 13.3



Rys. 13.3 Zasada działania wodnej turbiny Franciszki produkcji firmy FONAR w zabudowie: 1 - turbina, 2 - przekładnia zębata, 3 - generator, 4 - układ sterowania, 5 - mechanizm napędowy łopatek kierownicy, 6 - tachoprądnica, 7 - sonda pomiarowa poziomu wody [Gołębiowski S., Krzemień Z. 1998].

Woda za pośrednictwem, tzw. kierownicy doprowadzana jest do wirnika turbiny. W wirniku następuje zamiana energii przepływającej wody na pracę mechaniczną. Turbiny Franciszki stosowane są do spadków wody powyżej 10 m. Budowane są w kilku wariantach konstrukcyjnych umożliwiającym stosowanie ich w różnych warunkach hydrotechnicznych. Turbiny o osiach pionowych, instalowane w komorach otwartych, stosowane są w małych elektrowniach wodnych. Turbiny o osiach poziomych instalowane są bardzo rzadko.

Turbiny Banki – Michella. Są to turbiny przepływowe, akcyjne, charakteryzujące się bardzo prostą budową. Pracują przy spadkach wody 3,0 – 5,0 m. Na rys. 13.4 pokazano zasadę działania takiej turbiny. Wirnik posiada kształt walca, na pobocznicy, którego zamocowane są łopatki. Strumień wody przepływa przez wirnik całą jego szerokością. Na wlocie do wirnika zainstalowana jest dzielona ruchoma kierownica, pozwalająca na uzyskiwanie kilku natężeń przepływu wody.



Rys. 13.4 Zasada działania wodnej turbiny Banki – Michella: a – widok b – przy poziomym doprowadzeniu wody: 1 – korpus turbiny, 2 – kierownica, 3 – wirnik, 4 – łożyskowanie wirnika, 5 – osłona wirnika, 6 – zawór napowietrzający, 7 – rura ssąca, 8 – króciec wlotowy [Dreszer K., Michałek R., Roszkowski A. 2003].

Turbiny wodne charakteryzuje wyróżnik szybkobieżności opisany empirycznym równaniem:

$$\eta_s = -\frac{1,17n\sqrt{P}}{\sqrt[4]{H^5}} \quad (13.6)$$

gdzie:

- n – prędkość obrotowa wirnika turbiny, obr/min,
- P – moc turbiny, kW,
- H – spadek wody, m.

Wyróżnik szybkobieżności decyduje o zastosowaniu turbiny do określonego spadku wody oraz wyznacza proporcję wirników określonych typów. Wyróżnia się turbiny średnio i szybkobieżne, w zależności od wartości wyróżnika szybkobieżności, w stosunku do wartości granicznych. W tabeli 13.3, zestawiono wyróżniki szybkobieżności dla podstawowych typów turbin.

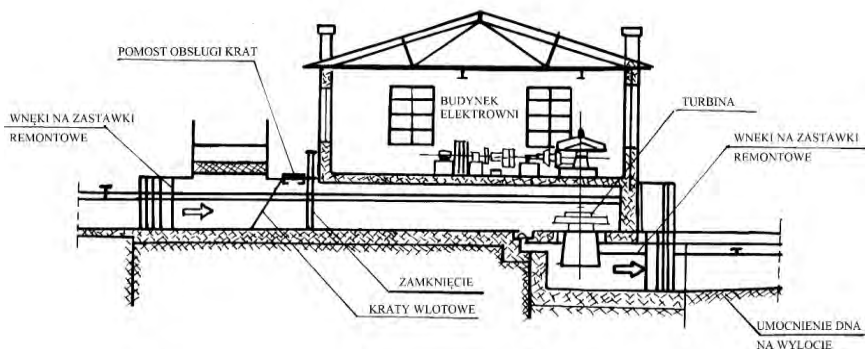
Tabela 13.3 Zastosowanie wyróżników szybkobieżności dla podstawowych turbin [Junkiewicz S., Michałowski S. 1997].

Szybkobieżność	Typ turbiny		
	Peltona	Francisa	Kaplana
Wolnobieżne	2 - 10	50 - 150	300 - 500
Średnobieżne	12 - 18	200 - 250	600 - 700
Szybkobieżne	20 - 35	300 - 450	800 - 1000

Najważniejsze rodzaje turbin stosowanych w MEW zestawiono w tabeli 13.4 a na wykresie rys. 13.5 przedstawiono sprawności wybranych rodzajów turbin w zależności od przełyku.

Tabela 13.4 Zastosowanie turbin MEW [Tymiński J. 1997].

Typ turbiny	Zakres spadów m	Zakres przepływów m ³ /s	Regulacja przełyku
Kaplana pionowa D ₁ = 900 - 2400	2 - 10	5 - 30	Regulacja podwójna
Rurowa kolanowa pozioma (typu „S”) D ₁ = 500 - 2100	2 - 20	1 - 30	Regulacja pojedyncza (łopatki wirnika)
Rurowa kolanowa pionowa (typu „Z”) D ₁ = 500 - 2100	10 - 25	1 - 30	Regulacja pojedyncza (łopatki wirnika)
Banki Michella, pozioma D ₁ = 400 - 700	3 - 10	0,2 - 4	Regulacja pojedyncza łopatkami kierownicy
Lewarowa, pionowa lub pozioma	1,5 - 5	0,4 - 1,5	Bez regulacji
Zatapialny turbospół (monoblok z prądnicą)	2,5 - 20	0,7 - 11	Regulacja pojedyncza (łopatki wirnika) lub bez regulacji

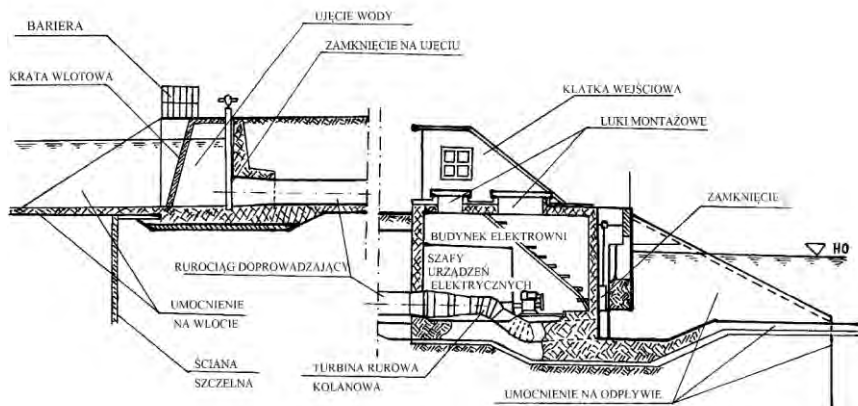


Rys. 13.5 Mała elektrownia wodna z ujęciem wodnym przy pomocy kanału otwartego [Gołębiowski S., Krzemień Z. 1998].

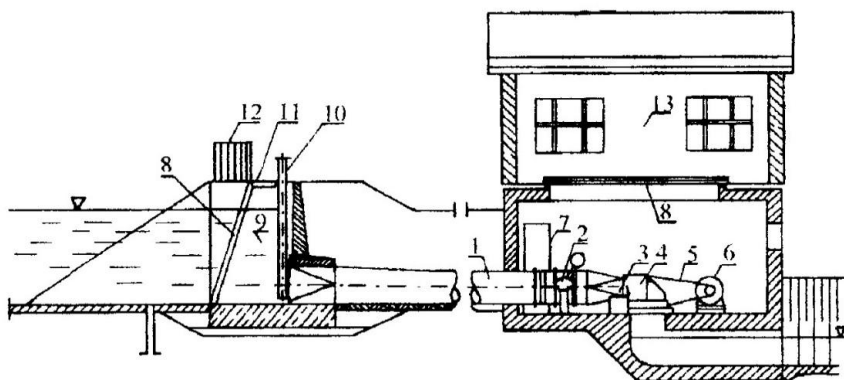
W skład elektrowni wodnych wchodzi różne urządzenia hydrotechniczne i budowle piętrzące, mające na celu wytworzenie spadku wody i skierowanie jej do kanału piętrzącego lub zbiornika. Rozróżnia się dwa rodzaje budowli piętrzących: jazy i zapory. Głównym celem jazu jest spiętrzenie wody w korycie cieku wodnego, zaś zapory powodują utworzenie zbiornika wodnego przez spiętrzenie wody w dolinie rzeki. Małe elektrownie wodne składają się z kilku elementów:

- ujęcia wodnego,
- dopływu wody do budynku elektrowni,
- budynku elektrowni,
- odpływu wody z budynku elektrowni.

Ujęcie wody związane jest z budynkiem elektrowni, usytuowanym w linii zapory wodnej, często poprzedzonej krótkim kanałem. Na rys. 13.6 pokazano MEW z ujęciem związanym z budynkiem elektrowni, a na rys. 13.7 MEW z ujęciem wody przy pomocy kanału otwartego.



Rys. 13.6 Mała elektrownia wodna z doprowadzeniem wody rurociągiem od ujęcia wody do ujęcia elektrowni [Gołębiowski S., Krzemień Z. 1998].



Rys. 13.7 Mała elektrownia wodna z wodną turbiną Banki - Michella: 1 - rurociąg doprowadzający, 2 - zawór motylkowy z zamknięciem ciężarowym, 3 - regulator turbiny, 4 - turbina Banki - Michella, 5 - pas transmisyjny, 6 - prądnica, 7 - szafa sterowniczo-rozdzielcza, 8 - luk montażowy, 9 - ujęcie wody, 10 - zamknięcie wody, 11 - pomost obsługi, 12 - bariera, 13 - budynek elektrowni [Dreszer K., Michałek R., Roszkowski A. 2003].

Woda do ujęcia elektrowni może być doprowadzona rurociągiem o średnicy ok. 1,0 – 1,2 m i przepływa z prędkością ok. 3,0 m/s.

W budynku elektrowni znajdują się pomieszczenia urządzeń hydromechanicznych elektrycznych, tj. turbiny z instalacjami towarzyszącymi technicznymi, generatory, rozdzielnie i akumulatornie. Odpływ wody z elektrowni odbywa się kanałem otwartym.

Literatura:

- [1]. Gołmbiowski S., Krzemień Z. 1998. *Przewodnik inwestora małej elektrowni wodnej*. Biblioteka Poszanowania Energii.
- [2]. Hoffman M. *Małe elektrownie wodne, poradnik*,. Wyd. II poprawione. Wyd. NABBA.
- [3]. Jackowski K. 1971. *Elektrownie wodne. Turbozespoły i wyposażenie*. WNT, Warszawa.
- [4]. Jackowski K. 1975 *Elektrownie wodne. Konstrukcja i zasady regulacji*. WNT, Warszawa.
- [5]. Krzyżanowski W. 1971. *Turbiny wodne. Konstrukcja i zasady regulacji*. WNT, Warszawa.
- [6]. Lewandowski J. 2002. *Małe elektrownie wodne*. Czysta Energia. Nr 4, OB-RYS, Poznań.
- [7]. Tymiński J. 1997. *Wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce do 2030 r aspekty energetyczne i ekologiczne* [ekspertyz]. IBMER, Warszawa.

14. ENERGIA GEOTERMALNA

Energia geotermalna określana jest, jako naturalna energia cieplna nagromadzona w wnętrzu ziemi. Energia cieplna zakumulowana jest w gruntach porowatych, przestrzeniach skał w postaci wody i pary wody. Złoża geotermalne usytuowane są pod skałami nieprzepuszczalnymi. W wyniku wymiany ciepła na zasadzie przewodnictwa i konwekcji swobodnej, ciepło z jądra ziemi mającego temperaturę ok. 5000°C przemieszcza się w jej górne warstwy, tworząc złoża energii geotermalnej. Wzrost temperatury w głębi ziemi zależy od warunków geologicznych, sposobu ułożenia skał, zawartości wody w skałach i przewodnictwa cieplnego skał. Przyrost temperatury o 1 K przypadający na głębokość mierzoną w metrach, nazywa się gradientem geotermicznym. W Europie stopień geotermiczny wynosi 33 m. Wzrost temperatury w głębi ziemi zależy również od sąsiedztwa wulkanów, jak też procesów rozpadu pierwiastków radioaktywnych [Kapuściński i in. 1997]. W oparciu o gradient geotermiczny, można wyróżnić następujące typy obszarów geotermicznych

- obszary o normalnej wartości gradientu geotermicznego zmieniającego się w zakresie od kilku do ok. 40°C na kilometr (skały krystaliczne i obszary plafonowe),
- obszary semitermalne o gradientach geotermalnych do 70°C na kilometr,
- obszary hipertermalne o gradientach poniżej 70°C.

W obszarach geotermicznych tych zawarte są specjalne tereny skorupy ziemskiej, gdzie anormalnie wysokie temperatury występują blisko powierzchni ziemi. Wykorzystanie wód geotermalnych uzależnione jest od właściwości hydrogeologicznych zbiornika geotermalnego. Według, Rogulskiej [2003.] wyróżnia się dwa rodzaje systemów hydrotermalnych:

- naturalne systemy hydrotermalne, których energia cieplna pozyskiwana jest w postaci wody lub pary wodnej zawartych w ośrodku skalnym,

- sztuczne systemy hydrotermalne obejmujące suche gorące skały, z których energia cieplna pozyskiwana jest na drodze właczania i wypompowywania wody ze skał [Sokołowski 2002], ze względu na charakter takich nośników energii, złoża geotermalne dzieli na:
 - złoża wód geotermalnych,
 - złoża przegrzanej pary wodnej,
 - złoża nagrzaných suchych skał.

Natomiast ze względu na temperatury złoża geotermalne dzielą się na:

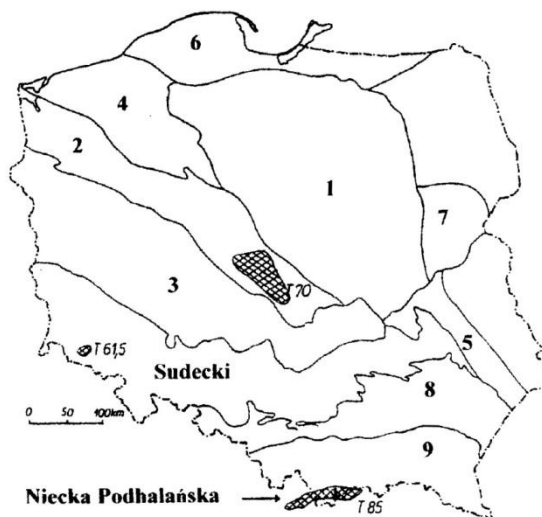
- zimne (do 20°C),
- ciepłe niskotemperaturowe (20 - 30°C),
- gorące lub średnotemperaturowe (35 - 80°C),
- bardzo gorące lub wysoko temperaturowe (100 - 130°C).

Wody geotermalne występują w Polsce na obszarze ok. 2511 km². Ich pojemność wynosi 668 km³ wody o temperaturze od 25 - 150°C. Energia cieplna zawarta na terenach Polski w wodach geotermalnych równoważna jest 34724 mld t.p.u (ton paliwa umownego).

Szacowane z obliczeń potencjalne zasoby wód geotermalnych, energia cieplna w nich zawarta oraz równoważność ropy naftowej wynoszą [Sokołowski 2002]:

- w obszarze niżowym - 5904 mld m³, co odpowiada 19054 mln ton ropy,
- w obszarze podkarpackim - 34 mld m³, co odpowiada 1024 mln ton ropy,
- w obszarze karpackim - 100 mld m³, co odpowiada 5000 mln ton ropy.

Polska posiada bogate zasoby wód geotermalnych rozłożone równomiernie na znacznej powierzchni kraju. Na rys. 14.1 przedstawiono mapę okręgów geotermalnych w Polsce, a w tabeli 14.1 potencjalne zasoby energii geotermalnej w Polsce.



Rys. 14.1 Mapa okręgów geotermalnych w Polsce [Ney R., Sokołowski J. 1987].

Tabela 14.1 Potencjalne zasoby energii geotermalnej w Polsce [Sokołowski J. 1995].

Lp.	Nazwa okręgu	Powierzchnia obszaru [km ²]	Objętość wód geotermalnych [km ³]	Zasoby energii cieplnej [mln tpu]
1	grudziądzko - warszawski	70000	2766	9835
2	szczecińsko - łódzki	67000	2854	18812
3	przed sudecki - północno świętokrzyski	39000	155	995
4	pomorski	12000	21	162
5	lubelski	12000	30	193
6	przy bałtycki	15000	38	241
7	podlaski	7000	17	113
8	przed karpacki	16000	362	1555
9	karpacki	13000	100	714
	RAZEM	251000	6343	32620

Najlepsze warunki występowania wód geotermalnych znajdują się na Niziu Polskim podzielonym na okręgi geotermalne. Największe zasoby wód geotermalnych występują w okręgu Grudziądzko – Warszawskim i Szczecińsko – Łódzkim.

Ciepło z wnętrza ziemi zaczęto wykorzystywać już w starożytności. W epoce brązu budowano łaźnie w Gruzji i Armenii. Do dzisiejszych czasów zachowały się tam pozostałości łaźni rzymskich. W Polsce wody geotermalne wykorzystywane były już w X wieku do celów leczniczych. W latach dwudziestych XIX wieku zbudowano baseny termalne w Ciechocinku. Obecnie wody geotermalne wykorzystywane są w takich uzdrowiskach jak: Łądek Zdrój, Duszniki Zdrój, Ciechocinek, Iwonicz Zdrój, Konstancin. W latach sześćdziesiątych XX wieku zasoby wód geotermalnych na Podhalu.

Geotermalne systemy ciepłownicze. Obecnie w eksploatacji znajdują się cztery zakłady geotermalne w Zakopanem, Pyrzycach, Uniejowie i w Mszczonowie. Na rys. 14.2 przedstawiono obiekty geotermalne na terenie Polski, a w tabeli 14.2 zestawiono dane techniczne i eksploatacyjne ciepłowni geotermalnych na terenie Polski.



Rys. 14.2 Obiekty geotermalne na terenie Polski [Onoszek-Popławska A., Zowski M., Rogulska M. 2003].

Tabela 14.2 Dane techniczno - eksploatacyjne ciepłowni geotermalnej w Polsce [Oniszk-Popławska A., Zowsik M., Rogulska M. 2003].

Ciepłownia	Pyrzyce	Zakopane	Mszczonów	Uniejów
Całkowita moc	52,8 MW	67,4 MW	7,5 MW	5,6 MW
Moc członu geotermalnego	12,8 MW	38 MW	1,72 MW	3,2 MW
Całkowita roczna produkcja energii	143000 GJ	258000 GJ	43600 GJ	19500 GJ
Roczna produkcja energii z członu geotermalnego	85800 GJ	160000 GJ	7800 GJ	11700 GJ
Głębokość otworów	1620 m	2500 m	1700 m	2012 m
Temperatura wody geotermalnej	61°C	82°C	42°C	70°C

Na Podhalu, w rejonie Zakopanego, czynne są cztery ujęcia wód geotermalnych o całkowitej mocy cieplnej 67,4 MW i temperaturach solanki na wypływie 72 - 82°C. Gorąca solanka przetłaczana jest przez wymiennik ciepła, gdzie oddaje ciepło wodzie z sieci, a następnie tłoczona jest do złoża zlokalizowanego na głębokości 2000 - 3200 m. W Pyrzycach znajdują się dwa ujęcia geotermalne solanki na głębokości 1640 m wyposażone w wymienniki ciepła z obiegiem powrotnym solanki do złoża. Temperatura solanki na wypływie wynosi 61 - 63°C. W Mszczonowie zakład geotermalny został zbudowany w 2000 r. Woda geotermalna wydobywana jest z odwiertu o głębokości 1600 - 1700 m za pomocą wielostopniowej pompy głębinowej. Woda o temperaturze 44°C z zastosowaniem absorpcyjnej pompy ciepła schładzana jest do temperatury 20 - 30°C, a następnie przetłaczana jest do stacji uzdatniania, skąd rozprowadzana jest do użytkowników. W Uniejowie woda geotermalna o temperaturze 68°C wypływa z trzech odwiertów. Ciepłownia geotermalna współpracuje z kotłownią opalaną olejem opałowym. Kotłownia wykorzystywana jest do dogrzewania wody w okresie szczytowego zapotrzebowania na energię cieplną. Możliwości wykorzystania wód geotermalnych zależą od ich temperatury. Wody geotermalne o temperaturze powyżej 100°C, mogą być wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej w elektrowni geotermalnej z turbiną parową, gdzie czynnikiem roboczym jest para wodna. Wody geotermalne o temperaturach 50 - 100°C wykorzystywane są do ogrzewania pomieszczeń mieszkal-

nych, technologicznych, szklarni, hodowli zwierząt, hodowli ryb, zakładach przetwórstwa rolno – spożywczego i do basenów kąpielowych.

Literatura:

- [1]. Kapuściński J. in. 1997. *Zasady i metodyka dokumentowania zasobów wód geotermalnych i energii geotermalnej oraz sposoby odprowadzania wód zużytych*. Poradnik metodyczny, Warszawa.
- [2]. Kępińska B. 2001. *Energia geotermalna stan i perspektywy wykorzystania. pt. „Odnawialne źródła energii u progu XXI wieku”*. Materiały konferencyjne EC BREC, IBMER, Warszawa.
- [3]. Ney R. Sokołowski J. 1987. *Wody geotermalne Polski i możliwości ich wykorzystania*.
- [4]. Oniszek-Popławska A Zowski M. Rogulska M. 2003. *Ciepło z wnętrza ziemi*. [Informator] EC BREC, IBMER, Warszawa.
- [5]. Rogulska M. Grzybek A. Wiśniewski G. 1994. *Wykorzystanie produktów rolniczych na cele energii w rolnictwie*. (Sprawozdanie) IBMER, Warszawa.
- [6]. Sokołowski J. 1995. *Polish Geothermal Association and Polish Academy of Sciences. Geothermal Provinces and Basins in Poland*. Kraków.
- [7]. Sokołowski J. 2002. *Geotermia w rolnictwie*, Czysta Energia nr 1 ABRYŚ, Poznań.

