

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA
I INŻYNIERII ŚRODOWISKA



POLSKIE ZRZESZENIE INŻYNIERÓW
I TECHNIKÓW SANITARNYCH



MONOGRAFIE

„INŻYNIERIA ŚRODOWISKA – MŁODYM OKIEM”

TOM 8

OGRZEWNICTWO I WENTYLACJE

**Iwona Skoczko
Janina Piekutin
Justyna Iwaniuk**



Białystok 2014

INŻYNIERIA ŚRODOWISKA – MŁODYM OKIEM
TOM 8
OGRZEWNICTWO I WENTYLACJE

pod redakcją
Iwony Skoczko
Janiny Piekutin
Justyny Iwaniuk

Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej
Białystok 2014

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA
I INŻYNIERII ŚRODOWISKA



POLSKIE ZRZESZENIE INŻYNIERÓW
I TECHNIKÓW SANITARNYCH



MONOGRAFIE

TOM 8

Serdecznie dziękujemy naszym patronatom za pomoc
w organizacji uroczystości
i wydaniu niniejszej publikacji.

**POLITECHNIKA
BIAŁOSTOCKA
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA
I INŻYNIERII
ŚRODOWISKA**



**Pod patronatem Rektora Politechniki Białostockiej
prof. dr hab. inż. Lecha Dzieńsa**

Patronat medialny:



Redaktor tomu:

Iwona Skoczko
Janina Piekutin
Justyna Iwaniuk

Zespół redakcyjny:

Iwona Skoczko – Redaktor Naczelny
Janina Piekutin – Redaktor Naczelny
Justyna Iwaniuk – Skład monografii
Kamila Janowska – Skład monografii
Joanna Jaśko – Skład monografii

Recenzenci monografii:

dr hab. inż. Mariusz Dudziak
dr inż. Katarzyna Gładyszewska - Fiedoruk

Zespół naukowy:

dr hab. inż. Iwona Skoczko – Politechnika Białostocka
dr n. tech. Janina Piekutin – Politechnika Białostocka
dr hab. inż. Jacek Piekarski, prof. PK - Politechnika Koszalińska
dr hab. inż. Mariusz Dudziak – Politechnika Śląska
prof. nzw. dr hab. Bożena Łozowicka – Instytut Ochrony Roślin
prof. dr hab. inż. Józefa Wiater – Politechnika Białostocka
prof. dr hab. inż. Rafał Miłaszewski – Politechnika Białostocka
dr hab. inż. Katarzyna Ignatowicz – Politechnika Białostocka
dr hab. inż. Mirosław Żukowski, prof. PB - Politechnika Białostocka
prof. Aleksey Ternovtsev – Kijowski Narodowy Uniwersytet Budownictwa i Architektury
prof. Dmitry Spitsov – Moskiewski Państwowy Uniwersytet Budownictwa
dr n. tech. Joanna Szczykowska – Politechnika Białostocka
dr inż. Anna Siemieniuk – Politechnika Białostocka
dr inż. Elżbieta Grygorczuk – Petersons – Politechnika Białostocka
dr inż. Dariusz Andraka – Politechnika Białostocka
dr inż. Katarzyna Gładyszewska – Fiedoruk – Politechnika Białostocka

Wszystkie zamieszczone w monografii prace są recenzowane

Copyright by Politechnika Białostocka, Białystok 2014

ISBN – 978-83-62582-54-9

Publikacja nie może być w jakikolwiek sposób powielana i rozpowszechniana bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich

Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej

Nakład: 100 egz.

Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej
Ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok
Tel.: 85 746 91 37 fax: 85 746 90 12
e-mail: oficyna.wydawnicza@pb.edu.pl
www.pb.edu.pl

SPIS TREŚCI

Ekonomiczne i technologiczne aspekty zastosowania mikro instalacji wiatrowej o pionowej osi rotacji do produkcji energii elektrycznej	7
mgr inż. Piotr Bara	
Koncepcja zwiększenia potencjału gospodarczego obszaru Kopalni Węgla Brunatnego Turów	35
mgr inż. Aleksandra Bąk	
Ogrzewanie w Polsce – koszty inwestycyjne i eksploatacyjne oraz ich wpływ na środowisko	62
mgr inż. Justyna Siergiejuk	
Gruntowe powietrzne wymienniki ciepła – teoria a praktyka.....	95
mgr inż. Justyna Topolańska, dr inż. Dorota Krawczyk	
Systemy uzdatniania i dystrybucji powietrza dla bloków operacyjnych na przykładzie projektów klimatyzacji w obiektach szpitalnych	128
mgr inż. Rafał Dąbrowa, Angelika Frosik	

mgr inż. Piotr Bara¹
Politechnika Białostocka, Katedra Ciepłownictwa
ul. Wiejska 45a, Białystok
e-mail: ¹p.bara@wp.pl

Ekonomiczne i technologiczne aspekty zastosowania mikro instalacji wiatrowej o pionowej osi rotacji do produkcji energii elektrycznej

Słowa kluczowe: *energia odnawialna, odnawialne źródła energii, energia wiatru, mikro instalacje wiatrowe*

Streszczenie: Artykuł traktuje o wykorzystaniu mikroinstalacji wiatrowej o pionowej osi obrotu do produkcji energii elektrycznej na własne potrzeby użytkownika w warunkach wietrzności województwa podlaskiego. W celu przedstawienia tematu tekst pracy zawiera rozdziały dotyczące takich zagadnień jak charakterystyka energii wiatru, omówienie warunków wietrzności w Polsce i na Podlasiu, analiza wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce ze szczególnym uwzględnieniem energetyki wiatrowej, przegląd występujących technologii i turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu. Ponadto przedstawiono pewne kalkulacje o charakterze ekonomicznym umożliwiające zbadanie różnych wariantów pracy zaproponowanej instalacji. Zaprezentowane obliczenia oraz analizy skutkują następującymi wnioskami końcowymi: zaproponowana instalacja nie pokrywa w pełni zapotrzebowania na energię elektryczną przeciętnego gospodarstwa domowego prowadzącego działalność rolniczą, występujące koszty rodzą konieczność dofinansowania inwestycji bazujących na mikroenergetyce wiatrowej, sprzedaż wygenerowanej energii elektrycznej jest opłacalna po odpowiednio wysokiej cenie, ponadto należy stwierdzić, iż dla badanego przypadku, województwo podlaskie posiada niekorzystne warunki wietrzności.

1. Wstęp

Problem produkcji energii przy wykorzystaniu jej odnawialnych źródeł jest obecnie nie tylko zagadnieniem energetycznym, lecz stanowi obowiązek ogólnie przyjęty w strukturach Unii Europejskiej. Długoterminowa polityka unijna obliguje państwa członkowskie do osiągnięcia ustalonych wielkości produkcji energii w bilansie energetycznym, uzyskiwanej z jej odnawialnych źródeł. Ostatnie lata przyniosły wyraźny rozwój technologii OZE (tzn. odnawialnych źródeł energii), które w obliczu rodzącego się kryzysu energetycznego mogą odegrać, w nieodległej przyszłości, istotną rolę w kształtowaniu struktury rynku energetycznego. Aktualnie jedną z dróg rozwoju technologii bazujących na tzw. „zielonej energii” jest ich promocja na szczeblu lokalnym. Stosowana polityka regionalna zachęca do wykorzystania instalacji odnawialnych źródeł energii bazujących na różnych jej formach, co znajduje swój wyraz w wielu programach wsparcia finansowego, z którego mogą skorzystać zarówno firmy branży energetycznej jak i pojedyncze gospodarstwa domowe. Istotne, więc jest rozpoznanie potencjału energetycznego regionu i określenie drogi postępowania w celu jego najefektywniejszego wykorzystania. Jako potencjalnie największych odbiorców energii ze

źródeł odnawialnych określa się rolnictwo, mieszkalnictwo oraz komunikację [1]. Ponadto zastosowanie technologii OZE pozwala uzyskać pewien stopień niezależności energetycznej, co może dotyczyć nie tylko pojedynczych odbiorców, ale całych lokalnych środowisk. W Polsce jednak tzw. polityka prosumencka wciąż się rozwija. Wyrazem tego są prowadzone prace na regulacjami prawnymi dotyczącymi OZE. Doskonałym przykładem dobrze funkcjonującej polityki prosumenckiej są Niemcy. Nasi zachodni sąsiedzi zaliczają się do grona liderów w zakresie wykorzystania odnawialnych form energii. Już ponad 90 wsi posiada całkowitą niezależność energetyczną i zabezpieczenie dostawy energii elektrycznej, a ponad 350 jednostek osadniczych dąży do poziomu gwarantującego zabezpieczenie potrzeb energetycznych [2]. Jak podają wyliczenia firmy Trend Research już 35% zielonej energii wyprodukowanej w Niemczech generuje sektor gospodarstw domowych, czyli tzw. prosumenci. Warty odnotowania ponadto jest fakt, iż stanowi to wynik wyższy niż uzyskany przez ogromne koncerny energetyczne takie jak E.ON, RWE, Vattenfall i EnBW, którym przypadło 5% udziału. [2] Ze względu na bliskie pokrewieństwo charakterystyki klimatycznej Niemiec i Polski, można uznać, że podobne wielkości są możliwe do uzyskania również w granicach naszego kraju. Problem zastosowania mikroinstalacji wiatrowej w województwie podlaskim do produkcji energii elektrycznej na własne potrzeby zostanie przedstawiony w prezentowanym artykule.

2. Energia wiatru

Energię wiatru stanowi energia ruchu mas gazów tworzących atmosferę i jest przekształconą formą energii słonecznej. Wiatr wywołany jest oddziaływaniem siły Coriolisa oraz poprzez występującą różnicę ciśnień, która wynika z różnego stopnia nagrzania powierzchni lądów, mórz, biegunów oraz równika. [1]

Człowiek wykorzystywał energię wiatru na własne potrzeby już ok. 5000 lat temu, gdzie oprócz m.in. siły napędowej łodzi wykorzystana była również przez wiatraki, które służyły do celów irygacyjnych. [3] W wieku XVII pojawiły się pierwsze wiatraki ze zmiennym ustawieniem łopat, tak by usytuowane były do aktualnego kierunku wiatru. [3] Kolejnym etapem rozwoju technologii wiatrowych było odkrycie zjawiska prądu elektrycznego, gdzie w wieku XIX zaczęto podejmować pierwsze próby konwersji energii wiatru na energię elektryczną. Pierwszą samoczynnie działającą siłownię wiatrową skonstruował Charles F. Brush w latach 1887-88. [3,4] Dalszy ich rozwój spowodował pierwszy kryzys paliwowy z roku 1957 oraz późniejszy, drugi kryzys paliwowy z 1975r. W wyniku tych wydarzeń energetyka wiatrowa została uznana za formę energetyki profesjonalnej na szeroką skalę.

Podobnie w Polsce pierwsze opracowania literaturowe datowane są na drugą połowę ubiegłego wieku, jak np. książka W. Jagodzińskiego z 1959r. – *Silniki wiatrowe* [5]. Pierwszy w kraju wiatrak napędzający prądnicę użyto natomiast w roku 1997. [6]

Szacuje się, iż potencjał energetyczny wiatru w skali światowej wynosi ok. 2700 TW. Wynosi to do 2% docierającej na powierzchnię Ziemi energii słonecznej, z czego 40 TW stanowi potencjał wiatrów lądowych. [1] Zainstalowana faktycznie moc elektrowni wiatrowych wciąż się zmienia. Obszar Europy stanowi pole, na którym energetyka wiatrowa rozwija się najdynamiczniej. Jak podają dane literaturowe znajdują się tu blisko 70% światowych mocy, które wg danych na rok 2012 wynoszą 281482 MW. Do państw liderów zalicza się tu Niemcy – ok. 31300 MW - oraz Hiszpanię – ok. 22800 MW. [7,8]

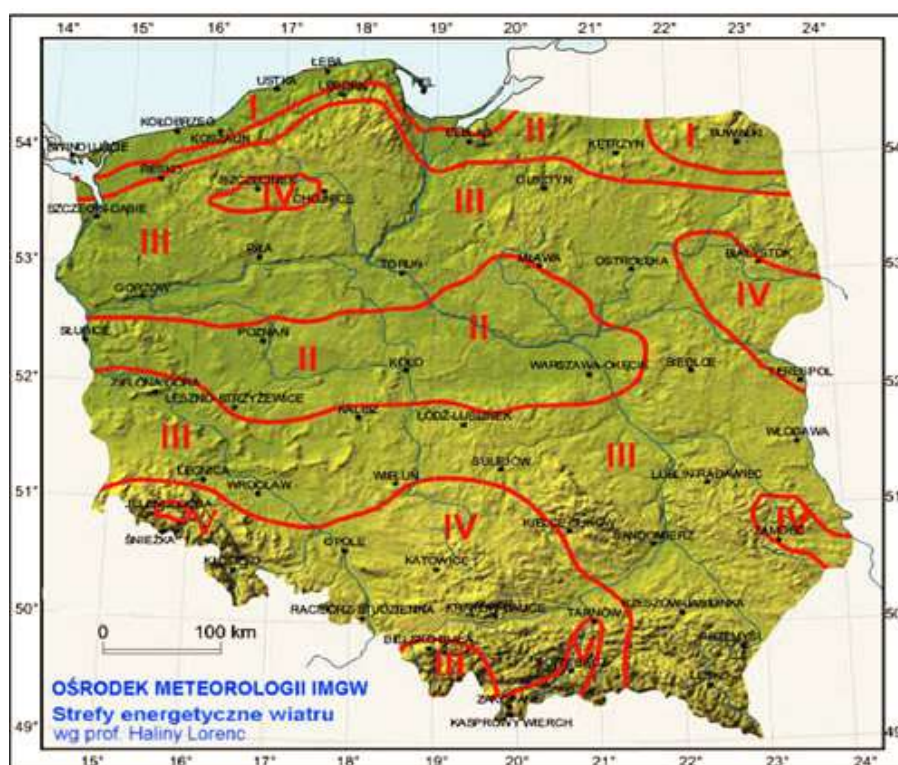
Wzrost zainteresowania eksploatacją odnawialnych źródeł energii, w tym energii wiatru ma bezpośredni związek z licznymi zaletami płynącymi z ich użytkowania. Energia wiatru nie wpływa na zanieczyszczenie środowiska naturalnego, a jej zasoby są niewyczerpywalne i ogólnodostępne. Ponadto wykorzystanie energii wiatru daje możliwość zagospodarowania terenów klasyfikowanych jako nieużytki, w tym np. wybrzeża, pustynie oraz obszary skaliste [6]. Z drugiej strony umożliwia także ich lokowanie w warunkach miejskich, gdzie w postaci mikro instalacji komponują się w krajobraz wysoko zurbanizowany generując przy tym określone wielkości energii elektrycznej. [6] Wyprodukowana w ten sposób energia elektryczna wpływa na zmniejszenie produkcji energii elektrycznej z jej konwencjonalnych źródeł, a więc pośrednio przyczynia się do redukcji takich zjawisk jak m.in. kwaśne deszcze, efekt cieplarniany, czy powstawanie dziury ozonowej.[3]

Główne przeszkody na dzień dzisiejszy stanowią jednakże wysokie koszty inwestycyjne oraz eksploatacyjne, a także cykliczność pracy instalacji wynikająca bezpośrednio ze zmienności wiatru w czasie.[3] Wśród wad wymienia się ponadto generowany hałas, zagrożenia dla migrujących ptaków, czy powodowane zakłócenia odbioru sygnału telewizyjnego.[3] Dodatkowo duże farmy wiatrowe mogą wpływać na zmiany w lokalnym klimacie. Naukowcy z Uniwersytetu Princeton w Stanach Zjednoczonych dowodzą o wzroście temperatury powietrza nawet o 2°C w obrębie dużych skupisk turbin wiatrowych.

Przedstawione wyżej problemy nie dotyczą jednak tzw. mikroinstalacji wiatrowych, które w najbliższych latach mogą stać się znaczącą alternatywą dla obiektów o znacznych rozmiarach, zapewniając przy tym dywersyfikację instalacji odnawialnych źródeł energii i wpływając jednocześnie na udział energii wytworzonej z OZE w bilansie energetycznym Polski oraz poszczególnych regionów.

2.1. Charakterystyka wietrzności w Polsce oraz w województwie podlaskim

Ustalenie zasobów energetycznych wiejących wiatrów wymaga przeprowadzenia wieloletnich badań i obserwacji. W Polsce podjęła się tego prof. dr hab. inż. Halina Lorenc z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Warszawie. Wyniki badań z lat 1971-2000 skutkowały sporządzeniem map kierunków i siły wiatru, a także jego potencjału energetycznego w ujęciu dobowym, miesięcznym oraz rocznym. [9] Klasyfikacja obszaru Polski pod względem możliwości energetycznego wykorzystania wiatru przedstawiona została na poniższej mapie.



Rysunek 1. Podział obszaru Polski na strefy wietrzności

Źródło: <http://www.baza-oze.pl/enodn.php?action=show&id=18>; data dostępu: 07.02.2014r.

Prof. dr hab. inż. Halina Lorenc zaproponowała podział terytorium kraju na sześć stref pod kątem możliwości wykorzystania wiatru jako źródła energii. Wyróżnia się tutaj następujące strefy:

- I – wybitnie korzystna
- II – korzystna
- III – dość korzystna
- IV – niekorzystna
- V – wybitnie niekorzystna
- VI – tereny wyłączone np. wysokie pasma górskie.

Obszary kraju o charakterystyce najkorzystniejszej dla rozwoju energetyki wiatrowej to wybrzeże nadbałtyckie, Suwalszczyzna, środkowa Wielkopolska oraz Mazowsze, Beskid Śląski i Żywiecki, a także Bieszczady i Pogórze Dynowskie. [3] Generalnie około 60% powierzchni Polski charakteryzują korzystne warunki wietrzności, jednak występują znaczne różnice w zasobach energii wiatru w poszczególnych regionach. Szacuje się, że zasoby wiatru w Polsce, które są możliwe do wykorzystania w celach technologicznych, wynoszą blisko 3000MW, tj. ok. 10% zapotrzebowania na energię elektryczną. [1] W granicach województwa podlaskiego występuje stosunkowo duże zróżnicowanie warunków wietrzności. Najkorzystniejsze warunki panują w okolicy Suwałk, gdzie średnioroczna prędkość wiatru ustalona jest na poziomie 4,2 m/s. Dla porównania w Białymstoku wynosi ona 2,9 m/s. [3]

3. Analiza stanu wykorzystania OZE w Polsce

Przedstawione w podrozdziale dane pochodzą z oficjalnych i ogólnodostępnych publikacji Głównego Urzędu Statystycznego dostępnych w Internecie – data dostępu: 28.02.2014 r. Ujęte w nich informacje zostały uzyskane w ramach badań statystycznych dotyczących obszarów gospodarki paliwowo-energetycznej objętymi rocznymi programami badań statystyki publicznej. Autorzy publikacji zaznaczają, że zakres ukazanych danych nie oddaje w pełni obrazu stanu OZE w Polsce, ze względu na lokalny charakter oraz rozproszenie źródeł pozyskania energii. Ponadto obiekty o małych mocach, wytwarzające i użytkujące energię utrudniają objęcie ich stałymi badaniami statystycznymi. [10]

W realiach krajowych energia ze źródeł odnawialnych obejmuje energię pochodzącą z wiatru, wody, zasobów geotermalnych, bezpośredniego wykorzystania energii słonecznej oraz wytworzoną z biomasy stałej, biogazu oraz biopaliw ciekłych. Dane mówiące o pozyskaniu energii pierwotnej oraz energii z jej odnawialnych źródeł w Polsce i 27. państwach Unii Europejskiej dla lat 2002-2010 zaprezentowane zostały w poniższej tabeli. [10]

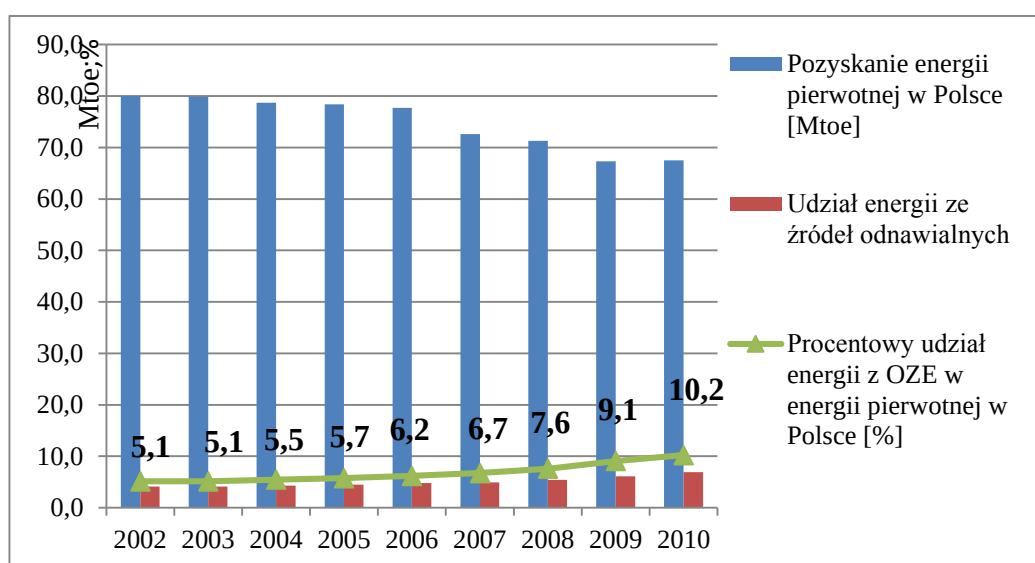
Tabela 1. Pozyskanie energii pierwotnej oraz energii ze źródeł odnawialnych w Polsce i UE

Wyszczególnienie	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Pozyskanie energii pierwotnej w UE [Mtoe]	939,9	931,6	928,4	896,9	878,1	856,1	850,4	813,7	830,9
Udział energii ze źródeł odnawialnych	97,5	103,9	111,8	115,9	123,5	134,1	142,0	148,8	166,6

Pozyskanie energii pierwotnej w Polsce [Mtoe]	80,0	79,9	78,7	78,4	77,7	72,6	71,3	67,3	67,5
Udział energii ze źródeł odnawialnych	4,1	4,1	4,3	4,5	4,8	4,9	5,4	6,1	6,9
Procentowy udział energii z OZE w energii pierwotnej w UE [%]	10,4	11,2	12,0	12,9	14,1	15,7	16,7	18,3	20,1
Procentowy udział energii z OZE w energii pierwotnej w Polsce [%]	5,1	5,1	5,5	5,7	6,2	6,7	7,6	9,1	10,2

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych GUS [10]

Jak widać w przedstawionej tabeli, począwszy od 2002 roku do roku 2010 odnotowuje się stały wzrost udziału energii ze źródeł odnawialnych w całkowitym pozyskaniu energii pochodzącej z pierwotnych źródeł zarówno w przypadku Polski jak i innych krajów Unii Europejskiej. Tendencja ta została utrzymana także w 2011 r., gdzie wg danych z bilansu krajowego wynosiła 325234 TJ (tj. 11,2%) – rysunek 2.

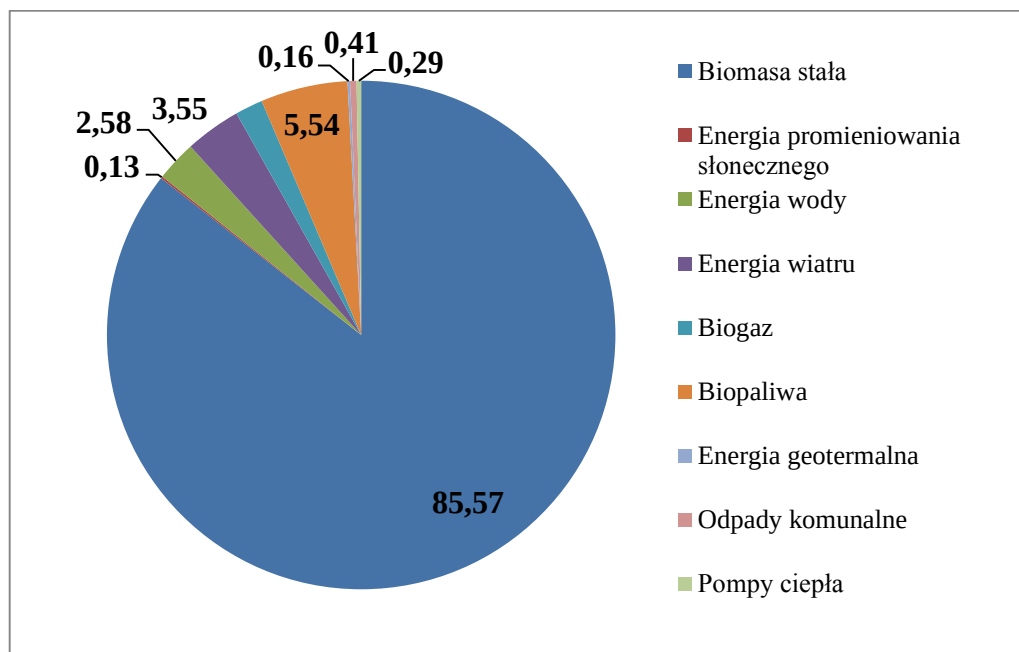


Rysunek 2. Struktura pozyskanej energii pierwotnej w latach 2002 – 2010

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych GUS [10]

Struktura pozyskania energii z odnawialnych źródeł (rysunek 3) jest bardzo zróżnicowana w poszczególnych krajach wspólnoty. W Polsce dominującą pozycję posiada biomasa stała (85,57%), do której zalicza się organiczne, niekopalne substancje pochodzenia biologicznego, które mogą być użytkowane w charakterze paliwa w celu produkcji ciepła lub wytwarzania energii elektrycznej [10]. Głównym paliwem stałym uzyskiwanym z biomasy jest

drewno opałowe. Z danych statystycznych wynika, że pozyskanie biomasy stałej wzrosło w roku 2011 o 70,4% w stosunku do roku 2002. W tym samym czasie zużycie również wzrosło o 70,3%. [10]



Rysunek 3. Struktura pozyskania energii z odnawialnych źródeł w Polsce w 2011 r.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie GUS [10]

Obecnie obserwuje się również tendencję wzrostową w przypadku użycia odnawialnych źródeł energii do wytwarzania energii elektrycznej. W tabeli 2. przedstawiono procentowy udział energii elektrycznej uzyskanej z odnawialnych nośników energii w zużyciu energii brutto, uwzględniającej straty i różnice bilansowe.

Tabela 2. Udział energii elektrycznej wytworzonej z odnawialnych źródeł energii w zużyciu energii elektrycznej brutto w latach 2004-2010

Rok	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Procentowy udział [%]	2,1	2,6	2,8	3,5	4,3	5,8	7	8,3

Źródło: Opracowanie własne na podstawie GUS [10]

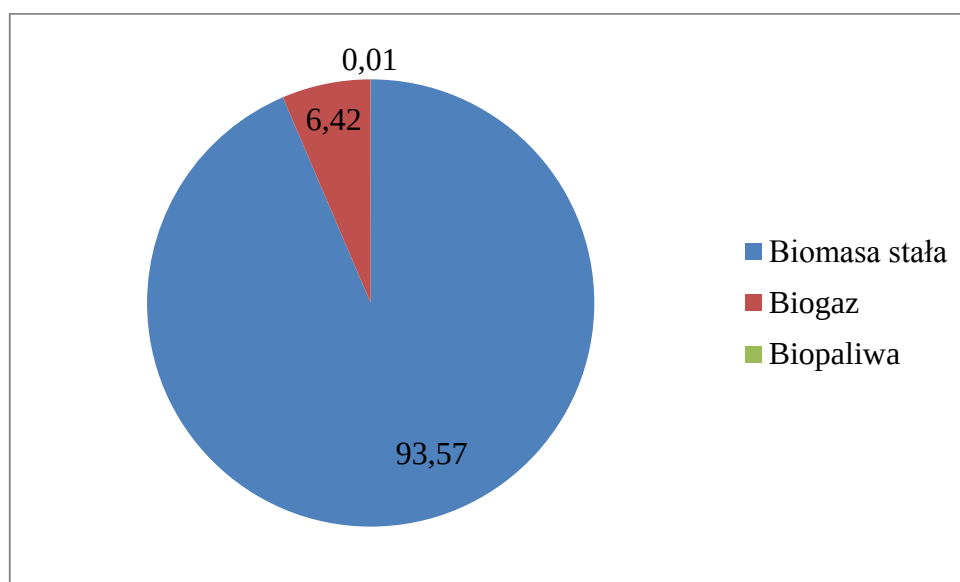
Struktura i wielkość pozyskania energii z odnawialnych źródeł celem wytworzenia energii elektrycznej w Polsce, wg danych za rok 2011 została przedstawiona w tabeli 3, gdzie widać również, że zasadniczą rolę odgrywa energia pochodząca z biomasy stałej (54,41%) oraz w mniejszym stopniu energia wiatru (24,39%) i energia wody (17,75%).

Tabela 3. Struktura pozyskania i wielkość energii z OZE w wytwarzaniu energii w Polsce w 2011 r.

Wyszczególnienie	Woda	Wiatr	Biomasa stała	Biogaz	Biopaliwa
Produkcja energii elektrycznej [GWh]	2331,4	3204,4	7148,4	451,1	1,4
Udział [%]	17,75	24,39	54,41	3,43	0,01

Źródło: Opracowanie własne na podstawie GUS [10]

Poza wykorzystaniem energii z odnawialnych źródeł do produkcji energii elektrycznej, jest ona także szeroko stosowana do wytwarzania ciepła. Wśród wykorzystywanych w tym celu paliw wyraźnie dominuje biomasa stała – 14374 TJ ciepła. Struktura udziału poszczególnych grup OZE w produkcji ciepła obrazuje rysunek 4.

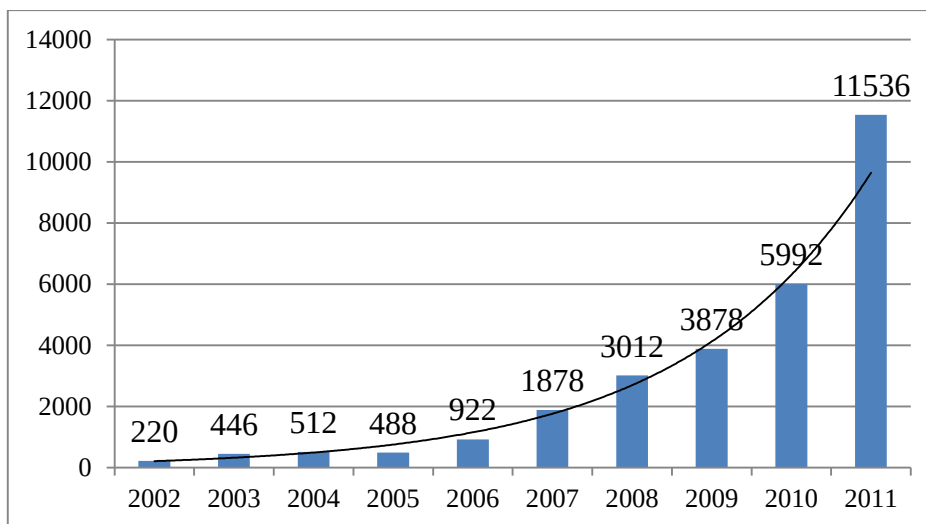
**Rysunek 4. Procentowy udział poszczególnych OZE w produkcji ciepła**

Źródło: Opracowanie własne na podstawie GUS [10]

Warto w tym miejscu wspomnieć, że Polska wypada korzystnie w porównaniu do pozostałych 27. państw członkowskich Unii Europejskiej w kwestii zużycia energii odnawialnej w całkowitym zużyciu energii. W 2010 r. zużycie to wyniosło 7% i było rezultatem o 0,2% wyższym niż przeciętny wynik państw wspólnoty. Należy także dodać, że do zużycia energii ze źródeł odnawialnych zalicza się także w całości zużycie komunalnych odpadów organicznych i nieorganicznych oraz wykorzystanie biopaliw w przemyśle naftowym i transporcie. [10]

3.1. Analiza stanu wykorzystania energii wiatru w Polsce

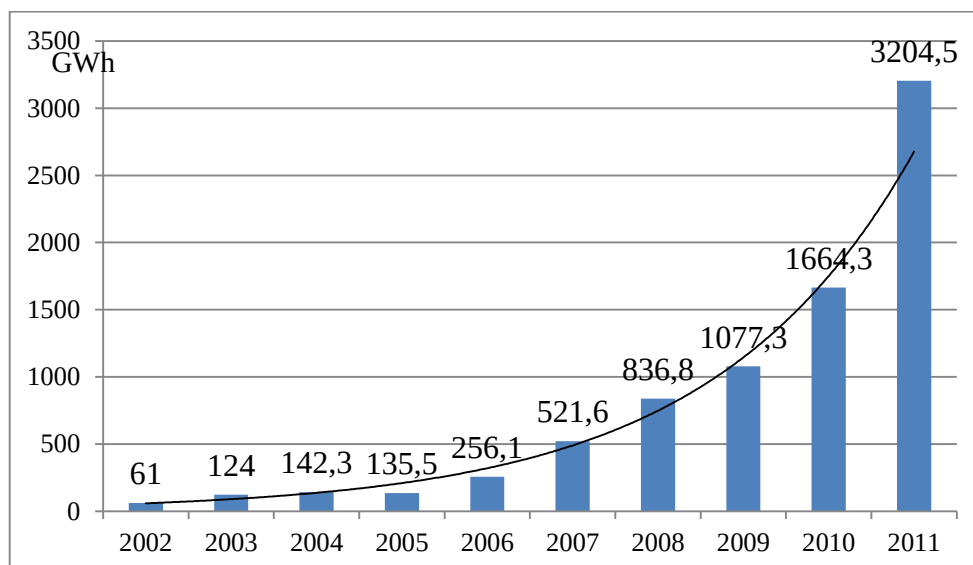
Koncentrując się natomiast na danych statystycznych dotyczących wykorzystania energii wiatru w Polsce można stwierdzić, że w latach 2002-2011 wystąpił wzrost pozyskania energii wiatru, od 220 TJ do 11536 TJ. Pozyskanie energii w poszczególnych latach zostało zobrazowane na rysunku 5. [10]



Rysunek 5. Pozyskanie energii wiatru w Polsce w latach 2002-2011

Źródło: Opracowanie własne na podstawie GUS [10]

Podobnie dostrzec można wyraźny wzrost wielkości produkowanej z energii wiatru energii elektrycznej. Dane obrazujące wzrost poziomu wyprodukowanej energii elektrycznej przedstawia rysunek 6. [10]



Rysunek 6. Wielkość produkcji energii elektrycznej z energii wiatru w latach 2002-2011

Źródło: Opracowanie własne na podstawie GUS [10]

Istotną informacją płynącą z badań Głównego Urzędu Statystycznego jest również fakt, iż w roku 2011 osiągalne w elektrowniach wiatrowych moce wynosiły 1800 MW, co oznacza że wzrosły ponad 56-krotnie w odniesieniu do roku 2002 (32 MW). Wynik ten oznacza, że stanowiły około 60% osiągalnych mocy elektrowni bazujących na odnawialnych źródłach energii do produkcji prądu elektrycznego. [10]

4. Przegląd wybranych technologii turbin wiatrowych o pionowej osi rotacji

Początki zastosowania turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu sięgają VIII w., gdzie stosowane przez Persów służyły pompowaniu wody i mieleniu ziarna. W celach wytworzenia energii elektrycznej zostały zastosowane pod koniec XIX w. Jednym z pierwszych urządzeń tego typu była turbina autorstwa Jamesa Blyth'a z 1887 r., która była zdolna do wytworzenia 12 kW energii elektrycznej. We współczesnych czasach dominuje jednak wykorzystanie turbin o poziomej osi obrotu, czyli typu HAWT (ang. *Horizontal Axis Wind Turbine*). Turbiny o pionowej osi rotacji – VAWT (ang. *Vertical Axis Wind Turbine*) stanowią w znacznej mierze instalację małych mocy wykorzystywanych na potrzeby indywidualnych odbiorców. [3, 11] Prowadzone są jednakże badania naukowe nad wykorzystaniem turbin VAWT w przypadku dużych farm wiatrowych. W swojej publikacji John O. Dabiri z California Institute of Technology porównał pracę dwóch zespołów urządzeń o odmiennych osiach obrotu. Instalację urządzeń o pionowej osi budowały turbiny Widspire o mocy znamionowej 1,2 kW i średnicy wirnika wynoszącej 1,2 m, natomiast instalację turbin o osi poziomej stanowiły turbiny o mocy znamionowej 2,5 MW i 3 MW, i rozpiętości 100 i 112 metrów. Wyniki przeprowadzonych badań polowych wskazują, że turbiny o osi pionowej są w stanie generować więcej energii przypadającej na metr kwadratowy zajmowanej powierzchni, a mianowicie 6 – 30 W/m². Urządzenia typu HAWT produkowały 2 – 3 W/m². Przeprowadzone badania mogą świadczyć, za słuszością koncepcji zastosowania turbin o pionowej osi obrotu również w wypadku dużych farm wiatrowych. [11]

Do głównych zalet technologii turbin o wertykalnej osi obrotu zaliczyć należy możliwość pracy niezależnie od kierunku wiejącego wiatru. Ponadto turbiny te uważa się za bezpieczniejsze dla przemieszczających się ptaków i nietoperzy. [3] Kolejną cechą charakterystyczną tego typu urządzeń jest wyższy wskaźnik wykorzystania energii wiatru, niż w przypadku turbin o poziomej osi obrotu, jednak wadę stanowi tu praktycznie zerowy moment startowy, co rodzi konieczność rozruchu instalacji. [12]

Do najszerzej stosowanych w praktyce turbin o pionowej osi obrotu należą turbiny typu

Darrieus oraz Savonius, które swoje nazwy wzięły od nazwisk ich konstruktorów. Wybrane typy urządzeń zostaną zaprezentowane w kolejnych podrozdziałach artykułu.

4.1. Turbina wiatrowa Darrieus’a

Turbina wiatrowa Darrieus’a opatentowana została przez francuskiego konstruktora w 1931 r. Urządzenia te stosowane są po dziś dzień z różnymi wprowadzonymi modyfikacjami i usprawnieniami. Największa tego typu turbina znajduje się w Quebecu w Kanadzie (rysunek 7).

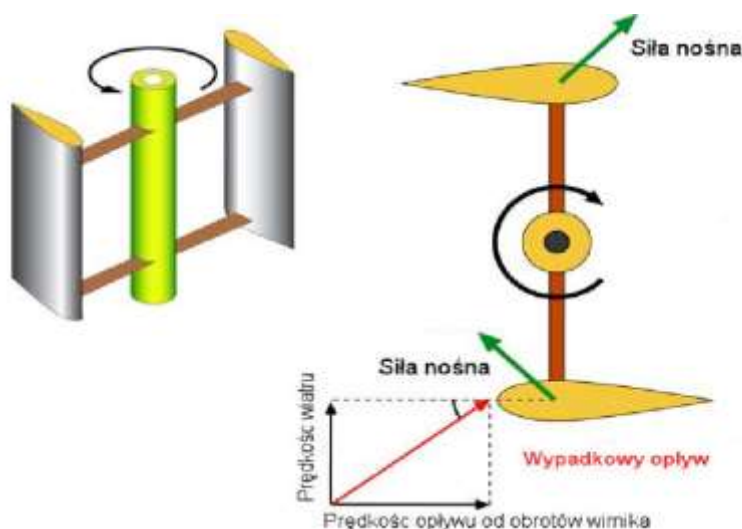


Rysunek 7. Turbina Darrieus’a- Eoliennes Gaspésie, w Quebecu w Kanadzie

Źródło: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/Eoliennes_Gaspésie.jpg; data dostępu: 07.02.2014r.

4.1.1. Turbina wiatrowa H-rotor

Tzw. H-rotory, znane również jako turbiny H-Darrieus’a, stanowią odmianę turbiny Darrieus’a. Ich konstrukcja jest mniej skomplikowana w odniesieniu do rozwiązania początkowego, z powodu zastosowania prostych łopat wirnika. Urządzenie charakteryzuje duża sprawność pracy. Moce jednostkowe H-rotorów potrafią osiągnąć poziom 300 kW. Rozwiązanie konstrukcyjne bazuje na zastosowaniu maksymalnej odległości łopat od osi wirnika dla tego typu rozwiązania. Obrót powoduje stałą zmianę kąta natarcia łopat względem wiatru od wartości ujemnych przez optymalne, aż do przekroczenia punktów krytycznych. Schemat działania w uproszczonej postaci przedstawiony został na rysunku 8. Standardowo turbiny wyposażone są w dwie, bądź trzy łopaty wirnika. [3]



Rysunek 8. Schemat działania turbiny H-rotor

Źródło: <http://www.drewnozamiastbenzyny.pl/turbina-wiatrowa-darrieusa/>; data dostępu: 07.02.2014r.

Stosunkowo często spotykaną odmianą turbiny H-rotor, zaopatrzoną w trzy łopaty wirnika oraz układ odśrodkowej regulacji kąta natarcia łopat jest turbina typu Kirke-Lazauskas, urządzeniem podobnego typu jest odmiana Heidelberg-Rotor. Ponadto spotyka się wariacje z ruchomym zawieszeniem łopat, czy zwiększoną liczbą łopat – tzw. turbiny wielopłatowe. Technologie tego typu przedstawiono na poniższym rysunku 9. Wśród oferowanych rozwiązań konstrukcyjnych znajdują się także turbiny przystosowane do bezpośredniego montażu na powierzchni terenu, bez konieczności wznoszenia konstrukcji nośnych. Znalazły one zastosowanie w gospodarstwach rolnych, zakładach przetwórstwa rolno-spożywczego oraz do odsalania wody. [3]



Rysunek 9. Wielopłatowe turbiny firmy Windstar Harvest – WHI

Źródło: <http://windharvest.com/>; data dostępu: 07.02.2014r.

4.1.2. Turbina miejska – Urban Wind Turbine

Urban Wind Turbine to kolejna odmiana turbiny typu Darrieus’a zwana turbiną miejską. Urządzenie te charakteryzuje niski poziom generowanego hałasu oraz eliminacją konieczności modyfikacji ułożenia wirników do panujących warunków wietrzności, poprzez użycie wirnika w kształcie potrójnej helisy - rysunek 10. Są to urządzenia o gabarytach dostosowanych do warunków miejskich.



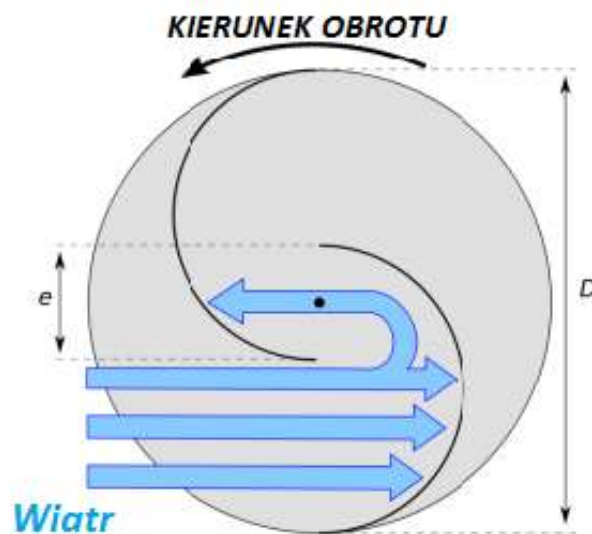
Rysunek 10. Urban Wind Turbine – turbina miejska

Źródło: <http://barnardonwind.com/2013/02/23/why-arent-vertical-axis-wind-turbines-more-popular/>; data dostępu: 07.02.2014r.

4.2. Turbina wiatrowa Savonius’a

Turbina wiatrowa Savonius’a to kolejne rozwiązanie technologiczne turbin o pionowej osi obrotu wirnika. Pierwotny projekt wywodzi się z 1920 roku. Zasada jej działania opiera się o wykorzystanie specjalnie profilowanych łopat obróconych względem siebie o 90° . Rozwiązanie takie ma na celu zmniejszenie znaczenie położenia wirnika względem kierunku wiatru na wartość momentu rozruchowego. Turbiny tego typu charakteryzuje jednak mniejsza sprawność niż ma to w przypadku urządzeń o poziomej osi obrotu oraz turbin typu Darrieus’a. [3] Główną zaletą, natomiast, jest prosta konstrukcja i zdolność pracy przy małych prędkościach wiatru. Dodatkowo turbiny Savonius’a wykazują znaczną odporność na porywistość wiatru osiagającego prędkości nawet do 60 m/s, a także niskim poziomem generowanego hałasu. Urządzenia tego typu znajdują zastosowanie do napędzania pomp wody, ale również instalowane są na dachach budynków miejskich w celu produkcji energii elektrycznej na własne potrzeby. Wspomniana wcześniej prostota konstrukcji i zasady działania pozwala na wykonanie turbin w sposób amatorski przy wykorzystaniu np. przeciętych beczek oraz pojemników z tworzyw sztucznych. Uproszczony schemat ich działania został ukazany na

rysunku 11, a przykładowa turbina na rysunku 12.



Rysunek 11. Schemat działania turbin typu Savonius

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Shane C. *Various Wind Turbines Technologies*, Global Energy Network Institute, 09.2012.



Rysunek 12. Turbina Savoniusa zainstalowana na obiekcie budowlanym

Źródło: <http://www.blog.odnawialne-firmy.pl/>; data dostępu: 07.02.2014r.

4.2.1. Turbiny świderkowe typu Savonius'a

Turbiny świderkowe stanowią modyfikację początkowego rozwiązania turbin typu Savonius. Po raz pierwszy zaproponowane zostały przez fińską firmę Windside. Zastosowanie tej modyfikacji konstrukcyjnej pozwala na pracę urządzenia w szeroki zakresie prędkości wiatru wynoszącym od 1,5 m/s do 60 m/s, zachowując jednocześnie prostą konstrukcję, która zapewnia bezpośrednie przenoszenie napędu wirnika do prądnicy. Turbina o powierzchni łopat

wynoszącej 2 m² osiąga moc 50 W przy wietrze wiejącym z prędkością 6 m/s, ważąc przy tym zaledwie 200 kg. To istotna cecha turbin tego typu, która pozwala na ich montaż na istniejących obiektach budowlanych jak np. mury, wieże, czy dachy budynków. [3]



Rysunek 13. Turbiny Savonius oferowane przez firmę Windside

Źródło: <http://www.bettergeneration.co.uk/> oraz <http://www.soe-townsville.org/>; data dostępu: 07.02.2014r.

4.2.2. Turbiny Zefir

Kolejnym wariantem turbin Savonius'a są turbiny typu Zefir. (ang. *Zephyr Designed Vertical Wind Turbine - ZVWT*). Jak wynika z informacji podawanych przez autorów tego typu rozwiązania, urządzenie jest zdolne do pracy niemal przy wszystkich prędkościach wiatr, zachowując jednocześnie pełną wytrzymałość na powstającą turbulencje. Ich zaletę stanowią relatywnie niewielkie rozmiary oraz fakt, iż nie wymagają dodatkowych konstrukcji nośnych. Dodatkowo charakterystyczną cechą urządzenia jest zdolność do samoczynnej regulacji prędkości obrotowej przy zmiennych warunkach wietrzności, dzięki czemu zbędne jest stosowanie dodatkowych systemów i mechanizmów regulujących. [3] Przykładowe urządzenie ukazuje rysunek 14.

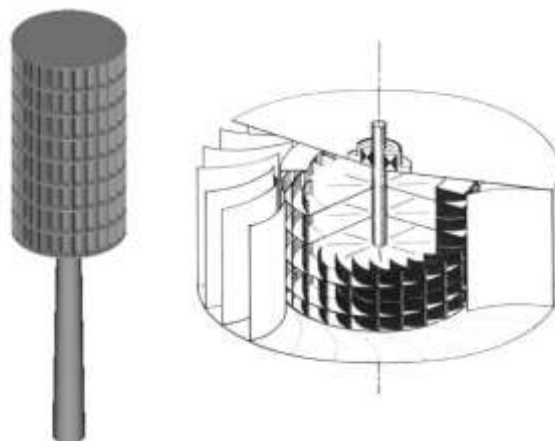


Rysunek 14. Turbina wiatrowa ZVWT

Źródło: <http://www.zephyrpower.com/past-projects/>; data dostępu: 07.02.2014r.

4.2.3. Poprzeczna Dwustopniowa Turbina Przepływowa

Poprzeczna Dwustopniowa Turbina Przepływowa (rysunek 15) jest rozwiązaniem opatentowanym przez polskiego konstruktora Zdzisława Pawlaka w 1985 roku. Jest to rozwiązanie technologiczne zbliżone do turbin typu Zefir. Urządzenie charakteryzuje się dużym momentem rozruchowym oraz wysoką sprawnością. Turbina bazuje na wykorzystaniu wirnika zlokalizowanego wewnątrz turbiny, gdzie w czasie tzw. ciszy wiatrowej rozpędzona wcześniej turbina posiada zdolność do wyrzutu powietrza ze środka, generując w ten sposób podciśnienie, co w końcowym efekcie skutkuje zmniejszeniem oporu w czasie kolejnych podmuchów wiatru. Konstruktor podaje też, że ten typ turbiny może również znaleźć zastosowanie do konwersji energii z pływów i fal morskich. [3, 13]



Rysunek 15. Poprzeczna Dwustopniowa Turbina Przepływowa

Źródło: <http://www.patenty.republika.pl/turbina/turbina.htm>; data dostępu: 07.02.2014r.

5. Badanie stosowalności instalacji o pionowej osi obrotu w warunkach wietrzności województwa podlaskiego

Rozdział przedstawia koncepcję zastosowania mikroinstalacji wiatrowej o pionowej osi rotacji służącej produkcji energii elektrycznej na potrzeby indywidualnego odbiorcy i poddaje analizie zastosowane rozwiązanie pod kątem technologicznym oraz w aspekcie ekonomicznym. Zaproponowane urządzenie stanowi turbina wiatrowa o nazwie handlowej Aerocopter 450 firmy ARTBAU WIND i reprezentuje rozwiązanie technologiczne turbin typu H-rotor Darieus’a. Do przeprowadzenia analizy ekonomicznej porównano dwa warianty pracy urządzenia. Wariant pierwszy zakłada użycie instalacji do produkcji energii elektrycznej w celu pokrycia własnych potrzeb energetycznych, w wariacie drugim założono sprzedaż energii wg taryfikatora przedstawionego w założeniach do *Projektu ustawy o odnawialnych źródłach energii*. Bazując na uzyskanych obliczeniach ustalone zostaną także dodatkowe kalkulacje pozwalające określić efektywną wielkość produkowanej energii elektrycznej oraz poziom ceny sprzedaży zapewniający rentowność przedsięwzięcia.

W celu przeprowadzenia założonych obliczeń konieczne jest dokonanie pewnych założeń do analizy, dotyczących warunków funkcjonowania instalacji oraz cech potencjalnego użytkownika:

- Lokalizacja instalacji – w omawianej koncepcji przyjęto lokalizację o charakterystyce wietrzności odpowiadającej mieście Suwałki, ze względu na korzystne warunki wietrzności panujące w tym regionie. Średnioroczna prędkość wiatru została przyjęta na poziomie 4,2 m/s i stanowi podstawę do ustalenia możliwości produkcyjnych turbiny. [3]
- Użytkownik instalacji – odbiorca indywidualny charakteryzowany jest przez średnioroczne zużycie energii elektrycznej. Na potrzeby przeprowadzenia niezbędnych kalkulacji jako użytkownika instalacji zaproponowano przeciętne polskie gospodarstwo domowe prowadzące działalność rolniczą. Dane pochodzą z badań statystycznych prowadzonych przez Główny Urząd Statystyczny. Roczne zużycie energii elektrycznej wynosi w tym przypadku 2983 kWh. [14]
- Ceny rynkowe energii elektrycznej – jak podaje GUS zróżnicowanie cen energii elektrycznej związane z funkcjonowaniem gospodarstw domowych jest niewielkie oraz nieduże są rozbieżności między występującymi cenami z wyjątkiem sytuacji wyjątkowych, do których należą przypadki bardzo małego zużycia energii elektrycznej, czy gospodarstw domowych mających specjalną taryfę pracowniczą. Do obliczeń

przyjęto średnią arytmetyczną cenę energii elektrycznej zewnętrznego dostawcy ustaloną na poziomie 0,53 zł/kWh.

- Dobór metod ekonomicznej oceny rentowności – posłużono się wybranymi metodami statystycznymi. Metody te są stosowane w początkowych etapach prowadzenia inwestycji i pomijają zmianę wartości pieniądza w czasie. [15]
- Instalacja spełnia kryterium mikroinstalacji, czyli łączna zainstalowana moc elektryczna nie przekracza 40 kW. [16]

5.1. Charakterystyka turbiny Aerocopter 450

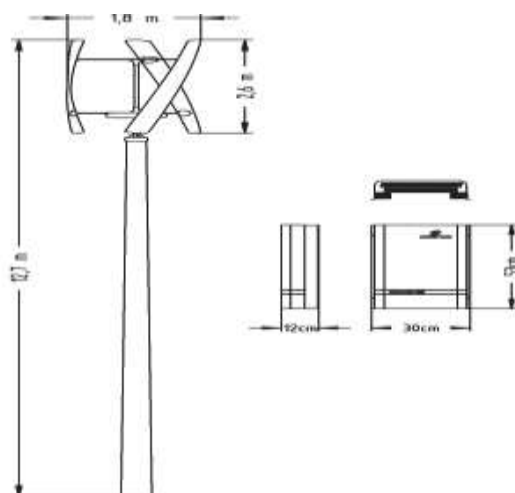
Turbina Aerocopter to urządzenie o pionowej osi obrotu powstałe w wyniku kilkuletnich prac naukowców z wyższych uczelni technicznych i ośrodków naukowo-badawczych poprzez symulację numeryczną oraz badania modelowe. Turbina posiada wirnik zintegrowany z generatorem, a budują ją wysoko wytrzymałościowe materiały kompozytowe odporne na działanie warunków atmosferycznych stosowane także w przemyśle kosmicznym i lotniczym. Urządzenie korzysta z technologii magnesów neodymowych do produkcji prądu elektrycznego. Element wyposażenia stanowi cyfrowy sterownik wyposażony w dwa mikroprocesory, którego zadaniem jest zapewnienie optymalnego wykorzystania energii wiatru, sterowanie energią układu oraz zespołu akumulatorów, rejestrowanie parametrów oraz komunikacja pracy poszczególnych elementów. Turbina zaopatrzona jest w czterostopniowy system bezpieczeństwa, gdzie pierwszy stopień stanowi hamulec elektromagnetyczny sterowany niezależnymi mikroprocesorami, za pomocą którego nadmiar energii przenoszony jest na grzałkę lub układ rezystorów dużej mocy oraz chroni turbinę przed przekroczeniem prędkości obrotowej wynoszącej 130 rpm. Stopień drugi stanowi zabezpieczenie urządzenia przed uszkodzeniem przewodu przyłączeniowego bądź awarii układu sterowania w postaci systemu ASBT umieszczonego w aeratorze. System ten nie pozwala na przekroczenie prędkości obrotowej ponad 160 rpm. Dodatkowo turbina wyposażona jest w automatyczny mechaniczny hamulec bezwładnościowy uruchamiający się w przypadku przekroczenia prędkości obrotowej 200 rpm oraz ręczny hamulec serwisowy. Na podstawie zapewnień producenta, turbina zdolna jest do produkcji energii elektrycznej przy małych prędkościach wiatru, zachowując zdolność pracy w szerokim zakresie prędkości. Urządzenie zostało przystosowane do montażu na słupie strunobetonowym E 12/15 oraz spełnia wymogi europejskich norm bezpieczeństwa. Wybrane dane techniczne turbiny przedstawia tabela 4. Na rysunku 16 zaprezentowano rysunek techniczny oraz rzeczywisty wygląd urządzenia.

Tabela 4. Aerocopter 450 – dane techniczne

Powierzchnia czynna	450 dm ²
Średnica wirnika	1800 mm
Wysokość wirnika	2600 mm
Ciężar turbiny	71 kg*
Zakres prędkości obrotowej	0 – 140 rpm
Poziom hałasu	< 37dB
Maksymalna moc pracy stałej	2000W**
Maksymalna moc chwilowa	2400W
Napięcia wyjścia na odbiornik	24V lub 48V (DC)***
Napięcie zestawu akumulatorów	24V lub 48V***
Zalecane akumulatory	Kwasowo-ołowiowe
Zalecana pojemność akumulatorów	4 x 200Ah
Sterownik	Mikroprocesorowy
Hamulec mechaniczny	Sprzęgłowy

* wirnik wraz z generatorem ** dla prędkości wiatru 13,5 m/s *** opcjonalnie

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych producenta


Rysunek 16. Urządzenie Aerocopter 450

Źródło: Rysunki udostępnione w materiałach producenta

5.2. Ustalenie efektu ekonomicznego

- Wariant I – produkcja energii elektrycznej w celu pokrycia własnych potrzeb użytkownika, wymaga sporządzenia wyceny zestawu służącego założonemu zadaniu. W tabeli 5 zawarto zestaw niezbędnych elementów oraz wycenę jego wartości

Tabela 5. Wycena zestawu Aerocopter 450 – wariant I

Nazwa	ilość		cena		wartość	
Turbina Aerocopter 450 z układem sterowania	1	szt.	18500,00	zł/szt.	18500,00	zł

Adapter do słupa 12/15 Strunobetonowego	1	szt.	900,00	zł/szt.	900,00	zł
Tuleja adaptera	1	szt.	210,00	zł/szt.	210,00	zł
Linka hamulca serwisowego	9,2	mb	12,00	zł/mb	110,40	zł
Pancerz linki hamulca serwisowego	9,2	mb	5,50	zł/mb	50,60	zł
Dźwignia hamulca i elementy montażowe	1	kpl	150,00	zł/kpl	150,00	zł
Akumulatory 200Ah/12V (4szt./kpl)	1	kpl	4800,00	zł/kpl	4800,00	zł
Zestaw kabli do akumulatorów	1	kpl	220,00	zł/kpl	220,00	zł
Grzałka 15 Ω z przyłączem 4m	1	kpl	190,00	zł/kpl	190,00	zł
Interfejs użytkownika	1	kpl	200,00	zł/kpl	200,00	zł
Rezystor 3000W	1	szt.	550,00	zł/szt.	550,00	zł
Okablowanie 4x4 mm ² *	50	mb	11,00	zł/mb	550,00	zł
RAZEM					26431,00	zł

*ilość przyjęta na potrzeby obliczeniowe

Źródło: Opracowanie własne na podstawie cennika producenta

Na podstawie przeprowadzonej wyceny uzyskano szacunkową wartość zestawu wynoszącą 26431 zł. Na etapie dalszych obliczeń przyjęto wartość 26500 zł. W tabeli 6 ustalono szacunkowy koszt netto zakupu i montażu turbiny. Do celów obliczeniowych założono 15-letni okres eksploatacji.