15. ZINTEGROWANE SYSTEMY ENERGETYCZNE

W odróżnieniu od stosowanych obecnie odnawialnych źródeł energii instalowanych w systemie rozproszonym (oddzielnie), stosowanie zintegrowanych systemów energetycznych umożliwi znacznie lepsze i szersze ich wykorzystanie w praktyce. Mogą one zapewnić ciągłą dostawę energii do gospodarstwa rolniczego. Zintegrowane systemy energetyczne pozwalają na współpracę kilku odnawialnych źródeł energii pomiędzy sobą, lub z tradycyjnymi źródłami energetycznymi. Będzie to, np. współpraca kolektora słonecznego z pompą ciepła i siłownią wiatrową, lub też współpraca ww. źródeł z podgrzewaczem powietrza opalany węglem. Wyniki krajowych prac badawczych prowadzonych przez IBMER w latach 1985 – 1990 [Tymiński 1988, Pabis J., Rogulska 1991] oraz zagranicznych [Jelonkowa i in.1985, Krystis i in. 1985, Castelli in. 1985] wykazały, że stosowanie zintegrowanych systemów energetycznych umożliwi uzyskanie ok. 10 – 20% energii więcej niż ze źródeł rozproszonych, a w niektórych technologiach, np. w suszarnictwie produktów rolniczych nawet do 30%. Energia uzyskiwana z odnawialnych źródeł ograniczona jest wieloma czynnikami, tj. warunkami atmosferycznymi, porami roku i dnia, położeniem geograficznym, sprawnościami cieplnymi, zasobami surowcowymi w przypadku biomasy oraz pokładami wód geotermalnych. Zintegrowane systemy energetyczne w porównaniu do źródeł rozproszonych pozwalają na większą elastyczność w sterowaniu, większe możliwości okresowej akumulacji ciepła, większą niezawodność systemu energetycznego, jak też ochronę środowiska naturalnego. Obiektem zastosowania zintegrowanego systemu energetycznego może być każde gospodarstwo rolne, wyodrębniona część gospodarstwa, grupa gospodarstw rolnych. System taki można więc zastosować wszędzie tam, gdzie istnieje zapotrzebowanie na niskotemperaturowe źródła energii. Projektowanie zintegrowanego systemu energetycznego dla zadanego obiektu, warunków i technologii, musi być poprzedzone analizą szeregu czynników, mających bezpośredni wpływ na strukturę tego obiektu. Zintegrowany system energetyczny powinien bilansować potrzeby energetyczne gospodarstwa rolniczego przez zastosowania różnych odnawialnych i tradycyjnych źródeł energii [Rogulska 1991].

Analizę można podzielić na etapy:

- analiza lokalnych czynników klimatycznych i struktury gospodarstwa rolniczego,
- analizę potrzeb energetycznych (dziennych, miesięcznych i rocznych gospodarstwa rolniczego w rozbiciu na typ i rodzaj energii: energię cieplną, energię elektryczną itp., oraz punkty odbioru energii),
- analizę ilości produkowanej energii (dziennie, miesięcznie i rocznie) oraz poszczególne urządzenia i maszyny wykorzystujące odnawialne źródła energii tj. kolektory słoneczne, siłownie wiatrowe, instalacje biogazowni, pompy ciepła oraz spalanie biomasy,
- analizę techniczno-ekonomiczną wykazującą zasadność instalowania odnawialnych źródeł energii,
- analizę doboru urządzeń towarzyszących zintegrowanemu systemowi jak np. pompy wodne, wentylatory transportery, aparatura kontrolno-pomiarowa i inne.

W projektowaniu zintegrowanych systemów energetycznych do analizy zapotrzebowania, produkcji energii i jej bilansowania wykorzystano w IBMER system SIENA (Sistemi Energetici Agricoli), składający się z trzech bloków [Rogulska. 1991, Rogulska 1996] o nazwach:

POTRZEBY - program symulujący dzienne zapotrzebowanie na energię cieplną i elektryczną na podstawie pomiarów miesięcznego zużycia energii w gospodarstwie rolniczym w skali rocznej,

ENERGIA - programy określające (na podstawie pomiarów) ilości energii produkowanej dziennie w skali roku,

ANALIZA - na który składają się poniżej wskazane podprogramy:

DANE - zakłada zbiór z danymi wejściowymi,

BILANS - dokonuje bilansu energetycznego na podstawie danych ze zbioru parametrów eksploatacyjnych,

WYDRUK - drukuje sumaryczne zestawienie wyników.

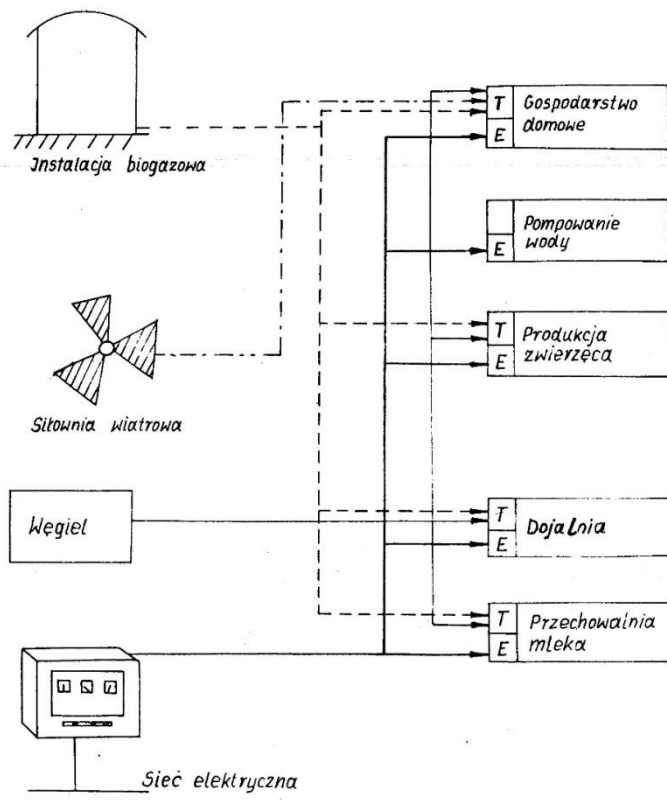
W sumarycznym, zestawieniu dla każdego układu urządzeń odnawialnych źródeł energii podawane są wskaźniki energetyczne i ekonomiczne, a więc:

- ilości energii uzyskiwanej w danym systemie energetycznym,
- stopień pokrycia potrzeb energetycznych,
- całkowite koszty urządzeń zainstalowanych w systemie,

- roczne koszty eksploatacji urządzeń i okres spłaty urządzeń.

Przykłady zintegrowanych systemów energetycznych

Na rys. 15.1 pokazano zintegrowane system energetyczne w gospodarstwie rolnym, opracowane w IBMER.

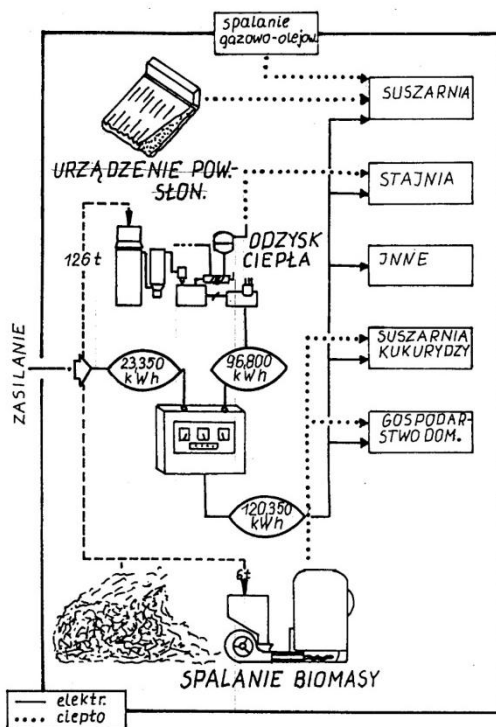


Rys. 15.1 Zintegrowany system energetyczny w gospodarstwie hodowli bydła mlecznego [IBMER].

Gospodarstwo rolne o powierzchni upraw 15 ha o specjalizacji hodowli bydła mlecznego o obsadzie stada 24 krów mlecznych, zużywa rocznie ok. 26000 kWh energii elektrycznej, 6 ton węgla i ok. 2800 kg oleju napędowego. Zintegrowany system energetyczny składa się tu z:

Produkcja warzyw prowadzona jest w dwóch szklarniach o powierzchni 600 m² oraz w 7 tunelach foliowych o łącznej powierzchni 1200 m². Został zaprojektowany zintegrowany system energetyczny z dwoma podsystemami, a mianowicie:

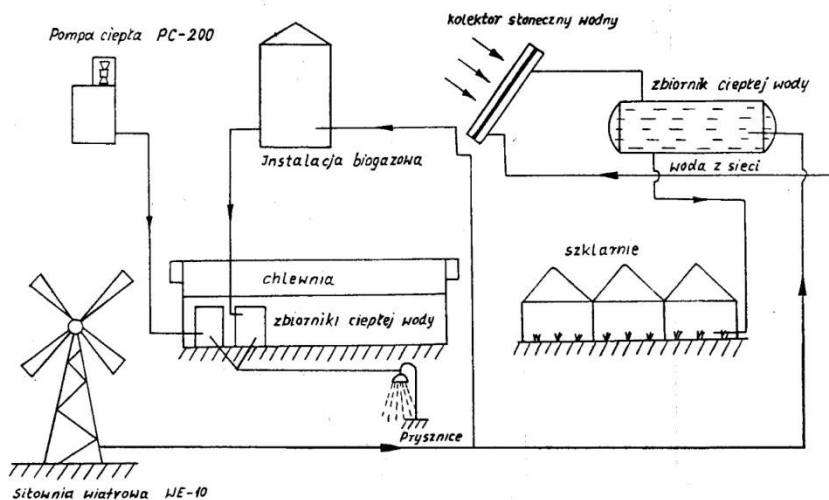
- podgrzewanie wody użytkowej z zastosowaniem pompy ciepła oraz instalacji biogazowej (pojenie zwierząt, rozcieńczanie karmy, parowanie pasz oraz podgrzewanie wody dla celów społecznych),
- podgrzewanie wody z zastosowaniem kolektora słonecznego o powierzchni 30 m², oraz siłowni wiatrowej WE – 10 ze zbiornikiem akumulacyjnym wodnym o pojemności 30000 litrów i łącznej mocy grzejników elektrycznych 24 kW.



Rys. 15.3 Zintegrowany system energetyczny w gospodarstwie ST. Ciasno, Włochy [Castelli i in. 1985]

Oprócz wykorzystania siłowni wiatrowej do podgrzewania wody użytkowej, energia elektryczna wykorzystywana jest do podgrzewania gnojowicy w zbiorniku fermentacyjnym. Bilans energetyczny tego zintegrowanego systemu wykazał, że w ciągu roku obniżenie energii cieplnej uzyskiwanej z tradycyjnych źródeł uległo o 6,5%, co w przeliczeniu na zużycie węgla wynosi to ok. 6,5 tony.

Na rys. 15.3 pokazano zintegrowany system w gospodarstwach rolnym Pouhow, a na rys. 15.4 w gospodarstwie rolnym Uherce w Republice Czeskiej [Jelinkowa 1987].

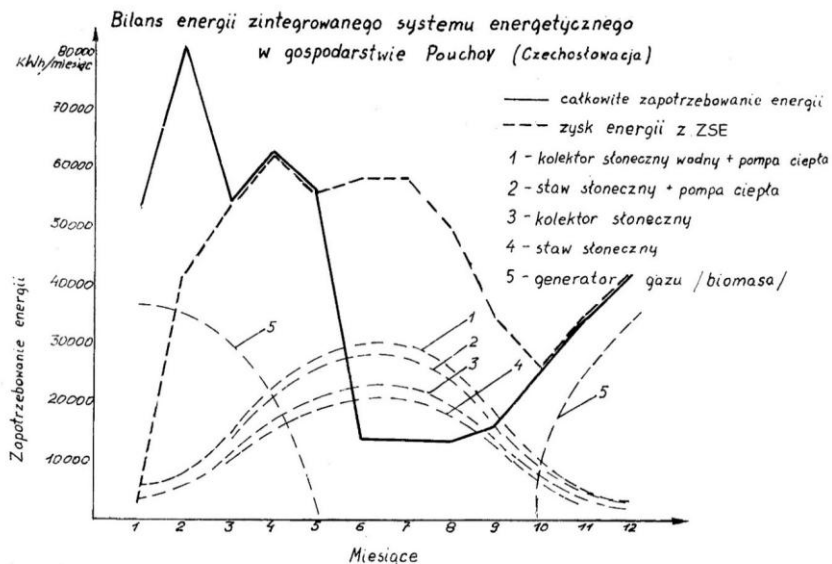


Rys. 15.4 Zintegrowany system energetyczny w gospodarstwie hodowli świń i w szklarni [Pabis J. i in. 1990].

Dwie pompy ciepła o układzie woda - woda, każda o mocy 30 kW, współpracują ze stawem słonecznym o powierzchni 256 m² i pojemności 150 m³ oraz z kolektorem słonecznym o powierzchni 250 m². Gaz uzyskany z gazyfikacji odpadów drewna wykorzystany jest do napędu silnika spalinowego, podgrzewania wody oraz podgrzewania powietrza w suszarce zielonek. Podgrzana woda wykorzystywana jest do podgrzewania podłoża i nawadniania roślin w szklarni oraz do celów bytowych i socjalnych w budynku. Wyniki badań i bilans energetyczny

wskazują, że zintegrowany system energetyczny pokrywa w 100% zapotrzebowanie energii w gospodarstwie.

Na wykresie rys. 15.5 pokazano bilans energetyczny zintegrowanego systemu energetycznego w gospodarstwie Pouhow.

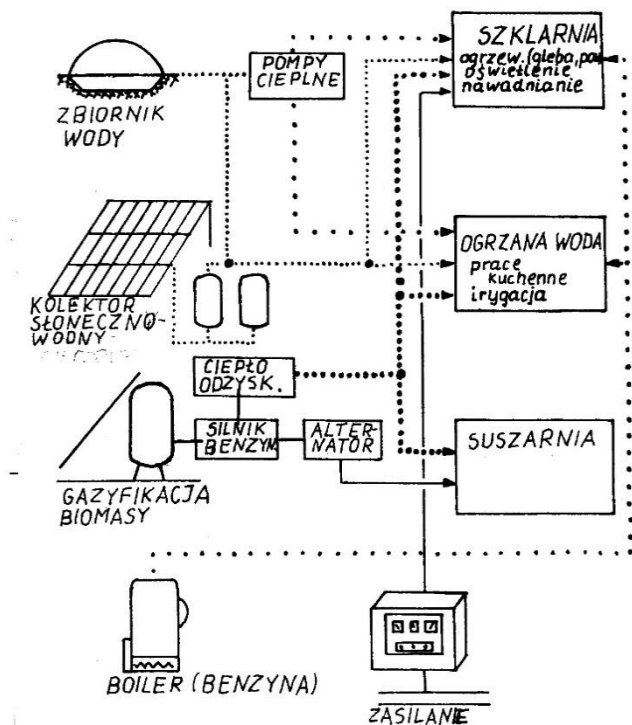


Rys. 15.5 Zintegrowane systemy energetyczne w gospodarstwie rolnym w Republice Czeskiej [Jelinkowa H. i in. 1985].

Z wykresu wynika, że zintegrowany system pokrywa w pełni zapotrzebowanie na energię cieplną w miesiącach od marca do grudnia. Natomiast od maja do października uzyskuje się znaczne nadwyżki energii. W pokazanym na rys. 15.5 gospodarstwie rolnym Pouhow zaprojektowano nieco inne rozwiązanie zintegrowanego systemu energetycznego, w porównaniu do opisanego poprzednio. Zastosowano tu instalację biogazową oraz elektrownię wodną. Podobne rozwiązania zintegrowanych systemów energetycznych zrealizowano w ramach współpracy międzynarodowej FAO na Węgrzech, w Jugosławii, Włoszech, Rumunii, Grecji, Portugalii, Szwecji, Izraelu i Szkocji. Wyniki badań przeprowadzone w ww. krajach wykazały celowość stosowania w praktyce zintegrowanych systemów energetycznych, pomimo jeszcze znacznych kosztów ich budowy. Argumentem za stosowaniem tych sys-

temów jest wykorzystanie lokalnych zasobów energetycznych tj. biomasy, częściowego wyeliminowania tradycyjnych paliw kopalnianych, z którymi wiąże się ograniczenie emisji do atmosfery oraz szkodliwych produktów spalania. Nie bez znaczenia jest wzrost zatrudnienia w środowisku wiejskim w zakresie lokalnej produkcji urządzeń, montażu instalacji i nadzoru podczas eksploatacji urządzeń. Obecnie wszystkie urządzenia techniczne odnawialnych źródeł energii produkowane są w skali przemysłowej oraz w małych przedsiębiorstwach terenowych.

Na schemacie rys. 15.6. przedstawiono koncepcję modelowego zintegrowanego systemu energetycznego w gospodarstwie ogrodniczym.

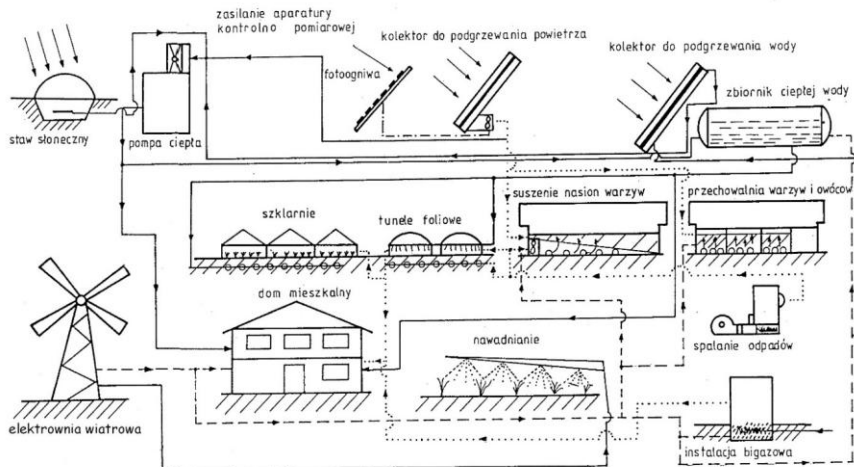


Rys. 15.6 Bilans zintegrowanego systemu energetycznego w gospodarstwie rolnym w Republice Czeskiej [Pabis J. wg Jelinkowej H. i in. 1985].

W tym systemie zaproponowano staw słoneczny i współpracującą z nim pompę ciepła w układzie woda - woda, kolektory słoneczne do

podgrzewania powietrza i wody, ogniwa fotowoltaiczne, siłownię wiatrową, instalację biogazową wykorzystującą odpady z produkcji roślinnej polowej i z szklarni, oraz kocioł opalany biomasą. Podgrzana woda może być wykorzystana do nawadniania roślin i podgrzewania podłoża w produkcji szklarniowej w gospodarstwie domowym, a podgrzane powietrze do wspomagania w ogrzewaniu szklarni i tuneli foliowych, ogrzewaniu czynnika suszącego (powietrza) w suszarce nasion warzyw oraz w przechowalni warzyw do obsuszania warzyw korzeniowych po zbiorze. Siłownia wiatrowa stosowana jest do produkcji energii elektrycznej dla potrzeb budynku mieszkalnego i podgrzewania wody w zbiorniku akumulacyjnym. Gaz z instalacji biogazowni wykorzystywany jest do ogrzewania szklarni, współpracując z kotłem opalany biomasą.

Na rys. 15.7 pokazano zintegrowane źródła energii w gospodarstwie rolnym.



Rys. 15.7 Koncepcja zintegrowanego systemu energetycznego w gospodarstwie ogrodniczym [Pabis J. 1999].

Zintegrowany system energetyczny w gospodarstwie rolnym o pow. 10 – 15 ha umożliwia pokrycie potrzeb na energię elektryczną wykorzystywaną do celów gospodarczych w zakresie 60 = 70%. W zbiorniku akumulatorowym kolektora słonecznego umieszczono

3 grzałki łącznie elektryczne o mocy 3 kW podłączone do agregatu prądowłórczego siłowni wiatrowej o mocy 4 kW. Umożliwia to dogrzanie wody w dni o małym natężeniu promieniowania słonecznego. Taki układ pozwala na pokrycie w 80% zapotrzebowań na ciepłą wodę. Kolektor słoneczny o powierzchni 30 m² wykorzystano do podgrzewania powietrza w suszarce podłogowej o pow. 25m² przeznaczonej do suszenia ziarna zbóż, gryki, grochu oraz obsuszania cebuli po zbiorze. W celu wykorzystania suszarki w porze nocnej, w przewodzie tłoczącym wentylatora zainstalowano 4 grzałki elektryczne każda o mocy 500 W.