Tabela 6. Koszt zakupu i instalacji turbiny Aerocopter 450- wariant I

Specyfikacja kosztów	Koszt	
Zestaw urządzeń Aerocopter 450	26500,00	zł
Maszt, montaż, dokumentacja*	20000,00	zł
Serwis*	4500,00	zł
Koszty razem	51000,00	zł

*wartość przyjęta

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych producenta i konsultacji z firmą branżową

Łączny koszt zakupu, montażu i serwisowania turbiny w 15-letnim okresie eksploatacyjnym przyjęto na poziomie 51000 zł. Na podstawie informacji producenta dotyczących mocy urządzenia oraz możliwości produkcyjnych zależnych od prędkości wiatru, ustalono możliwości produkcyjne na poziomie 2000 kWh w skali roku, dla założonej wcześniej prędkości wiatru równej 4,2 m/s. Wielkość produkcji pozwala na pokrycie 67% własnego zapotrzebowania energetycznego użytkownika. W tabeli 7 przedstawiono uzyskaną różnicę w wysokości opłat za energię elektryczną.

Tabela 7. Wygenerowana różnica w wysokości opłat – wariant I

Wariant	Energia elektryczna dostarczona od zewnętrznego dostawcy [kWh]	Cena [zł/kW]	Roczna opłata [zł]	Różnica wysokości opłat [zł]
Bez dodatkowego własnego źródła energii	2983	0,53	1580,99	1060,00
Z zastosowaniem Aeroceptor 450	983		520,99	

Źródło: Opracowanie własne

Jak widać z wyników przeprowadzonych obliczeń zastosowanie turbiny wiatrowej pozwala na uzyskanie rocznej różnicy w wysokości opłat na poziomie 1060 zł. Wykalkulowana różnica stanowi o długości okresu zwrotu proponowanej koncepcji. Obliczony okres oraz stopę zwrotu zestawiono w tabeli 8.

Tabela 8. Okres oraz stopa zwrotu Aeroceptor 450 – wariant I

Wartość netto instalacji [zł]	Roczna korzyść ekonomiczna [zł]	Okres zwrotu [lata]	Roczna stopa zwrotu [%]
51000,00	1060,00	48	2,08

Źródło: Opracowanie własne

Uzyskana korzyść ekonomiczna pozwala na zwrot wartości przedsięwzięcia w okresie około 48 lat, co przekłada się na prostą stopę zwrotu w wysokości 2,08% rocznie. Obliczony okres jest znacznie dłuższy niż założony wstępnie okres użytkowania instalacji wynoszący 15 lat. Zasadne na tym etapie zdaje się być ustalenie wysokości subsydiów, które zrównoważyłyby okres zwrotu z przewidzianym okresem eksploatacji użytkowania, i które stanowiłyby bezzwrotne wsparcie finansowe inwestycji. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 9.

Tabela 9. Ustalenie poziomu subsydiów – wariant I

Wyszczególnienie		Stopień pokrycia inwestycji środkami obcymi [%]	Roczna korzyść ekonomiczna [zł]	Okres zwrotu [lata]	Roczna stopa zwrotu [%]
Wartość netto instalacji [zł]	51000,00	68,82	1060,00	15	6,67
Wkład własny [zł]	15900,00				
Wkład obcy [zł]	35100,00				

Źródło: Opracowanie własne

W celu osiągnięcia opłacalności z punktu widzenia użytkownika instalacji, inwestycja powinna być wsparta w czasie 15 lat o około 69% swej wartości środkami obcymi niepodlegającymi zwrotowi. Daje to kwotę w wysokości 35100 zł, ustanawiając wkład własny eksploatatora na poziomie 15900 zł.

- Wariant II – sprzedaż wyprodukowanej energii elektrycznej wymaga zastosowania odmiennego zestawu urządzeń niż w przypadku wariantu I. Ich wyszczególnienie oraz wycena zestawu zestawione zostały w tabeli 10.

Tabela 10. Wycena zestawu Aerocopter 450 – wariant II

Nazwa	ilość		cena		wartość	
Turbina Aerocopter 450 z układem sterowania	1	szt.	18500,00	zł/szt.	18500,00	zł
Adapter do słupa 12/15 Strunobetonowego	1	szt.	900,00	zł/szt.	900,00	zł
Tuleja adaptera	1	szt.	210,00	zł/szt.	210,00	zł
Linka hamulca serwisowego	9,2	mb	12,00	zł/mb	110,40	zł
Pancerz linki hamulca serwisowego	9,2	mb	5,50	zł/mb	50,60	zł
Dźwignia hamulca i elementy montażowe	1	kpl	150,00	zł/kpl	150,00	zł
Inwerter 12V/24V/230V - 2000VA - Phoenix	1	szt.	6000,00	zł/szt.	6000,00	zł
Grzałka 15 Ω z przyłączem 4m	1	kpl	190,00	zł/kpl	190,00	zł
Interfejs użytkownika	1	kpl	200,00	zł/kpl	200,00	zł
Rezystor 3000W	1	szt.	550,00	zł/szt.	550,00	zł
Okablowanie 4x4 mm ^{2*}	50	mb	11,00	zł/mb	550,00	zł
RAZEM					27411,00	zł

* ilość przyjęta na potrzeby obliczeniowe

Źródło: Opracowanie własne na podstawie cennika producenta

Na podstawie przeprowadzonej wyceny szacunkową wartość zestawu należy ustalić na poziomie 27411 zł. W dalszych obliczeniach wartość zestawu wraz z niezbędnym oprzyrządowaniem przyjęto na poziomie 27500 zł. Koszty razem netto ustalono w tabeli 11.

Tabela 11. Koszt zakupu i instalacji turbiny Aerocopter 450-wariant II

Specyfikacja kosztów	Koszt	
Zestaw urządzeń Aerocopter 450	27500,00	zł
Maszt, montaż, dokumentacja*	20000,00	zł
Serwis**	4500,00	zł
Koszty razem	52000,00	zł

* wartość przyjęta do celów obliczeniowych na podstawie konsultacji z jedną z firm branżowych

Źródło: Opracowanie własne

Sumaryczny koszt zakupu, montażu oraz serwisowania zestawu urządzeń, uwzględniając 15-letni okres użytkowania turbiny, należy przyjąć na poziomie 52000 zł. W tabeli 12 przedstawiono natomiast wysokości rocznej korzyści ekonomicznej wynikającej ze sprzedaży wyprodukowanej energii elektrycznej po cenie ustalonej na podstawie taryfikatora *Feed in Tariff* przedstawionego w pierwotnych założeniach projektu ustawy o OZE.

Tabela 12. Wygenerowana różnica w wysokości opłat – wariant II

Wyszczególnienie	Ilość energii elektrycznej [kWh]	Cena [zł/kWh]	Wartość [zł]	Roczna opłata [zł]	Różnica w wysokości opłat [zł]
Sprzedaż energii elektrycznej	2000	0,65*	1300,00	280,99	1300,00
Zakup energii elektrycznej	2983	0,53	1580,99		

*cena przyjęta wg taryfikatora Feed in Tariff na podst. publikacji Ministerstwa Gospodarki na <http://www.mg.gov.pl/>

Źródło: Opracowanie własne

Uzyskany przychód ze sprzedaży wyprodukowanej energii elektrycznej pozwala zmniejszyć wielkość faktycznych opłat za energię elektryczną od zewnętrznego dostawcy do kwoty 280,99 zł. Uzyskiwana jest w ten sposób roczna korzyść ekonomiczna w wysokości 1300 zł. Pozwala ona na ustalenie okresu oraz rocznej stopy zwrotu – tabela 13.

Tabela 13. Okres oraz stopa zwrotu Aerocopter 450 – wariant II

Wartość netto instalacji [zł]	Roczna korzyść ekonomiczna [zł]	Okres zwrotu [lata]	Roczna stopa zwrotu [%]
52000,00	1300,00	40	2,50

Źródło: Opracowanie własne

Obliczona stopa zwrotu wynosi 2,5%, co oznacza, że zaproponowany zestaw urządzeń osiągnie zwrot poniesionych nakładów po 40 latach. Okres ten, podobnie jak w omawianym wcześniej wariantcie I znacznie przewyższa przewidziany czas eksploatacji wynoszący 15 lat. W tabeli 14 przedstawiono konieczny poziom subsydiów zapewniający okres zwrotu z inwestycji w przewidzianym okresie użytkowania zespołu urządzeń.

Tabela 14. Ustalenie poziomu subsydiów – wariant II

Wyszczególnienie		Stopień pokrycia inwestycji środkami obcymi [%]	Roczna korzyść ekonomiczna [zł]	Okres zwrotu [lata]	Roczna stopa zwrotu [%]
Wartość netto instalacji [zł]	52000,00	62,5	1300,00	15	6,67
Wkład własny [zł]	19500,00				
Wkład obcy [zł]	31500,00				

Źródło: Opracowanie własne

Bazując na przedstawionych wynikach obliczeń należy stwierdzić, że niezbędny bezzwrotny poziom subsydiów na przewidzianą inwestycję powinien wynieść 31500 zł, co stanowi 62,5% wartości netto przedsięwzięcia. Wkład własny eksploatatora w takim wypadku wyniósłby 19500 zł.

- Wariant III – to wariant obliczeniowy zakładający założenia cenowe wg publikacji z dnia 13.11.2014 r. dot. projektu ustawy o odnawialnych źródłach energii. Zasadniczą różnicę od poprzedniego wariantu obliczeniowego stanowi ustalenie ceny sprzedaży wyprodukowanej energii na poziomie 80% średniej ceny rynkowej za okres poprzedniego roku kalendarzowego ustalonej przez Prezesa URE. Do sporządzenia kalkulacji założono ustaloną cenę zakupu energii elektrycznej na poziomie 0,53 zł/kWh. Ponadto, ponieważ w przedstawionym przykładzie nie występuje nadwyżka wyprodukowanej energii, założono możliwość sprzedaży całej wyprodukowanej energii elektrycznej i zbadano efekt ekonomiczny postawionych założeń. Ustalane wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 15.

Tabela 15. Wygenerowana różnica w wysokości opłat – wariant III

Wyszczególnienie	Ilość energii elektrycznej [kWh]	Cena [zł/kWh]	Wartość [zł]	Roczna opłata [zł]	Różnica w wysokości opłat [zł]
Sprzedaż energii elektrycznej	2000	0,424	848,00	732,99	848,00
Zakup energii elektrycznej	2983	0,53	1580,99		

Źródło: Opracowanie własne na podstawie <http://legislacja.rcl.gov.pl/lista/2/projekt/19349/katalog/186451>

Możliwa do uzyskania wartość sprzedanej w całości wyprodukowanej energii elektrycznej wynosi 848 zł. Uzyskana w ten sposób korzyść ekonomiczna może posłużyć to określenia kolejnych wielkości przedstawionych w tabeli 16.

Tabela 16. Okres oraz stopa zwrotu Aerocopter 450 – wariant III

Wartość netto instalacji [zł]	Roczna korzyść ekonomiczna [zł]	Okres zwrotu [lata]	Roczna stopa zwrotu [%]
52000,00	848,00	61	1,64

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń daje się zauważyć, że dla ukazanego wariantu pracy instalacja osiągnie zwrot poniesionych nakładów po 61 latach, dając roczną stopę zwrotu na poziomie 1,64%. Niezbędny poziom dofinansowania określono w tabeli 17.

Tabela 17. Ustalenie poziomu subsydiów – wariant III

Wyszczególnienie		Stopień pokrycia inwestycji środkami obcymi [%]	Roczna korzyść ekonomiczna [zł]	Okres zwrotu [lata]	Roczna stopa zwrotu [%]
Wartość netto instalacji [zł]	52000,00	75,5	848,00	15	6,67
Wkład własny [zł]	12720,00				
Wkład obcy [zł]	39280,00				

Źródło: Opracowanie własne

Wariant III pracy turbiny wymaga dofinansowania w wysokości ok. 75,5 % wartości przedsięwzięcia. Należy jednak pamiętać, że założenia prawodawcze zakładają sprzedaż nadwyżki wyprodukowanej energii, która w prezentowanych analizach nie występuje. Przedstawiony jednak wariant obliczeniowy ma na celu ukazać różnicę w aspekcie ekonomicznym konfrontując założenia aktualne do tych zawartych w rozważanym uprzednio taryfikatorze opłat stałych.

- Wariant IV – wariant obliczeniowy ustalający wielkość produkcji energii elektrycznej za pomocą turbiny wiatrowej, powyżej której stanie się ona korzystna z punktu widzenia eksploatatora urządzenia.

W przeprowadzonych obliczeniach przyjęto wycenę zestawu urządzeń umożliwiającego sprzedaż energii do sieci zewnętrznej. Kalkulacje pozwoliły na ustalenie wymaganej korzyści ekonomicznej, zapewniającej okres zwrotu inwestycji w przewidzianym okresie użytkowania zespołu urządzeń. Wyniki obliczeń zaprezentowano w tabeli 18.

Tabela 18. Wymagana wielkość rocznej korzyści ekonomicznej

Wartość netto instalacji [zł]	Roczna korzyść ekonomiczna [zł]	Okres zwrotu [lata]	Roczna stopa zwrotu [%]
52000,00	3466,67	15	6,67

Źródło: Opracowanie własne

By okres zwrotu zrównał się z przewidzianym okresem użytkowania, instalacja wiatrowa powinna przynieść roczną korzyść ekonomiczną użytkownikowi w wysokości 3466,67 zł. Zakładając cenę sprzedaży energii elektrycznej do sieci zgodnie z wcześniejszymi założeniami możliwe staje się ustalenie koniecznej wielkości produkcji energii elektrycznej – tabela 19.

Tabela 19. Wymagana wielkość rocznej produkcji energii – wariant III

Wariant	Cena [zł/kWh]	Przychód ze sprzedaży energii [zł]	Ilość energii elektrycznej [kWh]
wg Feed in Tariff	0,65	3466,67	≈5333
wg aktualnych założeń ustawy o OZE	0,53/0,424*		≈7430

*-cena dotyczy potencjalnej ilości energii wyprodukowanej ponad zapotrzebowanie na energię elektryczną

Źródło: Opracowanie własne

Obliczona w ten sposób wielkość produkcji energii elektrycznej wynosi blisko 7430 kWh dla wariantu uwzględniającego aktualne wytyczne prawne oraz 5333 kWh dla wariantu zakładającego użycie taryfikatora stawek stałych. Na podstawie danych producenta turbiny odnoszących się do możliwości produkcyjnych urządzenia, zostałaby ona osiągnięta przy średniorocznej prędkości wiatru wynoszącej odpowiednio ok. 9,7 oraz ok. 8,4 m/s. Prędkości ta nie są możliwe do osiągnięcia w warunkach wietrzności województwa podlaskiego.

- Wariant IV – wariant obliczeniowy ustalający rentowny poziom ceny sprzedaży wyprodukowanej energii elektrycznej do sieci zewnętrznej.

Ukazane w tej części artykułu obliczenia mają na celu ustalić poziom ceny sprzedaży, który zapewni próg rentowności dla określonej wcześniej możliwości produkcyjnej turbiny wiatrowej. Ustalona roczna korzyść ekonomiczna przedstawia się tożsamo jak w wariantcie poprzednim i wynosi 3466,67 zł. Na tej podstawie można ustalić oczekiwaną cenę – tabela 20.

Tabela 20. Poziom ceny sprzedaży energii elektrycznej

Cena [zł/kWh]	Przychód ze sprzedaży energii [zł]	Ilość energii elektrycznej [kWh]
≈1,73	3466,67	2000

Źródło: Opracowanie własne

Przy ustalonych możliwościach produkcyjnych instalacji, cena sprzedaży energii elektrycznej do sieci zewnętrznej powinna wynieść ok. 1,73 zł, aby zapewnić eksploratorowi urządzenia zwrot poniesionych nakładów w przewidzianym czasie użytkowania.

6. Wnioski

Na podstawie dostępnych danych literaturowych, danych producentów oraz własnych analiz przedstawionego zagadnienia wyciągnięto następujące wnioski końcowe:

- Zastosowanie turbiny wiatrowej o rozwiązaniu technologicznym takim jak reprezentowane przez turbinę Aerocopter 450 nie pokrywa w pełni zapotrzebowania na energię elektryczną przeciętnego gospodarstwa domowego prowadzącego działalność rolniczą w warunkach wietrzności województwa podlaskiego,
- Względnie wysokie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne rodzą potrzebę znacznego dofinansowania inwestycji w odnawialne źródła energii bazujące na mikroenergetyce wiatrowej,
- Umożliwienie sprzedaży wyprodukowanej przez użytkownika mikroinstalacji energii elektrycznej po odpowiednio wysokiej cenie umożliwi osiągnięcie progu opłacalności inwestycji,
- Warunki wietrzności województwa podlaskiego są niewystarczające w celu osiągnięcia opłacalności inwestycji w prezentowanym przypadku mikroinstalacji wiatrowej.

Literatura i strony internetowe:

1. Tytko R. Odnawialne źródła energii, OWG, Warszawa, 2009.
2. <http://www.on-eco.pl/>; data dostępu: 06.02.2014r.
3. Boczar T. Energetyka wiatrowa. Aktualne możliwości wykorzystania, *Wydawnictwo Pomiar Automatyka Kontrola*, Warszawa, 2008.
4. Woliński K. Elektrownie wiatrowe, *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 4, 2002.
5. Jagodziński W. Silniki wiatrowe, *Państwowe Wydawnictwo Naukowe*, Warszawa, 1959.
6. Gronowicz J. Niekonwencjonalne źródła energii, *Wydawnictwo Technologii Eksploatacji – PIB*, Radom – Poznań 2010.
7. Flaga A. Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania, *Wydawnictwo Arkad*, Warszawa, 2008.
8. Global Wind Statistics 2012, *Global Wind Energy Council*, 11.02.2013r.
9. <http://www.imgw.pl/>; data dostępu: 16.01.2014r.
10. Berent-Kowalska G., Kacprowska J., Gogacz I., Jurgaś A. Energia ze źródeł odnawialnych w 2011 r., *Główny Urząd Statystyczny Departament Produkcji, Ministerstwo Gospodarki Departament Energetyki*, Warszawa 2012
11. Shane C. Various Wind Turbines Technologies, *Global Energy Network Institute*, 09.2012.
12. Wolańczyk F. Elektrownie wiatrowe, *Wydawnictwo i Handel Książkami KaBe*, Krosno, 2009
13. <http://www.zephyrpower.com/>; data dostępu: 15.01.2014r.
14. Zużycie energii w gospodarstwach domowych w 2009r., *Główny Urząd Statystyczny Departament Produkcji, Ministerstwo Gospodarki, Departament Energetyki*, Warszawa 2012.
15. Soliński I., Energetyczne i ekonomiczne aspekty wykorzystania energii wiatrowej, *Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami i Energią PAN*, Kraków, 1999.
16. <http://www.mg.gov.pl/>; data dostępu: 15.01.2014r.

mgr inż. Aleksandra Bąk¹
Akademia Górniczo – Hutnicza, Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska
al. A. Mickiewicza 30, 30 – 059 Kraków
e-mail: ¹abak@poczta.agh.edu.pl

Koncepcja zwiększenia potencjału gospodarczego obszaru Kopalni Węgla Brunatnego Turów

Słowa kluczowe: *elektrownia wodna, rekultywacja wodna, węgiel brunatny, Kopalnia Węgla Brunatnego Turów, Bogatynia, energetyka wodna*

Streszczenie: Niniejsza praca porusza problematykę rekultywacji terenów górniczych w oparciu o analizę sytuacji Kopalni Węgla Brunatnego „Turów”. Najczęściej pod pojęciem rekultywacji rozumie się przywrócenie terenom zdegradowanym ich wartości użytkowej poprzez zalesianie, które obejmuje 60 % przypadków, rekultywację rolną stanowiącą 20%, wodną – 10% oraz pozostałe 10% to metody dostosowane do indywidualnych warunków terenu.

W pracy poddano analizie sytuację wspomnianej kopalni w Bogatyni, gdzie od 1904 roku metodą odkrywkową wydobywany jest węgiel brunatny. W chwili obecnej zasoby w złożu szacuje się na 318 mln ton kruszcu, co zapewnia możliwość eksploatacji kopalni do 2043 roku. Aktualnie część obszaru poddana została rekultywacji w kierunku leśnym, pozostała część wyrobiska, po zakończonej eksploatacji, zgodnie z planem zostanie przekształcona w rekreacyjny zbiornik wodny. Z punktu widzenia rekultywacji planowane działania są poprawne, jednakże konfiguracja terenu, powstała w wyniku działalności kopalni zapewnia doskonałe warunki do utworzenia inwestycji o wyższym potencjale gospodarczym, jakim jest budowa elektrowni wodnej, nie rezygnując przy tym z rekreacyjnych walorów zbiornika. Ponadto proponowane rozwiązanie jest zgodne z ideą zrównoważonego rozwoju oraz staje naprzeciw rosnącemu zapotrzebowaniu na energię elektryczną.

Rozwiązanie, jakie zostało przedłożone w niniejszej pracy ma nie tylko znaczenia w wymiarze gospodarczym i społecznym, ale stanowi także próbę przekazania idei nieustannej ekspansji górnictwa, hutnictwa czy przemysłu, a więc też oddziaływania tych dziedzin gospodarki na środowisko. Istotą jest, aby zaprzestać postrzegania rekultywacji tylko, jako rekompensaty zmian związanych z działaniami na rzecz gospodarki, ale również wykorzystać jako szansę do wdrożenia bardziej atrakcyjnych koncepcji zagospodarowania terenów zdegradowanych.

1. Wstęp

Temat pracy opiera się o dwa z pozoru wzajemnie nie powiązane aspekty: energetykę opartą o wydobywanie węgla brunatnego oraz rekultywację. Mając na uwadze, iż bezpieczeństwo energetyczne dla każdego państwa stanowi kwestię strategiczną, a także że dostęp do energii elektrycznej warunkuje rozwój gospodarczy, trudno się dziwić postawie skierowanej ku produkcji energii elektrycznej z najtańszych dostępnych źródeł. Toteż w chwili obecnej większość (bo aż 56%) energii pierwotnej w Polsce produkowana jest na bazie paliw kopalnych, wśród których największym udziałem odznacza się węgiel kamienny i brunatny. Ponadto należy zauważyć, że każda ingerencja górnicza, jak np. eksploatacja węgla brunatnego skutkuje przekształceniami środowiska naturalnego. Stopień tych przekształceń jest uzależniony między innymi od panujących warunków geologiczno – górniczych oraz intensywności eksploatacji. Stąd drugi z rozpatrywanych w pracy aspektów – rekultywacja, będąca w dużej mierze wynikiem rosnącej świadomości ekologicznej.

Te jedynie następujące po sobie aspekty, są ściślej powiązane, co tłumaczy fakt, że w miejscu dotychczasowych wyrobisk węgla pojawiają się dwa problemy. Jednym z nich jest powstały zdewastowany teren, któremu zgodnie z ustawą należy przywrócić wartość użytkową. Drugim zaś fakt mniejszej produkcji energii związany z wyczerpaniem się złoża, jako źródła. Obydwie te kwestie mogą zostać rozwiązane w różnoraki sposób. Najczęściej podejmuje się decyzję o rekultywacji terenów zdegradowanych w kierunku rolnym bądź leśnym, zaś w przypadku produkcji energii elektrycznej – poszukujemy kolejnych źródeł energii, coraz częściej w dziedzinie energetyki niekonwencjonalnej. Oczywiście rozwiązania te spełniają założenia działań naprawczych, jednakże w wielu przypadkach istnieją korzystniejsze koncepcje zagospodarowania, gdzie rekultywacja oraz produkcja energii elektrycznej wzajemnie się uzupełniają.

Wybór kierunku rekultywacji często opiera się o warunki ekonomiczne, geologiczne, społeczne, przestrzenne i środowiskowe¹, zaś podjęte działania w większości mają na celu jedynie rekompensatę strat wywołanych w środowisku, ich niwelację oraz przywrócenie pierwotnej wartości użytkowej. Czy zatem, w przypadkach, gdy zdegradowany obszar stanowi potencjalne źródło energii, nie korzystniej byłoby zaniechać rekultywacji rolnej czy leśnej oraz podjąć możliwość gospodarczego użytkowania owego terenu? Działanie takie

¹ Ostręga A., Uberman R.: *Kierunki rekultywacji i zagospodarowania – sposób wyboru, klasyfikacja i przykłady*.

stanowiłoby rozwiązanie dwóch przedstawionych problemów – przywracałoby wartość obszarom zdegradowanym, a także zapewniałoby ciągłość w produkcji stając naprzeciw rosnącemu zapotrzebowaniu na energię elektryczną.

W takiej sytuacji w 2043 roku stanie Kopalnia Węgla Brunatnego „Turów”, gdzie konfiguracja terenu oraz plany dalszej eksploatacji pozwalają na utworzenie nowego źródła energii elektrycznej na terenie odkrywki. W pracy przeanalizowano możliwości utworzenia elektrowni szczytowo – pompowej, która wykorzystywałaby planowany zbiornik rekreacyjny.

1.1. Obszar objęty analizą

Jak już wspomniano, praca stawiała sobie za cel przedstawienie możliwości utworzenia elektrowni szczytowo – pompowej w miejscu aktualnego wyrobiska węgla brunatnego w Bogatyni. Rzeźbiona Kopalnia Węgla Brunatnego Turów położona w południowo – zachodniej części województwa dolnośląskiego, co obrazuje Rysunek 1. Morfologicznie stanowi ona fragment Kotliny Turoszowskiej. Eksploatowane złoża obejmuje swoim zasięgiem terytorium Polski, Niemiec oraz Czech, na terenie Polski zasoby są największe eksploatowane od wielu lat przez PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna S.A. – Oddział Kopalnia Węgla Brunatnego Turów.



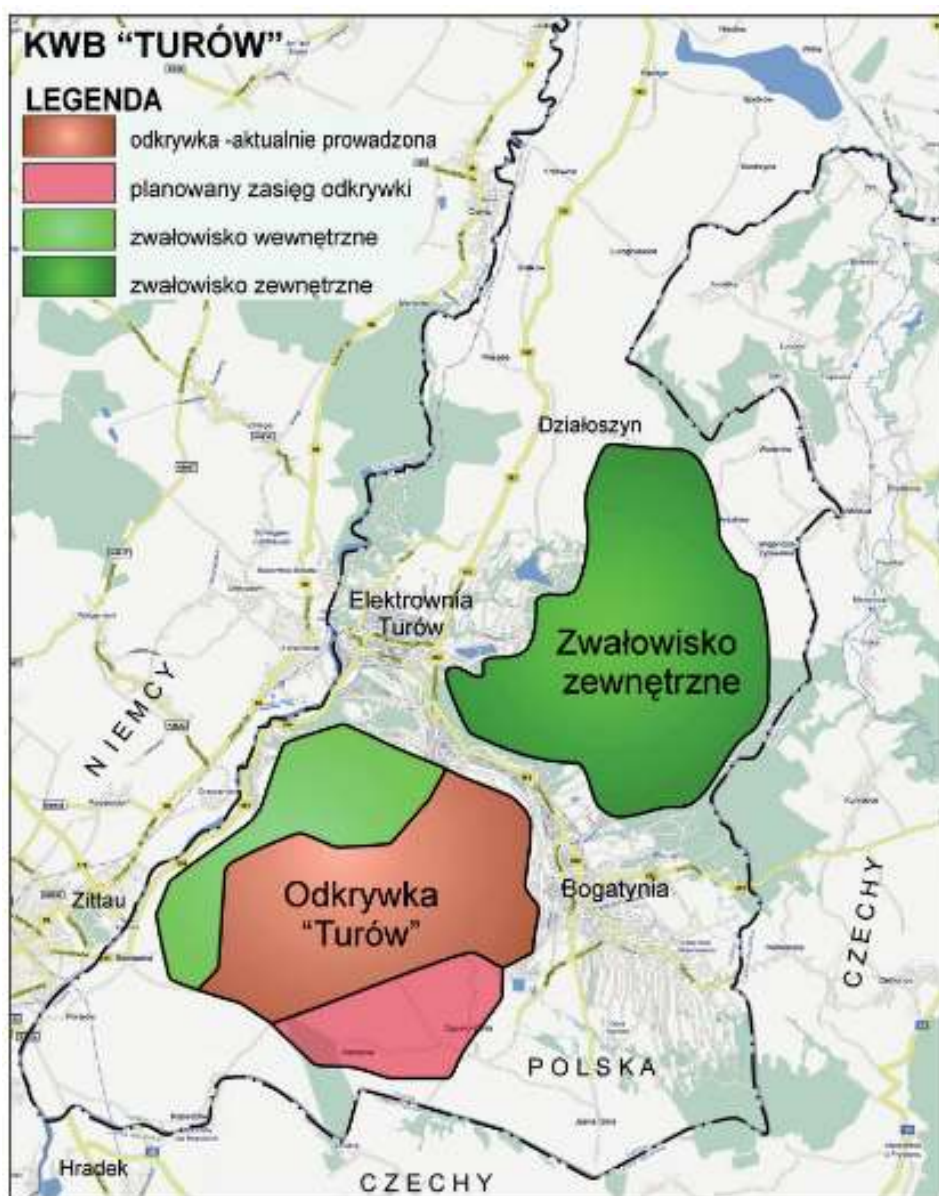
Rysunek 1. Lokalizacja Kopalni Węgla Brunatnego „Turów”

Źródło: <http://www.mapofpoland.pl/Bogatynia,mapa.html>

Historia wydobywania węgla brunatnego ze złoża na terenie Niecki Żytawskiej ma swoje początki już w roku 1740. Jednak eksploatację na skalę przemysłową metodą odkrywkową rozpoczęto w 1904 roku. Powstała kopalnia dopiero 43 lata później przeszła na własność

Państwa Polskiego pod nazwą „Turów”. Dalsze dzieje kopalni opierają się o ciągłą rozbudowę oraz modernizację. W niedługim czasie kopalnia w Bogatyni stała się rozwijającym się, nowoczesnym zakładem dbającym o ekologię, dzięki czemu już w 2001 roku została skreślona z listy 80 najbardziej uciążliwych dla środowiska zakładów.

Podstawą działalności kopalni jest wydobywanie, przetwórstwo oraz sprzedaż węgla brunatnego oraz surowców towarzyszących. Szacuje się, że roczne wydobywanie surowca energetycznego w zakładzie to 12 mln ton, przy tym zdejmowane jest 32 mln m³ nadkładu. Aktualnie odkrywka zajmuje ok. 2 500 ha powierzchni.



Rysunek 2. Mapa poglądowa obszaru działalności KWB „Turów”

Źródło: Kasztelewicz Z., Sypniewski S.: Rekultywacja w polskim górnictwie odkrywkowym węgla brunatnego. [2]

1.1.1. Odkrywka

Aktualnie wydobywanie węgla ma miejsce na Polu Północnym oraz Polu Południowym. Od początku eksploatacji, a więc od roku 1947 do połowy 2006 roku z wyrobiska zdjęto już 1 723,2 mln m³. Nadkład złoża w trakcie eksploatacji składowany był na dwóch zwałowiskach – wewnętrznym oraz zewnętrznym. W 2006 roku zakończone zostało formowanie zwałowiska zewnętrznego, stąd też nadkład kierowany jest aktualnie jedynie na zwałowisko wewnętrzne. W dalszych podrozdziałach szerzej opisany został proces technologiczny wydobywania węgla w Kopalni Węgla Brunatnego „Turów”.

1.1.2. Zwałowisko zewnętrzne

Zwałowisko to zajmuje obszar położony ok. 300 m na północny- wschód od krawędzi wyrobiska, jest jedną z największych tego typu form ziemnych w Polsce. Powierzchnia, jaką zajmuje to prawie 2 200 ha, przy względnej wysokości 245 m, co jest równoznaczne z osiągnięciem rzędnej 475 m n. p. m. Na tak powstałej formie zdeponowane zostało ok. 1 500 mln m³ nadkładu. Obecnie zwałowisko w 100 % zostało zrekultywowane, co zostało szerzej opisane w dalszych rozdziałach.

1.1.3. Zwałowisko wewnętrzne

Zamknięcie zwałowiska zewnętrznego zdecydował o konieczności utworzenia obszaru przeznaczonego pod składowanie nadkładu uzyskanego z dalszej eksploatacji złoża. Nowe zwałowisko zostało zlokalizowane wewnątrz wyeksploatowanej części wyrobiska, głównie zachodniej oraz północnej.

Zwałowisko wewnętrzne zajmuje powierzchnię 870 ha, na której zdeponowano około 262 mln m³ nadkładu. Planuje się, że będzie ono eksploatowane do czasu zakończenia pracy kopalni, czyli do 2043 roku, do tego czasu zezwałowane zostanie jeszcze blisko 1 500 mln m³ nadkładu. Miąższość gruntów zwałowych jest nierównomierna na obszarze całego zwałowiska, w północnych częściach może dochodzić nawet do 65 metrów. Jeśli zaś chodzi o materiał z jakiego jest ono zbudowane – stanowi on mieszaninę gruntów spoistych i niespoistych, głównie są to iły o różnej zawartości piasków i żwirów.

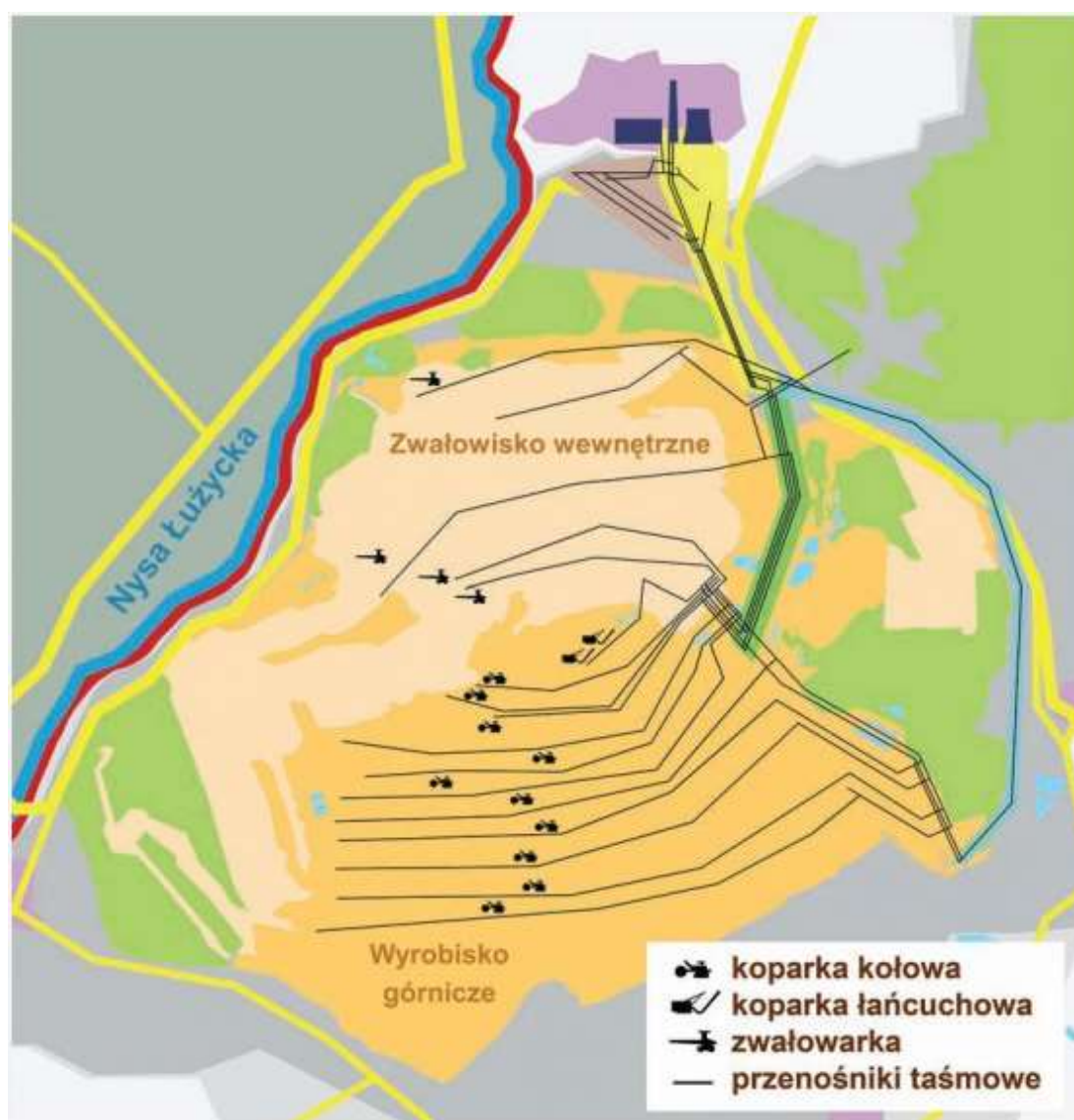
Planuje się, że obszar ten będzie eksploatowany, aż do osiągnięcia rzędnej równej 295 m n. p. m. Ocenia się pojemność zwałowiska północnego na 450 mln m³, w dalszym etapie eksploatacja obejmie także Pole Południowe.

1.2. Technologia wydobywania w KWB „Turów”²

Technologicznie wydobywanie złoża w kopalni oparte jest o działanie 12 wieloczerpakowych koparek oraz 4 zwałowarek połączonych ze sobą ponad 90 kilometrowymi przenośnikami taśmowymi. Obszary, w jakich pracują poszczególne urządzenia techniczne przedstawione są na Rysunku 3. Tak przygotowany ciąg technologiczny jest w stanie dostarczyć dziennie 32 tys. ton węgla do elektrowni.

Proces wydobywania węgla poprzedzony jest robotami przygotowawczymi, czyli pracami związanymi z zabezpieczeniem działań na terenie zarówno wyrobiska jak i zwałowiska. Obejmują one: budowę oraz przebudowę przenośników i elementów odwodnienia terenu, takich jak rowy, zbiorniki, osadniki czy pompownie. Sama eksploatacja złoża, jak już wspomniano, ma miejsce w Północnym i Południowym Polu Eksploatacyjnym. Na Polu Północnym od 2007 roku wydobywanie jest prowadzone głównie w obszarze przyuskokowym na poziomach +45, +25 oraz +5, obejmujących swoim zasięgiem zasoby II i I pokładu węgla.

² PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna SA. Kopalnia Węgla Brunatnego Turów. *Technologia górnicza – technologia eksploatacji*.



Rysunek 3. Proces technologiczny wydobycia węgla brunatnego w Kopalni „Turów”

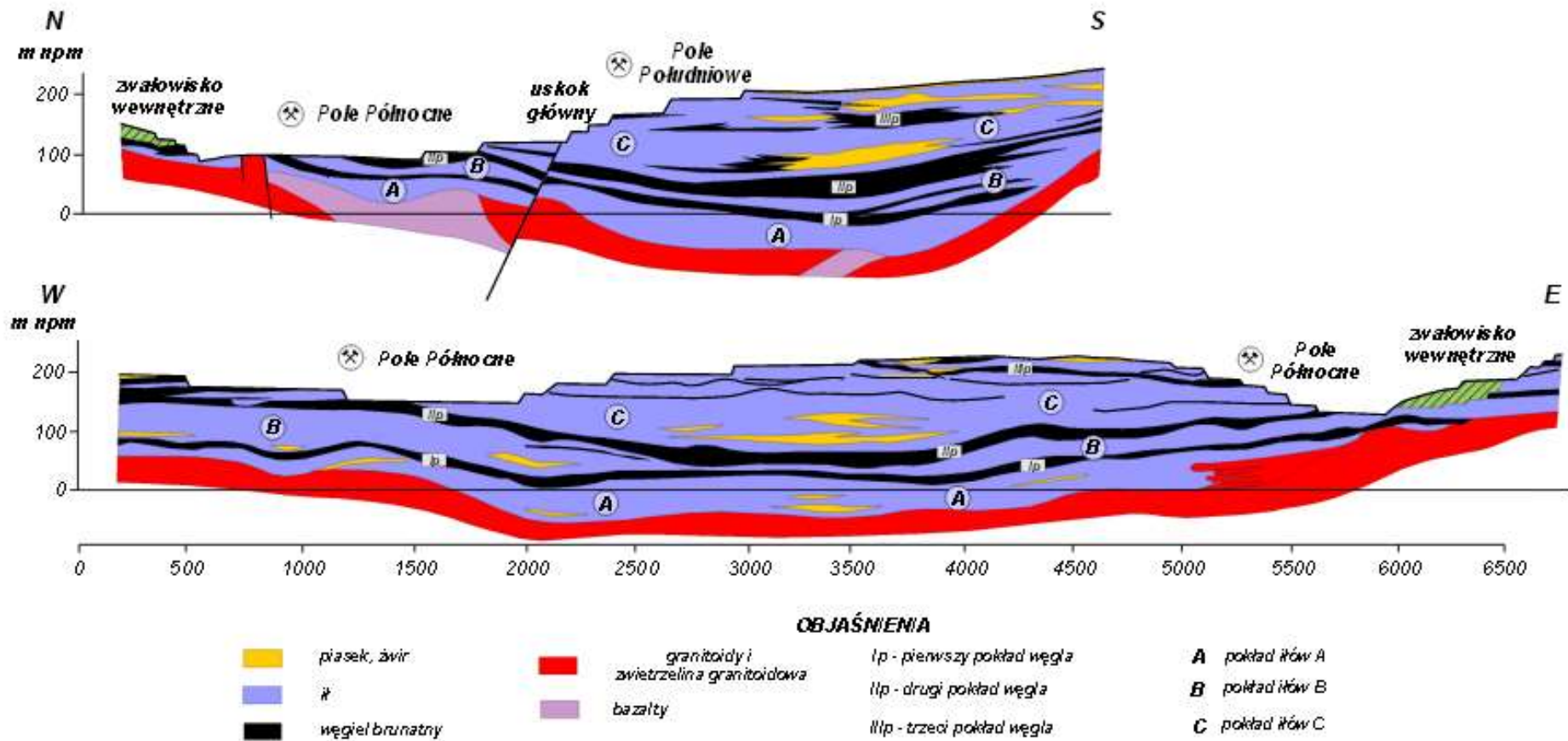
Źródło: <http://www.kwbturow.pgegiel.pl/index.php/technologia/technologia-gornicza/technologia-eksploatacji>.

1.2.1. Właściwości gruntów zwałowych³

Analiza zagadnień dotyczących właściwości gruntów zwałowych jest niesłychanie trudna ze względu na ich zróżnicowaną budowę wewnętrzną. W przypadku gruntów na terenie Kopalni Węgla Brunatnego „Turów” badania właściwości gruntu oparto o analizę 15 otworów badawczych, z czego trzy zlokalizowane były na terenie zwałowiska wewnętrznego, zaś pozostałe na zwałowisku zewnętrznym.

Zgodnie z przedstawionym schematem (Rysunek 4) przekroji geologicznych przez złożę węgla brunatnego „Turów” w wyrobisku obecne są trzy pokłady węgla.

³ Borecka A.: *Właściwości gruntów zwałowych z KWB „Turów” oraz próba ich oceny na podstawie sondowań statystycznych*.



Rysunek 4. Przekroje geologiczne przez złożę węgla brunatnego „Turów”.

Źródło: Borecka A.: Właściwości gruntów zwałowych z KWB „Turów” oraz próba ich oceny na podstawie sondowań statystycznych.

I z pokładów zbudowany jest z węgla ziemistego, w jego obrębie występują cienkie przerosty spągowe. Miąższość tej warstwy waha się od 0 do 35 m, osiągając maksymalną grubość w centralnych strefach wyrobiska. Pokład II, najliczniej reprezentowany posiada miąższość od 0 do 42 m w centralnych obszarach niecki. Występuje w postaci węgla ziemistych z licznymi przewarstwieniami ilastymi. Najpłycej położony pokład, który został już w dużym stopniu wyeksploatowany, zbudowany był z węgla ziemistych z niewielkimi przewarstwieniami węgla ksylicowych⁴.

Z analizy stratygrafii terenu wynika, że na Polu Południowym od strony południowej III pokład węgla położony jest na poziomie ok. 150 m n. p. m., zaś II i I leżą odpowiednio na głębokościach 100 – 50 m n. p. m. oraz 50 – 0 m n. p. m. Jeśli zaś chodzi o stratyografię złoże w kierunku wschodnio – zachodnim, pokład III zalega na głębokości ok. 200 m n. p. m., natomiast 100 m niżej położone są pokład II oraz I.

Całe złoże jest zbudowane z ilów. Zarówno w jednym, jak i drugim przekroju pomiędzy pokładem III i II znajdują się przerosty składające się z piasków i żwiru. Poniżej I pokładu zalegają granitoidy oraz zwietrzelina granitoidowa. Jedynie na Polu Północnym od strony północnej od głębokości ok. 30 m n. p. m. występują bazyalty.

Wnioskowanie na podstawie ułożenia warstw w złożu oraz licznie wykonane analizy wskazują na fakt, że 90 % gruntu zwałowego stanowią utwory o charakterze spoistym. Niewielki udział gruntów sypkich, głównie piasków i żwirów przejawia się w postaci nieregularnych przewarstwień, gniazd oraz soczew.

Wynik analizy wykonanej na potrzeby rozprawy doktorskiej [4] wskazuje na fakt, że skład gruntu w dużej mierze mógłby pomóc w realizacji koncepcji budowy elektrowni wodnej w miejscu aktualnego zwałowiska. Należy jednak pamiętać, że nie były to analizy wykonane pod kątem tworzenia zbiornika wodnego na szczycie zwałowiska wewnętrznego, zatem koniecznym byłoby uszczegółowienie i poszerzenie tych już obiecujących badań.

1.3. Rekultywacja terenów pokopalnianych KWB „Turów”

Jak już wspomniano w poprzednich podrozdziałach w marcu 2006 roku zakończono formowanie zwałowiska zewnętrznego oraz podjęto działania, mające na celu przywrócenie wartości terenu zdegradowanego. Początkowo podjęto się rekultywacji w kierunku rolnym, jednak nie znalazła ona uzasadnienia, gdyż koszt jej wprowadzania przekraczał wydajność

⁴ PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna SA. Kopalnia Węgla Brunatnego Turów. *Technologia górnicza – geologia złoże*.

plonów.⁵ Dlatego też zdecydowano się na podjęcie działań rekultywacyjnych w kierunku leśnym, które zostały zakończone w 2008 roku. Zabiegi te objęły wykonanie robót ziemnych, wybudowanie systemu hydrotechnicznego składającego się z 140 zbiorników-osadników, 190 tys. mb. rowów oraz 11 tys. mb. sprowadzeń, wykonania robót agrotechnicznych, a także wysadzenia blisko 20 mln drzew. W ten sposób zalesione zostało zwałowisko o miąższości 245 m i powierzchni 2 175 ha. W nasadzeniach przeważają drzewa liściaste, zaś domieszkę stanowią sadzonki drzew iglastych, takich jak sosna czarna i modrzew.

Efektom podjętych działań rekultywacyjnych jest przede wszystkim poprawa jakości podstawowych komponentów środowiska, takich jak powietrze atmosferyczne, wody oraz gleba. Na skutek zwiększania terenów zalesionych emisja niezorganizowana pyłu ze zwałowiska zmniejsza się, obecnie stężenie pyłu w rejonie zwałowiska zewnętrznego jest równa co do wielkości wartości tła dla terenów niezurbanizowanych. Ponadto powstały antropogeniczny kompleks leśny w znacznym stopniu podniósł lesistość uprzemysłowionego regionu. Mimo, że struktura wiekowa zalesień jest charakterystyczna dla młodych lasów, już teraz stanowi on ważny czynnik krajobrazowy oraz klimatyczny gminy Bogatynia.⁶

Powstały kompleks leśny stał się terenem rekreacyjnym, a w najbliższej przyszłości będzie również miejscem lokalizacji farmy wiatrowej jako alternatywnego źródła energii. W chwili obecnej trwają przygotowania inwestycji w zakresie dokumentacji związanej z uzyskaniem decyzji oddziaływania przedsięwzięcia na środowisko, opracowania raportów przyrodniczych, uzgodnień branżowych, opracowań technicznych oraz geodezyjnych. Planowane jest zainstalowanie 100 wiatraków o łącznej mocy 200 MW.⁷

Nie są to jedyne planowane działania rekultywacyjne, eksploatowana aktualnie część wyrobiska także została objęta planem rekultywacji. Zgodnie z nim około 2045 roku na terenie odkrywki powstanie zbiornik wodny o powierzchni 1 700 ha oraz pojemności około 1,2 mld m³ wody.⁸ Położenie rezerwuaru obrazuje Rysunek 5. Proponowany zbiornik byłby wykorzystywany do celów retencyjnych, a więc magazynowania wody na potrzeby gospodarcze, retencjonowania fal powodziowych, a także rekreacji i gospodarki rybackiej. Koncepcja utworzenia tego obiektu jest zachęcająca, jednakże nie wyczerpuje ona możliwości, jakie niesie za sobą to przedsięwzięcie. Dlatego też w niniejszej pracy podjęto

⁵ Nietrzeba – Marcinonis J.: *Rekultywacja biologiczna gruntów pogórnich w PGE KWB Turów S.A.*

⁶ Nietrzeba – Marcinonis J.: *Rekultywacja leśna gruntów pogórnich w PGE KWB Turów S.A.*

⁷ PGE Energia Odnawialna S. A. *PGE Energia Odnawialna zbuduje farmę wiatrową na zwałowisku KWB Turów.*

⁸ Kasztelewicz Z., Kozioł K., Klich J.: *Rekultywacja terenów poeksploatacyjnych w kopalniach węgla brunatnego w Polsce.*

próbę oceny potencjału energetycznego, jaki można uzyskać na terenie zmienionym w wyniku działalności górniczej, przy udziale projektowanego zbiornika wodnego.



Rysunek 5. Planowane kierunki rekultywacji terenów pogórnich KWB „Turów”

Źródło: Kasztelewicz Z., Kozioł K., Klich J.: Rekultywacja terenów poeksploatacyjnych w kopalniach węgla brunatnego w Polsce.

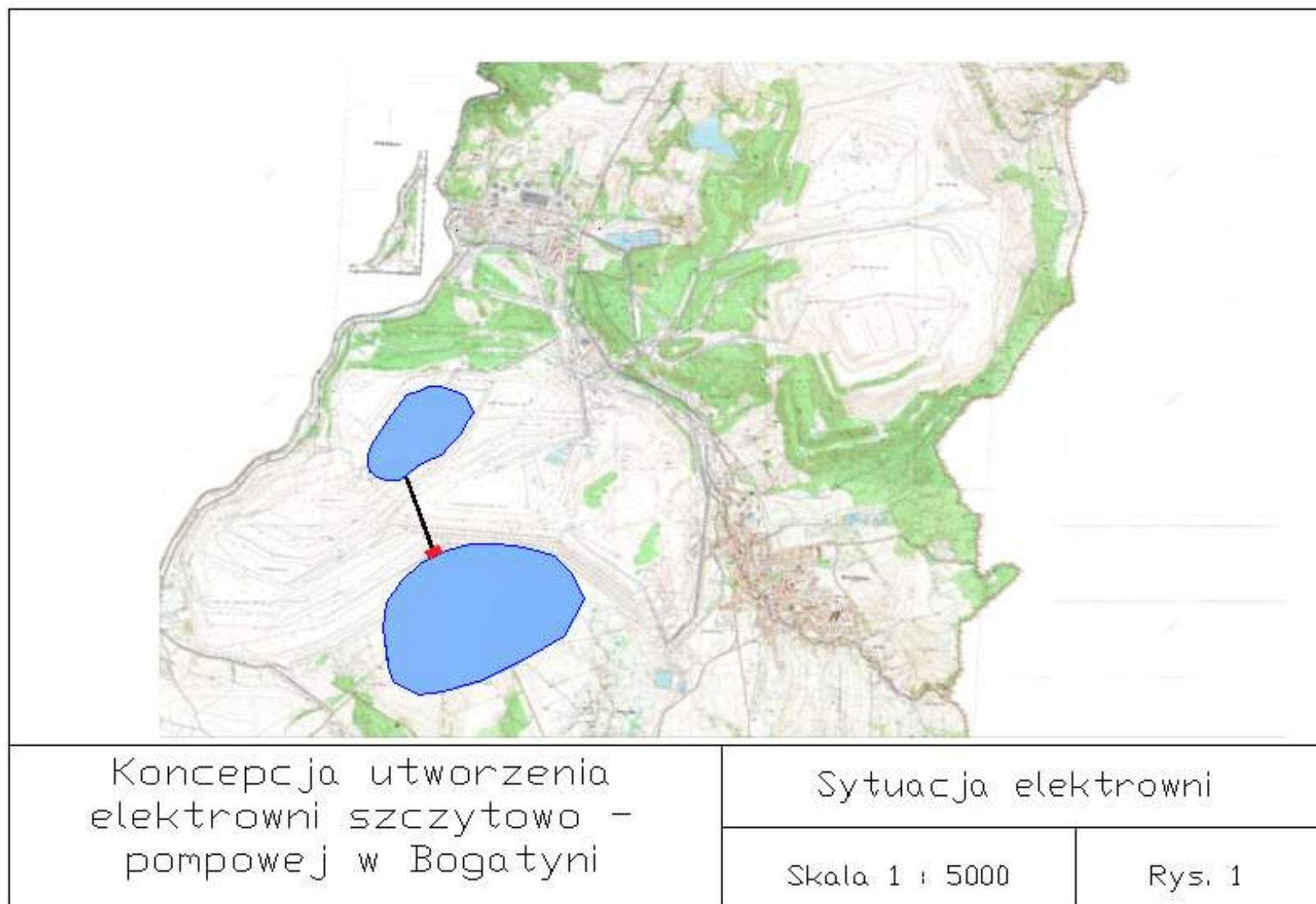
2. Teren i metodyka badań

Konwencjonalne źródła energii niosą ze sobą liczne uciążliwości, dlatego też korzystnym jest rozważenie innych możliwości, takich jak wykorzystanie energii wody. W tej dziedzinie przedmiot zainteresowania nadal stanowi energetyka wód śródlądowych, jest to efekt powszechności jej występowania, wielkość zasobów oraz stopnia rozwoju metod wykorzystania.

W przypadku nakreślonej sytuacji wyrobiska węgla brunatnego w Bogatyni, uwzględniając dalsze plany utworzenia zbiornika wodnego oczywista wydaje się być koncepcja gospodarczego wykorzystania owego obszaru. Konfiguracja terenu pokopalnianego umożliwiłaby utworzenie elektrowni szczytowo – pompowej o rozmiarach mających znaczenie dla wielkości i kosztów produkcji energii.

Rysunek 6 nakreśla analizowaną sytuację. Na mapie oznaczone zostały: zbiornik górny o powierzchni zwierciadła równej $5,5 \text{ km}^2$ oraz rezerwuar dolny, którego lustro wody zajmuje obszar 17 km^2 . Wrysowane na mapę zbiorniki połączone zostały derywacją o długości 1 200 m. W północno – zachodniej części zbiornika dolnego zaproponowano także posadowienie elektrowni. Podjęta analiza zakłada utworzenie sztucznego zbiornika górnego poprzez wykonanie wykopów oraz formowanie zwałowiska wewnętrznego już na etapie jego eksploatacji. W planowanej koncepcji rezerwuar dolny powstałby w oparciu o planowany zbiornik rekreacyjny w miejscu aktualnej odkrywki.

W kwestii kompozycji ogólnej elektrowni ciężko zaproponować jednoznaczne rozwiązanie na etapie analizy mającej na celu jedynie przedstawienie możliwości oraz idei. Każde z rozwiązań konstrukcyjnych powinno być dopasowane do indywidualnego przypadku, uwzględniając warunki ekonomiczne. Wpływ na wybór kompozycji zależeć będzie także od etapu eksploatacji złoża, na którym wprowadzana byłaby koncepcja budowy elektrowni. Część rozwiązań konstrukcyjnych, jak na przykład zastosowanie zespołów odwracalnych wymagałoby głębszego posadowienia budynku elektrowni, celem zatopienia wirnika turbiny odwracalnej. Ponadto można poddać rozważaniu dodatkowo elektrownię wyposażoną w oddzielne zespoły pompowe i turbinowe, czy też układy wyposażone w zespoły trójmaszynowe w układzie poziomym.



Rysunek 6. Ogólna sytuacja położenia zbiorników, derywacji oraz elektrowni
 Źródło: Opracowanie własne.