Literatura:

- [1]. Jelonkowa H. 1987. *Integrated energy system for Pauhow and Uherce farms. 4 th Technical consultation on the development of integrated farm energy systems.*[UNDP FAO/80/001] Warszawa, Kludzienko.
- [2]. Pabis J. 1991, *Kolektory słoneczne do podgrzewania powietrza.* Wieś Jutra, nr 1 Warszawa
- [3]. Pabis J., 2002. *Możliwości wykorzystania energii słońca w rolnictwie – współdziałanie kolektorów słonecznych z innymi źródłami energii,* Czysta Energia, nr10 ABRYS, Poznań.
- [4]. Riva G., Mazzetto F., 1985. *Construction aspects for solar plants for forage drying installed in northern Italy.* FAI, CNE Bulletin nr 7.
- [5]. Rogulska M.1991. *Zintegrowany system energetyczny możliwości zastosowania w ogrodnictwie. pt. „Wykorzystanie niekonwencjonalnych źródeł energii w produkcji ogrodniczej”* Materiały konferencyjne. SGGW, Warszawa.
- [6]. Rogulska M. 1996. *Metoda oceny zintegrowanych systemów energetycznych obiektów rolniczych.* Rozprawa doktorska. IBMER, Warszawa.
- [7]. Szpryngiel M. 2003. *Zintegrowane źródła energii odnawialnej w gospodarstwie rolnym.* Czysta Energia nr 10 ABRYS, Poznań.
- [8]. Tyminski J., Pabis J., Rogulska M. 1988. *Integrated energy system two Polish farm. Integrated energy system. Designand assessment Application to farms.* Reur Technical series,7.

16. ANALIZA WYKORZYSTANIA ZIARNA ZBÓŻ DO CELÓW ENERGETYCZNYCH

16.1. Wprowadzenie

Wzrost zainteresowania odnawialnymi źródłami energii w coraz większym stopniu obejmuje biopaliwa. Poszukiwanie nowych źródeł jest głównie związane z rosnącym zapotrzebowaniem na energię, zwiększającym się popytem na paliwa kopalne i ograniczoną ich podażą, bezpieczeństwem energetycznym i poszukiwaniem metod ograniczenia emisji zanieczyszczeń do atmosfery a tym samym zmniejszeniem tempa ocieplenia na świecie.

Szacunki Międzynarodowej Rady Zbożowej wskazują, że w dobiegającym końcu sezonu na cele przemysłowe zużyto 313,2 mln ton ziarna zbóż z wyłączeniem ryżu. Oznacza to 6-cio procentowy, wzrost wobec wykorzystania zbóż w sezonie 2012/2013, który wyniósł 296,0 mln ton. Wówczas, ze względu na bardzo wysokie ceny zbóż, w tym kukurydzy w Stanach Zjednoczonych, zaobserwowano spadek ich zużycia na potrzeby przemysłu. Co ciekawe, jeszcze wcześniej, czyli w okresie 2011/2012 wyniosło ono 306,6 mln ton, czyli nieznacznie mniej niż obecnie [1].

Zdaniem specjalistów Banku BGŻ, wzrost w sezonie 2013/2014 spowodowany był większym wykorzystaniem zbóż do produkcji etanolu, zwłaszcza na biopaliwa. Z danych wynika, że wytwórstwo biopaliw pochłonęło 151,7 mln ton ziarna zbóż w porównaniu z 140,7 mln ton sezon wcześniej (wzrost o 7,8% rok do roku). Należy podkreślić, że z całego wzrostu zużycia zbóż na cele przemysłowe, czyli 17,2 mln ton, aż 11,0 mln ton wykorzystano na cele biopaliwowe [60].

Według USDA 131 mln ton, czyli 35% produkcji amerykańskiej i 13% produkcji światowej, będzie wykorzystane w produkcji bioetanolu w USA w sezonie 2014/15. Od kilku lat ten kierunek wykorzystania jest ważnym komponentem światowego rynku kukurydzy. Większość amerykańskiego etanolu (95%) jest wykorzystywana na rynku wewnętrznym, pozwalając na domieszkę etanolu w paliwie konwencjonalnym na

poziomie 10%. Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska proponuje zmniejszenie tego obowiązkowego poziomu, podczas gdy producenci etanolu proponują podniesienie poziomu inkorporacji do 15% [60].

EIA (Amerykańska Agencja Informacji o Energii) opublikowała swoje przewidywania na temat rynku energii w roku 2015. W swoim raporcie EIA przewiduje utrzymanie się średniej ceny ropy naftowej w przyszłym roku w okolicach 68 \$ za baryłkę. Mimo konkurencji energii pochodzącej z kopalni, agencja amerykańska ocenia, że średnia produkcja etanolu w roku 2015 wyniesie 948 000 baryłek dziennie, a zatem więcej niż średnia produkcja dzienna w roku 2014, która wyniosła 931 000 baryłek.

Ten wzrost produkcji powinien pozwolić na zaspokojenie popytu, który także wzrasta [60].

Polska pozyskuje obecnie ok. 3% energii ze źródeł odnawialnych, a powinna ok. 11%. Według innych danych łączny udział „zielonej energii” w końcowym zużyciu ciepła, prądu i paliw transportowych przekroczył 11,5%. Ostatnia pewna liczba to 11,2% udziału w 2013 roku [12]. Do 2020 r. „zielonej energii” musi być 15%, jeśli nie będzie to zapłacimy wysokie koszty do budżetu Unii Europejskiej [11].

Spośród odnawialnych źródeł energii coraz szerszym zainteresowaniem cieszy się ziarno zbóż i jego różne formy wykorzystania. Jak zauważa Bank BGŻ ze względu na znaczne zwiększenie produkcji etanolu i biopaliwa, w sezonie 2013/2014 odnotowano znaczny wzrost zużycia zbóż na cele przemysłowe.

Według szacunków, w nadchodzącym sezonie 2014/2015, wykorzystanie przemysłowe zbóż osiągnie poziom o 1,5% wyższy (5,1 mln ton) niż w sezonie bieżącym. Nastąpi zatem spowolnienie wzrostu w stosunku do obecnego okresu. Warto zaznaczyć, że to nie produkcja biopaliw będzie napędzała wzrost wykorzystania zbóż, ale wytwórstwo skrobi. Jak podaje Bank BGŻ, zużycie na biopaliwa wzrośnie najprawdopodobniej o 2,3 mln ton do 154,0 mln ton. Produkcja etanolu z kukurydzy w Stanach Zjednoczonych jest już bliska limitowi, dlatego zużycie na ten cel będzie rosło przede wszystkim w innych regionach świata, zwłaszcza w Argentynie, Brazylii i Unii Europejskiej [57]

Analiza produkcji ziarna zbóż w Polsce wykazuje tendencję wzrostową, szczególnie w ostatnich latach. Zbiory zbóż w 2014 r. były rekordowe i zbliżyły się do 32 mln t. Za sprawą wyższych plonów, przy niezmiennym areale upraw, były one o 12,3 proc. wyższe niż rok wcześniej, kiedy wyniosły – 28,5 mln t. Jest to równocześnie o prawie jedną

piątą więcej niż w latach 2006-10, kiedy przeciętnie zbierano 26,7 mln t zbóż. Zbiory pszenicy szacuje się na 11,6 mln t w porównaniu z 9,6 mln t w 2013 r. (+21%), pszenżyta na 5,2 mln t wobec 4,3 mln t (+12%), jęczmienia 3,2 mln t wobec 2,9 mln t (+12%) a żyta na 2,8 mln t wobec 3,4 mln t (-17%) [1].

Co istotne, bardzo duży wzrost produkcji dokonał się przy niezmienionej powierzchni zasiewów (7,48 mln ha). Pokazuje to jak wielki postęp dokonał się w krajowej produkcji zbóż w ostatnich latach i jaki potencjał drzemie jeszcze w tym sektorze rolnym. Przeciętne plony w 2014 r. GUS oszacował na poziomie 4,27 t/ha, przy plonach 3,80 t/ha w 2013 r. i 3,57 t/ha przeciętnie w okresie 2010-12. Tak duży wzrost plonów wynikał na pewno w jakiejś części ze sprzyjających warunków pogodowych w trakcie okresu wegetacji. Jesień była ciepła, zima łagodna i krótka, wiosna ciepła i mokra. Jednak prawdopodobnie nie tłumaczą w całości zanotowanego wzrostu plonów o 0,7 t/ha (20%) wobec przeciętnych plonów z lat 2010-12 [1].

Drugim wytłumaczeniem jest zastosowanie bardziej intensywnych gatunków zbóż w uprawach. W powierzchni zasiewów w ostatnich latach bardzo wyraźnie rośnie znaczenie pszenicy, kukurydzy i pszenżyta, maleje zaś żyta, jęczmienia i mieszanek zbożowych. Pszenica zajmowała prawie 35% powierzchni zasiewów zbóż podstawowych pod zbiory w 2014 roku, podczas gdy jedynie niecałe 28% w latach 2006-10. Powierzchnia zajmowana przez pszenżyto w tym samym okresie wzrosła z 16,6% do 19,5%. Z kolei areal zasiewów żyta obniżył się z 16,4 do 13,2%, jęczmienia z 14,6 do 12,1% a mieszanek zbożowych z 17,5 do 13,2% [1].

16.2. Ziarno owsa na cele grzewcze

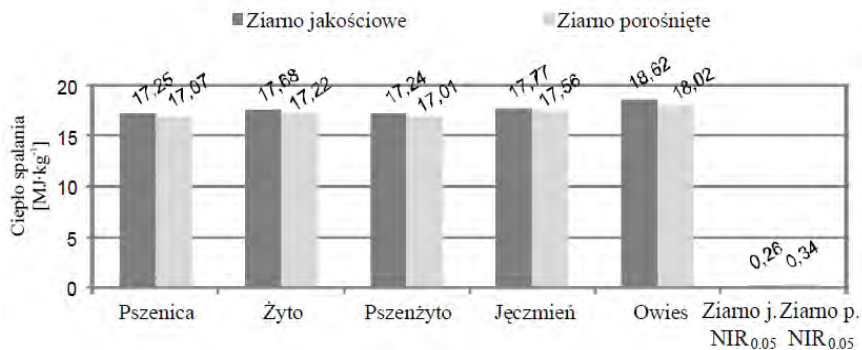
Na świecie uprawa owsa zajmuje około 17,9 mln ha, w Polsce zaś 570 tys. ha [25]. Przed II wojną światową było to ok. 1 mln ha, później jednak, wraz ze spadkiem liczby hodowanych koni zmniejszył się jego areal. Owies znajduje zastosowanie przede wszystkim jako pasza (w Polsce w ten sposób wykorzystywane jest 80% ziarna), poza tym służy jako surowiec dla przemysłu spożywczego, gdzie wykorzystuje się go do produkcji płatków, kasz i otrąb. Owies jest również wykorzystywany w przemyśle farmaceutycznym, kosmetycznym i chemicznym, a także do celów dietetycznych i leczniczych. Do tych licznych zastosowań dołą-

czyło niedawno kolejne to jest wykorzystanie owsa do celów energetycznych [25].

Koncepcja energetycznego wykorzystania ziarna owsa, rozpowszechniona w Szwecji, jest z powodzeniem wdrażana również w Polsce. W Polsce zbiory owsa są niewielkie w ostatnich latach stanowią około 6,2% wszystkich zbóż. Ma to głównie podłoże ekonomiczne cena ziarna owsa jest 2 bądź 2,5 krotnie niższa niż pszenicy. Plon ziarna owsa w kraju jest niski ok. 25,3 dt/ha i jest to zaledwie 43% jego potencjału. W uprawie znajdują się odmiany oplewione oraz nagoziarniste, wykorzystywane w żywieniu zwierząt oraz jako pokarm dla ludzi [41].

Wartością ciepła spalania zbóż zainteresowanych jest szereg jednostek badawczych. Przeprowadzono szereg badań między innymi nad wpływem poziomu nawożenia na wartość opałową ziarna jęczmienia i owsa [27].

Ciekawe wyniki uzyskano dla pięciu gatunków zbóż ocenianych dla ziarna jakościowego oraz dla ziarna porośniętego [66]. Wyniki te wykazały, że największą wartością ciepła spalania charakteryzowały się ziarniaki owsa a najmniejszą pszenicy i pszenżyta. W przypadku jakościowego ziarna owsa ciepło spalania wynosiło 18,62 MJ/kg a ziarna porośniętego 18,02 MJ/kg. Wartość ciepła spalania ziarna żyta, pszenicy, pszenżyta i jęczmienia nie wykazała istotnych różnic pomiędzy ziarnem jakościowym a porośniętym [66].



Rys.16.1. Wartości ciepła spalania ziarniaków jakościowych i porośniętych w obrębie poszczególnych gatunków [66]

16.3. Instalacje do spalania ziarna

Technologia spalania ziarna zbóż od lat stosowana jest w Skandynawii. W Szwecji (przodującej w wykorzystaniu energii ze źródeł odnawialnych) funkcjonują setki urządzeń spalających ziarno owsa i innych zbóż. Palniki (przystawki) do spalania ziarna przeznaczone są głównie do ogrzewania gospodarstw rolnych, ale można je również wykorzystać w kotłowniach budynków użyteczności publicznej czy pomieszczeń produkcyjnych o różnej powierzchni, w zależności od parametrów pieca. Palnik można podłączyć do każdego pieca na paliwa stałe o mocy do 28 kW. Ziarno podawane jest do palnika za pomocą podajnika w ilościach gwarantujących jego stały poziom w komorze buforowej. Z komory tej transportowane jest do komory spalania, połączonej z wentylatorem wdmuchującym powietrze. Tutaj, dzięki odpowiedniemu napowietrzeniu paliwa, odbywa się jednorodny proces spalania, a następnie płomień wypychany jest do komory grzewczej. Odpowiednia konstrukcja urządzenia pozwala na podawanie paliwa od dołu, dzięki czemu spalanie biomasy jest dokładne (nie ma niedopalonych resztek). Urządzenia zaopatrzone są też w system zabezpieczeń awaryjnych, gwarantujących automatyczne wyłączenie palnika w przypadku wystąpienia jakichkolwiek awarii, zablokowania podajnika, przekroczenia temperatury w komorze buforowej, zaniku płomienia w komorze grzewczej itp. Na polskim rynku funkcjonuje już kilka firm oferujących przystawki i palniki oraz zestawy do spalania ziarna owsa [23, 29, 58, 64]. W skład zestawu wchodzi kocioł 25 kW, palnik na owies ze sterowaniem oraz zbiornik z systemem podającym w cenie ok. 10 tys. zł [64]. Inny producent oferuje ekologiczny palnik na owies Biotem 25 w cenie 4900 [13]. Ceny są różne i zależą od oferowanego palnika lub zestawu. Kotły z serii SAS AGRO-ECO spalają różnorodne paliwa, m.in. produkty pochodzenia rolniczego, co stwarza znaczne możliwości dla użytkownika. Są to: pelety (zarówno z czystych trocin, jak i z kory drzewnej, wierzby energetycznej oraz np. słomy rzepakowej), ziarno (owsa, żyta, jęczmienia, pszenicy, gorczycy, kukurydzy, łubinu), zrębki wierzbowe (dł. <20 mm i wilgotności <15%), suche pestki np. czereśni itp. Wyposażenie paleniska w mechanizm ruchomych rusztowin pozwala na zastosowanie paliw posiadających tendencję wytwarzania szlaku [45].

Rodzaj biopaliwa, oraz w znacznym stopniu jego wilgotność, ma znaczenie dla uzyskania efektu grzewczego kotła. W zależności od rodzaju zastosowanego opału i jego kaloryczności uzyskamy zwiększone

(niższa kaloryczność) lub zmniejszone (wyższa kaloryczność) zużycie paliwa. Zużycie np. owsa w sezonie grzewczym, w zależności od powierzchni domu ($140+180\text{ m}^2$), jego termoizolacji itp. wynosi ok. 6÷8 ton [45]. Zaletą pracy kotła jest komfort i prostota obsługi sprowadzona praktycznie tylko do okresowego uzupełniania stanu paliwa w koszu zasypowym.

Istnieją również specjalne kotły centralnego ogrzewania, przeznaczone do spalania ziarna. Kotły te posiadają podobnie jak palniki systemy zabezpieczeń awaryjnych i regulowane systemy napowietrzania komory spalania, a podawanie ziarna do pieca odbywa się w pełni automatycznie.

Do wyprodukowania 10 tys. kW energii cieplnej potrzebne są ok. 3 tony owsa, co odpowiada 1 m^3 (1000 l) oleju opałowego. W sezonie grzewczym zużywa się przeciętnie 6-7 ton ziarna. Do ogrzania jednego gospodarstwa wystarczają zbiory z pola o powierzchni 2 ha [58]. Jak podaje Solarski [49] w innej publikacji kaloryczność, czyli wydajność cieplna, ziarna owsa w stosunku do kaloryczności węgla wynosi 1,3:1. Oznacza to, że w przybliżeniu 1 t dobrego węgla odpowiada 1,3 t owsa. Wydajność cieplna owsa wynosi ok. 17-18 MJ/kg spalonego ziarna.

16.3.1. Spalanie owsa w Polsce

Pierwsza w Polsce instalacja do ogrzewania domu owsem została uruchomiona na początku 2004 r. w Brzuchani pod Miechowem (woj. małopolskie). W gospodarstwie Jana Podymy zainstalowano przystawkę, podnoszącą efektywność spalania. Właściciel gospodarstwa pozytywnie ocenia efekty wdrożenia tej technologii wg jego obliczeń 150 kg ziarna wystarcza do ogrzewania mieszkania o powierzchni 200 m^2 przez ponad trzy doby. Proces jest w dużej mierze zautomatyzowany należy jedynie uzupełniać zawartość zasobnika na ziarno. Prekursor spalania owsa w Polsce zupełnie rezygnuje z wykorzystania węgla stosowana przez niego technologia jest opłacalna i nie zanieczyszcza środowiska, a powstający popiół rolnik stosuje do nawożenia pola [41].

Wykorzystanie ziarna owsa do celów grzewczych bywa jednak łatwiejsze do wdrożenia niż przekonanie polskich plantatorów do uprawy roślin energetycznych. Rolnicy mają bowiem doświadczenie w uprawie zbóż, do którego posiadają odpowiednie zaplecze maszynowe i magazynowe, natomiast uprawa większości roślin energetycznych jest jeszcze mało rozpoznana. Ponadto przy dużych plantacjach np. wierzby pojawia

się problem zakupu specjalistycznych maszyn i urządzeń. Wykorzystanie powierzchni składowania, w przeliczeniu na wartość energetyczną produktu, też okazuje się korzystniejsze dla zbóż niż dla innych rodzajów biomasy. Ziarno, ze względu na swe niewielkie rozmiary jednostkowe, łatwiej jest transportować i magazynować niż drewno czy słomę. W przypadku ziarna możliwa jest też łatwa automatyzacja procesu dozowania biopaliwa do kotła. Jedynym ograniczeniem jest dość znaczny koszt palnika (powyżej 10 tys. zł), który jednak jest niezbędny, gdyż dla efektywnego spalania ziarno wymaga odpowiedniej ilości powietrza oraz odmiennej temperatury niż powszechnie stosowane rodzaje biomasy. Pewne obawy budzi też ryzyko inwazji gryzoni i insektów w miejscach przechowywania ziarna.

Mimo iż koncepcja spalania ziarna owsa jest stosunkowo nowa, obserwowane jest duże zainteresowanie ze strony rolników zakupem odpowiednich palników. Nie sprawdziły się obawy, że przeszkodą dla rozwoju tej technologii w Polsce będzie bariera mentalnościowa, wynikająca z szacunku dla ziarna zbóż. Dotychczasowe obserwacje wskazują, że aspekt ekonomiczny przeważa jednak w tym względzie i rolnicy wyzbywają się tego typu uprzedzeń [41]. Według Solarskiego [48] koszty ogrzewania ziarnem są 2-krotnie niższe od opalania gazem, np. do wytworzenia 10000 kW ciepła potrzeba ok. 1000 litrów oleju opałowego lub 3,5 tony owsa.

Zalety

Owies nadaje się do uprawy w całym kraju. Ponieważ jego wymagania glebowe są niewielkie, pod uprawę można wykorzystywać także ubogie gleby niskiej jakości (pod warunkiem, że zostaną odpowiednio nawodnione) i odłogi, które są w ten sposób zagospodarowywane. Owies uprawiany na terenach skażonych oczyszcza glebę z metali ciężkich, w skutek czego nie nadaje się do spożycia przez ludzi czy zwierzęta, może zostać wykorzystany na cele energetyczne.

Posiada właściwości fitosanitarne, czyli jest dobrym przedplonem dla innych roślin. Wprowadzenie owsa do płodozmianu zbożowego zmniejsza konieczność stosowania nawozów mineralnych.

Owies jest łatwy w spalaniu. Cechuje się stabilną wartością energetyczną (18,5 MJ/kg) i wilgotnością (10 -13%).

Podczas spalania owsa powstają minimalne ilości popiołu (ok. 0,6%), który jest doskonałym nawozem, nadającym się do wykorzystania na polach czy w ogródkach przydomowych.

Spaliny, powstające podczas spalania owsa charakteryzuje mniejsza toksyczność w porównaniu ze spalinami, powstającymi podczas spalania innych surowców. W kotle do spalania owsa można spalać także pelety.