Bez względu na zastosowane w elektrowni zespoły, w przypadku tego typu przedsięwzięć o wielkości zasobów energetycznych, jakie można uzyskać decyduje w większości przemiana energii potencjalnej (1). Właśnie w taki sposób szacowano potencjał energetyczny poszczególnych konfiguracji zbiorników.

$$E = \frac{mgh}{3600000} \quad (1)$$

E – energia elektryczna [kWh]

m – masa wody w zbiorniku górnym [kg]

g – przyspieszenie ziemskie; 9,81 m/s²

h – różnica wysokości pomiędzy średnią rzędną wody w zbiorniku górnym oraz zwierciadła w zbiorniku dolnym [m]

Następnie celem określenia możliwej do uzyskania mocy elektrowni (2) uwzględniano sprawność elektrowni, na którą oczywiście składa się sprawność poszczególnych elementów:

$$P = E \cdot \eta_e \quad (2)$$

P – potencjalna moc możliwa do uzyskania w elektrowni [kWh]

E – energia elektryczna [kWh]

η_e – sprawność elektrowni; przyjęta w tym przypadku na poziomie 0,9.

Posługując się powyższym schematem rozważono kilka koncepcji utworzenia wspomnianej elektrowni szczytowo – pompowej.

2.1. Wariant I

Pierwszy z analizowanych wariantów oparty został o utworzenie zbiornika górnego o głębokości 25 m i rzędnej zwierciadła wody równej 290 m n. p. m., która zgodnie z aktualnym planem nie przekracza maksymalnej rzędnej 295 m n. p. m., jaką osiągnąć ma zwałowisko wewnętrzne. Tak utworzony zbiornik miałby objętość równą 112 mln m³. Jako, że w północno – zachodniej części zwałowiska utworzona jest już ściana boczna planowanego zbiornika, przy realizacji tego wariantu konieczne byłoby jedynie utworzenie ściany południowo – wschodniej, która będzie jednocześnie graniczyła z zbiornikiem dolnym. Prace te podjęte już na etapie wydobywania aktualnego na wyrobisku południowym znacznie zmniejszą koszty utworzenia zbiornika.

Koncepcja ta uwzględnia także zmiany w zbiorniku dolnym, zgodnie z analizą pokładów złoża węgla brunatnego poziom I w północnej części wyrobiska położony jest na głębokości 0 m n. p. m. Po planowanej eksploatacji złoża, uwzględniając dodatkowo uszczelnienie dna, bądź jego niewielkie wypłyconie balastem uzyskanym z eksploatacji utworzony zostanie zbiornik o rzędnej dna równej 25 m n. p. m. Przyjęta głębokość tego rezerwuaru to 100 m, w rezultacie uzyskujemy rzędną zwierciadła na poziomie 125 m n. p. m. oraz powierzchni równej $5,5 \text{ km}^2$. Dodatkowo, aby dolny zbiornik spełniał pierwotne założenia związane z jego utworzeniem, konieczne byłoby aby skarpa od strony wschodniej została wypłycona z możliwością adaptacji dla celów rekreacyjnych. Zbiornik wodny w dolnej części wyrobiska posiadałby objętość 350 mln m^3 (Rysunek 7).

Określając energię potencjalną rezerwuaru górnego przyjęto jako różnicę wysokości różnicę średniego położenia zwierciadła wody w zbiorniku górnym oraz zbiorniku dolnym. W tym wypadku różnica ta to 152,5 m. Zatem energia potencjalna zbiornika to: $100,5 \cdot 10^{12} \text{ J}$ czyli około $27,9 \cdot 10^6 \text{ kWh}$.

Zakładając dodatkowo sprawność elektrowni na poziomie 90% otrzymujemy potencjał energetyczny rzędu $25,1 \cdot 10^3 \text{ MWh}$. Przy założonej zainstalowanej mocy elektrowni równej 1000 MW uzyskujemy to w czasie około 25 h pracy zespołów.

2.2. Wariant II

W wariantcie drugim, górny zbiornik zaprojektowany został w ten sam sposób, co w poprzedniej koncepcji, podstawową różnicą są natomiast zmiany wprowadzone w budowie zbiornika dolnego. W tym wypadku pozostałby on zgodny w stosunku do rezerwuaru rekreacyjnego, planowanego jako działanie rekultywacyjne po zakończeniu działalności kopalni.

Zgodnie z tym planem obszar powstały w wyniku działalności górniczej zostanie wypłycony do rzędnej 120 m n. p. m. Zbiornik rekreacyjny osiągnie głębokość 105 m, zatem zwierciadło wody uzyska rzędną 225 m n. p. m. oraz powierzchnię 17 km^2 . Do napełnienia powstałego zbiornika potrzebne będzie $1 220 \text{ mln m}^3$ wody.

W ten sposób konfiguracja zbiorników powoduje, że różnica poziomów, jaka została użyta do określenia możliwości produkcyjnych zbiorników to jedynie 52,5 m (Rysunek 8). Potencjał energetyczny określony w przedstawionej sytuacji to $8,7 \cdot 10^6 \text{ kWh}$, przekładających się na 8,6 h pracy turbinowej.

Wariant ten nie ingeruje w żaden sposób w plany dotyczące utworzenia zbiornika rekreacyjnego. Ponadto podjęcie działań w kierunku produkcji energii elektrycznej nie kolidowałyby z rekreacyjnymi aspektami zbiornika, gdyż elektrownia usytuowana zostałaby w północno – zachodniej części wyrobiska, zaś obszar rekreacyjny na wschodniej części, gdzie brzegi zbiornika zostałyby odpowiednio dostosowane poprzez zmniejszenie nachylenia brzegów zbiornika oraz ich umocnienia w związku z niewielkimi wahaniami poziomów wody w wyniku jej przepompowywania między rezerwuarami.

2.3. Wariant III

W poprzednich wariantach rozważono jakie możliwości niosłaby za sobą elektrownia skonstruowana na bazie istniejącej elektrowni węgla brunatnego gdyby utworzono niewielki zbiornik wodny na zwałowisku zewnętrznym. Analiza składu gruntów zwałowych przedstawiona przez A. Borecką w studium „Właściwości gruntów zwałowych z KWB „Turów”⁹ oraz próba ich oceny na podstawie sondowań statycznych” nie ocenia jednoznacznie stateczności skarp, jest jedynie podstawą do podjęcia dalszych analiz. Jednak wynika z niej także, że nie ma podstaw do wykluczenia możliwości utworzenia większego zbiornika w miejscu zwałowiska wewnętrznego.

Dlatego też w III oraz IV wariantach rozpatrzono przypadki, dla których zaplanowano utworzenie górnego zbiornika o głębokości 45 m. Zwierciadło wody nadal pozostaje na 290 m n. p. m. W takim przypadku, podobnie jak w poprzednim wariantach ujęcie wody umieszczono na głębokości 5 m powyżej dna zbiornika. Również niezmienną pozostaje odległość pomiędzy zbiornikami, równa 1 200 m. W wyniku zabiegu, jakim było powiększenie projektowanego zbiornika górnego, uzyskano rezerwuuar o pojemności 245 mln m³.

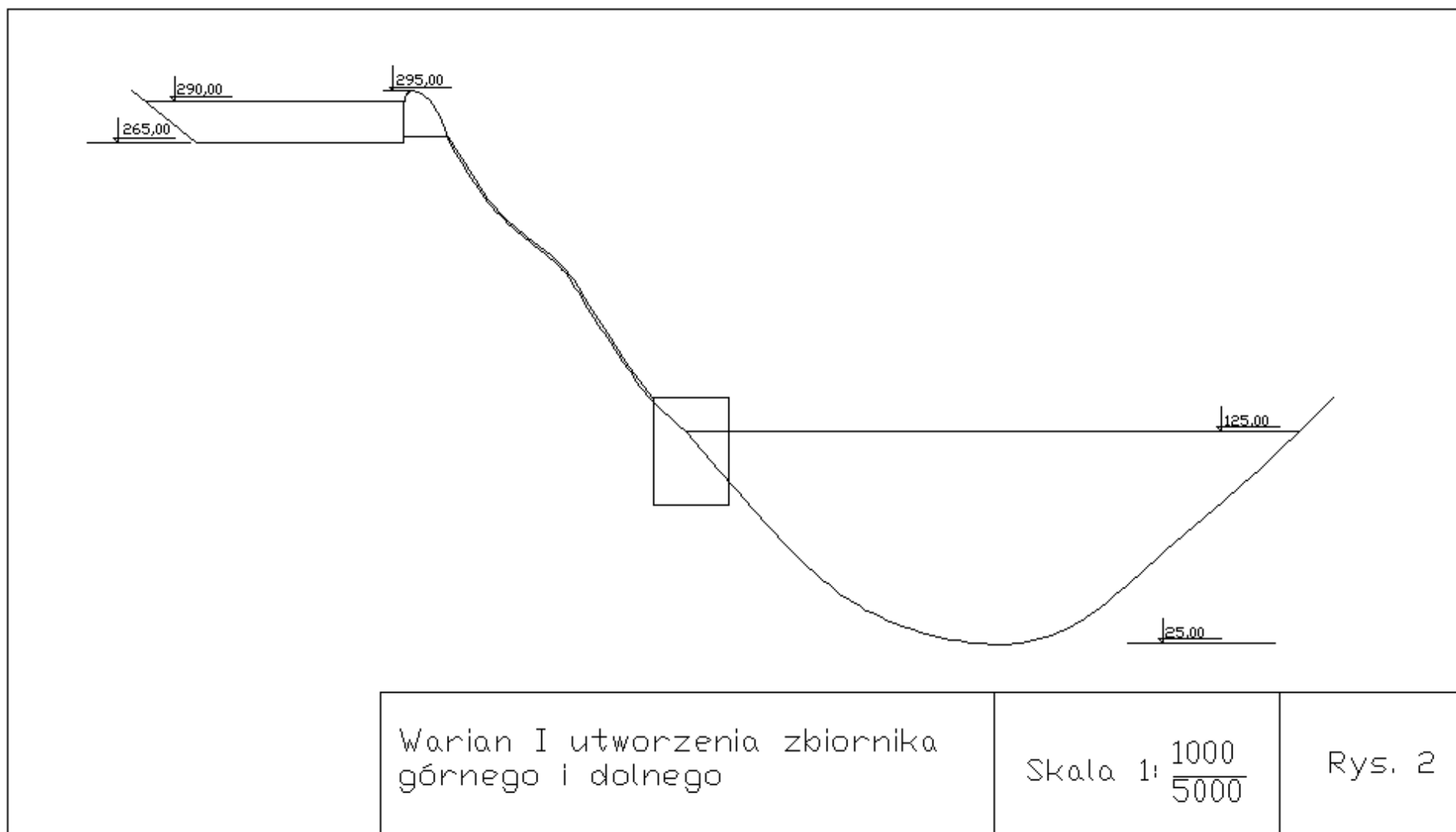
W koncepcji tej zbiornik dolny jest zgodny co do konstrukcji z planowanym zbiornikiem rekreacyjnym.

Tak dobrane parametry zbiorników oraz ich wzajemna konfiguracja dają możliwość uzyskania potencjału energetycznego równego blisko $15,3 \cdot 10^3$ MWh.

⁹ Borecka A.: *Właściwości gruntów zwałowych z KWB „Turów” oraz próba ich oceny na podstawie sondowań statycznych*.

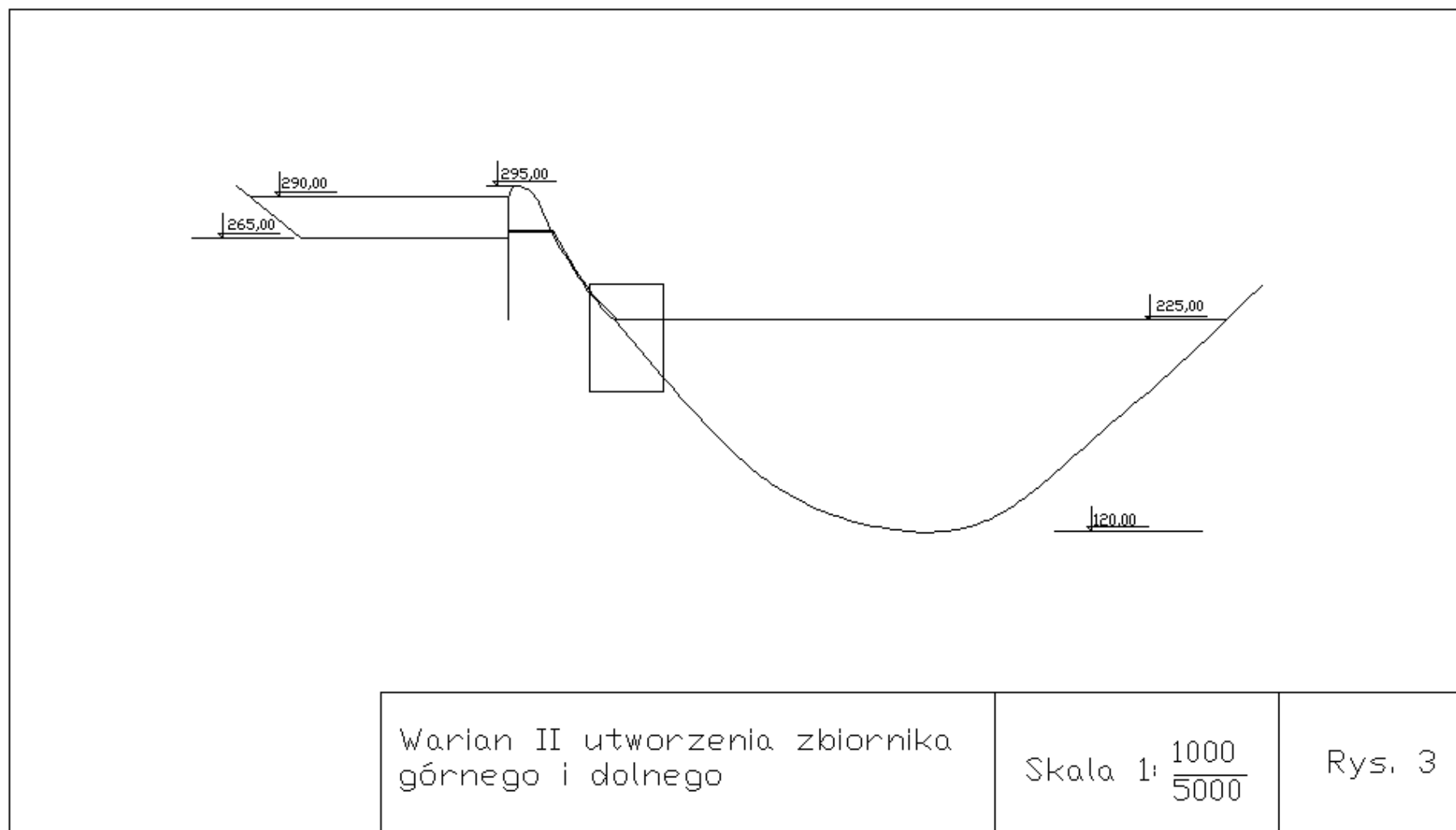
2.4. Wariant IV

Jest analogicznym wariantem do poprzednich – górny zbiornik utworzony został zgodnie z wariantem III, a zatem jego głębokość została powiększona o 20 m, zaś dolny zbiornik jest zgodny z pierwszą przedstawioną koncepcją. Co oznacza, że głębokość zbiornika nie zostałaby wypłycona, dno osiągnęłoby rzędną 25 m n. p. m. oraz głębokość równą 100 m. W takim wariantcie możliwy do uzyskania potencjał energetyczny jest rzędu $51,4 \cdot 10^3$ MWh.



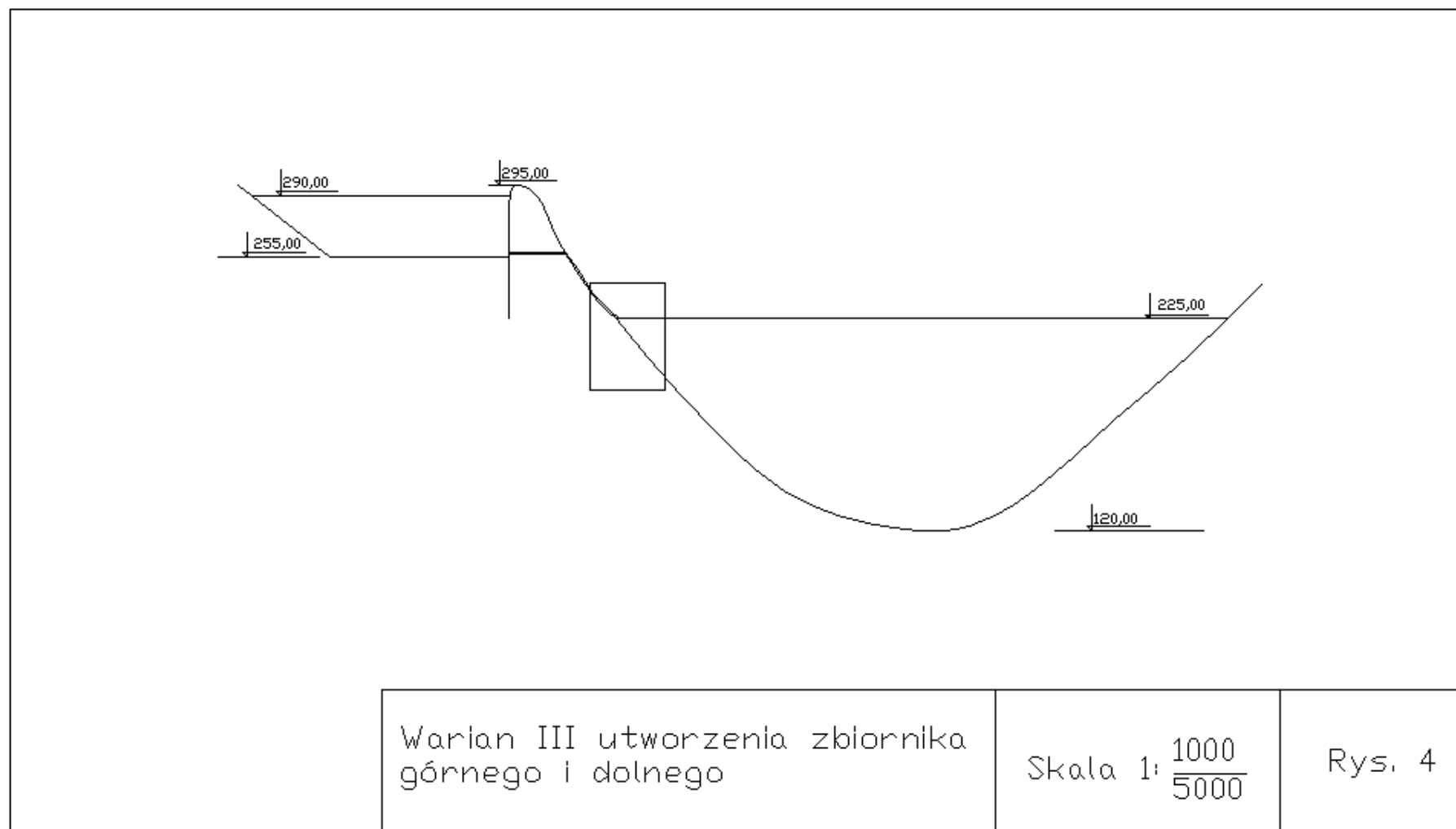
Rysunek 7. Wariant I konfiguracji zbiornika dolnego i górnego projektowanej elektrowni szczytowo - pompowej

Źródło: Opracowanie własne.



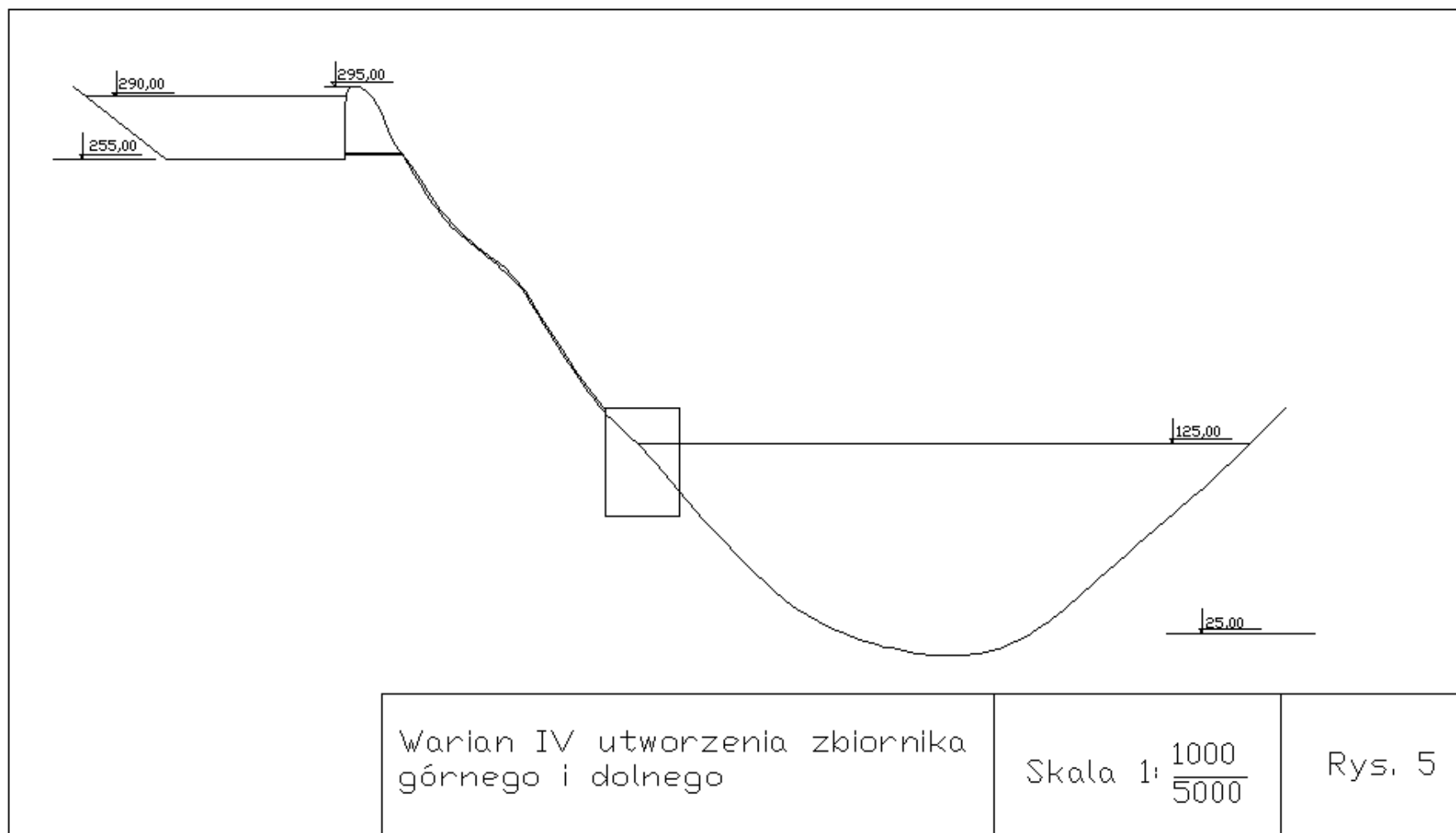
Rysunek 8. wariant II konfiguracji zbiorników w koncepcji elektrowni wodnej w Bogatyni

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 9. Wariant III konfiguracji zbiorników wodnych w koncepcji utworzenia elektrowni wodnej w miejscu Kopalni Węgla Brunatnego „Turów”

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 10. Wariant IV konfiguracji zbiorników wodnych w koncepcji utworzenia elektrowni wodnej w miejscu Kopalni Węgla Brunatnego „Turów”

Źródło: opracowanie własne.

3. Wyniki badań i dyskusja

3.1. Otrzymane wyniki.

Tabela 1. Parametry zbiorników dla poszczególnych wariantów utworzenia elektrowni wodnej w KWB „Turów”

	Zbiornik górny				Zbiornik dolny			
	Rzędna dna	Rzędna zwierciadła	Głębokość [m]	Pojemność [mln m ³]	Rzędna dna	Rzędna zwierciadła	Głębokość [m]	Pojemność [mln m ³]
Wariant I	265	290	25	112	25	125	100	350
Wariant II	265	290	25	112	120	225	105	1220
Wariant III	245	290	45	245	120	225	105	1220
Wariant IV	245	290	45	245	25	125	100	350

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 2. Potencjał energetyczny poszczególnych wariantów utworzenia elektrowni wodnej w KWB „Turów”

	Różnica wysokości [m]	Energia potencjalna górnego zbiornika [J]	Energia górnego zbiornika [kWh]	Energia pomniejszona o sprawność elektrowni [kWh]	Energia pomniejszona o sprawność elektrowni [GWh]	Ilość godzin pracy [h]
Wariant I	152.5	1.00533E+14	27925800	25133220	25.13322	25.13322
Wariant II	52.5	3.46097E+13	9613800	8652420	8.65242	8.65242
Wariant III	42.5	6.1288E+13	17024438	15321993.75	15.32199	15.32199
Wariant IV	142.5	2.05495E+14	57081938	51373743.75	51.37374	51.37374

Źródło: Opracowanie własne

Zgodnie z obliczeniami przedstawionymi w Tabeli 2. najmniejszym potencjałem energetycznym charakteryzuje się wariant II, gdzie możliwa do uzyskania moc jest rzędu $8,7 \cdot 10^6$ kWh. Produkcja takiej ilości energii wymagałaby 8,5 h pracy turbinowej przy zainstalowanej mocy 1000 MW. Znacznie korzystniej prezentuje się wariant IV, gdzie maksymalnie powiększone zostały obydwa zbiorniki, w wyniku czego ich potencjał energetyczny wzrósł do $51,4 \cdot 10^3$ MWh.

Niestety, pomimo dużego zaangażowania właścicieli kopalni w ochronę środowiska, nie została do tej pory rozważona koncepcja zagospodarowania w ten sposób obszaru odkrywki. Jednakże dla porównania zestawiono wartości obliczone dla proponowanej elektrowni z parametrami największej elektrowni szczytowo – pompowej w Polsce. Sztucznie utworzony zbiornik górny rzecznej elektrowni ma pojemność 13,6 mln m³, co pozwala na akumulację 3 600 000 kWh. W elektrowni zainstalowane są 4 hydrozespoły odwracalne o nominalnej mocy 179 MW w systemie pracy generatorowej, a także 210 MW w systemie pracy pompowej. Szacuje się, że elektrownia w Żarnowcu pracuje 18 000 h rocznie.

Elektrownia utworzona w miejscu aktualnej Kopalni Węgla Brunatnego „Turów” byłaby konstrukcyjnie zbliżona do powyżej opisanej, jednakże nawet uwzględniając wariant najmniej optymistyczny, byłaby ona w stanie dostarczyć 2,5 razy więcej energii elektrycznej, pracując w zbliżonej liczbie godzin rocznie. W przypadku analizy wariantu IV moc możliwa do uzyskania może być nawet 10 razy większa niż w przypadku elektrowni wodnej w Żarnowcu. Należy jednak pamiętać, że wartości te mogłyby ulec zmianie w związku z doborem urządzeń realizowanych w elektrowni oraz parametrów korygujących, które w przypadku wykonanej analizy były jedynie przybliżeniami.

Wszystkie przytoczone koncepcje jednoznacznie pokazują, że budowa elektrowni w miejscu obecnego wyrobiska węgla brunatnego „Turów” niesie za sobą korzyści ekonomiczne oraz energetyczne. Należy jednak pamiętać, że praca opiera się na koncepcji, nie proponuje doboru poszczególnych elementów elektrowni. Jest jedynie pracą poglądową, która przedstawiać ma ideę oraz możliwości, nie zaś rozwiązania techniczne, do których konieczne byłoby m. in. ciągłe badanie zmian związanych z eksploatacją złoża czy też wykonanie kierunkowych badań geologicznych.

4. Wnioski

Analiza była próbą postawienia naprzeciw: problematyki zapotrzebowania na energię elektryczną, możliwości zaspokajania tej potrzeby poprzez działalność górnictwem, pogórnictwem

rekultywacji terenu zdegradowanego oraz problemu wyczerpywania się źródeł energii, jakim są kopalnie. Zgodnie z koncepcją wszystkie te zagadnienia mogą wzajemnie się uzupełniać, a dowód tego przedstawiony został w niniejszej pracy. Bowiem utworzenie elektrowni szczytowo – pompowej w miejscu Kopalni Węgla Brunatnego „Turów” spowodowałoby powstanie zastępczego źródła energii w miejscu złoża węgla, które zostanie wyczerpane w 2043 roku. W związku z czym deficyt energetyczny, jaki odczuwałoby społeczeństwo, zostanie uzupełniony przez energię produkowaną w elektrowni wodnej.