Transport i magazynowanie owsa są łatwiejsze, niż transport i magazynowanie innych rodzajów biomasy, np. drewna czy słomy. Przechowując owies można efektywniej wykorzystywać powierzchnię składowania.

W Polsce istnieje długa tradycja uprawy owsa, nie występują więc trudności pojawiające się nieraz w związku z hodowlą nowych gatunków roślin energetycznych [61].

16.3.2. Ekonomiczne aspekty

Uprawa owsa wymaga nakładów energii w postaci pracy człowieka i maszyn rolniczych, surowców i materiałów (nasiona, nawozy, środki chemicznej ochrony roślin) oraz bezpośrednich nośników energii (paliwo). Doświadczenie przeprowadzone na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim pozwoliło stwierdzić, że nakłady energii na uprawę 1 ha owsa oplewionego wynoszą ok. 14 tys. MJ/ha, a owsa nagiego – 13,4 tys. MJ/ha. W doświadczeniu uzyskano stosunkowo wysokie plony ziarna: 46,8 dt/ha owsa oplewionego i 41,1 dt/ha formy nagiej. Przyjmując wartość energetyczną ziarna na poziomie odpowiednio 17,3 i 18,3 MJ/kg, z 1 hektara można uzyskać plon o wartości energetycznej 75-80 tys. MJ, zaś po odjęciu nakładów energii poniesionych na jego uzyskanie bilans wynosi ok. 65 tys. MJ/ha. Efektywność energetyczna obu form owsa wynosi odpowiednio 5,75 i 5,66 [41].

Rolnicy rozpatrujący możliwość zainstalowania w swoim gospodarstwie palnika lub kotła na owies powinni najpierw wybrać technologię produkcji ziarna. W większych gospodarstwach mogą zdecydować się na technologię ekstensywną, przy niskich nakładach na produkcję, w małych na technologię intensywną, pozwalającą uzyskać większy plon z jednostki powierzchni, przy uwzględnieniu większych nakładów energetycznych.

Należy też pamiętać, iż produktem ubocznym uprawy zbóż jest słoła, która także może być wykorzystana jako odnawialne źródło ener-

gii. Stosunek plonu słomy do plonu ziarna owsa waha się na poziomie 1,01-1,08, co pozwala uzyskać dodatkową ilość energii z plantacji owsa [41].

Skutki środowiskowe wykorzystania owsa jako odnawialnego źródła energii są takie jak w przypadku innych rodzajów biomasy. Najważniejsze efekty wykorzystania ziarna owsa na cele energetyczne to ograniczenie zużycia surowców kopalnych, zmniejszenie emisji związków powstających podczas spalania węgla i zerowy bilans emisji CO₂, a także możliwość wykorzystania powstałego popiołu do nawożenia pól i uniezależnienie się gospodarstwa od zewnętrznych dostawców surowców energetycznych. Ponadto owies może być uprawiany lokalnie, z wykorzystaniem powszechnie dostępnych maszyn i urządzeń, na glebach odłogowanych, niskiej jakości, co powoduje ożywienie gospodarze terenów rolniczych. Efektami wykorzystania owsa na cele energetyczne są też ograniczenie odpływu środków finansowych z gminy, stabilna cena (niezależna od cen paliw na rynkach światowych), wykorzystanie nadprodukcji ziarna oraz wygoda i łatwość obsługi urządzeń grzewczych [41].

Perspektywy rozwoju – jak podają autorzy opracowania [41] technologia spalania ziarna owsa cieszy się coraz większym zainteresowaniem polskich rolników. Wykorzystanie ziarna do celów grzewczych przywędrowało do naszego kraju ze Skandynawii, ale stosowane jest także w USA i Kanadzie. Kalkulacje ekonomiczne przeprowadzone na Uniwersytecie w Minnesocie wskazują, że spalanie ziarna kukurydzy w tym kraju jest ekonomicznie konkurencyjne w porównaniu z olejem, gazem czy energią elektryczną.

Przy obecnej relacji cen energii i zbóż w Polsce technologia ta wydaje się opłacalna. Wzrost cen zboża w Polsce raczej nie nastąpi szybko, stąd też wdrażanie spalania ziarna w kraju jest przedsięwzięciem perspektywicznym. Nawet w przypadku zmiany relacji cenowych do spalania można będzie wykorzystywać ziarno niepełnowartościowe porażone przez choroby lub pozyskiwane z plantacji zakładanych na gruntach skażonych.

Wieloletnie dyskusje i uzgodnienia toczą się wokół odnawialnych źródeł energii w tym także wykorzystania zboża na cele energetyczne. Według opracowania Chojnackiego [8] w polskich elektrowniach i elektrociepłowniach można już spalać zboże.

16.4. Produkcja bioetanolu

Bioetanol dodawany do benzyn silnikowych zwiększa efektywność spalania, ogranicza emisję tlenków węgla, tlenków azotu i węglowodorów w spalinach oraz obniża stężenie CO w spalinach. W Polsce dodawanie spirytusu odwodnionego do benzyn rozpoczęto już ponad 70 lat temu. Pierwszą produkcję przemysłową spirytusu odwodnionego rozpoczęto w Kutnie w 1928 roku [35]. Etanol powszechnie otrzymywany jest w wyniku fermentacji surowców zawierających cukry proste (przede wszystkim glukozę) lub dwucukry (sacharozę lub laktozę) [53]. Surowce zawierające wielocukry (skrobia, celuloza) stanowią najbardziej interesujące źródło zaopatrzenia dla przemysłu fermentacyjnego. Ich wykorzystanie do produkcji etanolu wymaga wstępnej hydrolizy rozłożenia wielocukrów do cukrów fermentowanych. Skrobia, która jest materiałem zapasowym w świecie roślinnym łatwo ulega hydrolizie. Celuloza, stanowiąca materiał konstrukcyjny roślin jest bardziej odporna na działanie czynników hydrolizujących.

Powszechnie wykorzystywane surowce skrobiowe to: żyto, pszenżyto, kukurydza, ziemniaki. Zawierają one od ok. 20% skrobi (ziemniaki) do 60% skrobi (zboża). Wydajność etanolu z poszczególnych surowców skrobiowych przedstawiono w tabeli 16.1 [53].

Zgodnie z przedstawionymi danymi (tab.16.1) produkcja etanolu z ziemniaków daje większą wydajność z 1 ha niż produkcja ze zbóż. Jednakże, jeśli uwzględnimy ceny rynkowe surowców to wyłania się zupełnie inny obraz. Przeciętna cena skupu ziemniaków (przemysłowych) stanowi 56 - 65% ceny żyta. Zawartość skrobi w ziemniakach jest ok. 3 razy mniejsza niż w zbożach.

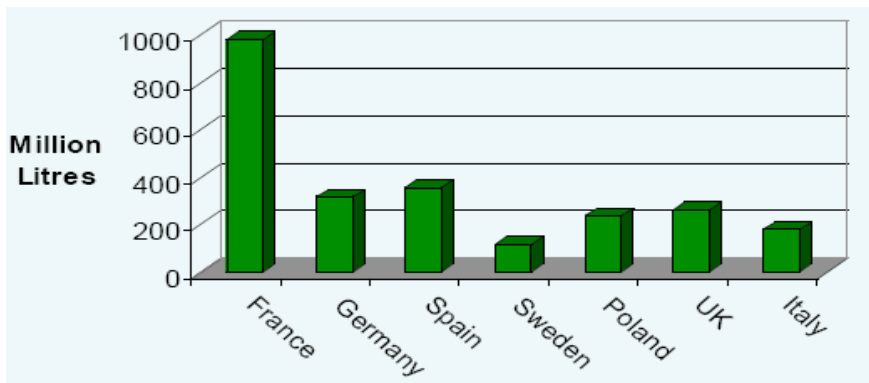
Tabela 16.1 Wydajność etanolu z wybranych surowców skrobiowych [53].

Surowiec	Zawartość skrobi	Wydajność etanolu	Przeciętny plon	Wyd. etanolu
	%	kg/kg surowca	kg/ha	m ³ z 1 ha
Ziemniak	20	0,1	20000	2,5
Żyto	60	0,3	2500	0,95
Pszenżyto	60	0,3	3200	1,2
Kukurydza	60	0,3	4000	1,5

W rezultacie koszty ziemniaków jako surowca do produkcji etanolu są ponad dwukrotnie większe niż żyta. Ta różnica nie ma istotnego znaczenia w produkcji spirytusu konsumpcyjnego za to jest bardzo istotna w produkcji etanolu do celów paliwowych. Najniższe koszty uzyskuje się przy wykorzystaniu jako surowców żyta i kukurydzy [53]. Podobnie Burczyk [6] stwierdza, że najczęściej poszukiwanym surowcem do pozyskiwania bioetanolu jest ziarno żyta, które w zasadzie powinno być produkowane tylko na glebach lekkich. Tradycja otrzymywania etanolu z żyta w Polsce ma bardzo długą historię, bowiem spirytus z żyta był i nadal jest wykorzystywany przez przemysł spirytusowy do produkcji wysokogatunkowych wyrobów alkoholowych. Natomiast bioetanol na potrzeby biopaliw powinien być produkowany z ziemniaków uprawianych na glebach lekkich, a nie z żyta. Z kolei Budzyński i Bielski [5] podają za Mytkowskim, że zbożem najbardziej efektywnym pod względem energetycznym i wydajności alkoholu z jednostki powierzchni jest kukurydza (tab.16.1). Dodatkowym jej atutem jest wysoki plon z jednostki powierzchni, przewyższający niekiedy dwukrotnie inne zboża.

Według opracowań Glenia [19] najlepszą odmianą do produkcji etanolu jest Dańkowskie Amber będące najnowszą odmianą hodowli DANKO. Odmiany żyta różnią się między sobą szeregiem cech. W gorzelnictwie istotna jest zawartość cukrów. Dańkowskie Amber ma największą (wśród populacyjnych) zawartość cukrów ogółem 68,3% (wg COBORU). Odmiana ta charakteryzuje się mniejszą zawartością miktosyn dzięki dużej odporności na wyleganie co ogranicza infekcję grzybów [19].

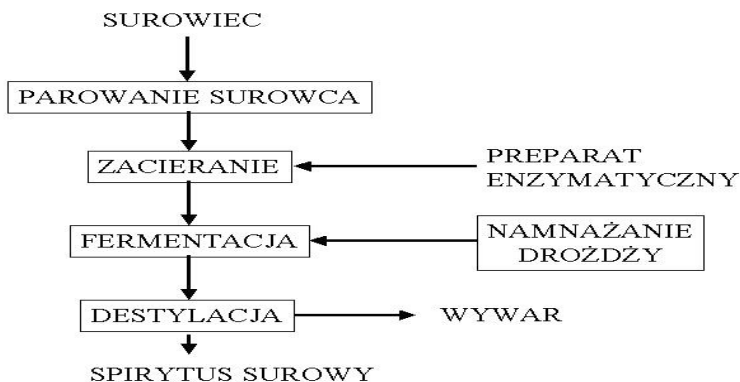
Innymi bardzo przydatnymi zbożami do produkcji bioetanolu są najnowsze odmiany pszenżyta Grenado i Baltico [37]. O przydatności żyta i pszenżyta do gorzelnictwa decyduje stosowanie odpowiedniej technologii uprawy a w tym stosowanie wymaganej ochrony, nie dawanie azotu na kłos oraz nie spóźnianie się ze zbiorem [37]. Jak podaje Majchrzycki [37] według badań niemieckich (Kruse-Zeitung aktuell. Ausgabe 01/2005) spośród badanych siedmiu odmian pszenżyta najwyższą wydajność 100% spirytusu z pszenżyta ozimego uzyskano dla odmiany Grenado 40,8 – 41,4 l/100 kg ziarna.



Rys.16.2 Główni europejscy producenci bioetanolu Majchrzycki [37].

16.4.1. Technologie otrzymywania etanolu

Fermentacja etanolowa jest jedną z najstarszych technik biotechnologicznych stosowanych przez człowieka. Wykorzystuje ona drobno-ustroje, najczęściej drożdże *Saccharomyces cerevisiae*, które w warunkach beztlenowych przetwarzają cukry proste do alkoholu etylowego. Technologia wytwarzania etanolu składa się z trzech etapów: przygotowania surowca, fermentacji etanolowej i wydzielenia produktu. Na rysunku 16.3 przedstawiono przykładowy schemat gorzelnii zbożowej.



Rys.16.3 Schemat otrzymywania alkoholu w gorzelnii zbożowej Szewczyk [53].

W gorzelnianach produkowany jest spirytus surowy zawierający ok. 90-92% etanolu. Przerabiany jest on w instalacjach rektyfikacyjnych do spirytusu konsumpcyjnego bądź bezwodnego.

16.4.2. Produkcja etanolu

Wykorzystanie etanolu jako paliwa samochodowego datuje się od roku 1908 model T Forda mógł być dostosowany do zużywania bądź benzyny bądź alkoholu. Jeszcze w latach 20-tych XX wieku etanol stanowił do 20% sprzedaży paliw w USA. W latach następnych jego znaczenie gwałtownie zmalało. Dopiero po kryzysie naftowym w latach 70-tych ponownie zwrócono uwagę na etanol jako paliwo płynne [53]. Pierwszy duży program wytwarzania etanolu do celów paliwowych rozpoczął się w Brazylii w 1975 r. (*ProAlcohol Programme*). Podobny program zainicjowano w USA w roku 1978. W latach 90-tych produkcja etanolu w Brazylii wzrastała o ok. 4% rocznie by pod koniec lat 90-tych osiągnąć wielkość 13 – 16 mln m³ co pokrywało ok. 19% zużycia energii. Warto podkreślić, że w tym samym czasie udało się obniżyć koszty produkcji w tempie ok. 3% rocznie.

Światowa produkcja etanolu wynosi ok. 31 – 33 mln m³ (24,5 – 26 mln ton) z czego 7% jest wytwarzane poprzez syntezę chemiczną, reszta pochodzi z fermentacji. Głównym producentem etanolu jest Ameryka Północna (głównie USA) i Południowa (głównie Brazylia) – dające razem 65% światowej produkcji etanolu. Na Azję przypada 18% a na Europę 15% światowej produkcji etanolu [53]. Obecnie ok. 2/3 światowej produkcji etanolu jest przeznaczona na cele paliwowe, przy czym ten udział jest bardzo zróżnicowany w poszczególnych krajach. W Unii Europejskiej ok. 5% wytwarzanego etanolu jest wykorzystywane jako paliwo podczas gdy w USA ponad 60% zaś w Brazylii ponad 95%. Etanol może być wykorzystywany jako paliwo płynne w różny sposób (tabela 16.2).

Etanol ma wyższą liczbę oktanową niż zwykła benzyna co umożliwia zwiększenie stopnia kompresji w silnikach i lepsze osiągi. Stosowanie czystego 95% etanolu jako paliwa wymaga specjalnej konstrukcji silników. W Brazylii uwodniony etanol dostępny jest w 26 tys. stacji zaś ogólna liczba samochodów dostosowanych do jego użytkowania przekracza 3 mln. Poza Brazylią, głównym sposobem wykorzystania etanolu jako paliwa jest obecnie stosowanie go jako dodatku utleniającego do benzyny. W tym celu stosuje się etanol bezwodny.

Tabela 16.2 Zawartość etanolu w wybranych paliwach płynnych [53].

Paliwo	Zawartość etanolu
	(%obj.)
Alcool (Brazylia)	95,5
E85 (USA)	85
Gasoline (Brazylia)	24 - 26
Biodiesel (Szwecja)	15
E10 (USA)	10
Dodatki utleniające (oxygenated fuel USA)	7,6
Paliwo ulepszone (reformulated gasoline USA)	5,7

W USA obserwuje się znaczący wzrost sprzedaży paliwa zawierającego 10% etanolu (E10) jednak nadal stanowi to jedynie 12% całkowitej sprzedaży benzyny.

Zalecenia Unii Europejskiej mówią o 5% udziale etanolu w rynku paliw w 2010 roku. Jako dodatek do paliw etanol musi konkurować z pochodnymi petrochemicznymi ETBE i MTBE (etylowe i metylowe etery tetrbutylowe). Z uwagi na zagrożenie dla środowiska, toksyczność i możliwe działanie kancerogenne, kraje zachodnie wycofują się z używania MTBE. Obecnie preferowanym przez przemysł petrochemicznym dodatkiem jest ETBE, z uwagi na lepsze właściwości przeciwstukowe i smarowne. Należy jednak zwrócić uwagę, że do wytwarzania ETBE także wykorzystywany jest etanol [49].

Według Banku Gospodarki Żywnościowej kukurydza jest jedną z tych upraw polowych, których plonowanie na świecie ciągle wzrasta. Regularnie wzrasta również światowa produkcja kukurydzy w ciągu ostatnich 10 lat zwiększyła się z 600 mln ton do prawie miliarda ton w roku 2014 (dokładnie 992 mln ton według ostatnich oszacowań). Ten wzrost wynika ze zwiększenia światowej powierzchni zasiewów i plonowania [11].

Według USDA 131 mln ton, czyli 35% produkcji amerykańskiej i 13% produkcji światowej, będzie wykorzystane w produkcji bioetanolu w USA w sezonie 2014/15. Od kilku lat ten kierunek wykorzystania jest ważnym komponentem światowego rynku kukurydzy. Większość amerykańskiego etanolu (95%) jest wykorzystywana na rynku wewnętrznym, pozwalając na domieszkę etanolu w paliwie konwencjonalnym na

poziomie 10%. EPA (Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska) proponuje zmniejszenie tego obowiązkowego poziomu, podczas gdy producenci etanolu proponują podniesienie poziomu inkorporacji do 15%. Wzrost produkcji etanolu w USA jest również efektem spadku produkcji trzciny cukrowej w Brazylii, wywołanego wiosenną suszą. W wyniku czego etanol brazylijski, produkowany z trzciny cukrowej przestał być konkurencyjny, a jego eksport znacznie spadł (1,5 miliardów litrów, spadek o 46% w stosunku do roku 2013, najniższy poziom od roku 2003), pozwalając Amerykanom na umocnienie się na rynku międzynarodowym. Producenci etanolu, którzy są skoncentrowani głównie na Środkowym Zachodzie (MidWest), wykorzystują sytuację, dzięki czemu eksport wzrósł o 30% do poziomu najwyższego od roku 2011. Dodatkowo surowiec jest dostępny w dobrej cenie. Wszystko sprzyja produkcji, która pod koniec listopada osiągnęła rekordowy poziom 982 000 baryłek dziennie. Rekord został pobity na początku grudnia, kiedy produkcja dzienna osiągnęła 988 000 baryłek, a zapasy wzrosły do poziomu 17,8 milionów baryłek (czyli 21 dni zapasów). Tak duża produkcja wskazuje na duże zapotrzebowanie na bioetanol na rynku światowym. Nie jest pewne, czy taki rytm będzie zachowany, biorąc pod uwagę spadające ceny ropy [60].

Amerykańska Agencja Informacji o Energii (EIA) opublikowała swoje przewidywania na temat rynku energii w roku 2015. Mimo konkurencji energii pochodzącej z kopalni, agencja amerykańska ocenia, że średnia produkcja etanolu w roku 2015 wyniesie 948 000 baryłek dziennie, a zatem więcej niż średnia produkcja dzienna w roku 2014, która wyniosła 931 000 baryłek.

Ten wzrost produkcji powinien pozwolić na zaspokojenie popytu, który także wzrasta na etanol, jako substytut energii [60]

U drugiego na świecie producenta etanolu, Brazylii, rząd przygotowuje się do ogłoszenia stopnia domieszki etanolu w benzynie. Po poprzedniej podwyżce z roku 2013, zwiększenie do 25%, wobec wcześniejszych 20%, domieszka ta mogłaby osiągnąć poziom 27,5%. Podwyżka ta spowodowałaby zwiększenie brazylijskiego zapotrzebowania na biopaliwo o 1 miliard litrów rocznie [60].

Tabela 16.3 Bilans bioetanolu i biodiesla w latach 2008 – 2013 [22].

Wyszczególnienie	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2008	2009	2010	2011	2012	2013
	w tonach											
	bioetanol						biodiesel					
Pozyskanie	92088	127344	152799	136583	172530	190919	263729	364832	379802	363894	605385	642371
Import (+)	113376	136873	118027	120064	43828	41158	94034	151535	397689	495634	181390	156218
Eksport (-)	400	-	1450	-	1900	2725	-	8343	13060	37441	48508	157984
Zmiana zapasów (+/-) ...	-6906	80	-3091	-4832	2480	-3038	-7408	2392	-3468	1365	-8365	19915
Zużycie krajowe ogółem z tego:	198158	264297	266285	251815	216938	226314	350355	510416	760963	823452	729902	660520
elektrownie zawodowe	-	-	-	-	-	-	-	825	240	599	71	192
mieszalnie produktów naftowych	198158	233563	184437	187413	205823	195228	344391	421837	529912	583853	693451	654211
końcowe (finalne) w transporcie.....	-	30734	81848	64402	11115	31086	5964	87754	230811	239000	36380	6117

Spirytus surowy wytwarzany jest w Polsce w gorzelniach rolniczych i przemysłowych. Gorzelni rolniczych jest znacznie więcej niż przemysłowych. W 2000 roku zezwolenie na produkcję spirytusu surowego w Polsce posiadało ok. 948 gorzelni. Szacowane zdolności produkcyjne gorzelni wynosiły ponad 400 tys. m³ surowego spirytusu (90-92%) na rok. W zasobach Agencji Własności Rolnej Skarbu Państwa jest 854 obiektów, a ich łączne zdolności produkcyjne szacowane są przez właścicieli na ok. 300 tys. m³ spirytusu. W sezonie 2000/2001 pracowało ok. 300 gorzelni i liczba ta z roku na rok maleje (w sezonie 1997/1998 pracowało jeszcze ok. 760 gorzelni). Obecnie trudno jest potwierdzić szacunki zdolności produkcyjnej gorzelni, gdyż stan techniczny znacznej ich części (m.in. wskutek przestojów czy dewastacji) uległ pogorszeniu. W Polsce dominują gorzelnie rolnicze o niskich zdolnościach produkcyjnych (około 400 m³/rok) i przestarzałym, zdekapitalizowanym majątku produkcyjnym.

Ekonomicznie uzasadniona, minimalna wielkość produkcji spirytusu dla celów paliwowych wynosi ok. 1 000 m³/rok. Wielkość produkcji etanolu w Polsce systematycznie spada. W latach 80-tych, wg. Krajowej Rady Gorzelnictwa, wynosiła ok. 270 tys. m³ by pod koniec lat 90-tych obniżyć się do ok. 170 tys. m³. Nieco inne dane o produkcji spirytusu surowego przedstawia GUS. Różnice te spowodowane są inną metodyką badań (agregowania danych) w GUS. Pomijane są gorzelnie zatrudniają-

ce poniżej pięciu pracowników. Zgodnie z danymi GUS produkcja etanolu wynosi ok. 100 tys. m³ [53].

16.5. Produkcja biodiesla

Biodiesel olej napędowy stanowiący lub zawierający biologiczny komponent w postaci estrów olejów roślinnych. W Europie będzie to głównie metylowy ester rzepakowy (MER), który może być stosowany jako paliwo w czystej postaci w wybranych pojazdach lub mieszany z konwencjonalnym olejem napędowym. Czysty ester rzepakowy najczęściej stosuje się do napędu silników pracujących na zbiornikach wodnych lub w ich bezpośrednim otoczeniu, gdyż łatwo ulega biodegradacji i nie stanowi zagrożenia dla czystości wód. Może być również stosowany do napędu autobusów miejskich lub sprzętu rolniczego w specjalnie chronionych rejonach kraju. Rozwiązania takie najczęściej są stosowane w Niemczech i Austrii. Najłatwiejsze jest natomiast wprowadzenie 5-8% dodatku MER do oleju napędowego, będącego w powszechnej sprzedaży, ponieważ nie wymaga to tworzenia specjalnej sieci dystrybucji takiego paliwa. Dodatkowo ester ten poprawia właściwości smarne oleju napędowego i może zastępować niektóre komponenty syntetyczne dodawane do tego paliwa [42].

W ostatnich latach wzrosło w świecie zainteresowanie wykorzystaniem biopaliw płynnych jako paliwo alternatywne i proekologiczne o parametrach porównywalnych z olejem napędowym. Najszerzej stosowane jest przetwarzanie nasion roślin oleistych (rzepak, słonecznik, soja) na paliwo płynne oraz przetwarzanie surowców roślinnych (zboża, buraki cukrowe) na alkohol. Polska jest liczącym się producentem rzepaku w Europie. Potencjał techniczny produkcji rzepaku wynosi ok. 1,6 mln ton rocznie, co jest równoważne z możliwością produkcji ok. 630 tys. ton biopaliwa. Wynosiłoby to ok. 7% zapotrzebowania na olej napędowy. Z jednej tony rzepaku, można uzyskać około 400 kg biopaliwa. Z jednego ha upraw rzepaku przy plonie 2,1 t/ha, w zakładzie produkcyjnym można otrzymać:

- oleju 810 l,
- biopaliwa 690 l,
- śruty rzepakowej 1,3 t,
- słomy rzepakowej 2 t.

W praktyce stosowane są dwie technologie produkcji biopaliwa [42] bezcisnieniowa (zimna, w której proces estryfikowanych olejów rzepakowych odbywa się pod ciśnieniem atmosferycznym w temperaturze 20 – 70°C, z zastosowaniem katalizatorów alkalicznych, w wyniku czego powstaje ester metylowy (etylowy) i frakcja glicerynowa ciśnieniowa (gorąca), w której proces otrzymywanie estrów kwasów tłuszczowych odbywa się w sposób ciągły w temperaturze 240°C i ciśnieniu ok. 10 MPa. W wyniku procesu powstaje ester i frakcja glicerynowa. Technologia ta zastosowana jest w przemysłowych metodach produkcji. Wymaga ona znacznych nadmiarów metanolu w stosunku do oleju, który może być ponownie kierowany do procesu. W Polsce istnieją dwa kierunki produkcji biopaliw z estryfikowanego oleju rzepakowego. Jeden z nich zakłada produkcję czystego estru jako substytutu oleju napędowego, drugi zakłada mieszanie go z olejem napędowym w różnych proporcjach. Produkcja czystego estru może odbywać się w zakładach chemicznych posiadających odpowiednie linie produkcyjne. Natomiast produkcja estryfikowanego oleju rzepakowego, dodawanego do oleju napędowego, jest możliwa w rolnictwie w niewielkich zakładach produkcyjnych, zwanych agrorafineriami o możliwościach produkcji od 100 – 300 ton biopaliwa rocznie. W Polsce pierwsza agrorafineria zbudowana została w Mochełku k. Bydgoszczy przy współudziale IBMER [42].

Jak podaje Pabis [42] w ostatnich latach nastąpił szybki rozwój stosowania biopaliw, uzyskiwanych z przetwarzania nasion roślin oleistych na paliwa płynne oraz etanolu (spirytusu odwodnionego), uzyskiwanego z przetwarzania zbóż, ziemniaków, buraków i melas. Rolnictwo może być potencjalnym dostawcą nośników energetycznych w postaci stałej tj. drewno, słoma i trawy, w postaci ciekłej tj. oleje roślinne, w postaci gazowej tj. biogaz z odchodów zwierzęcych i produkcji roślinnej. Szacuje się, że zasoby energii pochodzącej z biomasy wynoszą w Polsce ok. 500 PJ/rok, co przy całkowitej produkcji energii w Polsce wynoszącej ok. 4000 PJ/rok umożliwiłoby pokrycie potrzeb energetycznych w kraju o ok. 12,5%, eliminując spalanie ok. 17,0 mln ton węgla Pabis [42]. Produkcja drewna w Polsce oceniana jest na ok. 22 mln m³ rocznie, z czego na drewno opałowe przypada ok. 3,8 mln m³ rocznie. W przemyśle drzewnym odpady drewna wynoszą ok. 12,0 mln m³ rocznie, z czego na cele energetyczne można wykorzystać 50,0% tj. 6,0 mln m³ rocznie. Z cięcia sadów (prześwietlania) i drzew z terenów miejskich i rekreacyjnych można uzyskać dodatkowo 1,0 mln m³ rocznie. Łącznie na cele energii cieplnej można by wykorzystać około 7,0 mln m³ odpadów drewna rocznie, co jest równoznaczne ze spalaniem ok. 5,5 mln ton węgla

rocznie lub ok. 4000 PJ energii cieplnej. Stanowi to ok. 2,5% całkowitego zużycia energii cieplnej w Polsce. Wg Wójcickiego [62] energia cieplna ze spalania biomasy (drewna i ich odpadów) wynosiła w 2000 roku 55 PJ/rok, a wg prognoz w 2010 r. ma wynosić 65 PJ/rok. Zasoby słomy z uprawy zbóż, rzepaku i kukurydzy szacuje się na ok. 30 mln ton rocznie o potencjale energetycznym 495 PJ. Zakładając, że na cele energetyczne można by przeznaczyć 10% ogólnych zasobów, to pozyskana ze spalania biomasy energia cieplna wynosiłaby 49,5 PJ rocznie Pabis [42]. Oleje roślinne mogą być mieszane z olejem napędowym lub stanowić jego zamiennik, z 1,0 tony nasion rzepaku uzyskuje się 370 kg oleju. Zakładając wykorzystanie 50% zbioru rzepaku na paliwo płynne, to z 1,6 mln ton rzepaku w Polsce, można uzyskać 630 tys. ton oleju o wartości energetycznej 7,7 PJ. Warunki glebowe w Polsce pozwalają na produkcję rzepaku na ok. 30% powierzchni użytków rolnych. Wg prognoz w 2030 r. Grzybek [20] przewiduje się przeznaczenie na cele energetyczne, uprawy rzepaku o pow. 500 tys. ha, z której można wyprodukować 485 tys. ton biopaliwa o wartości energetycznej 17 PJ [42].

16.6. Biogaz

Według Urzędu regulacji Energetyki [4] biogaz rolniczy: jest to paliwo gazowe otrzymywane w procesie fermentacji metanowej z surowców rolniczych, produktów ubocznych rolnictwa, płynnych lub stałych odchodów zwierzęcych, produktów ubocznych lub pozostałości z przetwórstwa produktów pochodzenia rolniczego lub biomasy leśnej, z wyłączeniem gazu pozyskanego z surowców pochodzących z oczyszczalni ścieków oraz składowisk odpadów.

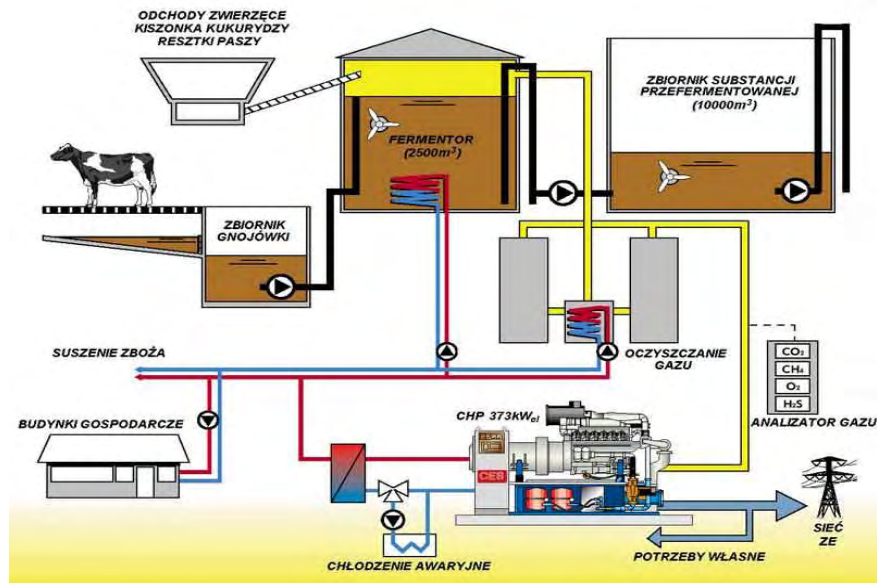
Jak podaje Solarski [47] do biopaliw gazowych zaliczamy:

- biogaz rolniczy (fermentacja gnojownicy),
- biogaz z fermentacji odpadów przetwórstwa spożywczego,
- biogaz z fermentacji osadów ściekowych,
- gaz wysypiskowy,
- gaz drzewny,
- wodór.

Biogaz wytworzony w procesie fermentacji metanowej odpadów rolniczych może być wykorzystany do produkcji energii elektrycznej i/lub ciepła. Całkowity potencjał techniczny do produkcji biogazu rolniczego z odchodów zwierząt w Polsce wynosi 674 m sześciennych biogazu tj. 2,2 PJ [47].

Dominują dwie podstawowe koncepcje biogazowni rolniczych, ze względu na ilość gospodarstw obsługiwanych: biogazownie scentralizowane oraz indywidualne [47].

Biogazownia scentralizowana przyjmuje duże ilości odchodów zwierzęcych (dziennie od 25 do ponad 400 ton) od okolicznych rolników właścicieli dużych ferm hodowlanych itp., w promieniu do 20 km. Dodatkowo może przyjmować odpady organiczne z przemysłu rolno-spożywczego (czasem również miejskie odpady organiczne, bądź osady ściekowe), które stanowią dodatkowy substrat w procesie fermentacji. Odchody zwierzęce zbierane są ze zbiorników magazynowych na fermach, transportowane do biogazowni, mieszane z odpadami organicznymi i poddawane fermentacji [47].



Rys. 16.4 Schemat produkcji biogazu SolarSKI [47].

Tabela 16.4 Produkcja biogazu z fermentacji beztlenowej wybranych odpadów organicznych w przeliczeniu na suchą masę.

Rodzaj odpadu	Produkcja biogazu m ³ /t s.m.o. po 28 dniach fermentacji
Organiczne odpady kuchenne	480
Trawa	430
Słoma żytnia	250
Kiszonka	450
Szlamy z oczyszczalni ścieków	175
Odchody bydła	160
Odchody trzody	210
Łodygi i liście ziemniaczane	170
Liście buraczane	420

Jak podaje Burczyk [6] w odniesieniu do produkcji biomasy na potrzeby biogazowni rolniczych, możliwości są znacznie większe, można bowiem, poza wyżej wymienianymi roślinami, wykorzystywać uprawę żyta w poplonie ozimym, kukurydzę, sorgo, buraki w plonie wtórnym oraz biomasę z poplonów ścierniskowych. Badania na ten temat realizowano w IWNiRZ.

Potencjał energetyczny polskiego rolnictwa zależy od struktury gospodarstw rolnych, powierzchni zasiewów głównych upraw rolnych, tj. zbóż, ziemniaków, buraków cukrowych, rzepaku i warzyw oraz ilość hodowanych zwierząt gospodarskich (bydła, trzody chlewnej i owiec) [2].

Z zagospodarowania nieużytków oraz produktów ubocznych istnieje możliwość pozyskania znaczącej ilości substratów do produkcji biogazu (tabela 16.4) w biogazowni. W Polsce jest około 7800 gospodarstw rolnych o obsadzie powyżej 100 sztuk dużych SD - Sztuka Duża przelicznik umowne zwierzę o masie ok.500 kg), w których możliwa jest produkcja biogazu wykorzystująca odchody zwierząt. Około 1300 gospodarstw zajmuje się hodowlą bydła, 3000 gospodarstw hodowlą trzody, a 3500 gospodarstw zajmuje się hodowlą drobiu [2]. Wytwarzają one ponad 40 mln m³ gnojowicy i 50 mln m³ obornika. Z takiej ilości obornika o zawartości węgla ok. 36% przy sprawności fermentacji 50% można wy-

tworzyć ok. 3 mld m³ biogazu o zawartości ok. 60% metanu. Natomiast z gnojowicy o zawartości węgla ok. 37% przy sprawności fermentacji 50% (bez uwzględnienia dodatków w postaci kiszzonek) można wytworzyć ok. 146 mln m³ biogazu.

Potencjał techniczny produkcji biogazu z produktów ubocznych produkcji rolnej 1,5 mld m³, z trwałych użytków zielonych 1,1 – 1,7 mld m³, z pozostałości przetwórstwa rolno-spożywczego 100 mln m³. Z powyższych danych wynika, że możliwe jest wyprodukowanie ok. 5 mld m³ biogazu rocznie, wykorzystując tylko istniejące zasoby. Budowa ok. 2 tysięcy małych biogazowni w dużym rozproszeniu spowoduje lokalny rozwój produkcji rolnej, szczególnie hodowli zwierząt i upraw roślin energetycznych oraz zwiększenie zagospodarowania wielu nieużytków. Wynikać to będzie przede wszystkim ze wzrostu rentowności gospodarstw i wzrostu zapotrzebowania na substraty wykorzystywane w biogazowniach [2].

16.7. Podsumowanie

Ocena udziału rolnictwa w produkcji surowców energetycznych jest różna i zależna od miejsca zatrudnienia i kierunku zainteresowań autorów opracowań. Niewątpliwym jest, że najważniejszą misją rolnictwa jest zaspokojenie potrzeb w zakresie produkcji żywności. Jak podaje Faber [15] ocenia się, że na cele energetyczne trzeba będzie przeznaczyć 1,7 mln ha do 2020 roku. Koniecznym będzie zintensyfikowanie produkcji żywnościowej, z czym będą związane koszty finansowe i środowiskowe. Jeżeli nie uda się zrekompensować ubytku wzrostem plonów to należy się liczyć z odczuwalnym wzrostem cen surowców rolnych i żywności. Należy również zauważyć, że z perspektywy producenta niezbędnym warunkiem rozwoju produkcji na cele energetyczne jest właściwa jej opłacalność. Jeśli rynek jej nie wymusi, to trzeba ją będzie wspomagać pod rygorem nie wywiązywania się przez rolnictwo z narodowych i unijnych celów produkcji biomasy na cele energetyczne [32].

Jak podaje Kreczko [32] zboża słabej jakości wpisano na listę surowców, które mogą być stosowane jako biomasa. Ta natomiast jest niezbędna firmom energetycznym, które są zobowiązane do wytwarzania części energii z odnawialnych źródeł. Sprzedaż zbóż słabej jakości do elektrowni cały czas rośnie za pośrednictwem firm handlowych.

W odniesieniu do surowców przeznaczonych do produkcji biopaliw płynnych, takich jak zboża (bioetanol) i rzepak (biodiesel) o opłacal-

ności decyduje sytuacja na rynku polskim, UE i krajów trzecich. Rynek tych produktów nie jest stabilny i w konsekwencji wysoce zmienna jest opłacalność produkcji [15].

Opracowanie przez kierownictwa resortów rolnictwa i gospodarki we współpracy z organizacjami rządowymi i grupami ekspertów programu rozwoju małych biogazowni rolniczych jest przełomem w sposobie podejścia do energetyki odnawialnej oraz sposobu wykorzystania zasobów biomasy i odpadów organicznych. Postulowane od wielu lat ograniczenie marnotrawstwa biomasy w dużych blokach elektrycznych i przeniesienie wagi rozwoju energii odnawialnej na kogeneracyjne systemy rozproszone ma szansę realizacji [2].

Jak podaje Stankiewicz [51] w ocenie Ministerstwa Rolnictwa potencjał energetyczny rolnictwa umożliwi wytworzenie 5 – 6 mld m³ biogazu rocznie o czystości gazu ziemnego wysokometanowego. W szacunku tym uwzględniono w pierwszej kolejności wykorzystanie produktów ubocznych rolnictwa, płynnych i stałych odchodów zwierzęcych oraz pozostałości przemysłu rolno-spożywczego.

Równoległe jednak z wykorzystaniem tych surowców przewidziano prowadzenie upraw roślin określanych jako energetyczne z przeznaczeniem na substrat dla biogazowni. Uprawy te prowadzone byłyby na powierzchni ok. 700 tys. ha, co pozwoliłoby na produkcję biopaliw na poziomie określonym w narodowym celu wskaźnikowym i nie naruszałoby krajowych potrzeb żywnościowych [51].

Jak podaje Szymczuk [55] do 2020 roku w Polsce ma powstać ponad 2 tysiące biogazowni rolniczych średnio jedna w każdej gminie. Lubelszczyzna jako region rolniczy ma duży potencjał do produkcji biogazu. Ministerstwo Gospodarki przygotowało specjalny program pod hasłem „Innowacyjna Energetyka – Rolnictwo Energetyczne”. Zakłada on, że w ciągu najbliższych 10 lat powstanie 2 tysiące zakładów produkujących energię z odpadów [55].

Literatura:

- [1]. Bank Gospodarki Żywnościowej. *Rekordowe zbiory zbóż w Polsce*. [www.portalspozywczy.pl] (23.12.2014).
- [2]. Borecki R., Pyrc M., Jamrozik A. *Perspektywy rozwoju małych biogazowni rolniczych w Polsce do 2020 roku*. [http://bioenergypromotion.w.interia.pl/0113a.pdf].

- [3]. Belżecka P. *Wiele hałasu o nic – zboża jako źródło energii*. [www.portalspozycywczy.pl].
- [4]. Borychowski M. *Produkcja i zużycie biopaliw płynnych w Polsce i na świecie – szanse, zagrożenia, kontrowersje*. Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu. Katedra Makroekonomii i Gospodarki Żywnościowej, Poznań. [http://www.kpsw.edu.pl/pobierz/wydawnictwo/re5/borychowski_produkcja_i_zuzycie_biopaliw_plynnnych_w_polsce_i_na_swiecie.pdf].
- [5]. Budzyński W., Bielski S. *Surowce energetyczne pochodzenia rolniczego. Cz. I. biokomponenty paliw płynnych*. Acta Sci. Pol., Agricultura 3(2) 2004, s. 5-14.
- [6]. Burczyk H. *Przydatność zbóż na potrzeby produkcji energii odnawialnej w świetle wyników doświadczeń*. Problemy Inżynierii Rolniczej nr 3/2011. s. 43-51.
- [7]. Chalecka K. *Możliwości wykorzystania odnawialnych zasobów energetycznych w Polsce*. Acta Universitatis Nicolai Copernici. Zeszyt 397/2010. s. 133-140.
- [8]. Chojnacki I. *W polskich elektrowniach i elektrociepłowniach można już spalać zboże*. [http://forsal.pl/artykuly/405057,w_polskich_elektrowniach_i_elektrociepłowniach_].
- [9]. Chrzanowski P. *Zboże poszło w komin*. [http://witrynowiejska.org.pl/strona-glownao-tym-sie-mowi/item/206].
- [10]. Czaja M., Florek A. *Biopaliwa pokarm czy opał*. Nauka i technika. Chemia w szkole 1/2005.s. 5-8.
- [11]. Dec B., Krupa J. *Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w aspekcie ochrony środowiska*. Wyższa Szkoła Informatyki i zarządzania w Rzeszowie, Katedra Turystyki i Rekreacji.
- [12]. Derski B. *OZE w Polsce szybko się rozwijają*. [http://wysokienapieci.e.pl/oze/749-oze-w-polsce-udzial-nowelizacja-ustawy-o-oze].
- [13]. *Ekologiczny palnik na owies BIOTERM 25*. [http://www.firmy.net/WX34Y,ekologiczny-palnik-na-owies,P3YS.html].
- [14]. *Ekologiczne spalanie w kottach DEFRO*. [http://piece-kotly.eu/ekologiczne-spalanie-wkotlach-defro] (20.06.2014).
- [15]. Faber A. *Podstawowe problemy produkcji roślin na cele energetyczne*. IUNiG, Państwowy Instytut Badawczy w Puławach.2010. Źródło: Chrońmy Klimat. [http://ziemianarozdrozu.pl/artikul/1075/podstawowe-problemy-prod].