Oczywiście możliwe jest budowanie elektrowni wodnych w innych miejscach, jednak zawsze wiąże się to z budową obiektów hydrotechnicznych, które znacznie ingerują w naturalne siedliska, zaburzają istniejące stosunki wodne, a także powodują zmiany w krajobrazie. Dlatego też dodatkowym aspektem przemawiającym za wdrażaniem tego typu idei jest fakt, że elektrownia została wybudowana na obszarze poddanym wieloletniej działalności górniczej, nie spowodowałaby zatem zniszczeń w środowisku naturalnym.

Podsumowując:

1. W pracy przeanalizowana została sytuacja Kopalni „Turów”, gdzie metodą odkrywkową wydobywany jest węgiel brunatny. Szacuje się wielkość złoża na 318 mln ton kruszcu, co pozwoli na eksploatację kopalni do 2043 roku. Aktualnie obszar, na którym zakończono eksploatację poddany został rekultywacji leśnej, planuje się, że pozostała część wyrobiska zostanie przekształcona w rekreacyjny zbiornik wodny. Jednakże konfiguracja terenu, powstała na skutek działalności kopalni, zapewnia warunki do utworzenia obiektów o wysokim potencjale energetycznym, nie wykluczając przy tym rekreacyjnego aspektu.
2. Statystyki prowadzone przez Główny Urząd Statystyczny wykazują, że województwo dolnośląskie charakteryzuje się jednym z najwyższych wskaźników zużycia energii elektrycznej w Polsce. Średnie zużycie w poprzednich latach w tym regionie wynosi 600 kWh/os/rok, czyli ok. 1 800 MWh rocznie w skali województwa. Biorąc pod uwagę duże zapotrzebowanie na energię elektryczną rejonu konieczne jest poszukiwanie źródeł energii zapewniających możliwość łagodzenia krzywej dobowego obciążenia systemu elektroenergetycznego. Rozwiązaniem tej kwestii może być proponowana koncepcja utworzenia elektrowni wodnej w Bogatyni.

3. Analiza wykazała możliwość budowy elektrowni szczytowo – pompowej o mocy równej 1000 MW w miejscu aktualnego wyrobiska węgla brunatnego „Turów”. W wersji utworzenia zbiorników minimalizując nakłady finansowe na ich realizację potencjał energetyczny, jaki jest możliwy do osiągnięcia jest rzędu $8,7 \cdot 10^6$ kWh. Zaś koncepcja najkorzystniejsza skutkuje wzrostem potencjału do $51,4 \cdot 10^3$ MWh.
4. Zgodnie z przyjętymi założeniami elektrownia zaprojektowana zgodnie z wariantem II byłaby w stanie wyprodukować 2,5 razy więcej energii, niż największa elektrownia szczytowo – pompowa w Polsce.
5. Analiza gruntów zwałowych wskazuje na znaczny udział utworów spoistych, co nie wyklucza możliwości utworzenia zbiornika wodnego na szczycie zwałowiska wewnętrznego. Jednakże jest to jedynie teoria, która musiałaby zostać poparta kierunkowymi analizami pod kątem wytrzymałości formy w kontekście utworzenia rezerwuaru oraz wzmocnienia jego brzegów przez utwory nadkładowe wydobyte w trakcie eksploatacji.
6. Zlokalizowanie nowej elektrowni szczytowo – pompowej zawsze wiąże się z licznymi trudnościami, jest to spowodowane głównie warunkami terenowymi (możliwościami magazynowania wody, czy uzyskania wysokich spadów), a także kontrowersjami w związku z nieuniknioną ingerencją w środowisko naturalne. W przypadku proponowanej koncepcji rozwiązano większość z tych problemów.
7. Ponadto elektrownie szczytowo – pompowe są doskonałym akumulatorem energii, który w racjonalny sposób może łagodzić krzywe zużycia energii w szczytach poprzez uzupełniania zapotrzebowania w okresach największego zużycia.
8. Koncepcja utworzenia elektrowni nie koliduje z planami utworzeniem obszarów rekreacyjnych, wymagałaby jedynie niewielkiego dostosowania (złagodzenie wschodniego brzegu oraz jego umocnienie) zbiornika dolnego dla celów rekreacyjnych. Dodatkowo rezerwuar nadal mógłby pełnić funkcję retencyjną oraz przechwytywać wodę powodziową, a także spełniać funkcje dla rybołówstwa.

Literatura:

1. Łaski A.: *Elektrownie wodne. Rozwiązania i dobór parametrów*. Wyd. N – T, Warszawa, 1971.
2. Ostrenga A., Uberman R.: *Kierunki rekultywacji i zagospodarowania – sposób wyboru, klasyfikacja i przykłady*. „Górnictwo i Geoinżynieria” 2010, nr 34/4, s. 445 – 461.
Dostępne także online:
http://journals.bg.agh.edu.pl/GORNICTWO/2010-04/GG_2010_4_33.pdf
3. Kasztelewicz Z., Sypniewski S.: *Rekultywacja w polskim górnictwie odkrywkowym węgla brunatnego*. „Górnictwo i Geoinżynieria” 2010, nr 34/4, s. 289 – 304.
Dostępne także online:
http://journals.bg.agh.edu.pl/GORNICTWO/2010-04/GG_2010_4_21.pdf
4. PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna SA. Kopalnia Węgla Brunatnego Turów. *Technologia górnicza – technologia eksploatacji*. Dostępne online:
<http://www.kwbturow.pgegiek.pl/index.php/technologia/technologia-gornicza/technologia-eksploatacji>
5. Borecka A.: *Właściwości gruntów zwalowych z KWB „Turów” oraz próba ich oceny na podstawie sondowań statystycznych*. Rozprawa doktorska. Kraków, 2006.
6. PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna SA. Kopalnia Węgla Brunatnego Turów. *Technologia górnicza – geologia złoża*.
<http://www.kwbturow.pgegiek.pl/index.php/technologia/technologia-gornicza/geologia>
7. Nietrzeba – Marcinonis J.: *Rekultywacja biologiczna gruntów pogórnicznych w PGE KWB Turów S.A.* „Górnictwo i Geoinżynieria” 2010, nr 34/4, s. 435 – 443.
Dostępne także online:
http://journals.bg.agh.edu.pl/GORNICTWO/2010-04/GG_2010_4_32.pdf
8. Nietrzeba – Marcinonis J.: *Rekultywacja leśna gruntów pogórnicznych w PGE KWB Turów S.A.* „Węgiel Brunatny” 2009, nr 3/68.
Dostępny także online: <http://www.ppwb.org.pl/wb/68/7.php>
9. PGE Energia Odnawialna S. A. *PGE Energia Odnawialna zbuduje farmę wiatrową na zwalowisku KWB Turów*. <http://www.pgeeo.pl/aktualnosci/pge-energia-odnawialna-zbuduje-farme-wiatrowa-na-zwalowisku-kwb-turow>
10. Kasztelewicz Z., Kozioł K., Klich J.: *Rekultywacja terenów poeksploatacyjnych w kopalniach węgla brunatnego w Polsce*. „Górnictwo i Geoinżynieria” 2007,

nr 31/2, s. 295 – 307. Dostępne także online:
http://journals.bg.agh.edu.pl/GORNICTWO/2007-02/GG_2007_2_24.pdf

11. Milkowski D.: *Warunki końcowego formowania najwyższych pięter zwałowiska BOT KWB Turów SA*. „Węgiel Brunatny” 2006, nr 2/55. Dostępny także online:
<http://www.ppwb.org.pl/wb/55/10.php>
12. Uberman R., Kaczarewski T.: *Analiza możliwości rekultywacji i zagospodarowania terenów pogórnich w KWB "Turów" S.A.* „Węgiel Brunatny” 2005, nr 1/50. Dostępny także online: <http://www.ppwb.org.pl/wb/50/10.php>

mgr inż. Justyna Siergiejuk¹
Politechnika Białostocka, Katedra Ciepłownictwa
Wiejska 45E, 15-351 Białystok
e-mail: ¹j.siergiejuk@gmail.com

Ogrzewanie w Polsce – koszty inwestycyjne i eksploatacyjne oraz ich wpływ na środowisko

Słowa klucze: *pompy ciepła, groszek energetyczny, emisja dwutlenku węgla, TEWI*

Streszczenie: Przy wyborze sposobu ogrzewania budynków mieszkalnych oraz przygotowania ciepłej wody najczęściej decydują koszty inwestycyjne i eksploatacyjne. Coraz częściej zwraca się także uwagę na względy ekologiczne. W związku z tym, w pracy skupiono się na emisji dwutlenku węgla w wyniku ogrzewania budynków. Analizy dokonano na podstawie budynku mieszkalnego jednorodzinnego w Zaściankach. W obliczeniach porównano dwa różne rodzaje źródeł ciepła: wciąż popularny w Polsce kocioł na groszek energetyczny oraz popularną pod względem proekologicznym pompę ciepła z sodami gruntowymi. W pracy został policzony wskaźnik TEWI. Pozwolił on na porównanie obu źródeł zasilania w ciepło pod względem emisji dwutlenku węgla w przyjętym okresie użytkowania równym 100 lat. Jak wynika z obliczeń stosowanie kotła na groszek energetyczny przyczynia się do większej emisji dwutlenku węgla w porównaniu z pompą ciepła. W związku ze wspomnianym wcześniej faktem kierowania się użytkownikami, przy wyborze źródła ciepła, aspektami ekonomicznymi, w artykule dokonano także analizy kosztów inwestycyjnych i rocznych kosztów eksploatacyjnych obu rozpatrywanych źródeł zasilania w ciepło. Pozwoliło to na wybór źródła bardziej opłacalnego pod względem ekonomicznym. W tym przypadku tańszym rozwiązaniem okazała się inwestycja z kotłem na groszek energetyczny.

1. Wstęp

Przy rozpoczęciu większości inwestycji budowlanych zawsze należy rozwiązać kwestię ogrzewania danego budynku. Możliwości jest wiele. Podczas wyboru sposobu zasilania budynków w ciepło oraz rodzaju paliwa można kierować się różnymi aspektami. Najczęściej zwraca się uwagę na to, by inwestycja była opłacalna ekonomicznie. O wyborze paliwa decyduje przede wszystkim jego dostępność (szczególnie w przypadku gazu ziemnego), łatwość dostaw, a także oczywiście cena. Coraz częściej zwraca się również uwagę na wygodę obsługi urządzenia oraz sposób podawania do niego paliwa. Im bardziej zautomatyzowany jest ten system tym komfort i wygoda obsługi są wyższe. W dzisiejszych czasach, w dobie zwiększającej się świadomości ekologicznej społeczeństwa, dużą uwagę przywiązuje się także do tego, aby stosowane źródła ciepła i paliwa w jak najmniejszym stopniu wpływały na otoczenie.

Wszystkie wyżej wymieniony czynniki wpływają na decyzję o wyborze źródła zasilania. Poszukuje się rozwiązań, które spełniłyby wszystkie opisane wymagania, zarówno te pod względem ekonomicznym jak i ekologicznym

Poniżej przedstawiono przegląd rodzajów źródeł ciepła dla budynków.

1.1. Rodzaje źródeł ciepła

Źródło ciepła jest to urządzenie lub zespół urządzeń służących do wytworzenia odpowiedniej ilości ciepła na cele ogrzewania, ciepłej wody, a także wentylacji i klimatyzacji. Istnieje wiele podziałów źródeł ciepła w zależności od rozpatrywanych kryteriów.

Ogólnie można podzielić je na [1]:

- indywidualne
- lokalne
- centralne.

Źródła ciepła indywidualne inaczej nazywane są domowymi. Służą do ogrzania jednego mieszkania lub jednego pomieszczenia. Zalicza się do nich m.in. piece ceramiczne, piece stałopalne metalowe, trzony kuchenne ceramiczne, metalowe, trzony kuchенно-grzewcze, ogrzewacze gazowe, elektryczne akumulacyjne oraz promienniki gazowe. [1]

Lokalne źródła ciepła wytwarzają ciepło dla jednego lub kilku obiektów. Do tej grupy należą kotłownie wbudowane, dobudowane lub wolnostojące. [1]

Trzeci rodzaj źródeł ciepła tworzą ciepłownie, elektrociepłownie i kotłownie wysokoprężne. Produkują one ciepło na potrzeby jednej lub kilku dzielnic, a nawet całego miasta. Wytwarzają one czynnik grzewczy o wysokich parametrach, który przesyłany jest poprzez sieci cieplne do węzłów cieplnych, gdzie za pomocą zespołu urządzeń następuje zamiana na parametry niskie. [1] Obecnie ta zamiana dokonywana jest poprzez wymianę ciepła w wymiennikach. Wcześniej była również dokonywana poprzez zmieszanie z wodą instalacyjną w węzłach hydroelewatorowych lub zmieszania pompowego.

Produkowane ciepło jest rozprowadzane za pośrednictwem czynnika grzewczego, którym może być woda lub para wodna. Istnieją także źródła ciepła mieszane czyli parowo-wodne.

Każde ze źródeł ciepła może korzystać z różnych rodzajów energii pierwotnej, która służy do wytworzenia energii użytkowej. Wprowadza to kolejny podział na źródła wykorzystujące paliwa konwencjonalne oraz niekonwencjonalne. Te pierwsze dzielą się na

stałe, ciekłe i gazowe. Paliwa stałe to np.: drewno, torf, węgiel oraz koks. Do paliw ciekłych zalicza się m.in. oleje mineralne, smołowe i syntetyczne, natomiast do gazowych – gaz ziemny i płynny czyli propan-butan, propan, propylen i inne. Paliwa gazowe mogą być też sztuczne. Są to te gazy, które powstały w wyniku procesów przetwarzania innych paliw. Gazami tymi są gaz wylewny, węglowy, powietrzny, wodny, powietrzno-wodny, a także tlenowo-parowy. [1]

Niekonwencjonalne źródła energii to [2]:

- energia wody,
- energia wiatru,
- energia promieniowania słonecznego,
- energia geotermalna,
- ogniwa fotowoltaiczne,
- biomasa,
- biogaz,
- ogniwa paliwowe,
- wodór.

Do wytworzenia energii elektrycznej wykorzystuje się energią potencjalną wody (różnice wysokości wód powierzchniowych), a także energię kinetyczną pływów, fal morskich oraz prądów oceanicznych. Z tego rodzaju konwersji energii pochodzi obecnie 20% energii elektrycznej na świecie. W największym stopniu energia wód wykorzystywana jest w Brazylii. W kraju tym ok. 90% energii elektrycznej pochodzi właśnie z elektrowni wodnych. Ogólnie elektrownie wodne dzielą się na małe i duże. Innym podziałem jest podział na elektrownie przepływowe, zbiornikowe oraz szczytowo-pompowe. [3]

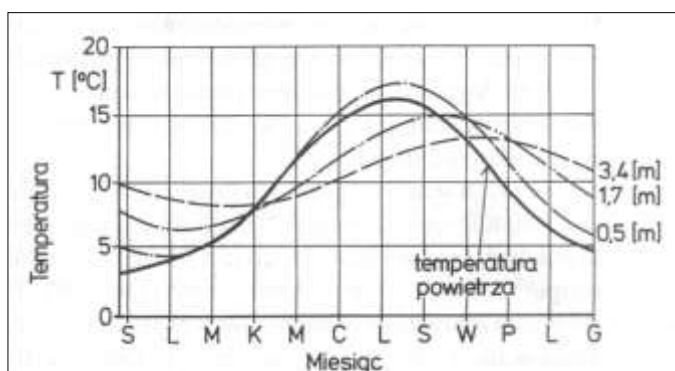
Prognozy wykazują, że w 2020 r. z energii kinetycznej prądów powietrznych można będzie pozyskać ok. 12% energii elektrycznej. W tym celu stosuje się urządzenia zwane wiatrakami, które najczęściej umieszcza się na tzw. farmach wiatrowych. Kontynentem przodującym w wykorzystaniu energii wiatru jest Europa, a państwem – Niemcy. W Polsce najlepszymi terenami do budowy elektrowni wiatrowych są województwa pomorskie i zachodniopomorskie. [3]

Z energii promieniowania słonecznego produkowana jest zarówno energia elektryczna jak i ciepło. Jest to szczególny rodzaj energii odnawialnej, ponieważ wykorzystywany jest nie tylko bezpośrednio, ale także po przemianie na inne postaci energii jak np. energia kinetyczna fal morskich lub wiatru oraz energia wiązań chemicznych zawarta w biomasie czy

nawet w węglu i ropie naftowej. W celu zamiany energii promieniowania słonecznego na ciepło wykorzystywane są kolektory słoneczne. Wyróżnia się kolektory słoneczne płaskie (cieczowe lub gazowe) oraz kolektory rurowe próżniowe. [3]

Energia geotermalna jest to ciepło pochodzące z wnętrza Ziemi. Temperatura Ziemi wzrasta w głąb o ok. 30°C na każdy kilometr. Najpowszechniej ten rodzaj energii wykorzystywany jest w Islandii, gdzie ok. 87% budynków zasilanych jest w ciepło pochodzące z tego źródła. Energia ta stosowana jest do wytwarzania ciepła, energii elektrycznej, a także używa się jej w ogrodnictwie i rolnictwie. Urządzeniami korzystającymi z ciepła Ziemi są pompy ciepła. [3] To właśnie one zostały poddane analizie w artykule. W pracy pod uwagę wzięto gruntowe pompy ciepła z sondami gruntowymi. W przypadku rozpatrywanego domku jednorodzinnego była to najlepsza forma źródła dolnego. Sondy gruntowe pomimo, że są rozwiązaniem o wiele droższym od kolektorów poziomych, to jednak pozwalają na stabilniejszą i efektywniejszą pracę pompy ciepła. Ogólnie to stosując jako dolne źródło ciepła grunt można korzystać z ciepła powierzchniowego magazynowego w jego zewnętrznej warstwie na głębokości do ok. 10 m lub geotermicznego, znajdującego się głębiej bo powyżej 20 m. [4]

Najkorzystniej jest pobierać ciepło gruntu z miejsca, w którym jest stała temperatura w ciągu roku. Wierzchnie warstwy gruntu charakteryzują się zmienną temperaturą zależną od temperatury powietrza. Najlepsze warunki występują na głębokości ok. 10 m, gdzie temperatura jest stała i dla umiarkowanej strefy klimatycznej wynosi 10-11 °C. Im bliżej powierzchni ziemi tym temperatura gruntu jest coraz bardziej zbliżona do tej jaką posiada powietrze [4]. Zależność tą pokazano na rysunku nr 1.



Rysunek 1. Przebieg zmian temperatury powietrza i gruntu dla umiarkowanej strefy klimatycznej

Źródło: [4]

Na większych głębokościach temperatura gruntu wykazuje przesunięcie w czasie w stosunku do temperatury powietrza. Od sierpnia gdy temperatura powietrza maleje i spada poniżej 5°C, temperatura gruntu na głębokości 3,4 m rośnie do października, a następnie spada ciągle jednak utrzymując się na poziomie wyższym niż temperatura powietrza. Jest to zjawisko korzystne, gdyż właśnie od października zwiększa się zapotrzebowanie na ciepło.

Najlepsze efekty poboru mocy z omawianego źródła dolnego można uzyskać gdy kolektory ułożone zostaną w gruncie wilgotnym. Bardzo dobry jest wilgotny grunt gliniasty, z którego uzyskuje się 34-40 W/m² ciepła. [4]

W celu poboru energii powierzchniowej, czyli ciepła słonecznego akumulowanego przez grunt, wykorzystuje się kolektory gruntowe. Układane są one na głębokości od 0,8 do 1,8 m, w strefie niezamarzającej. Rury, najczęściej z polietylenu, tworzą węzownice lub spirale wychodzące z rozdzielacza. Długość węzownicy nie powinna przekraczać 150 m, a długość spirali – 125 m. Ważne jest, aby nad kolektorami nie sadzić roślin o długich korzeniach oraz by kolektory te przysypać piachem w celu ochrony przez ostrymi kamieniami. [4]

Wady i zalety takiego rozwiązania to [4]:

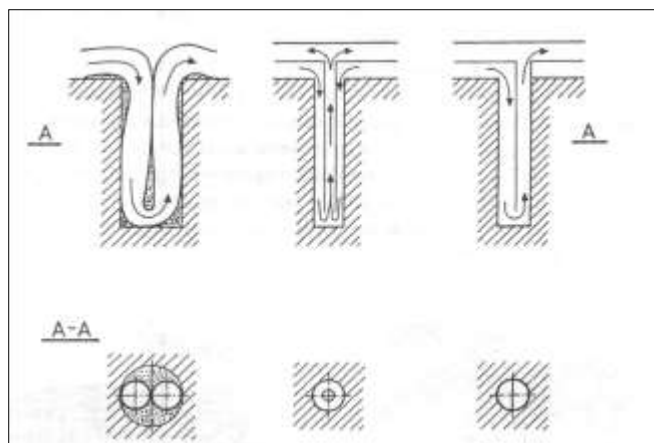
zalety:

- niższy koszty inwestycyjny, w porównaniu z zastosowaniem sond gruntowych;
- niskie koszty eksploatacyjne;

wady:

- wymagana duża powierzchnia działki;
- brak możliwości późniejszej przebudowy;
- wymagana duża precyzja przy układaniu, istnieje możliwość powstania tzw. „korków powietrznych” w przypadku nieodpowiedniej instalacji.

Innym sposobem wykorzystania energii gruntu jest zastosowanie sond zwanych kolektorami pionowymi. Dzięki nim może być pobierane ciepło geotermiczne czyli te pochodzące z wnętrza ziemi. Rodzaje pionowych gruntowych wymienników ciepła przedstawiono na rysunku nr 2.



Rysunek 2. Schematy rozwiązań pionowych wymienników

Źródło: [4]

Na pierwszym rysunku od lewej pokazano wymiennik typu U. Są one stosowane najczęściej gdyż nie są trudne do wykonania. Kolejne rysunki przedstawiają sondy o przepływie koncentrycznym i przeciwbieżnym. [4]

Sondy gruntowe mogą sięgać do głębokości 150 m i umieszczane są w specjalnych odwiertach. Czasami zamiast sond stosowane są stalowe wymienniki, najczęściej wtedy gdy umieszczone będą w gruncie żwirowym lub piaszczystym. [4]

Wady i zalety zastosowania sond gruntowych [4]:

zalety:

- nie jest wymagana duża powierzchnia działki;
- stała temperatura gruntu;
- niskie koszty eksploatacyjne;

wady:

- wyższe koszty w porównaniu z kolektorami poziomymi;
- nie mogą być stosowane na każdym terenie.

Kolejnym wymienionym wcześniej niekonwencjonalnym źródłem energii są ogniwa fotowoltaiczne. Najwięcej na świecie ogniw fotowoltaicznych produkowanych jest w Japonii. Ogniwa te umożliwiają bezpośrednie przekształcenie energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną. Wykorzystywany jest tu efekt fotowoltaiczny polegający na powstaniu różnicy potencjałów w ciele stałym w wyniku działania promieniowania słonecznego. Ogniwa wykorzystywane są m.in. do zasilania przenośnych telewizorów, latarni morskich, telefonów komórkowych, samochodów będących w fazie eksperymentów. [3]

Biomasa jest to materia organiczna. Należą do niej substancje pochodzenia roślinnego, zwierzęcego, odpady z leśnictwa, rolnictwa, oczyszczalni ścieków. Energię z biomasy można

uzyskać poprzez jej bezpośrednie spalanie lub też spalanie dopiero po jej przetworzeniu, a także współspalanie z innymi paliwami. W wyniku przetwarzania biomasy uzyskuje się biopaliwa stałe, ciekłe i gazowe. [3]

Biogaz uzyskuje się z odpadów organicznych w wyniku procesu beztlenowej fermentacji. Powstaje on głównie na wysypiskach śmieci, a także w oczyszczalniach ścieków oraz w gospodarstwach rolnych. Stosuje się go zarówno do wytwarzania ciepła jak i energii elektrycznej. [3]

Ogniwa paliwowe służą do wytwarzania energii elektrycznej w wyniku utleniania dostarczanego do nich paliwa. Najpowszechniej stosowane są ogniwa wodorowo-tlenowe posiadające membranę. W powstających spalinach znajduje się głównie para wodna.

Wodór można stosować w turbinach gazowych do produkcji prądu elektrycznego, w ogniwach paliwowych oraz do ogrzewania budynków. [2]

Źródła ciepła wykorzystujące energię odnawialną to np. ciepłownie geotermalne czy te w domkach jednorodzinnych, które stosują urządzenia takie jak pompy ciepła lub kolektory słoneczne.

Obecnie najczęściej korzysta się z paliw konwencjonalnych. W Polsce ciągle popularne są kotły na paliwa stałe. Wspomnieć tu należy o tzw. ekogroszku czyli paliwie wytwarzanym z wysokokalorycznego węgla kamiennego. Jest to rozwiązanie bardzo wygodne. Stosuje się je w kotłach z automatycznym podajnikiem paliwa, więc ogrzewanie nim domu nie wymaga dużego wysiłku ani nakładu czasu. Jednak używanie go nie sprzyja dbałości o środowisko, gdyż jak wspomniano pochodzi on z węgla kamiennego.

Jak pokazano w tabeli nr 1 oraz nr 2 w polskich gospodarstwach domowych bardzo duży udział procentowy w ogrzewaniu budynków oraz przygotowaniu ciepłej wody stanowią paliwa stałe.

Tabela 1. Sposoby ogrzewania budynków w Polsce

Rodzaj ogrzewania	Procentowy udział [%]
ciepło sieciowe	40
kocioł dwufunkcyjny – paliwa stałe	20
kocioł jednofunkcyjny – paliwa stałe	14
piece w pomieszczeniach – paliwa stałe	10
kocioł dwufunkcyjny – gaz ziemny	6
kocioł jednofunkcyjny – gaz ziemny	3
kominek – paliwa stałe	3
grzejniki stałe i ruchome, ogrzewanie podłogowe, energia elektryczna	3
inne techniki	1

Źródło: [5]

Tabela 2. Sposoby przygotowania ciepłej wody dla budynków w Polsce

Sposób przygotowania ciepła	Procentowy udział [%]
instalacja ciepłownicza	24
boiler lub terma elektryczna	24
piecyk łazienkowy gazowy	22
kocioł dwufunkcyjny lub ogrzewacz wody – paliwa stałe	18
kocioł dwufunkcyjny – gaz ziemny	6
brak ciepłej wody bieżącej	5
kocioł jednofunkcyjny – gaz ziemny	3
inne techniki	1

Źródło: [5]

Jednak są dwie główne przyczyny dla których ciągle dąży się do coraz powszechniejszego używania odnawialnych źródeł energii na cele energetyczne. Pierwszym jest fakt, że paliwa konwencjonalne są nieodnawialne i ich zasoby stale maleją. Drugą przyczyną jest ich negatywny wpływ na środowisko z powodu wydzielania się tlenków siarki, azotu i węgla co powoduje szereg konsekwencji [4]:

- wzrost efektu cieplarnianego,
- kwaśne deszcze negatywnie wpływające na wody i roślinność oraz budynki zabytkowe,
- wpływ na zdrowie ludzi.

Z tego też powodu w Polsce i na świecie stosuje się szereg przedsięwzięć mających na celu rozpowszechnianie odnawialnych źródeł energii. Wdrażane są odpowiednie uwarunkowania prawne m.in. w sprawie emisji szkodliwych gazów do atmosfery i wprowadzanie opłat za tzw. korzystanie ze środowiska. Tworzone są także dofinansowania na instalacje wykorzystujące niekonwencjonalne źródła energii.

1.2. Aspekty ekologiczne w ogrzewaniu budynków

Obecnie w ochronie środowiska zwraca się głównie uwagę na pogłębiający się efekt cieplarniany. Od połowy XX wieku obserwuje się podwyższanie średniej temperatury atmosfery przy powierzchni ziemi i oceanów czyli globalne ocieplenie, za które odpowiedzialnością obarczane są tzw. gazy cieplarniane: para wodna, dwutlenek węgla, metan, ozon, chlorowcopochodne węglowodorów stosowane np. w chłodnictwie (freony) czy w pożarnictwie jako środki gaśnicze (halony), podtlenek azotu. O wpływie konkretnego gazu na globalny wzrost temperatury decyduje jego zdolność pochłaniania promieniowania podczerwonego. Spośród wyżej wymienionych gazów najsilniej promieniowanie podczerwone pochłania metan. Jednakże większy wpływ na opisywane zjawisko ma dwutlenku węgla ze

względem na znacznie większą jego zawartość. Gazy te mogą znaleźć się w atmosferze z różnych źródeł, zarówno naturalnych jak i związanych z działalnością człowieka. Do naturalnych należą przede wszystkim: aktywność wulkaniczna - emisje gazów oraz aktywność biologiczna flory i fauny. Rozwój cywilizacyjny także w znacznym stopniu przyczynia się do zwiększania ilości gazów cieplarnianych w atmosferze poprzez: spalanie paliw kopalnych, produkcję cementu i innych substancji z węglanów, chów bydła. Z drugiej strony następuje zmniejszenie pochłaniania dwutlenku węgla np. poprzez wylesianie.