- [16].Faber A. *Spalanie ziarna-prozaiczne dylematy pozaetyczne*. [CIRE.pl-energetyka, rynek energii.htm].
- [17].Gleń A. *Nowoczesne technologie uprawy żyta z uwzględnieniem aspektu gorzelniczego*. DANKO hodowla Roślin Sp. Z o. o.
- [18].Gleń A. *Produkcja biogazu i metanu*. DANKO Hodowla Roślin Sp. Z o.o.
- [19].Gleń A. *Żyto Dańkowskie Amber*. DANKO Hodowla Roślin Sp. Z o.o.
- [20].Grzybek A. *Biomasa jako alternatywne źródło energii*. Wojewódzki Ośrodek Doradztwa Rolniczego. Warszawa .2002.
- [21].Gumeniuk A. *Owies do pieca*. Bioenergetyka 2007-02-27.
- [22].GUS. *Energia ze źródeł odnawialnych w 2013 r*. Warszawa .2014. [www.stat.gov.pl].
- [23].Janowicz L. *Ziarno zbóż jako surowiec energetyczny – palniki do jego spalania*. IBMER, Warszawa. [sbh-systems.com/pobierz/PDF/artykulis/palniki_na_ziarno.pdf].
- [24].*Jedna biogazownia w każdej gminie*. [http://www.agrobudownictwo.pl/jedna-biogazownia-w-kazdej-gminie,81,aktualnosc.html].
- [25].Inne wykorzystanie tradycyjnego ziarna. Instytut Rozwoju Energii Odnawialnej. [http://biegus.pl/news/inne-wykorzystanie-tradycyjnego-ziarna].
- [26].Kaszkowiak E., Kaszkowiak J., Szymczyk M. *Spalanie ziarna kukurydzy, pszenżyta i żyta uprawianych przy ograniczonym nawożeniu azotowym*. Inż. i Ap. Chem. 2013, 2. s. 58-59.
- [27].Kaszkowiak J., Kaszkowiak E. *Wykorzystanie ziarna zbóż uprawianych w technologii uproszczonej na cele energetyczne*. Inż. Ap. Chem. 2009, 48, 2, s. 62-63.
- [28].Konczalski S. *Kierunki wykorzystania słomy*. Eko Technika sp. Z o.o. Brodnica.
- [29].*Kotły na biomasę-czysto, niedrogo*. [http://ogrzewaniemdomu.pl/koty-na-pellet-i-owies-wentylacja-mechaniczna-kielce].
- [30].*Kotły na pellets Pellets Fuzzy Logic – Kostrzewa*. [http://www.kostrzewa.com.pl/#!Serwis-Pellets_Fuzzy_Logic_2].
- [31].Krakowczyk T. *A może zboże?*, [www.instalator.pl].
- [32].Kreczko W. *Roślinie sprzedaż zbóż na cele energetyczne*. [http://www.porta.lspozywczy.pl].

- [33].Kruczek H. *Biomasa dla celów energetycznych*. Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, 2005. s. 52.
- [34].Krzemiński J. *W sejmie o bigazowniach*. [<http://www.chromy klimat.pl/pr ojekt/biogazownia-przemyslany-wy>].
- [35].Kuś J. *Produkcja biomasy na cele energetyczne (możliwości i ograniczenia)*. [http://www.pan-ol.lublin.pl/biul_7/art_710.htm].
- [36].Kwapisz M. *Efektywność energetyczna produkcji wybranych gatunków zbóż*. [www.warsztaty.wnr.edu.pl/13/referaty/tekst/kwapisz.pdf].
- [37].Majchrzycki T. *Program DANKO-bioetanol*. DANKO Hodowla Roślin Sp. Z o.o.
- [38].Matuszczak A. *Uprawa kukurydzy na cele energetyczne*. [<http://www.m odr.mazowsze.pl/porady-dla-rolnikow/produkcja-roslinna/461-upra wa-kukurydzy-na-cele-energetyczne>].
- [39].Nykiel P. *Alternatywne źródła energii – biopaliwa*. WSz Inż.-Ekon., Ropczyce, 2008.
- [40].*Odpowiedź na interpelacje w sprawie wykorzystania zboża jako odnawialnego źródła energii*. [<http://orka2.sejm.gov.pl/IZ6.nmsf/main/5F3F59FA>].
- [41].*Owies nie tylko dla konia*. [http://www.ekoenergia.pl/index.php?id_a rt=325&cms=115&plik=K].
- [42].Pabis J. *Odnawialne źródła energii uzupełnieniem energetyki w rolnictwie*. [www.agengpol.pl/LinkClick.aspx?fileticket=DKqjvuznNeQ%3D...144].
- [43].RAPID. *Kotły na owies*. [www.rapid.sim.pl].
- [44].Rembowski Ł. *Brykieciarki hydrauliczne. Aeroenergetyka*. [<http://aeroener gety ka.pl/?a=ariele&id=187>].
- [45].SAS AGRO-ECO – opis właściwości kotła. [<http://www.sas.busko.pl/pl/produkty/sas-agro-eco/opis-waciwoci-kota.html>].
- [46].Senn T., Hartmann F. *Anbau von Ethanolgetreide und dessen verarbeitungstechnische Eigenschaften*. Vortragsveranstaltung Ethanolgetreide in Zeit 27. Februar 2007.
- [47].SolarSKI T. *Wykorzystanie biomasy do produkcji energii*. LODR w Końskowoli.
- [48].SolarSKI T. *Energia odnawialna jako główny czynnik przyspieszonego rozwoju obszarów wiejskich i bezpieczeństwa energetycznego*. LODR w Końskowoli. 2011.

- [49]. Solarski T. *Ziarno owsa zamiast węgla*. [http://www.wodr.konskowola.pl/index.php?option=com_content&vi].
- [50]. Solarski T. *Energetyczne wykorzystanie biomasy*. [www.bpp.lublin.pl/new-s1/oze/prezentacje/3.pdf].
- [51]. Stankiewicz D. *Produkcja rolna na cele energetyczne jako instrument polityki klimatycznej*. Studio BAS, Nr 1(29) 2012, s. 185-208.
- [52]. Stuligrosz M. *Interpelacja w sprawie kontrowersji związanych ze spalaniem zbóż w elektrowniach*. [<http://orka2.sejm.gov.pl/IZ6.nsf/main/1CFF5BC1>].
- [53]. Szewczyk W., K. *Zarys możliwości wykorzystania etanolu jako odnawialnego źródła energii*. Politechnika Warszawska. Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej. Warszawa 2004.
- [54]. Szmolke N. *Wybrane przykłady spalania biomasy*. Nauka i praktyka – staże zawodowe w przedsiębiorstwach. Politechnika Opolska. Akademicki Inkubator Przedsiębiorczości. 2009. Problemy Inżynierii Rolniczej nr 3/2011, s. 43-51.
- [55]. Szymczuk W. *Jedna biogazownia w każdej gminie*. Źródło: Redakcja Rolna TVP. 22.09.2010.
- [56]. Szwed-Lipińska K. *Biomasa na cele energetyczne*. [http://www.powermeetings.eu/konferencje/en/forum-technologie-w-energetyce-spalanie-biomasy-belchatow-2014/images/prezentacje/03_K_Szwed_Lipinska.pdf].
- [57]. *Światowe zużycie zbóż na cele przemysłowe w sezonach 2013/2014 i 2014/2015*. [<http://www.gospodarz.pl/aktualności/zboza/swiatowe-zuzycie-zboz-na-cele-przemysl>].
- [58]. Tomczak I. *Ziarno na cele energetyczne*. KPODR Minikowo, Oddział w Zarzeczewie PZDR w Radziejowie. XII 2009. [<http://www.kpdr.pl/index.php/galeria-2013/392-ziarno-na-cele-energetyczne>].
- [59]. Tomaszewski R. *Czy piec na pelet umożliwi spalanie ziaren zbóż i kukurydzy*. [<http://murator-dom.pl/instalacje/ogrzewanie-paliwami-stalymi/czy-pi>].
- [60]. Thomas Joly Y. *USA produkcja bioetanolu pozwala na utrzymanie cen*. Maiz'Info Biuletyn francuskiej branży nasion kukurydzy. Grudzień 2014/Styczeń 2015.
- [61]. Urząd Regulacji Energetyki. *Biomasa na cele energetyczne – kwalifikacja w postępowaniu przed regulatorem*. [http://www.ure.gov.pl/pl/rynki-energii/en/energia-elektryczna/odnawialne-zrodla-ener/biomasa-na-cele-energie/5069_Biomasanaceleenergetyczne.html].

- [62]. Wójcicki Z. *Poszanowanie energii środowiska w rolnictwie i na obszarach wiejskich*. IBMER Warszawa 2007.
- [63]. *Wykorzystanie biomasy w energetyce*. [<http://www.spalanie.pwr.wroc.pl/badania/biomasa/biomasa.htm>].
- [64]. *Zestaw do spalania zboża (owies) o mocy 25 kW*. [<http://www.moderator.com.pl/home/19-wyprzedaz/zestawy-do-sp>].
- [65]. *Ziarno energetyczne*. [<http://www.biomasa.org/index.php?d=artykul&kat=61&art=58>].
- [66]. Żabiński A., Sadowska U., Wcisło G. *Ciepło spalania ziarniaków zbóż o obniżonych cechach jakościowych*. WIR, Inżynieria Rolnicza, 2012:Z.2(136) T.1, s 353-359.

17. ZAŁĄCZNIK

17.1. Wybrane definicje i objaśnienia z zakresu techniki cieplnej i odnawialnych źródeł energii

Absorpcja (pochłanianie) - proces w którym energia promieniowania słonecznego jest przetwarzana w inną postać energii, dzięki oddziaływaniu e.p.s na materię (e.p.s. energia promieniowania słonecznego).

Absorber - element kolektora słonecznego, w którym zachodzi bezpośrednia przemiana energii promieniowania słonecznego na inną postać energii cieplnej (powietrze, woda).

Adiabata - krzywa przedstawiająca na wykresie przemianę, w której nie zachodzi wymiana ciepła z otoczeniem.

Aerodynamiczna charakterystyka silnika wiatrowego - graficznie przedstawiona zależność pomiędzy warunkami pracy wirnika (prędkość wiatru, obroty wirnika), a parametrami takimi jak moc, moment obrotowy i parcie osiowe.

Albedo - wielkość określająca, jaka część promieniowania słonecznego, padająca na daną powierzchnię zostanie odbita.

Bakterie metanowe - bakterie wytwarzające metan przy redukcji dwutlenku węgla w procesach beztlenowej fermentacji metanowej.

Bilans cieplny - zestawienie, na podstawie badań lub obliczeń w ustalonych warunkach cieplnych, ilości ciepła dostarczonego paliwem, ilości ciepła użytecznego wykorzystanego w procesie technologicznym oraz ilości poszczególnych strat cieplnych.

Bilans energii - zestawienie w postaci równania, w którym po lewej stronie znaku równości występuje energia doprowadzona E_d do badanego układu wyodrębnionego za pomocą osłony bilansowej, zaś po stronie prawej ilość energii wyprowadzonej z układu E_w i przyrost E_u energii układu. $E_d = E_w + E_u$

Bilans paliwowo - energetyczny zestawienie ujmujące w jednostkach energii, oraz częściowo w tradycyjnych i innych jednostkach miar, przychody paliw i energii oraz ich predysponowanie i straty w fazach poprzedzających zużycie w odbiornikach.

Biogaz - gaz powstający podczas fermentacji metanowej materii organicznej (rozkładu w warunkach beztlenowych) np. odchodów zwierzęcych, odpadów przetwórstwa spożywczego, odpadów komunalnych na wysypiskach i odpadów produkcji roślinnej. Biogaz zawiera głównie metan i dwutlenek węgla.

Biogazownia - instalacja biogazowa składająca się z zespołu urządzeń służących do prowadzenia fermentacji metanowej substancji organicznych.

Biomasa - materia pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, która ulega biodegradacji, substancje pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz leśnej, a także przemysłu przetwarzającego ich produkty oraz inne części odpadów, które ulegają biodegradacji.

Ciało doskonale białe - ciało, które całkowicie odbija promieniowanie słoneczne.

Ciało doskonale czarne - ciało, które całkowicie pochłania promieniowanie słoneczne.

Ciało doskonale przezroczyste - ciało, które całkowicie przepuszcza promieniowanie słoneczne.

Ciepło parowania - ilość ciepła, jaką należy doprowadzić do cieczy, aby otrzymać z niej przy stałej temperaturze i stałym ciśnieniu taką samą masę pary suchej nasyconej.

Ciepło spalania - (górna wartość opałowa W_g) ilość ciepła jaka wydziela się podczas spalania 1 kg paliwa stałego, ciekłego lub 1 m³ paliwa gazowego, jeżeli spalanie było zupełne i całkowite, oraz substraty miały temperaturę normalną a produkty spalania oddały taką ilość ciepła, że również mają temperaturę normalną, a cała para wodna zawarta w spalinach uległa skropleniu. Ciepło spalania nazywane jest często górną wartością opałową W_g . Dolna wartość opałowa W_d , jest definiowana podobnie jak ciepło spalania z tą różnicą, że podczas spalania cała para wodna zawarta w spalinach nie uległa skropleniu.

Ciepło właściwe – ilość ciepła potrzebna do podwyższenia temperatury ciała o jednostkowej masie lub objętości 1 mola gazu o 1 K, nie wywołującą przemiany fazowej ciała.

Ciśnienie całkowite – ciśnienie płynu cieczy lub gazu, stanowiące sumę ciśnienia statycznego i dynamicznego w rozważanej przestrzeni.

Ciśnienie dynamiczne – ciśnienie płynu lub gazu będącego w ruchu, niezbędne do nadania jego cząstkom określonej prędkości przepływu. Ciśnienie dynamiczne jest proporcjonalne do kwadratu prędkości przepływu płynu lub gazu i zależy od ich gęstości.

Ciśnienie statyczne – ciśnienie płynu lub gazu wywierane na ściany zbiornika, w którym się dany płyn lub gaz znajduje.

Czynnik grzewczy – medium, (płyn lub gaz) służące do transportu ciepła między źródłem ciepła, a odbiornikiem ciepła.

Czynnik suszący – ogrzany gaz, powietrze lub mieszanina gazów, która przekazuje ciepło materiałowi suszonemu i odprowadza w procesie suszenia z niego wodę w postaci pary wodnej.

Czynnik termodynamiczny – substancja w postaci gazu, pary lub cieczy, biorąca udział w procesie wymiany ciepła i masy albo pośrednicząca w przekształcaniu ciepła na pracę mechaniczną lub odwrotnie.

Deklinacja – kąt padania promieniowania słonecznego na płaszczyznę równika.

Efekt szklarniowy – zjawisko polegające na pochłanianiu energii cieplnej promieniowania słonecznego przez glebę, rośliny i elementy konstrukcji w szklarni oraz wzroście temperatury wewnątrz szklarni przy minimalnych ilościach ciepła, wypromieniowanego z wnętrza szklarni do otoczenia.

Efektywność energetyczna – relatywny lub różnicowy wskaźnik odzwierciedlający stopień osiągnięcia założonych celów w stosunku do użytych ilości lub wartości paliw i energii.

Ekosystem – układ ekologiczny obejmujący organizmy żywe i środowisko nieożywione, w którym zachodzi obieg materii i przepływ energii.

Elektrownia wiatrowa – urządzenie przekształcające energię wiatru na energię elektryczną, składające się z silnika wiatrowego, prądnicy połączonej za pomocą przekładni z wałem silnika wiatrowego.

Elektrownia wodna – elektrownia przekształcająca energię przepływającą cieką wody na energię elektryczną.

Elektrownia wodna przepływowa – elektrownia zasilana wodą z rzeki bez stosowania zbiorników retencyjnych, umożliwiających gromadzenie wody w celu powiększenia przepływu podczas większego zapotrzebowania na moc.

Elektrownia wodna zbiornikowa – elektrownia zasilana ze zbiornika, którego objętość umożliwia czasowe gromadzenie przepływającej wody i regulowanie dopływu wody do turbin w zależności od zapotrzebowania na moc w sieci zasilanej z tej elektrowni.

Energia – uniwersalna wielkość fizyczna wyrażona w jednostkach pracy, określająca zdolność układu ciał do wykonywania pracy podczas przejściu ich z jednego stanu w stan drugi.

Energia elektryczna – jest to energia prądu elektrycznego, obliczaną jako iloczyn mocy prądu elektrycznego i czasu jego poboru.

Energia odnawialna – energia, która pod wpływem oddziaływania promieniowania słonecznego zostają odtworzone, tj. energia słońca, energia wiatru, energia pochodząca z biomasy, energia geotermiczna oraz energia rzek.

Energia wiatru brutto – energia kinetyczna strumienia powietrza (wiatru) przepływającego w określonym czasie przez jednostkę powierzchni prostopadłej do kierunku wiatru, podawana w kilowatogodzinach na metr kwadratowy kWh/m²rok.

Energia wiatru netto – część energii brutto wykorzystanej ze strumienia wiatru przez silnik wiatrowy.

Fermentacja metanowa – (anaerobowa) proces biochemiczny zachodzący w warunkach beztlenowych, w wyniku którego wielocząsteczkowe substancje organiczne rozkładane są przez bakterie na związki proste, głównie metan i dwutlenek węgla.

Gęstość strumienia ciepłego – ilość ciepła przepływającego przez jednostkę powierzchni w jednostce czasu.

Gnojowica – mieszanina odchodów zwierzęcych, resztek pasz oraz wód technologicznych z budynków inwentarskich.

Gnojówka - odciek powstający w budynkach inwentarskich przy ściółkowym systemie utrzymania zwierząt.

Granula - prostopadłościan lub walec uformowany z pasz rozdrobnionych na mączkę.

Granulator - urządzenie do granulowania.

Heliostat - urządzenie odbijające promieniowanie słoneczne w określonym kierunku.

Kąt odbicia promieniowania słonecznego - kąt pomiędzy normalną do powierzchni, a kierunkiem promieniowania odbitego.

Kąt załamania - kąt pomiędzy normalną do powierzchni, a kierunkiem promieniowania załamanego.

Kolektor cieczowy o działaniu bezpośrednim - kolektor słoneczny do podgrzewania wody w którym czynnikiem grzewczym krążącym w absorberze jest woda.

Kolektor cieczowy o działaniu pośrednim - kolektor słoneczny do podgrzewania wody, w którym czynnikiem grzewczym krążącym w absorberze jest ciecz niezamarzająca.

Kolektor cieczowy próżniowy - kolektor słoneczny do podgrzewania wody, w którym między absorberem, a pokryciem wytworzona jest próżnia.

Kolektor materacowy - kolektor słoneczny do podgrzewania powietrza, w którym pokrycie z folii ma kształt materaca.

Kolektor niskotemperaturowy - kolektor słoneczny do podgrzewania wody o temperaturze czynnika grzewczego poniżej 40°C.

Kolektor odkryty - kolektor słoneczny do podgrzewania powietrza lub wody bez przezroczystej osłony absorbera.

Kolektor płaski o bezpośrednim podgrzewaniu wody - kolektor słoneczny, w którym zastosowano płaski absorber o powierzchni gładkiej lub profilowanej.

Kolektor powietrzny foliowy - kolektor słoneczny do podgrzewania powietrza, w którym zastosowano absorber foliowy.

Kolektor poddachowy - kolektor słoneczny do podgrzewania powietrza, w którym przepływające powietrze ogrzewa się od wewnętrznej strony dachu będącego absorberem.

Kolektor porowaty - kolektor słoneczny do podgrzewania powietrza, w którym jako absorber zastosowano warstwę porowatą.

Kolektor skupiający soczewkowy - kolektor do podgrzewania wody, w którym do skupienia wiązki promieniowania słonecznego zastosowano soczewki.

Kolektor skupiający z lustrami płaskimi - kolektor słoneczny do podgrzewania wody, w którym do koncentrowania promieniowania słonecznego zastosowano lustra płaskie.

Kolektor średnotemperaturowy - kolektor do podgrzewania wody o temperaturze czynnika grzewczego 40 - 110°C.

Kolektor zakryty - kolektor słoneczny do podgrzewania powietrza i wody, w którym absorber zakryty jest osłoną przezroczystą.

Komora fermentacyjna - zbiornik zamknięty, w którym odpady organiczne rozkładane są biologicznie w warunkach beztlenowych, w wyniku czego powstaje metan.

Lepkość - zdolność cieczy i gazu do przyczepiania się do ścian przewodów przez które przepływają lub do przedmiotów wokół których opływają.

Liczba Reynoldsa - kryterium kinematyczne przepływu, wyrażające stosunek sił bezwładności do sił wewnętrznej tarcia płynu lub gazu i określające charakter przepływu.

Łopata wirnika - płaski element wirnika turbiny umieszczony na jego obwodzie.

Mechanizm orientacji - mechanizm służący do ustawiania wirnika pod odpowiednim kątem do wiatru, zapewniający optymalną pracę silnika wiatrowego.

Moc silnika wiatrowego - moc uzyskiwana na wale wirnika.

Moc strumienia powietrza - moc strumienia energii kinetycznej wiatru przepływającego przez jednostkę przekroju w jednostce czasu.

Natężenie cieplne – ilość ciepła wytworzonego lub przepływającego w jednostce czasu w odniesieniu do jednostki objętości lub powierzchni urządzenia,

Natężenie promieniowania – ilość energii wypromieniowanej przez jednostkę powierzchni ciała w jednostce czasu we wszystkich kierunkach, w postaci fal o wszystkich długościach.

Natężenie przepływu – ilość (masa lub objętość) czynnika przepływającego przez określony przekrój w określonym czasie.

Pompa ciepła – urządzenie pobierające ciepło z ośrodka o niższej i dostarczające je do ośrodka o temperaturze wyższej.

Promieniowanie podczerwone – promieniowanie elektromagnetyczne o długości fal większej niż $0,78 \mu\text{m}$.

Promieniowanie ultrafioletowe – elektromagnetyczne o długości fal mniejszej niż $0,38 \mu\text{m}$.

Promieniowanie widzialne – promieniowanie elektromagnetyczne o długości fal $0,38 - 0,78 \mu\text{m}$.

Przepływ laminarny – (przepływ uwarstwiony) przepływ powietrza lub cieczy w którym cząstki powietrza lub płynu poruszają się równoległe do kierunku przepływu.

Przepływ turbulentny – (burzliwy) przepływ powietrza lub cieczy nie poruszają się równoległe do kierunku przepływu, lecz wykonują ruch zawirowania.

Regenerator – wymiennik ciepła, w którym tę samą powierzchnię opływa na przemian czynnik gorący i zimny.

Rekuperator – wymiennik ciepła, w którym przepływają równocześnie dwa czynniki gorący i zimny, przegrodzone od siebie ścianką.

Silnik wiatrowy – urządzenie do zamiany energii kinetycznej wiatru na energię mechaniczną poruszającą inne maszyny.

Silnik wiatrowy o osi pionowej – silnik wiatrowy, w którym wał wirnika usytuowany jest pionowo i nie wymaga mechanizmu orientacji.

Silnik wiatrowy o osi poziomej – silnik wiatrowy, w którym wał wirnika usytuowany jest poziomo lub prawie poziomo i nie wymaga mechanizmu orientacji.

Siłownia wiatrowa – silnik wiatrowy z napędzaną przez niego maszyną np. prądnica, pompa.

Strumień ciepła – (moc cieplna) ilość ciepła przenoszona w jednostce czasu przez daną powierzchnię.

Strumień energii – wielkość wektorowa charakteryzująca szybkość przepływu energii.

System pasywnego ogrzewania słonecznego – system ogrzewania słonecznego, w którym energia cieplna przenoszona jest na skutek różnicy temperatur, włączając w tym przewodzenie, konwekcję naturalną i promieniowanie.

Szybkobieżność wirnika – stosunek prędkości obwodowej do prędkości wiatru.

Temperatura zapłonu – najniższa temperatura, przy której paliwo zaczyna się palić przy doprowadzeniu z zewnątrz źródła ognia.

Turbina wodna – urządzenie hydromechaniczne, służące do przetwarzania energii kinetycznej, zawartej w przepływającej przez turbinę wodzie, na energię mechaniczną ruchu obrotowego wału sprzęgniętego z prądnicą, wytwarzającą prąd elektryczny przesyłany do sieci.

Wilgotność względna powietrza – wilgotność powietrza wyrażona stosunkiem ciśnienia cząstkowego pary wodnej zawartej w powietrzu do ciśnienia pary wodnej nasyconej, przy tej samej temperaturze i ciśnieniu powietrza.

Współczynnik wykorzystania energii wiatru przez wirnik – wartość określająca stosunek energii uzyskanej na wale wirnika do energii przepływającej przez wirnik.

Wyróżnik szybkobieżności – liczba obrotów turbiny, przy spadzie wody z jednego metra i mocy turbiny jednego konia mechanicznego.

17.2. Tabele

Tabela 1. Właściwości fizyczne i cieplne suchego powietrza przy ciśnieniu 101 325 Pa [Kale-
ta A., Wojdalski J. 2000]

Temperatura t[°C]	Gęstość ρ[kg/m ³]	Ciepło właściwe C _p [kJ/(kg K)]	Współczynnik przewodzenia ciepła λ × 10 ² [W/(m K)]	Dyfuzyjność cieplna a × 10 ⁶ [m ² /s]	Współczynnik lepkości dynamicznej μ 10 ⁶ [Pa × s]	Współczynnik lepkości kinematycznej ν × 10 ⁶ [m ² /s]	Liczba Prandtla Pr
1	2	3	4	5	6	7	8
-50	1,584	1,013	2,04	12,70	14,61	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,78	15,20	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,92	15,69	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,20	16,18	11,61	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,45	16,67	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,81	17,16	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,06	17,65	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,42	18,14	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,86	18,63	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,31	19,12	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,72	19,61	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,20	20,10	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,97	28,56	20,59	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,20	21,09	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,89	21,48	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,64	21,87	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,84	22,85	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,34	23,73	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,89	24,52	30,09	0,682
180	0,779	1,021	3,78	47,50	25,30	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,37	25,99	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,00	27,36	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,61	71,56	29,72	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,87	31,38	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,12	33,05	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,75	115,31	36,19	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,29	39,23	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,40	41,78	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,77	44,33	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,24	46,68	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,94	49,04	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,27	51,19	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,53	53,45	223,7	0,724

Tabela 2. Właściwości fizyczne i ciepłe pary wodnej wody na granicy nasycenia [Kaleta A., Wojdalski J. 2000]

	Liczba Prandla Pr	Napięcie powierzchniowe $\sigma \cdot 10^4$ [N/m]	Współczynnik rozszerzalności cieplnej objętościowej $\beta \cdot 10^4$ [K ⁻¹]	Współczynnik lepkości kinematycznej $\nu \cdot 10^6$ [m ² /s]	Współczynnik lepkości dynamicznej $\mu \cdot 10^4$ [Pa • s]	Dyfuzyjność ciepła $a \cdot 10^8$ [m ² /s]	Współczynnik Przewodzenia ciepła λ [W/(m • K)]	Ciepło właściwe Cp [kJ/(kg • K)]	Enthalpia właściwa i [kJ/kg]	Gęstość ρ [kg/m ³]	Cisnienie $p \cdot 10^{-5}$ [Pa]	Temperatura t [°C]
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	1,013	999,9	0	4,212	0,551	13,1	17,88	1,789	-0,63	756	13,67	
10	1,013	999,7	42,0	4,191	0,575	13,7	13,05	1,306	+0,70	741	9,52	
20	1,013	998,2	83,9	4,183	0,600	14,3	10,04	1,006	1,82	727	7,02	
30	1,013	995,7	125,7	4,174	0,618	14,9	8,01	0,805	3,21	712	5,42	
40	1,013	992,2	167,5	4,174	0,634	15,3	6,53	0,659	3,87	696	4,31	
50	1,013	988,1	209,3	4,174	0,648	15,7	5,49	0,556	4,49	677	3,54	
60	1,013	983,2	251,1	4,179	0,659	16,1	4,70	0,478	5,11	662	2,98	
70	1,013	977,8	293,0	4,187	0,668	16,3	4,06	0,415	5,70	643	2,55	
80	1,013	971,8	335,0	4,195	0,675	16,6	3,55	0,365	6,32	626	2,21	
90	1,013	965,3	377,0	4,208	0,680	16,8	3,15	0,326	6,95	607	1,95	
100	1,013	958,4	419,1	4,220	0,683	16,9	2,82	0,295	7,52	588	1,75	
110	1,43	951,0	461,4	4,233	0,685	17,0	2,59	0,272	8,08	569	1,60	
120	1,99	943,1	503,7	4,250	0,686	17,1	2,37	0,252	8,64	548	1,47	
130	2,70	934,8	546,4	4,267	0,686	17,2	2,18	0,233	9,19	529	1,36	
140	3,62	926,1	589,1	4,287	0,685	17,3	2,01	0,217	9,72	507	1,26	
150	4,76	917,0	632,2	4,313	0,684	17,3	1,86	0,203	10,3	486	1,17	
160	6,18	907,4	675,4	4,346	0,683	17,3	1,74	0,191	10,7	466	1,10	
170	7,92	897,3	719,3	4,380	0,679	17,3	1,63	0,181	11,3	443	1,05	
180	10,03	886,9	763,3	4,417	0,675	17,2	1,53	0,173	11,9	422	1,00	
190	12,55	876,0	807,6	4,459	0,670	17,1	1,44	0,165	12,6	400	0,96	
200	15,55	863,0	852,5	4,505	0,663	17,1	1,36	0,158	13,3	377	0,93	
210	19,08	852,8	897,7	4,555	0,655	16,9	1,30	0,153	14,1	354	0,91	
220	23,20	840,3	943,7	4,614	0,645	16,6	1,25	0,148	14,8	331	0,89	
230	27,98	827,3	990,2	4,681	0,637	16,5	1,20	0,145	15,9	310	0,88	
240	33,48	813,6	1038,0	4,756	0,628	16,2	1,15	0,141	16,8	285	0,87	
250	39,78	799,0	1086	4,844	0,618	16,0	1,10	0,137	18,1	262	0,86	
260	46,94	784,0	1135	4,949	0,605	15,6	1,06	0,135	19,7	237	0,87	
270	55,05	767,9	1185	5,070	0,590	15,1	1,02	0,133	21,6	215	0,88	
280	64,19	750,7	1237	5,230	0,575	14,6	0,98	0,131	23,7	191	0,90	
290	74,45	732,3	1290	5,485	0,558	13,9	0,94	0,129	26,2	169	0,93	
300	85,92	712,5	1345	5,736	0,540	13,2	0,91	0,128	29,2	144	0,97	
310	98,69	691,1	1402	6,071	0,523	12,5	0,88	0,128	32,9	121	1,03	
320	112,89	667,1	1462	6,574	0,506	11,5	0,85	0,128	38,2	98,1	1,11	
330	128,64	640,2	1526	7,244	0,484	10,4	0,81	0,127	43,3	76,7	1,22	
340	146,08	610,1	1595	8,165	0,457	9,17	0,77	0,127	53,4	56,7	1,39	
350	165,37	574,4	1671	9,504	0,430	7,89	0,73	0,126	66,8	38,1	1,60	
360	186,74	528,0	1761	13,98	0,395	5,36	0,67	0,126	109	20,2	2,35	
370	210,53	450,5	1893	40,32	0,337	1,86	0,57	0,126	264	4,7	6,79	

Tabela 3. Wartości współczynnika oporu miejscowego [Malicki M. 1977].

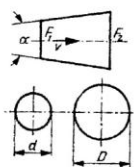
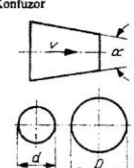
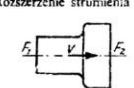
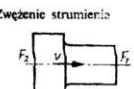
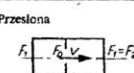
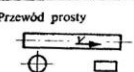
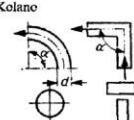
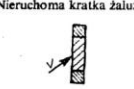

Nazwa, forma i przekrój	Współczynniki oporu miejscowego ζ											
Dyfuzyor 	F_2/F_1	α	10°	15°	20°	25°	30°	45°				
		1,25	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06				
		1,50	0,02	0,03	0,05	0,08	0,11	0,13				
	1,75	0,03	0,05	0,07	0,11	0,15	0,20					
	2,00	0,04	0,06	0,10	0,15	0,21	0,27					
	2,25	0,05	0,08	0,13	0,19	0,27	0,34					
	2,50	0,08	0,10	0,15	0,23	0,32	0,40					
Dla $\alpha > 45^\circ$ $\zeta = \left(1 - \frac{F_2}{F_1}\right)^2$												
Konfuzor 	α	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°				
	ζ	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28				
	α	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°				
	ζ	0,30	0,31	0,3	0,32	0,33	0,34	0,34				
Rozszerzenie strumienia 	$\frac{F_1}{F_2}$	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
	ζ	0	0,01	0,04	0,09	0,16	0,25	0,36	0,49	0,64	0,81	1
	$\zeta = \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right)^2$											
Zwężenie strumienia 	$\frac{F_2}{F_1}$	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	ζ	0,5	0,47	0,42	0,38	0,34	0,30	0,25	0,20	0,15	0,09	0
	$\zeta = \left(1 - \frac{F_2}{F_1}\right)^2$											
Przesłona 	$\frac{F_0}{F_2}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
	ζ	226	47,8	17,5	7,8	3,75	1,80	0,80	0,29	0,06	0,00	
Przewód prosty 	wlot $\zeta = 0,30$ wyłot $\zeta = 1,00$											
Kołano 	α 90° 120° 135° 150°											
	ζ 1,1 0,55 0,25 0,20											
Nieruchoma kratka żaluzjowa 	$\zeta = 0,30$											
Siatka 	Dla powierzchni otworów równej 80% całej powierzchni $\zeta = 0,10$											

Tabela 4. Średnie prędkości wiatru w Polsce [Malicki M. 1977].

Miejscowość	Miesiąc											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Biała Podlaska	4,3	4,0	4,2	3,4	3,3	3,0	2,7	2,9	3,1	3,3	3,9	3,9
Białowieża	4,8	4,4	4,6	3,9	3,8	3,3	2,8	3,5	3,5	3,4	4,7	4,5
Białystok	4,1	3,9	3,7	3,4	3,1	2,8	2,6	2,8	2,8	2,3	3,8	3,7
Bydgoszcz	3,9	3,6	3,9	3,6	3,5	3,2	3,1	3,0	2,7	3,0	3,2	3,6
Chojnice	4,2	3,9	3,9	3,4	3,2	2,8	2,7	2,3	3,0	3,2	3,2	3,1
Cieszyn	2,4	2,3	2,1	2,1	1,8	1,6	1,6	1,4	1,7	1,7	2,0	2,1
Częstochowa	2,7	2,7	2,6	2,2	2,4	2,2	2,1	2,0	2,0	2,0	2,3	2,4
Elbląg	3,8	3,8	4,3	4,0	3,7	3,3	3,1	3,1	3,1	3,4	3,6	3,9
Gdańsk - Wrzeszcz	4,2	3,9	4,2	3,8	3,6	3,0	3,1	3,0	3,0	3,6	3,5	3,9
Gdynia	4,9	4,7	4,7	3,8	3,7	3,4	3,5	3,3	3,6	4,2	4,6	4,0
Gorzów Wielkopolski	3,3	3,3	3,6	3,2	3,1	2,8	2,9	2,6	2,8	2,7	2,9	3,0
Hel	5,5	4,9	4,7	3,8	3,9	3,6	3,6	3,7	3,2	5,0	5,0	5,5
Jelenia Góra	3,3	3,2	3,0	2,4	2,3	2,0	2,1	1,7	2,2	2,3	2,8	2,8
Kalisz	3,2	2,9	3,0	2,6	2,6	2,3	2,3	2,2	2,4	2,2	2,6	2,9
Kasprowy Wierch	8,6	8,2	7,6	6,4	5,4	5,3	5,1	5,4	5,8	6,5	8,2	8,6
Katowice	4,0	3,8	3,9	3,9	3,3	2,9	2,9	2,7	3,0	3,0	3,6	3,8
Kętrzyn	4,0	3,8	3,9	3,5	3,3	2,9	2,9	2,7	3,0	3,0	3,6	3,8
Kielce	3,1	3,0	3,2	2,6	3,0	2,6	2,5	3,4	2,6	2,5	2,8	2,8
Kłodzko	3,8	3,5	3,2	2,8	2,4	2,1	2,0	1,9	2,4	2,8	3,4	3,5
Koło	3,2	3,1	2,4	2,5	2,4	2,1	2,0	1,9	1,9	2,1	2,6	2,8
Kolobrzeg	5,0	4,8	4,6	4,0	3,7	3,4	3,5	3,4	3,8	4,0	4,2	4,8
Koszalin	5,5	4,8	4,8	4,7	4,3	3,4	3,4	3,4	3,8	4,0	4,0	5,1
Kraków	2,1	2,3	2,5	1,9	2,0	1,7	1,6	1,5	1,4	1,5	1,8	1,7
Legnica	3,2	3,1	3,3	2,8	2,9	2,6	2,6	2,2	2,5	2,5	2,9	2,9
Lębork	3,4	3,2	3,4	3,1	2,8	2,7	2,6	2,5	2,5	2,9	2,8	3,0
Lublin	3,4	3,1	3,2	2,5	2,5	2,3	2,0	2,0	2,2	2,4	3,0	3,1
Łeba	6,0	5,6	5,6	4,9	4,5	4,2	4,6	4,5	4,7	5,4	5,4	5,8
Łódź	5,3	5,2	5,2	4,4	4,1	3,6	3,6	3,4	3,7	3,8	4,7	4,9
Międzyzdroje	3,5	3,3	3,2	2,9	2,8	2,6	2,9	2,4	2,8	3,0	3,0	3,4
Mława	3,2	3,2	3,4	3,1	3,1	2,1	2,6	2,4	2,4	2,6	2,9	3,0
Olsztyn	3,8	3,6	3,6	3,2	3,2	2,7	2,6	2,5	2,3	3,0	3,2	3,7
Opole	2,3	2,4	2,5	2,3	2,4	2,2	2,1	2,0	2,0	2,0	2,3	2,4
Ostrolęka	3,8	3,4	3,5	3,2	3,0	2,4	2,4	2,4	2,7	2,7	3,1	3,3
Plock	4,3	3,9	4,0	3,3	3,5	3,0	2,8	2,7	3,1	3,3	3,7	3,9
Poznań	4,2	4,0	4,1	3,6	3,6	3,1	3,3	3,1	3,2	3,3	3,6	3,4
Przemysł	3,5	3,5	3,9	3,0	3,0	2,8	2,6	2,6	2,5	2,7	3,0	2,3
Rabka Zdrój	2,0	1,8	1,8	1,7	1,7	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,7	2,0
Racibórz	2,5	2,4	2,4	2,4	2,4	2,2	2,2	1,9	1,8	1,9	2,3	2,5
Radom	3,8	3,8	3,0	3,0	2,9	2,6	2,5	2,6	2,6	2,8	3,3	3,4
Rozewie	6,5	6,0	5,9	4,6	4,4	4,1	4,3	4,1	4,9	6,0	6,3	6,9
Rzeszów	4,9	4,8	4,4	3,3	3,0	2,8	2,6	2,6	2,7	3,1	4,3	4,6
Sandomierz	3,8	3,6	3,5	3,0	3,0	2,7	2,5	2,5	2,6	2,8	3,3	3,4
Siedlce	3,8	4,4	4,4	3,5	3,3	2,8	2,8	2,8	3,2	3,5	3,9	4,2
Słubice	3,3	3,0	3,0	2,7	2,6	2,3	2,4	2,1	2,3	2,3	2,6	3,0
Suwałki	4,8	4,4	4,5	3,2	3,8	3,4	3,3	3,4	3,4	4,0	4,6	4,4
Szczecin - Dąbie	4,7	4,5	4,6	3,8	3,6	3,2	3,4	3,3	3,5	3,8	3,9	4,6
Szczecinek	3,4	3,3	3,2	3,1	3,0	2,5	2,5	2,4	2,6	2,7	2,9	3,3
Szczytno	3,7	3,4	3,6	3,3	3,1	3,0	2,8	2,7	2,8	3,0	3,2	3,5
Tarnów	3,2	3,4	3,4	2,8	2,8	2,5	2,1	2,1	2,2	2,2	3,2	3,1
Toruń	4,1	4,1	4,3	4,0	3,8	3,3	3,1	3,0	2,9	3,0	3,4	3,6
Wałcz	2,9	2,7	2,9	2,6	2,6	2,2	2,2	2,1	2,3	2,3	2,5	2,7
Warszawa	3,0	3,0	3,1	2,8	3,0	2,6	2,4	2,5	2,6	2,8	2,8	2,8
Włodawa	3,6	3,4	3,4	2,6	2,6	2,4	2,2	2,2	2,4	2,7	3,4	3,2
Wrocław	3,9	3,9	3,9	3,4	3,1	2,9	3,0	2,6	2,9	2,9	3,4	3,6
Zamość	3,9	3,6	3,5	2,8	2,7	2,5	2,4	2,3	2,6	2,8	3,3	3,4
Zgorzelec	3,6	3,0	2,8	2,0	2,4	2,2	2,2	2,1	2,3	2,6	2,6	3,2
Zielona Góra	2,6	3,2	3,2	2,7	2,6	2,3	2,5	2,4	2,7	2,7	2,9	3,3

Tabela 5. Wartości opałowe paliw stałych [Hejft R., Konopno H. 1994].