Zgodnie z aktualnymi hipotezami dwutlenek węgla odpowiada za 9-26 % bezpośredniego efektu cieplarnianego. Na podstawie krzywej Keelinga, która przedstawia dwutlenek węgla w atmosferze zmierzony w Mauna Loa (Hawaje), można zauważyć, że ilość jego ciągle wzrasta (od ok. 313 ppm w 1960 r. do 385 ppm w 2008 r.) [6] Pomimo tego, że dwutlenek węgla pochodzący ze źródeł naturalnych (głównie z wybuchów wulkanów) jest 20 razy więcej od tego, który dostał się do atmosfery w wyniku działalności człowieka, to według obowiązujących trendów należy dążyć do ograniczenia jego emisji [7].

Ogrzewanie budynków jest jednym z głównych źródeł zanieczyszczeń powietrza w Polsce. Potwierdzeniem tego jest tabela nr 3.

Tabela 3. Procentowy udział różnych źródeł zanieczyszczeń powietrza w Polsce

Źródło zanieczyszczenia	Procentowy udział poszczególnych zanieczyszczeń			
	dwutlenek węgla	metan	dwutlenek siarki	tlenki azotu
produkcja energii elektrycznej	57,5	-	-	-
ogrzewnictwo	23,5	-	49,0	32,0
energetyka	-	-	22,5	9,0
przemysł	11,0	-	26,0	30,0
transport	8,0	-	-	-
górnictwo węgla	-	37,0	-	-
rolnictwo	-	36,0	-	-
wysypiska śmieci	-	13,0	-	-
bagna	-	9,0	-	-
górnictwo ropy naftowej	-	5,0	-	-
motoryzacja	-	-	2,5	29,0

Źródło: [8]

Wyraźnie widać, że dwutlenek siarki, węgla, tlenki azotu pochodzą przede wszystkim z ogrzewania lub produkcji energii elektrycznej. Szczególnie istotny jest tu dwutlenek węgla odpowiedzialny za efekt cieplarniany.

To jak dane źródło ciepła i zastosowane paliwo wpływa na emisję dwutlenku węgla, a w związku z tym na efekt cieplarniany, pokazuje współczynnik TEWI (ang. Total Equivalent

Warming Impact czyli całkowity równoważnik tworzenia efektu cieplarnianego). Wskaźnik TEWI pozwala uwzględnić ilość dwutlenku węgla emitowanego bezpośrednio do atmosfery w źródle ciepła oraz dwutlenek węgla powstały w wyniku procesu produkcji energii elektrycznej zużytej w tym źródle. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wspomnianego wskaźnika można stwierdzić, że urządzenia, które powszechnie uznane są za przyjazne środowisku wcale takie być nie muszą. Okazuje się, że porównując (w warunkach polskich) pompę ciepła, kotły na gaz ziemny i olej opałowy pod względem ich wskaźnika TEWI, pompa ciepła i kocioł na olej opałowy charakteryzują się najwyższą jego wartością [9].

W przypadku kotłów uwzględniona jest emisja CO₂ bezpośrednio ze źródła w wyniku procesu spalania. Pompa ciepła przedstawiana jest jako urządzenie przyjazne środowisku. Pierwsze skojarzenie rzeczywiście nasuwa takie spostrzeżenia. Źródło zasilania z pompą ciepła nie wymaga bowiem budowy komina co świadczy o tym, że w czasie jej pracy nie wydostają się szkodliwe spaliny. Jednak wglębiając się w to zagadnienie zauważyć można, że pompa ciepła przyczynia się do emisji dwutlenku węgla poprzez bezpośredni wpływ czynnika roboczego w wyniku jego ewentualnego wycieku i ulatania, ale także poprzez sposób pośredni spowodowany zużyciem energii elektrycznej. Wpływ bezpośredni czynnika roboczego na emisję dwutlenku węgla jest coraz mniejszy. Uzyskano to poprzez stosowanie coraz lepszych materiałów konstrukcyjnych i uszczelniających oraz zamianie chlorowcopochodnych czynników roboczych na inne charakteryzujące się mniejszymi wartościami ODP i GWP [8]. W tabeli nr 4 pokazano jak procentowo rozkłada się wartość współczynnika TEWI od poboru energii elektrycznej i bezpośredniej emisji czynnika chłodniczego w różnych urządzeniach.

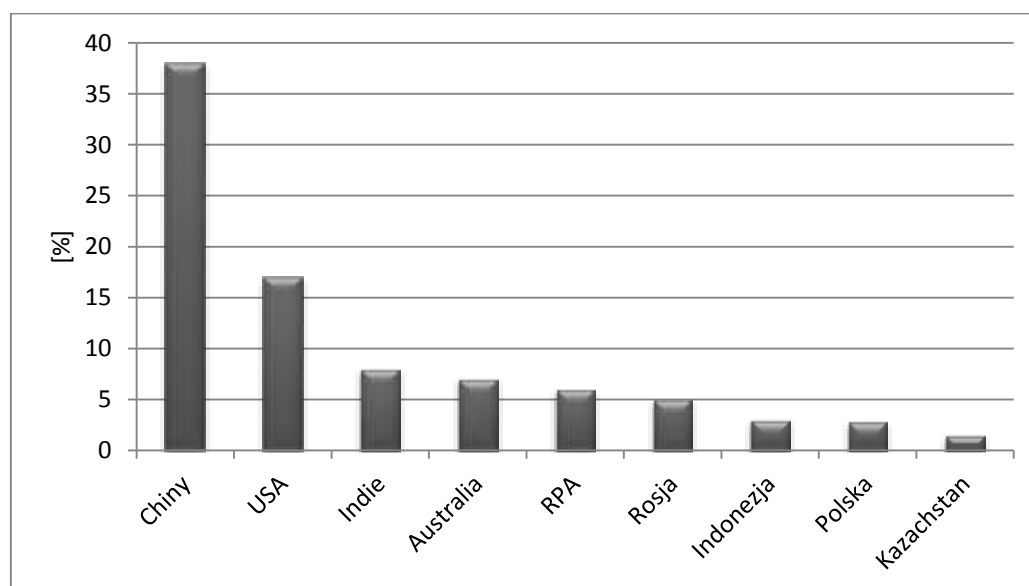
Tabela 4. Wskaźnik TEWI dla różnych urządzeń z czynnikiem HCFC/HFC

urządzenie chłodnicze, pompa ciepła, izolacja	bezpośrednia emisja czynnika roboczego [%]	emisja dwutlenku węgla w wyniku poboru energii elektrycznej [%]
handlowe urządzenia i meble chłodnicze	37,0	63,0
izolacja i pokrycia dachowe	35,0	65,0
klimatyzatory samochodowe	32,0	68,0
izolacja pomieszczeń (mieszkań)	4,0	96,0
klimatyzatory kompaktowe, 10 kW	2,0	98,0

izolacja domowych chłodziarko-zamrażarek	1,0	99,0
domowe chłodziarko zamrażarki	1,0	99,0
sprężarkowe pompy ciepła, 10 kW	0,5	99,5

Źródło: [8]

Jednak jak wykazują obliczenia to właśnie fakt konieczności poboru energii elektrycznej przez pompę ciepła sprawia, że nie jest ona tak do końca urządzeniem proekologicznym, szczególnie w przypadku Polski. Przyczyną tego jest to, że do produkcji energii elektrycznej w naszym kraju wykorzystywany jest głównie węgiel kamienny i brunatny. Związane jest to z faktem posiadania przez Polskę dużych zasobów tego paliwa. Rysunek nr 3 pokazuje procentowy udział Polski w wydobyciu węgla kamiennego na świecie.



Rysunek 3. Udział Polski w wydobyciu węgla kamiennego na świecie

Źródło: [10]

Stosowanie pompy ciepła jest przyjazne dla środowiska w krajach, w których do tego celu wykorzystuje się energię jądrową i pochodzącą ze źródeł niekonwencjonalnych takich jak np. energia wodna. Dlatego też dopóki w Polsce głównym źródłem w tworzeniu energii elektrycznej będzie spalanie węgla, korzystanie z pompy ciepła, patrząc przez pryzmat jej oddziaływania na środowisko, jest nieopłacalne.

Na świecie nieustannie dąży się do stosowania urządzeń w ogrzewnictwie korzystających z odnawialnych źródeł energii. Przykładem mogą być Niemcy gdzie od maja 2014 r. wejdą

przepisy dotyczące oszczędzania energii oraz kolejne w tym zakresie od 2016 r. Wszystkie one będą skłaniać do korzystania z pomp ciepła. Będzie to się wiązać również z efektywniejszym wykorzystaniem energii pierwotnej do produkcji energii elektrycznej. Według bieżących danych w Niemczech w 2016 r. wystarczy 1,8 kWh energii pierwotnej do wytworzenia 1 kWh energii elektrycznej. Spowodowane jest to wysokim udziałem energii wiatrowej oraz fotowoltaiki w produkcji energii elektrycznej. Odnośnie budynków pojawią się klasy energetyczne od klasy A+ do klasy D. To właśnie poprzez stosowanie pomp ciepła (sprężarkowych typu solanka/woda oraz powietrze/woda) będzie można osiągnąć tą najwyższą klasę.[11] Podział na klasy oraz rodzaj urządzeń do ogrzewania poprzez jakie można je uzyskać pokazano w tabeli nr 5.

Tabela 5. Klasy energetyczne budynków jednorodzinnych oraz stosowane w nich urządzenia grzewcze

Klasa energetyczna	Zużycie energii końcowej [kWh/(m ² /rok)]	Urządzenia
A+	< 30	pompy ciepła solanka/woda; powietrze/woda
A	30÷50	gazowe pompy ciepła + kolektory słoneczne; hybryda: kocioł kondensacyjny + pompa ciepła powietrze/woda
B	50÷75	gazowy kocioł kondensacyjny + kolektory słoneczne
C	75÷100	gazowa mikrokogeneracja ciepła i prądu
D	>100	kotły do spalania biomasy i peletu

Źródło: [11]

W takim przypadku promowanie pomp ciepła jest jak najbardziej uzasadnione. W Polsce problem z wprowadzeniem takich przepisów wiąże się przede wszystkim z tak dużym udziałem paliw kopalnianych w tworzeniu energii elektrycznej.

Obecnie w Polsce najkorzystniejszym pod względem ilości wytwarzanego dwutlenku węgla konwencjonalnym źródłem energii jest gaz ziemny [12].

Tabela nr 6 pokazuje emisję dwutlenku węgla dla krajów Unii Europejskiej w latach 1990-2009. Jak widać Polska znajduje się na piątym miejscu pod względem emisji dwutlenku węgla. Jednak w opisanych latach zmniejszyła ona swoją emisję. Jest wiele krajów, które charakteryzują się niższą niż Polska emisją tego gazu a jednak ciągle przyczyniają się do zwiększenia emisji.

Tabela 6. Emisja dwutlenku węgla w krajach Unii Europejskiej w latach 1990-2009

Kraj	Emisja dwutlenku węgla [mln ton]	
	1990	2009
Niemcy	1248	920
Wielka Brytania	776	566
Francja	563	517
Włochy	519	491
Polska	453	377
Hiszpania	283	368
Rumunia	250	131
Holandia	212	199
Czechy	196	133
Belgia	143	124
Bułgaria	111	59
Grecja	104	123
Węgry	97	67
Austria	78	80
Słowacja	74	43
Szwecja	72	60
Finlandia	70	66
Dania	68	61
Portugalia	59	75
Irlandia	55	62
Litwa	50	22
Estonia	41	17
Łotwa	27	11
Słowenia	18	19
Luksemburg	13	12
Cypr	5	9
Malta	2	3

Źródło: [13]

Dobrym rozwiązaniem jest stosowanie także kotłów na biopaliwa. Wydostający się w tym przypadku do atmosfery dwutlenek węgla nie jest zaliczany do tych pogłębiających efekt cieplarniany. Sprawia to, że ten rodzaj paliwa znajdzie się na ostatnim miejscu pod względem wskaźnika TEWI, ponieważ bilans dwutlenku węgla równy jest zero, gdyż obieg jego w przyrodzie jest zamknięty. Za stosowaniem tego rodzaju paliwa przemawia także fakt, że będą wprowadzane coraz wyższe podatki za emisję dwutlenku węgla.

Poza dwutlenkiem węgla w wyniku spalania paliw do atmosfery wprowadzane są także inne gazy takie jak dwutlenek siarki i tlenki azotu oraz pyły. Pod tym względem stosowanie paliw pochodzących z biomasy również okazuje się korzystniejsze niż paliw kopalnych. Świadczą o tym parametry biomasy, które wynoszą 14/1/0,01. Oznacza to, że wartość opałowa wynosi 14 MJ/kg, zawartość popiołu 1 %, a zawartość siarki 0,01%. Dla porównania parametry węgla dopuszczonego to do stosowania w Polsce to 21/15/0,64. Czyli poza wyższą wartością opałową, wyższość pozostałych parametrów nie przemawia

za stosowaniem węgla. Istotny jest również fakt, że popiół powstający podczas spalania peletu często wykorzystywany jest jako nawóz. [2, 14]

Także ilość wydzielanych tlenków azotu jest ok. dwukrotnie niższa przy zastosowaniu biopaliw niż przy stosowaniu węgla. [15]

Istotne jest by urządzenia, w których spalane są paliwa pochodzące z biomasy, były specjalnie do tego przystosowane. Jedynie wtedy osiągną one wysoką sprawność i nie będą negatywnie wpływać na środowisko. [15]

Oprócz biopaliw stałych stosowane są także biogazy, czyli te pochodzące z odgazowania odpadów z wysypisk lub z osadów z oczyszczalni ścieków. Stosowanie tego rodzaju paliwa sprawia, że wykorzystuje się gazy, które wydzielając się w sposób niekontrolowany z wysypisk przyczyniają się do przedostawania do atmosfery szkodliwego metanu. Wykorzystując biogaz zmniejsza się także ryzyko wybuchu na wysypiskach oraz ilości nieprzyjemnych zapachów. [15]

Wykorzystanie biomasy umożliwia zużycie wielu odpadów szczególnie tych pochodzących z rolnictwa i niektórych gałęzi przemysłu.

Także pompy ciepła wykorzystują odpadowe źródła energii, które w przeciwnym razie mogłyby zostać utracone.

Jak już wspomniano istnieje wiele uwarunkowań prawnych, które zmuszają do ciągłej redukcji gazów cieplarnianych. Jedne z nich związane są z postanowieniami Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu, głównie Protokołu z Kioto. Zobowiązania jakie Polska musi spełniać to [16]:

- stworzenie oraz wprowadzenie w życie strategii redukcji emisji gazów cieplarnianych. Polska zobowiązana jest także do sprawowania co pewien okres kontroli nad realizacją tego procesu
- prowadzenie corocznego spisu wielkości emisji gazów cieplarnianych
- stworzenie planu redukcji emisji oddzielnie dla każdego rodzaju gazów cieplarnianych i dla każdego sektora gospodarczego
- rozwijanie i propagowanie badań naukowych związanych z poprawą klimatu
- sporządzanie co dwa lata raportów rządowych odnośnie realizacji powyższych postanowień.

W wyniku protokołu z Kioto należy dążyć do redukcji sześciu gazów cieplarnianych takich jak:

- dwutlenek węgla
- metan
- tlenek azotu
- fluorowęglowodory
- perfluorowęglowodory

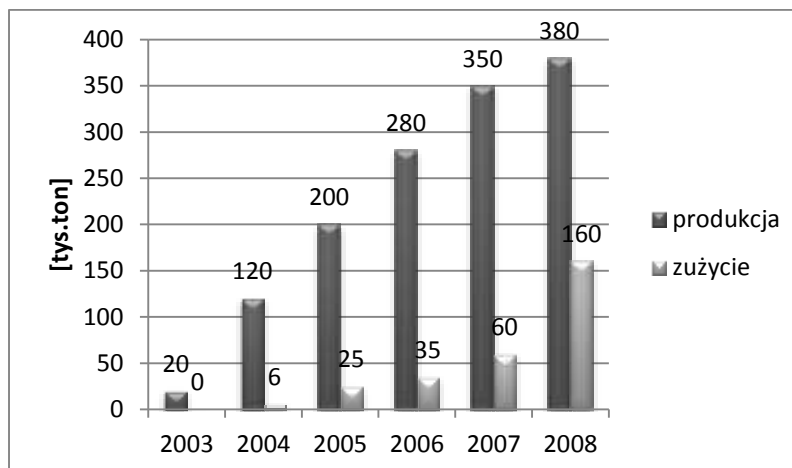
- sześćciofluorki siarki

1.3. Aspekty ekonomiczne w ogrzewaniu budynków

Oprócz aspektów ekologicznych bardzo ważne przy wyborze źródła zasilania w ciepło budynków jest cena paliwa oraz jego dostępność.

W przypadku pomp ciepła nie potrzebne jest paliwo, ale niezbędna jest energia elektryczna. Należy brać pod uwagę zaniki prądu elektrycznego oraz wysokie opłaty za jego pobór. Korzyści ekonomiczne stosowania pomp ciepła to przede wszystkim ograniczenie zużycia paliw bezpośrednio w źródle zasilania budynku w ciepło, a także możliwość uzyskania dodatkowych korzyści latem czyli wykorzystanie pompy ciepła do chłodzenia pomieszczeń [2]. Ceny samych pomp ciepła są jednak ciągle bardzo wysokie, więc koszty inwestycyjne tego typu instalacji będą wysokie. Jednak użytkowanie nie wiąże już z płaceniem za paliwo, a za pobór prądu elektrycznego potrzebnego do pracy sprężarki pompy.

Rozważając paliwa konwencjonalne takie jak gaz ziemny, olej opałowy czy ekogroszek pod względem ich ceny najkorzystniej jest wybrać ekogroszek bądź gaz ziemny. Jednak ten pierwszy wymaga ciągłego uzupełniania magazynu oraz kotła, natomiast gaz ziemny nie zawsze jest dostępny na każdej działce. Natomiast olej opałowy czy gaz płynny charakteryzują się znacznie wyższą ceną, a to oczywiście pociąga za sobą większe koszty ogrzewania budynków. Korzystnym rozwiązaniem mogą okazać się pelety. Z drugiej jednak strony produkcja peletu w Polsce jest cały czas na etapie rozwoju. Ciągłe powstają nowe firmy zajmujące się jego wytwarzaniem. W związku z tym ceny tego paliwa mogą z czasem ulegać zmianie [17]. Jednak już na obecną chwilę nie ma większych problemów z jego pozyskaniem. Jednak jest to ciągle paliwo jeszcze niedoceniane w kraju i jego większość jest eksportowana za granicę. Wielkość produkcji peletu w Polsce oraz ich zużycie przedstawiono na rysunku nr 4.



Rys. 4. Produkcja peletu w Polsce

Źródło: [18]

Widać, że w Polsce produkuje się coraz więcej peletu i coraz większe jest jego zużycie w kraju. Ponad dwukrotny wzrost zużycia w 2008 r. spowodowany był stosowaniem peletu przez elektrownie i elektrociepłownie. Ciągłe jednak jest to niewiele w porównaniu z jego produkcją. Szacuje się, że cała ilość peletu produkowana w Polsce wystarczyłaby do spalania w ok. 70 000 kotłach dla domków jednorodzinnych. [18,19]

Oczywiście dodatkowym czynnikiem ekonomicznym przemawiającym za stosowaniem pomp ciepła lub kotłów na biomasę jest fakt istnienia wsparcia finansowego dla tych inwestycji w ramach propagowania odnawialnych źródeł energii. W tym zakresie udzielane są odpowiednie korzystne kredyty, a także bezzwrotne pożyczki. Źródła finansowania to głównie [16]:

- Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej
- źródła międzynarodowe takie jak: World Bank, GEF, Fundusze Strukturalne i Spójności UE
- środki własne przedsiębiorstw
- budżet państwa

Dodatkowe koszty związane z wykorzystaniem biomasy takiej jak np. wierzba energetyczna czy pozyskiwanie słomy wiążą się z pielęgnacją w czasie prowadzenia uprawy, a dokładniej z nawadnianiem, nawożeniem, stosowaniem odpowiednich środków ochrony roślin, kupno sadzonek, koszty związane ze zbiorem [2,17]. Wpływ na rozwój tego rodzaju biomasy mają warunki atmosferyczne. Dlatego też plony nie zawsze będą obfite. Będzie to miało wpływ na dostawę paliwa oraz jego cenę [17].

Biorąc pod uwagę powyższe rozważania w pracy poddano analizie jedno źródło zasilania w ciepło budynków, które tak silnie propagowane jest na całym świecie czyli pompę ciepła oraz

źródło, które ciągle jest w Polsce popularne, czyli kocioł na groszek energetyczny.

2. Teren i metodyka badań

W artykule dokonano doboru źródeł ciepła dla domku jednorodzinnego znajdującego się w Zaściankach koło Białegostoku. Zapotrzebowanie na ciepło analizowanego obiektu równe jest 16,16 kW, natomiast moc, policzona zgodnie z Polską Normą [20], potrzebna na ogrzanie ciepłej wody użytkowej to 1,41 kW.

2.1. Koszty inwestycyjne analizowanych źródeł ciepła

Jako pierwsze rozwiązanie wybrano źródło zasilania z pompą ciepła. Wybrano gruntową pompę ciepła z sondami gruntowymi. W przypadku niedużej działki jest to lepsza opcja niż pompa ciepła z poziomymi kolektorami. Daje również możliwość pozyskania ciepła z gruntu o stabilniejszej temperaturze. Na rysunku nr 5 pokazano przyjęty schemat technologiczny źródła zasilania z pompą ciepła, zaś w tabeli nr 7 przedstawiono niezbędne do dalszych obliczeń dane techniczne dobranej pompy ciepła.

Tabela 7. Dane techniczne pompy ciepła typu NIBE F1145 firmy NIBE-BIAWAR oraz dane gruntu

Moc grzewcza	16,17 kW
Liczba dobranych pomp ciepła	1 szt
COP	3,4
Czynnik chłodniczy	R407C
Masa czynnika chłodniczego	2,4 kg
Potencjał efektu cieplarnianego	GWP=1526
Wyciek czynnika chłodniczego	L=0,834 kg/a
Poziom odzysku czynnika chłodniczego	$\alpha=0,75$
Średnia właściwa wydajność poboru z gruntu	50 W/m

Dobrano pompę ciepła typu NIBE F1145 firmy NIBE-BIAWAR o mocy grzewczej 16,17 kW. Dodatkowo w celu akumulowania ciepła zastosowano bufor wody grzewczej typu HF300 firmy Reflex. Do podgrzewu ciepłej wody użytkowej dobrano podgrzewacz typu AH300/1 firmy Reflex. Jako zabezpieczenie instalacji zastosowano naczynie wzbiorcze przeponowe typu NG18, natomiast po stronie dolnego źródła ciepła – typu NG12. Ciepło z gruntu pozyskiwane jest za pomocą sond gruntowych. Wymaganą głębokość odwiertów pod sondy gruntowe policzono zgodnie ze wzorem nr 1 i 2.

$$l = \frac{Q_{ch}}{q_E} [m] \quad (1)$$

$$Q_{ch} = Q_{PC} \cdot \left(1 - \frac{1}{COP}\right) [kW] \quad (2)$$

gdzie:

Q_{ch} – wydajność chłodnicza pompy ciepła [kW],

Q_{PC} – moc grzewcza pompy ciepła [kW],

COP – współczynnik efektywności pompy ciepła,

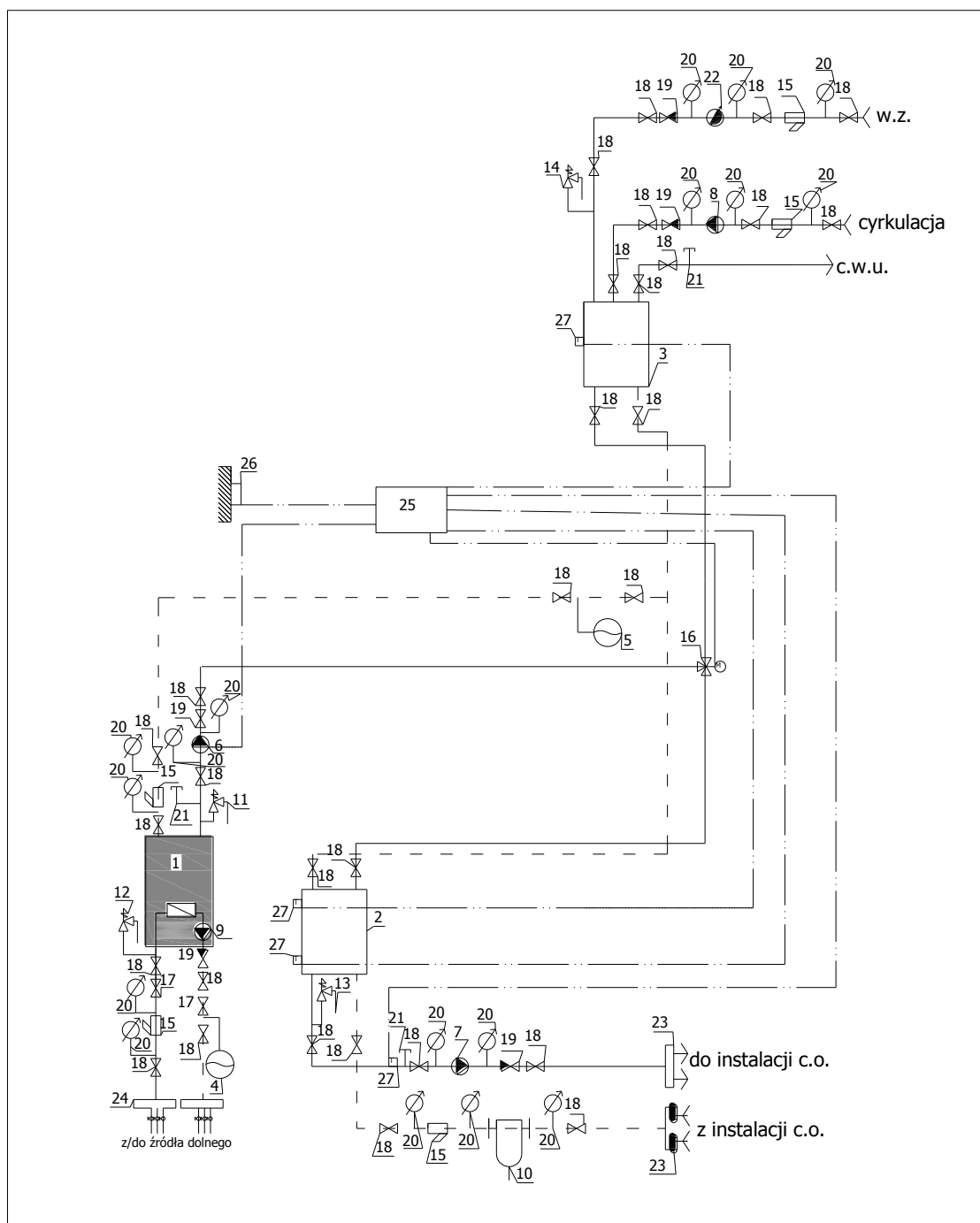
q_E – średnia właściwa wydajność poboru z gruntu [W/m]

Zmienne ze wzoru i ich wartości znajdują się w tabeli nr 7.

Na podstawie obliczeń przyjęto konieczność wykonania 3 odwiertów, każdy po 95 m. Jako sondy stosuje się podwójne U-rurki o średnicy 32x2,9 mm.