Paliwa	MJ/kg
Węgiel kamienny	16,7 - 33,4
Węgiel brunatny	7,5 - 18,8
Koks	24,6 - 01,0
Drewno powietrze suche	13,6 - 14,6
Stoma pszenna świeża (zaw. wilgoci 12 - 22%)	12,9 - 14,9
Stoma pszenna sucha	17,3
Stoma jęczmienna (zaw. wilgoci 12 - 22%)	12,0 - 13,9
Stoma jęczmienna sucha	16,1
Stoma kukurydziana (zaw. wilgoci 50 - 70%)	3,3 - 7,2
Stoma kukurydziana sucha	16,8
Torf podsuszony	12,7

Tabela 6. Wybrany zakres oceny technicznej spalania słomy [Hejft R., Konopno H. 1994].

Kryteria oceny	Słoma cięta	Bele małe duż. zgniot.	Bele duże		Brykiety
			okrągłe	prostop.	
Gęstość usypowa kg/m ³	40 - 60	70 - 120	60 - 90	60 - 160	300 - 600
Masa jednostkowa	-	8 - 25	300 - 400	200 - 600	0,02 - 0,2
Średnia objętość magazynowania m ³ /60000 kWh	250 - 370	125 - 215	170 - 250	90 - 250	25 - 50
Załadunek materia- łu do pieca	ciągły	okresowy	okresowy	okresowy	ciągły okresowy
Możliwości regula- cji mocy cieplnej	5	4	4	4	5
Energia cieplna kWh/m ³	0,13 - 0,19	0,16 - 0,36	0,19 - 0,29	0,23 - 0,43	0,99 - 1,43
Korzystne Systemy spalania	piec z pneum. lub mechanicznym zadawaniem.	Piecze z dolnym paleniskiem z komorą dopalania			

Tabela 7. Charakterystyka energetyczna paliw ciekłych [Glijer L. 1992].

Wskaźnik	Benzol	Mazut	Olej gazowy	Benzyna
Udziały gramowe pierwiastków w %				
C	92,2	87,4	85,0	85,0
H	7,8	11,2	13,0	15,0
S	-	0,5	-	-
O	-	0,9	2,0	-
Wartość opałowa kJ/kg	40700	43100	43600	47000
Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza na m_{min} , kmol/kg	0,459	0,480	0,489	0,515
Teoretyczny udział CO ₂ + SO ₂ w spalinach suchych, k_{max} , %	17,5	16,0	15,5	14,8
Kalorymetryczna temperatura spalania przy $\lambda=1$, T _{kal} , K	2613	2535	2483	2536

Tabela 8. Właściwości składników gazów palnych [Glijer L. 1992].

Wyszczególnienie	Gaz mocny			Gaz słaby			Gaz ciekły (propan - butan)
	ziemny	koksowniczy	miejski	wodny	czadnicowy	wielkopiecowy	
Ciepło spalania Q_p MJ/m ³ _N	21 - 40	19,2	17,5	11,3	4,6 - 6,7	4,0	104
Wartość opałowa Q^r_w MJ/m ³ _N	18,8-35,5	17,1	15,9	10,2	4,3 - 6,3	3,97	92,4
Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza m^3_N/m^3_N	4,7-9,0	4,1	3,8	2,1	0,9 - 1,4	0,75	24
Temperatura spalania °C	ok. 1950	2100	2150	2250	1700 - 1800	1500	2140

Tabela 9. Właściwości fizyczne wybranych paliw gazowych [Glijer L. 1992].

Nazwa i wzór chemiczny	Gęstość kg / m ³ _N	Ciepło spalania MJ / m ³ _N	Wartość opałowa MJ / m ³ _N
Wodór (H ₂)	0,0899	12,8	10,79
Tlenek węgla (CO)	1,250	12,7	12,7
Metan (CH ₄)	0,7168	40,07	36,18
Etan (C ₂ H ₆)	1,356	69,5	63,52
Etylen (C ₂ H ₄)	1,261	64,48	60,59
Acetylen (C ₂ H ₂)	1,171	58,37	56,36
Propan (C ₃ H ₈)	2,019	99,09	91,20
Propylen (C ₃ H ₆)	1,915	91,88	85,96
n-Butan (C ₄ H ₁₀)	2,703	128,49	118,62

Tabela 10. Równoważniki przeliczeniowe paliw.

		Kcal	MJ	Kwh	Przelicznik do p.u.
Paliwo umowne	1 kg p.u.	7000	29,3	8,1	1,0000
Energia elektryczna	1 kwh	864	3,6	1,0	0,1235
Olej napędowy	1 kg	10000	41,9	11,6	1,4286
Olej opałowy	1 kg	10000	41,9	11,6	1,4286
Etylina	1 kg	10000	41,9	11,6	1,4286
Węgiel kamienny	1 kg	5600	23,4	6,5	0,8000
Węgiel koksujący	1 kg	7000	29,3	8,1	1,0000
Węgiel eksportowy	1 kg	6800	28,4	7,8	0,9714
Węgiel brunatny	1 kg	1800	7,5	2,1	0,1000
Drewno opałowe	1 kg	3200	13,4	3,7	0,4571
Torf	1 kg	3400	14,2	3,9	0,4857
Gaz ziemny z importu	1 m ³	8000	33,3	9,2	1,1428
Gaz wysokometanowy	1 m ³	8000	33,3	9,2	1,1428
Gaz zaazotowany	1 m ³	6100	25,5	7,1	0,8714
Biogaz	1 m ³	5500	23,0	6,4	0,7857
Propan	1 kg	10900	45,6	12,4	1,5285

Gdzie p.u. - paliwo umowne

Tabela 11. Ogólna charakterystyka produkcji i właściwości biogazu [Romaniuk W. i in. 1992].

a) Charakterystyka wybranych odpadów rolniczych – substratów w produkcji biogazu

Rodzaj odpadów	Sucha masa g/l	ChZT* g/l	BZT ₅ ** g/l
Gnojowica bydła	74–105	23–33	14–17
Gnojowica trzody chlewnej	18–80	12–26	5,5–16
Scełki z gorzelni	50–120	40–90	20–40

b) Produkcja biogazu w temperaturze 35°C

Rodzaj surowca	Produkcja gazu w m ³ na 1 kg dodanej suchej masy m ³ /kg-d	Produkcja gazu w m ³ na 1 sztukę dużą (500 kg) m ³ /SD-d
Gnojowica		
– trzody chlewnej	0,4–0,7	1,8
– bydła	0,2–0,45	1,5
– drobiu	0,5–0,7	2,5
Obornik	0,5	1,0

c) Typowe wyniki redukcji zanieczyszczeń osiągnięte w wyniku fermentacji metanowej

Oznaczenie	% redukcji
Sucha masa	40–60
Sucha masa organiczna	50–75
BZT ₅	60–80
ChZT	50–60

d) Biogaz jako paliwo zastępcze

Paliwo	Wartość opałowa	Przelicznik w stosunku do 1 m ³ biogazu (26 MJ/m ³)
Biogaz	20–26 MJ/m ³	1 m ³
Gaz ziemny	33,4 MJ/m ³	0,78 m ³
Oil napędowy	41,9 MJ/l	0,62 l
Węgiel kamienny	23,4 MJ/kg	1,1 kg

Tabela 12. Dopuszczalne do wprowadzenia do powietrza ilości dwutlenku siarki, dwutlenku azotu i pyłu powstające w procesie energetycznego spalania paliw w g/GJ, [Załącznik Nr 1 do rozporządzenia Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 12 lutego 1990 (poz. 92)].

Lp.	Nazwa substancji	Dopuszczalne wartości stężeń w mikrogramach na metr sześcienny (µg/m ³) w odniesieniu do okresu		
		30 min. ¹⁾	24 godz. ²⁾	roku ³⁾
1	Arsen ^{a)}	0,2*	0,05	0,01 0,005 od 2010 r.
2	Benzen	20*	10	2,5
3	Benzo/a/piren (ng/m ³)	12*	5	1
4	Dwutlenek azotu	500	150	40
5	Dwutlenek siarki	500	150 125 od 2005 r.	40 30 od 2005 r.
6	Kadm ^{a)}	0,52*	0,22	0,01 0,005 od 2010 r.
7	Nikiel ^{a)} (ng/m ³)	230*	100	25
8	Ołów ^{a)}	5*	2	0,5
9	Pył zawieszony ogółem ^{b)}	350*	150	75
10	Pył zawieszony PM10 ^{c)}	280*	125 50 od 2005 r.	50 30 od 2005 r. 20 od 2010 r.

ZAŁĄCZNIK

11	Rtęć ^{d)}	0,7*	0,3	0,04
12	Tlenek węgla	20.000	5.000	2.000*
13	Akrylonitryl	5*	2	0,5
14	Arsenowodór	5	2	0,4
15	Azbest (włókna/m ³)	2.350*	1.000	250*
16	Beryl i jego związki ^{a)}	0,12	0,05	0,001
17	Chlorek winylu	12*	5	1
18	Chrom ^{VIa)}	4,6*	2	0,4
19	Czterochloroetylen	600	300	70
20	Dwusiarczek dwumetylu	5*	2,1	0,44
21	Formaldehyd	50	20	4
22	Kwas siarkowy	200	100	16
23	Tlenek etylenu	100	30	4,3
24	Tlenek propylenu	100	30	4,3
25	Trójchloroetylen	400	150	60
26	Aceton	350	150	30
27	Acetonitryl	20	10	2,5
28	Acetylen	100*	50	10
29	Akroleina	10	4	0,9
30	Aldehyd octowy	20	10	2,5
31	Aldehyd propionowy	300*	100	16
32	Alkohol allilowy	60	20	3,2
33	Alkohol benzylowy	40*	17	3,5
34	Alkohol butylowy	300	130	26
35	Alkohol dwuacetonowy	150	50	7,9
36	Alkohol furfurylowy	100	50	13
37	Alkohol izobutylowy	300	130	26
38	Amoniak	400	200	50
39	Anilina	50	30	10
40	Antymon i jego związki ^{a)}	23	10	2
41	Bar i jego związki ^{a)}	30	10	1,6
42	Bezwodnik kwasu octowego	100*	43	8,7
43	Bizmut i jego związki ^{a)}	50*	10	1,2

c.d. Tabela 12

Lp.	Nazwa substancji	Dopuszczalne wartości stężeń w mikrogramach na metr sześcienny ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) w odniesieniu do okresu		
		30 min. ¹⁾	24 godz. ²⁾	roku ³⁾
44	Bor i jego związki ^{a)}	2*	1	0,25
45	Brom - pary	20	10	2,5
46	Bromek etylu	20	8,5	1,7
47	Bromek metylu	20	8,5	1,7
48	Bromooctan etylu	10*	4,3	0,9
49	Bromowodór	30	10	1,6
50	Butyloamina	200	100	2,5
51	Butyloglikol	100*	50	10
52	Cer i jego związki ^{a)}	3	1	0,16
53	Chlor	100	30	7
54	Chlorek allilu	100	43	8,7
55	Chlorek benzoilu	50*	30	10
56	Chlorek benzylu	10*	4,3	0,9
57	Chlorek etylenu	200	100	25
58	Chlorek metylenu	200	100	25
59	Chlorobenzen	100	43	8,7
60	Chlorofenole ^{c)}	20	10	2,5
61	Chloroform	200	100	25
62	Chloromrówczan etylu	30*	10	1,6
63	Chloromrówczan metylu	20*	10	2,5
64	Chloronitroanilina	1*	0,5	0,15
65	Chloropikryna	10	5	1,3
66	Chloropren	100	43	8,7
67	Chlorowodór	200	100	25
68	Chrom - związki III i IV wartościowe ^{a)}	20*	10	2,5
69	Cyjanamid wapniowy	10*	5	1,3
70	Cyjanowodór, cyjanki	20	10	2,5
71	Cykloheksan	10	5	1
72	Cykloheksanol	60	26	5,2
73	Cykloheksanon	40	17	3,5

ZAŁĄCZNIK

74	Cykloheksyloamina	10	5	1,3
75	Cyna i jej związki ^{a)}	50*	20	3,8
76	Cynk i jego związki ^{a)}	50	20	3,8
77	Czterochlorek krzemu	100*	30	4,3
78	Czterochlorek węgla	60	30	7,6
79	Czteroetyłek ołowiu	1,2	0,5	0,1
80	Czterohydrofuran	50	21	4,4
81	Czterometyloolfów	0,5*	0,2	0,04
82	Dichlorfos	6	2	0,3
83	Dioksan	50	10	1,2
84	Diuron	100*	50	13
85	Dwuchlorobenzen	60*	26	5,2
86	1,2-dwuchloroetan	400	150	60
87	1,1-dwuchloroetylen	30	10	1,6
88	1,2-dwuchloroetylen	300	100	16
89	Dwuetanoloamina	30	10	1,6
90	Dwuetyloamina	10	5	1,3
91	Dwuetyloanilina	6*	2,6	0,52
92	Dwumetyloamina	10	5	1,3
93	Dwumetylodwuchlorosilan	3*	1	0,16
94	Dwumetyloetanoloamina	10*	5	1,3
95	Dwumetyloformamid	30	13	2,6
96	Dwunitrobenzen	10	5	1,3
97	Dwunitrotoluen	10	3	0,43
98	Dwusiarczek węgla	50	20	10
99	Dwutlenek chloru	30	10	1,6
100	Epichlorhydrina	10	4	0,76
101	Etanoloamina	30	10	1,6
102	2-etoksyetanol-1	50	10	1,2
103	Etylenodwuamina	20	5	0,65
104	Etylobenzen	500	200	38
105	Fenol	20	10	2,5

c.d. Tabela 12

Lp.	Nazwa substancji	Dopuszczalne wartości stężeń w mikrogramach		
-----	------------------	---	--	--

		na metr sześcienny ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) w odniesieniu do okresu		
		30 min. ¹⁾	24 godz. ²⁾	roku ³⁾
106	Fluor ^{f)}	30	10	2
107	Fosforan trójkretylu	20	10	2,5
108	Fosforowodór	20	10	2,5
109	Fosgen	10	5	1,3
110	Ftalan dwu-2-etyloheksylu	100	50	15
111	Ftalan dwubutyli	100	50	15
112	Ftalan dwuetyli	100	50	15
113	Ftalan dwumetyli	100	50	15
114	Furfural	50	21	4,4
115	Glikol	100	50	10
116	Hydrochinon	15	5	0,8
117	Izocyjaniany	10*	5	1,3
118	Kaprolaktam	100*	50	13
119	Kobalt ^{a)}	5	2	0,4
120	Krezol	30	10	1,6
121	Ksylene ^{g)}	100	50	10
122	Kumen	50	21	4,4
123	Kwas akrylowy	10	4,3	0,9
124	Kwas chlorosulfonowy	100*	30	4,3
125	Kwas p-toluenosulfonowy	100*	30	4,3
126	Linuron	100*	30	4,3
127	Mangan ^{a)}	9*	4	1
128	Merkaptany	20	10	2
129	Metakrylan butyli	200	80	20
130	Metakrylan metyli	200	80	20
131	Metyloamina	100	50	13
132	Metyloetyloketon	300	130	26
133	Metyloizobutyloketon	50	20	3,8
134	Mezetylen	100*	50	13
135	Miedź ^{a)}	20	5	0,6
136	Molibden, związki	35	15	3,1

ZAŁĄCZNIK

	nierozpuszczalne ^{a)}			
137	Molibden, związki rozpuszczalne ^{a)}	3,5	1,5	0,3
138	N-Metylopirolidon	300*	100	16
139	N.N-dwuetyloanilina	3*	1	0,16
140	Nadtlenek benzoilu	100	50	13
141	Nadtlenek cykloheksanonu	40*	20	5,1
142	Naftochinon	10*	3	0,43
143	a-naftyloamina	10*	5	1,3
144	Nitrobenzen	50	30	10
145	Nitrotoluen	50	20	3,8
146	Octan butylu	100	43	8,7
147	Octan etylu	100	43	8,7
148	Octan metylu	70	30	6,1
149	Octan winylu	100	-	10*
150	Pirydyna	20	10	2,5
151	Propylobenzen	100*	50	13
152	Selen	30	0,3	0,06
153	Siarkowodór	20	7	5
154	Styren	20	5	2*
155	Substancje smołowe	100*	50	10
156	Tal ^{a)}	1,00	0,5	0,13
157	Tlenochlorek fosforu	5	2,1	0,44
158	Toluen ^{a)}	100	50	10
159	Toluidyna	200	60	8,7
160	Toluienodwuzycyan	10	5	1,3
161	Trójchlorek fosforu	200	100	25
162	Trójchloroetan	100	50	10
163	Trójetylenoczteroamina	20	10	2,5
164	Trójetyloamina	20	10	2,5
165	Trójfenylofosfina	300*	150	50
166	Tytan ^{a)}	50	20	3,8
167	Wanad ^{a)}	2,3*	1	0,25

c.d. Tabela 12

Lp.	Nazwa substancji	Dopuszczalne wartości stężeń w mikrogramach
-----	------------------	---

		na metr sześcienny ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) w odniesieniu do okresu		
		30 min. ¹⁾	24 godz. ²⁾	roku ³⁾
168	Węgiel elementarny	150*	50	8
169	Węglowodory alifatyczne – do C ₁₂ (poza wymienionymi w innych pozycjach i metanem)	3.000*	2.000	1.000
170	Węglowodory aromatyczne (poza wymienionymi w innych pozycjach)	1.000*	300	43
171	Wolfram ^{a)}	100*	50	10
172	Żelazo ^{a)}	100*	50	10

Objaśnienia:

Przy kontroli stanu zanieczyszczenia powietrza uwzględnia się substancje zanieczyszczające wymienione w lp. 1-25 i ozon.

- 1) jako 99,8 percentyl obliczony ze stężeń odniesionych do 30 minut, występujących w roku kalendarzowym,
 - 2) jako 98 percentyl obliczony ze stężeń odniesionych do 24 godzin, występujących w roku kalendarzowym,
 - 3) jako stężenie średnie w roku kalendarzowym,
 - a) jako suma metalu i jego związków w pyłe zawieszonym PM₁₀,
 - b) stężenie pyłu mierzone metodą wagową, bez separacji frakcji,
 - c) stężenie pyłu o średnicy aerodynamicznej ziaren do 10 μm (PM₁₀) mierzone metodą wagową z separacją frakcji lub metodami uznanymi za równorzędne,
 - d) jako suma rtęci i jej związków,
 - e) jako suma związków,
 - f) jako suma fluoru i fluorków rozpuszczalnych w wodzie,
 - g) jako suma izomerów,
- * wielkości normowane tylko do celów obliczeniowych.

Tabela 13. Dopuszczalne stężenia substancji zanieczyszczających powietrze, [Załącznik Nr 2 do rozporządzenia Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 12 lutego 1990 (poz. 92)].

Paliwo	Palenisko	Instalacje								
		grupa A			grupa B			grupa C		
		SO ₂	NO ₂ *	pył	SO ₂	NO ₂ *	pył	SO ₂	NO ₂ *	pył
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Węgiel kamienny	rusztowanie stałe	990	35	1850	720	35	1370	650	35	1370
	rusztowanie mechaniczne	990	160	800	640	95	600	200	95	600
	pyłowe z ciepłym odzuzłaniem	1240	495	170	870	170	90	200	170	90
	pyłowe z suchym odzuzłaniem	1240	330	260	870	170	130	200	170	130
Węgiel brunatny	pyłowe z ciepłym odzuzłaniem	1540	225	140	1070	150	70	200	150	70
	pyłowe z suchym odzuzłaniem	1540	225	195	1070	150	95	200	150	95
Koks	rusztowanie stałe	410	45	720	410	45	235	410	45	235
	rusztowanie mechaniczne	500	145	310	250	145	235	250	110	235
Olej opałowy	kotły < 50 MW _t	1720	120	-	1250	120	-	1250	90	-
	kotły > 50 MW _t	1720	160	-	170	160	-	170	120	-
Gaz ziemny	kotły < 50 MW _t	-	60	-	-	35	-	-	35	-
	kotły > 50 MW _t	-	145	-	-	85	-	-	85	-
Drewno	rusztowe	-	50	-	-	50	-	-	50	-

*Oznacza sumę tlenku azotu i dwutlenku azotu w przeliczeniu na dwutlenek azotu

Wielkości podane w tablicy należy stosować do instalacji o mocy powyżej 0,2 MW_t.

Wielkości podane w tablicy dotyczą emisji zanieczyszczeń odniesionej do strumienia energii chemicznej (iloczynu zużycia paliwa i jego wartości opałowej) wprowadzonego w paliwie do procesu energetycznego.

Instalacje nowe muszą spełniać wymagania określone do grupy C.

Za instalacje nowe uznaje się:

- instalacje uruchamiane po 31 grudnia 1994 r.,
- instalacje, których budowę rozpoczyna się po dniu wejścia w życie niniejszego rozporządzenia.

Instalacje istniejące w dniu wejścia w życie niniejszego rozporządzenia:

- w okresie do 31 grudnia 1997 r. muszą spełniać wymagania określone dla grupy A,
- w okresie po 31 grudnia 1997 r. muszą spełniać wymagania określone dla grupy B; wymagania te uważa się za spełnione w życie w przypadku ich osiągnięcia w odniesieniu do emisji łącznej ze wszystkich źródeł uruchomionych przed dniem wejścia w życie niniejszego rozporządzenia.

Instalacje nie kwalifikujące się do wyżej wydzielonych pozycji muszą spełniać wymagania:

- w okresie do 31 grudnia 1997 r. – jak dla obiektów istniejących po 31 grudnia 1997 r.,
 - w okresie po 31 grudnia 1997 r. – określone dla grupy C.
- Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej nr 15. Warszawa 15 maja 1990 r.