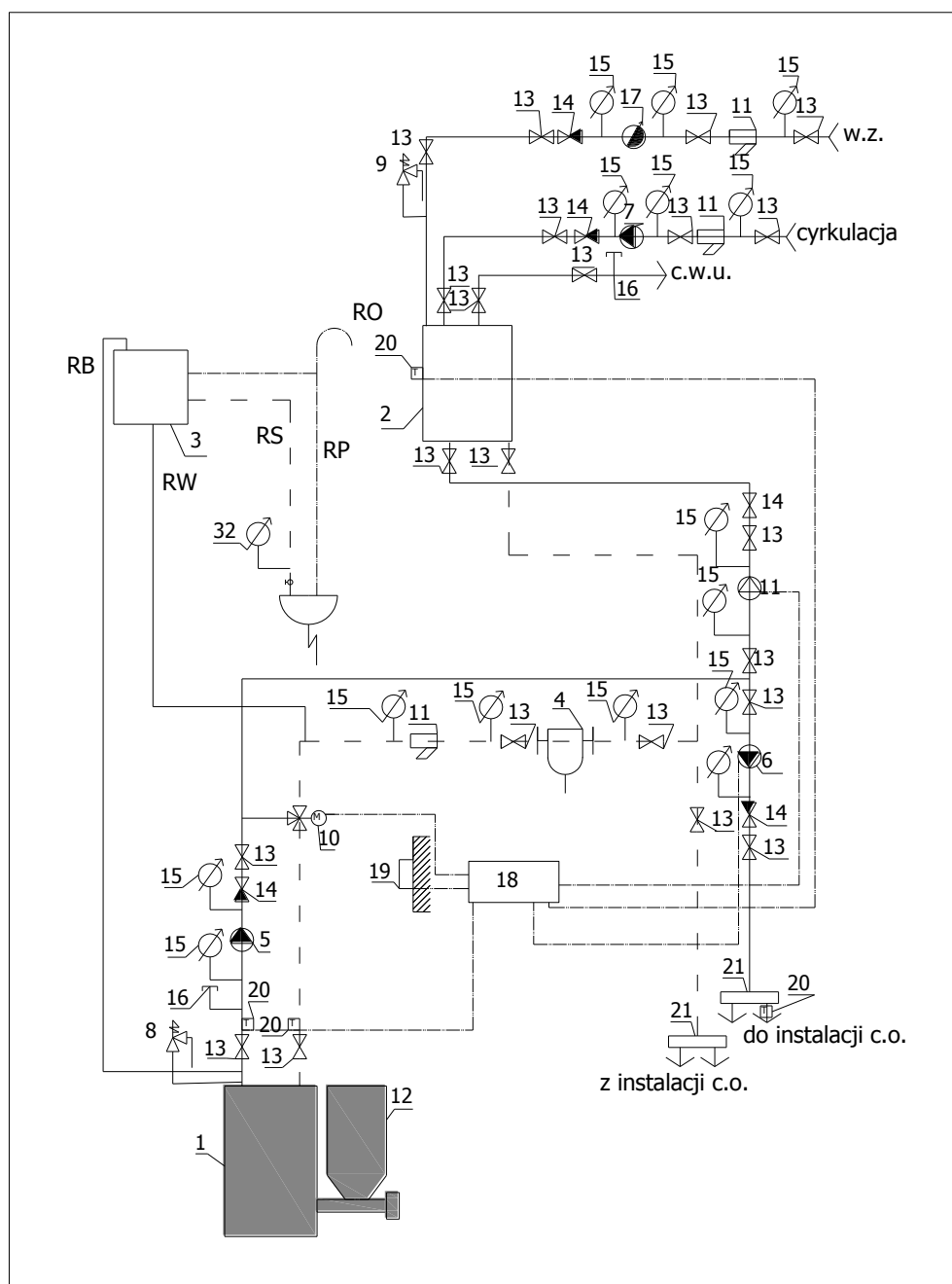
Na podstawie dobranych urządzeń i po zsumowaniu ich cen jednostkowych oraz ceny za wykonanie odwiertów pod sondy gruntowe, oszacowano koszty inwestycyjne źródła zasilania z pompą ciepła dla domku jednorodzinnego. Koszt pozostałych urządzeń oraz robociznę przyjęto jako 10% wartości dobranych urządzeń bez kosztów odwiertów. W wyniku obliczeń otrzymano wysokość nakładów inwestycyjnych koniecznych do realizacji analizowanego źródła, w wysokości 52 097 zł.

Jako drugie rozwiązanie przyjęto kotłownię na groszek energetyczny, której schemat technologiczny pokazano na rysunku nr 6, natomiast w tabeli nr 8 przedstawiono dane dotyczące wybranego kotła.



Rysunek 5. Schemat technologiczny źródła zasilania z pompą ciepła, gdzie cyframi oznaczono:

1 – pompa ciepła, 2- bufor, 3- podgrzewacz ciepłej wody użytkowej, 4 – przeponowe naczynie wzbiórcze na obiegu solanki, 5 – przeponowe naczynie wzbiórcze, 6 – pompa obiegowa, 7 – pompa obiegowa instalacji centralnego ogrzewania, 8 – pompa cyrkulacyjna, 9 – pompa obiegu solanki, 10 – magnetoodmulacz, 11 – zawór bezpieczeństwa przy pompie ciepła, 12 – zawór bezpieczeństwa na obiegu solanki, 13 – zawór bezpieczeństwa na instalacji centralnego ogrzewania, 14 – zawór bezpieczeństwa na wodzie zimnej, 15 – filtr siatkowy, 16 – zawór 3-drogowy przełączający, 17 – zawór do napełniania i opróżniania obiegu solanki, 18 – zawór odcinający, 19 – zawór zwrotny, 20 – manometr, 21 – termometr, 22 – wodomierz, 23 – rozdzielacz centralnego ogrzewania, 24 – rozdzielacz obiegu solanki, 25 – regulator pompy ciepła, 26 – czujnik temperatury zewnętrznej, 27 – czujnik temperatury wody



Rysunek 6. Schemat technologiczny kotłowni na groszek energetyczny, gdzie cyframi i literami oznaczono: 1 – kocioł, 2- podgrzewacz ciepłej wody użytkowej, 3 – naczynie bezpieczeństwa otwarte, 4 – magnetoodmulacz, 5 – pompa obiegowa, 6 – pompa obiegowa instalacji centralnego ogrzewania, 7 – pompa cyrkulacyjna, 8 – zawór bezpieczeństwa przy kotle, 9 – zawór bezpieczeństwa na wodzie zimnej, 10 zawór 3-drogowy mieszający, 11 – filtr siatkowy, 12 – zbiornik paliwa, 13 - zawór odcinający, 14 – zawór zwrotny, 15 – manometr, 16 – termometr, 17 – wodomierz, 18 – regulator kotła, 19 - temperatury zewnętrznej, 20 – czujnik temperatury wody 21 – rozdzielacz centralnego ogrzewania, RB – rura bezpieczeństwa, RW – rura wzbiorka, RO – rura odpowietrzająca, RP – rura przelewowa, RS – rura sygnalizacyjna.

Tabela 8. Dane techniczne kotła na groszek energetyczny typu KWM-SGR

Moc grzewcza	19 kW
--------------	-------

Liczba dobranych kotłów	1 szt
Sprawność kotła	85 %
Pobór mocy elektrycznej	175 W

W tym przypadku dobrano kocioł na groszek energetyczny typu KWM-SGR z automatycznym podajnikiem paliwa, o mocy grzewczej równej 19 kW. Jako podgrzewacz ciepłej wody użytkowej zastosowano podgrzewacz typu SB100 Reflex. Zabezpieczenie instalacji w tym przypadku stanowi naczynie otwarte o pojemności 15l firmy Lumo typ WZ. Dodatkowo dobrano także komin jednościenny śr. 160 mm firmy Wadex.

Podobnie jak w pierwszym przypadku, tutaj również po zsumowaniu cen jednostkowych urządzeń, dodaniu kosztów na omurowanie komina oraz na pozostałe urządzenia i robociznę otrzymano wartość inwestycji kotłowni na groszek energetyczny dla analizowanego domku jednorodzinnego w wysokości 12 612 zł.

Na rysunku nr 7 pokazane zostały wartości opłat potrzebnych do realizacji obu inwestycji.

2.2. Koszty eksploatacyjne analizowanych źródeł ciepła

Kolejnym etapem było określenie kosztów eksploatacyjnych. Punktem wyjściowym było obliczenie liczby stopniodni na podstawie danych takich jak liczba dni sezonu grzewczego oraz średnia temperatura w danym miesiącu zgodnie z tabelą nr 9.

Tabela 9. Liczba dni grzewczych i średnia temperatura w danym miesiącu dla rejonu Białegostoku

Miesiąc	Średnia temperatura [°C]	Liczba dni grzewczych [d]
styczeń	-4,9	31
luty	-2,0	28
marzec	1,7	31
kwiecień	7,3	30
maj	13,2	10
czerwiec	15,9	0
lipiec	17,3	0
sierpień	14,5	0
wrzesień	12,1	10
październik	7,1	31
listopad	1,6	30
grudzień	-1,3	31

Źródło: [1]

Liczba stopniodni została policzona zgodnie ze wzorem nr 3:

$$S_d = \Sigma(t_w - T_e(m)) \cdot L_d(m) [^{\circ}C \cdot d] \quad (3)$$

gdzie:

t_w – projektowana temperatura wewnątrz budynku [$^{\circ}C$] [1],

$T_e(m)$ – średnia temperatura w danym miesiącu [$^{\circ}C$],

$L_d(m)$ – liczba dni ogrzewania w danym miesiącu [dni].

Wartości zmiennych we wzorze umieszczone zostały w tabeli nr 9 i 11.

W przypadku pierwszego rozwiązania jakim jest źródło zasilania z pompą ciepła główne koszty eksploatacyjne są to przede wszystkim opłaty za energię elektryczną niezbędną do pracy sprężarki pompy ciepła. Wymaganą ilość energii policzono ze wzoru nr 4, 5, 6:

$$E_E = \frac{h_{c.o.} \cdot Q_{c.o.} + h_{c.w.u.} \cdot \Phi_{h\ sr}}{COP} \left[\frac{kWh}{a} \right] \quad (4)$$

$$h_{c.o.} = \frac{S_d \cdot 24}{(t_w - t_z)} \left[\frac{h}{a} \right] \quad (5)$$

$$h_{c.w.u.} = (365 - d_{c.o.}) \cdot \tau_{c.w.u.} \left[\frac{h}{a} \right] \quad (6)$$

gdzie:

$h_{c.o.}$ – ilość godzin pracy przy parametrach obliczeniowych w sezonie grzewczym [h/a],

$h_{c.w.u.}$ – ilość godzin pracy na potrzeby c.w.u. poza sezonem grzewczym [h/a],

$Q_{c.o.}$ – zapotrzebowanie na ciepło [kW],

$\Phi_{h\ sr}$ – zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową [kW],

t_z – projektowa temperatura zewnętrzna dla danej strefy klimatycznej [$^{\circ}C$],

$d_{c.o.}$ – liczba dni sezonu grzewczego [d/a],

$\tau_{c.w.u.}$ – czas pracy systemu grzewczego na cele c.w.u. [h/d],

Wartości zmiennych we wzorze umieszczone zostały w tabeli nr 11, natomiast wyniki w tabeli nr 13.

Obliczenia pozwoliły na określenie niezbędnej ilości energii elektrycznej, równej w tym przypadku 11 897 kWh/a. Moc zamówiona dla dobranej pompy ciepła wynosi 8,7 kW.

Następnie na podstawie danych PKP Energetyka [21] dla taryfy G11 dla Wschodniego Rejonu Dystrybucji określono wysokość opłat za pobraną energię elektryczną. Wyniki przedstawiono w tabeli nr 10.

Tabela 10. Wysokość opłat za pobór energii elektrycznej do pracy pompy ciepła

	Cena jednostkowa	Ilość energii elektrycznej	Całkowita cena [zł/a]
Obrót			
Cena za energię elektryczną czynną	0,2684 zł/kWh	11 897 kWh/a	3 193,15
Dystrybucja			
Składnik jakościowy stawki systemowej	0,0108 zł/kWh	11 897 kWh/a	128,49
Składnik stały stawki sieciowej (układ pomiarowy 3-fazowy)	3,54 zł/m-c za moc zamówioną	8,7 kW	369,58
Składnik zmienny stawki sieciowej	0,2045 zł/kWh	11 897 kWh/a	2 432,94
Stawka opłaty abonamentowej (okres rozliczeniowy 1 – miesięczny)	2,7 zł/m-c	-	32,40
Stawka opłaty przejściowej (dla rocznego zużycia energii > 1 200 kWh)	2,44 zł/m-c za moc zamówioną	8,7 kW	254,74
		Σ	6 411,29

W drugim analizowanym źródle ciepła główne koszty eksploatacyjne to przede wszystkim te poniesione na zakup paliwa. Zapotrzebowanie na paliwo w sezonie i poza sezonem grzewczym obliczono na podstawie wzoru Hottingera [1]:

$$B_{c.o.} = \frac{y \cdot a \cdot 3,6 \cdot \tau_{c.o.} \cdot S_d \cdot Q_{c.o.}}{Q_i \cdot \eta_{sr} \cdot (t_w - t_z)} \left[\frac{kg}{a} \right] \quad (5)$$

$$B_{cwu.} = \frac{3,6 \cdot \tau_{cwu.} \cdot (365 - d_{c.o.}) \cdot \Phi_{h sr}}{Q_i \cdot \eta_{sr}} \left[\frac{kg}{a} \right] \quad (6)$$

gdzie:

y – współczynnik zmniejszający,

a – współczynnik zwiększający,

$\tau_{c.o.}$ – czas pracy systemu grzewczego [h/d],

$\tau_{c.w.u.}$ – czas pracy systemu grzewczego na cele c.w.u. [h/d],

$d_{c.o.}$ – liczba dni sezonu grzewczego [d/a],

Q_i – wartość opałowa paliwa [kJ/kg],

η_{sr} – średnia sprawność kotła,

Niezbędne wartości potrzebne do obliczeń pokazano w tabeli nr 11, natomiast otrzymane wyniki w tabeli nr 13.

Tabela 11. Dane do obliczeń

$Q_{c.o.}$	16,16 kW
$\Phi_{h\ sr}$	1,41 kW
t_w	20 °C
S_d	4 014,8 °C·d
t_z	-22 °C
$d_{c.o.}$	232 d/a
$\tau_{c.w.u.}$	18 h/d
$\tau_{c.o.}$	24 h/d
$h_{c.o.}$	2 294 h/a
$h_{c.w.u.}$	2 394 h/a
y	0,95
a	1
Q_i	26 000 kJ/kg
η_{sr}	0,85

Podobnie jak w przypadku pompy ciepła, tutaj również należało uwzględnić koszty za pobór energii elektrycznej. Jej ilość zużywaną przez kocioł policzono wg wzoru nr 7:

$$E_E = (P_{k1} \cdot h_{c.o.} + P_{k2} \cdot h_{c.w.u.}) \left[\frac{kWh}{a} \right] \quad (7)$$

gdzie:

P_{k1} – pobór mocy elektrycznej przez kocioł w okresie grzewczym [kW],

P_{k2} – pobór mocy elektrycznej przez kocioł poza sezonem grzewczym [kW].

Niezbędne wartości potrzebne do obliczeń pokazano w tabeli nr 8 i 11, natomiast otrzymane wyniki w tabeli nr 13.

Obliczone zużycie energii elektrycznej wyniosło 820 kWh/a. Moc zamówiona dla dobranego kotła wynosi 0,175 kW. Tabela nr 12 pokazuje wysokość opłat za pobraną energię elektryczną wg taryfy G11.

Tabela 12. Wysokość opłat za pobór energii elektrycznej do pracy kotła na groszek energetyczny

	Cena jednostkowa	Ilość energii elektrycznej	Całkowita cena [zł/a]
Obrót			
Cena za energię elektryczną czynną	0,2684 zł/kWh	820 kWh/a	220,09
Dystrybucja			
Składnik jakościowy stawki systemowej	0,0108 zł/kWh	820 kWh/a	8,86
Składnik stały stawki sieciowej (układ pomiarowy 3-fazowy)	3,54 zł/m-c za moc zamówioną	0,175 kW	7,43
Składnik zmienny stawki sieciowej	0,2045 zł/kWh	820 kWh/a	167,69
Stawka opłaty abonamentowej (okres rozliczeniowy 1 – miesięczny)	2,7 zł/m-c	-	32,40
Stawka opłaty przejściowej (dla rocznego zużycia energii > 1 200 kWh)	2,44 zł/m-c za moc zamówioną	0,175 kW	1,62
		Σ	438,09

Tabela 13. Zużycie paliwa oraz energii elektrycznej

	kocioł na groszek energetyczny	pompa ciepła
E_E [kWh/a]	820	11 897
$B_{c.o.}$ [kg/a]	6 502	-
$B_{cw.u.}$ [kg/a]	592	-
B [kg/a]	7 093	-

Zsumowując koszty za zakup paliwa oraz opłaty za energię elektryczną otrzymano roczne koszty eksploatacyjne kotłowni na groszek ekologiczny w wysokości 7 118 zł.

Porównanie obu analizowanych źródeł ciepła dla domku jednorodzinnego pokazano na rysunku nr 8.

2.3. Emisja dwutlenku węgla w wyniku ogrzewania

Kolejnym celem artykułu jest wykazanie, które z analizowanych źródeł ciepła dla domku jednorodzinnego charakteryzuje się mniejszą emisją dwutlenku węgla.

W przypadku kotłowni na groszek energetyczny jest to przede wszystkim bezpośrednia emisja ze źródła ciepła w postaci spalin z komina. W celu określenia wielkości tej emisji należało określić ilość zużywanego paliwa w ciągu roku, co zostało przedstawione w tabeli nr 13. Następnie określono emisję dwutlenku węgla pochodząca ze spalania paliwa zgodnie ze wzorem nr 8:

$$E_{B-CO_2} = B \cdot Q_i \cdot WE \left[\frac{kgCO_2}{a} \right] \quad (8)$$

gdzie:

WE – wskaźnik emisji CO_2 [$kgCO_2/GJ$].

Wartości wskaźnika WE dla poszczególnych paliw pokazano w tabeli nr 14.

Źródło zasilania z pompą ciepła przyczynia się do emisji dwutlenku węgla głównie pośrednio poprzez zużycie energii elektrycznej. Ilość pobieranej energii elektrycznej przez dobraną pompę ciepła zapisano w tabeli nr 13. Na tej podstawie można było określić jaka jest emisja dwutlenku węgla pochodząca z produkcji energii elektrycznej w elektrociepłowni:

$$E_{E-CO_2} = E_E \frac{\sum_{i=1}^5 WE_i \cdot P_i}{\eta_p \cdot \eta_t} \left[\frac{kgCO_2}{a} \right] \quad (9)$$

gdzie:

P_i – udział poszczególnych paliw w produkcji energii elektrycznej w Polsce,

η_p – sprawność przetwarzania energii elektrycznej,

η_t – sprawność przesyłu energii elektrycznej.

Powyższe obliczenia dotyczące emisji dwutlenku węgla poprzez zużycie energii elektrycznej zastosowano także do kotła na groszek energetyczny, gdyż również zużywa on energię elektryczną.

Tabela 14. Dane dotyczące produkcji energii elektrycznej w Polsce

źródło energii	węgiel kamienny	węgiel brunatny	gaz ziemny	olej opałowy	elektrownie wodne
P - procentowy udział w tworzeniu energii elektrycznej w Polsce [%]	55,4	37,0	3,0	2,0	2,3
WE - wskaźnik emisji CO_2 [$kgCO_2/GJ$] ^a	94,19	109,08	55,82	76,59	0,0

sprawność przetwarzania energii elektrycznej [%] ^b	36
sprawność przesyłu energii elektrycznej [%] ^c	79,2

Źródło: a – [22], b – [23], c – [24].

Wyliczone z powyższych danych emisje dwutlenku węgla ze spalania paliwa oraz w wyniku zużycia energii elektrycznej zestawiono w tabeli nr 15.

Tabela 15. Emisja dwutlenku węgla dla analizowanych źródeł ciepła

	kocioł na groszek energetyczny	pompa ciepła
E_{B-CO_2} [kgCO ₂ /a]	17 371	-
E_{E-CO_2} [kgCO ₂ /a]	992	14 382
E_{CO_2} [kgCO ₂ /a]	18 363	14 382

Jak wspomniano we wstępie wartością charakteryzującą emisję dwutlenku węgla jest wskaźnik TEWI. Wskaźnik ten w przyjętym okresie czasowym równym $n=100$ lat został policzony dla pomp ciepła zgodnie ze wzorem:

$$TEWI = GWP \cdot L \cdot n + GWP \cdot m(1 - \alpha) + n \cdot E_{E-CO_2} [kgCO_2], \quad (10)$$

gdzie:

GWP - potencjał efektu cieplarnianego,

L - wyciek czynnika chłodniczego [kg/a],

n – okres eksploatacji urządzenia [lat],

m – masa czynnika chłodniczego [kg],

α - poziom odzysku czynnika chłodniczego,

natomiast w przypadku kotła jest to całkowita emisja dwutlenku węgla w ciągu roku pomnożona przez 100.

Wartości zmiennych pokazano w tabeli nr 7.

Jak można zauważyć ze wzoru nr 10 przy pompach ciepła została uwzględniona także emisja dwutlenku węgla bezpośrednia w źródle ciepła, czyli ta związana z wyciekiem czynnika chłodniczego.

Wyniki obrazujące emisję dwutlenku węgla z analizowanych źródeł ciepła dla domku jednorodzinnego pokazano na rysunku nr 9.

3. Wyniki badań i dyskusja

Na rysunkach nr 7 i 8 przedstawiono wyniki obliczeń pokazanych w rozdziałach 2.1 oraz 2.2. Przedstawiają one koszty inwestycyjne oraz eksploatacyjne kotłowni na groszek energetyczny oraz źródła zasilania z pompą ciepła dla domku jednorodzinnego.

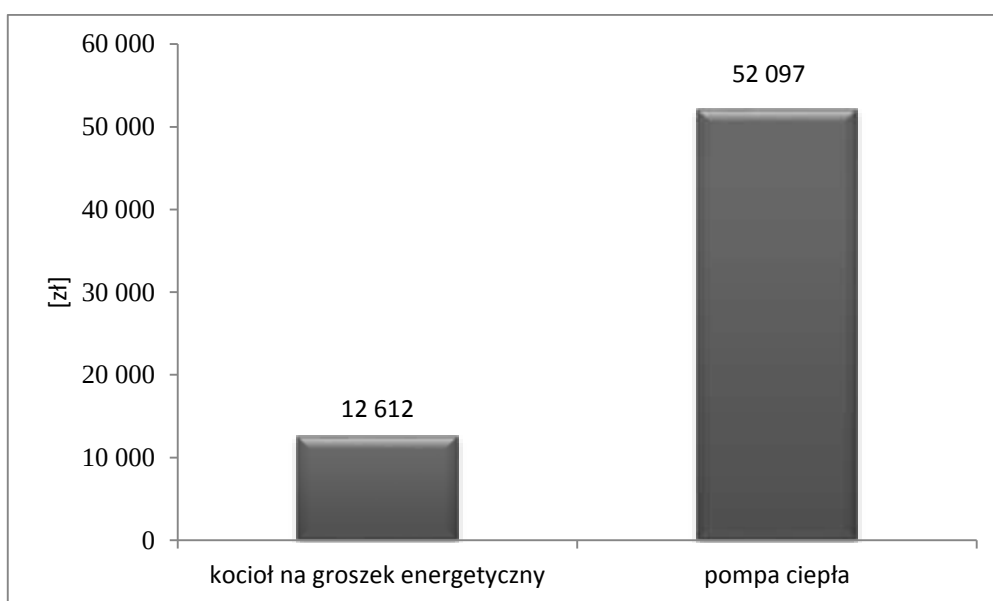
Porównując koszty inwestycyjne oraz eksploatacyjne obu analizowanych źródeł ciepła można na podstawie wzoru nr 11 określić po jakim czasie zwróci się droższa inwestycja jaką jest źródło zasilania z pompą ciepła.

$$SPBT = \frac{I}{Z} [lat] \quad (10)$$

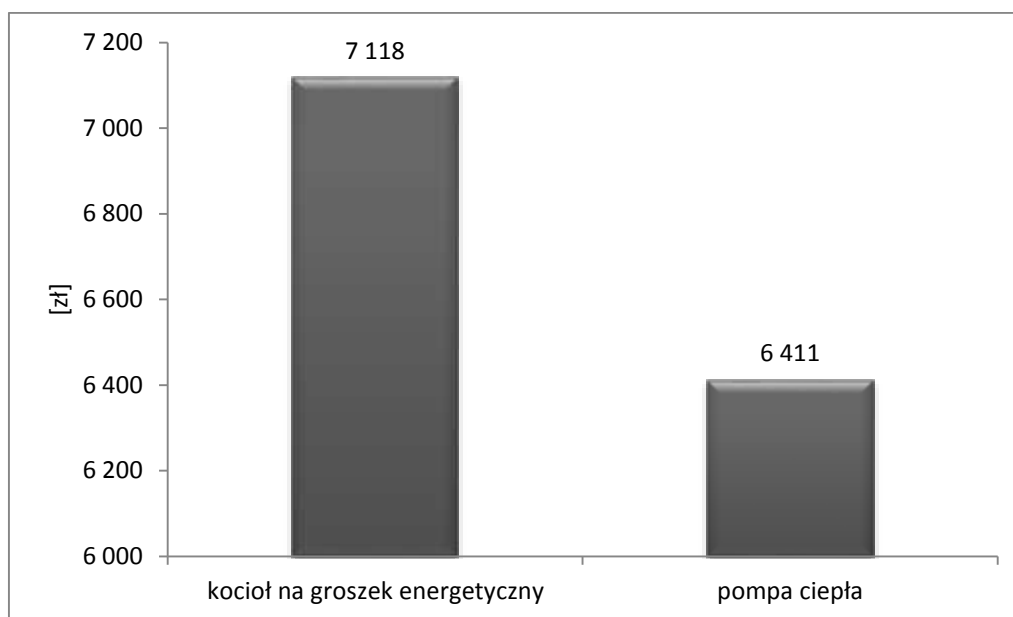
gdzie:

I – różnica nakładu inwestycyjnego na źródło z pompą ciepła i kotłowni na groszek energetyczny [zł],

Z – roczne oszczędności w eksploatacji [zł].



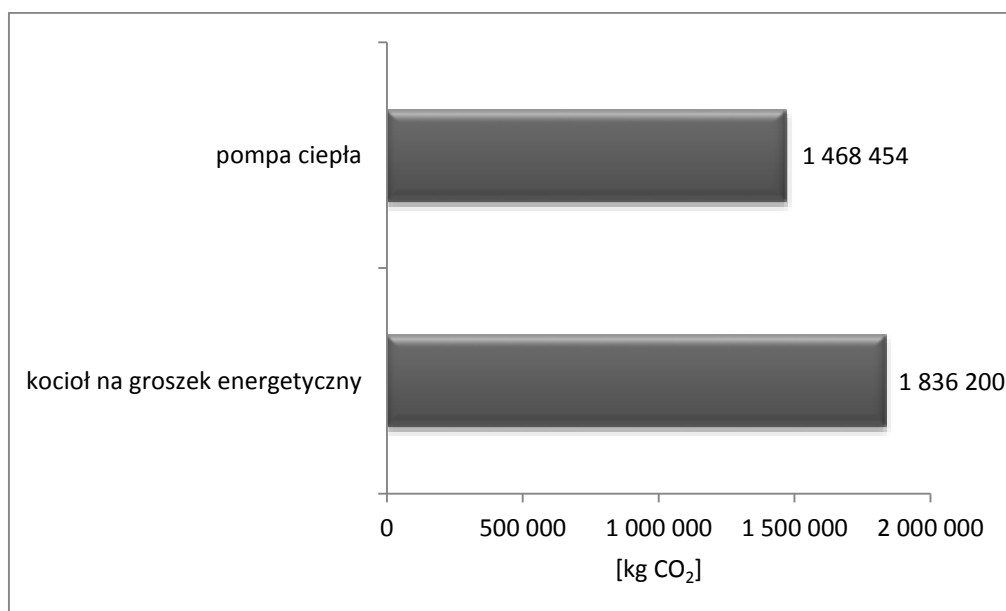
Rysunek 7. Koszty inwestycyjne analizowanych źródeł ciepła dla domku jednorodzinnego



Rysunek 8. Koszty eksploatacyjne analizowanych źródeł ciepła dla domku jednorodzinnego

Określony prosty czas zwrotu nakładu SPBT pokazuje, że inwestycja z pompą ciepła zwróci się dopiero po 56 latach. Na tej podstawie można stwierdzić, że pod względem ekonomicznym inwestycja z kotłem na groszek energetyczny jest bardziej opłacalna. Urządzenie jakim jest pompa ciepła oraz wykonanie odwiertów stanowią bardzo wysokie koszty inwestycyjne, natomiast nie uzyskuje się dużych oszczędności w późniejszej eksploatacji pomimo iż w przypadku pompy ciepła nie potrzebny jest zakup paliwa.

Rysunek nr 9 obrazuje wyniki obliczeń z rozdziału nr 2.3. Analizując go można zauważyć, że stosowanie kotła na groszek energetyczny przyczynia się do większej emisji dwutlenku węgla w porównaniu z pompą ciepła. Jest to różnica na poziomie niecałych 400 kg dwutlenku węgla w przyjętym okresie czasowym $n=100$ lat.



Rysunek 9. Wartość TEWI analizowanych źródeł dla domku jednorodzinnego

Pomimo, że pompa ciepła nie potrzebuje do pracy żadnego paliwa to jednak stosowanie jej przyczynia się w znacznym stopniu do emisji dwutlenku węgla. Związane jest to oczywiście z faktem poboru energii elektrycznej przez pompę ciepła. Jak wykazano w obliczeniach [12] pompy ciepła w warunkach polskich nie mogą być nazywane urządzeniami ekologicznymi. Produkcja energii elektrycznej w Polsce pochodzi przede wszystkim z węgla kamiennego i brunatnego, które charakteryzują się bardzo wysoką emisją dwutlenku węgla. Dopóki w Polsce będzie przeważał właśnie ten surowiec w produkcji energii elektrycznej, to najkorzystniejszym pod względem ekologicznym źródłem ogrzewania będzie kondensacyjny kocioł na gaz ziemny. Porównując obliczenia z niniejszego artykułu oraz z [12] można stwierdzić, że pompa ciepła jest efektywniejsza ekologicznie jedynie od kotła na groszek energetyczny oraz emisja przy jej stosowaniu jest porównywalna do emisji z kotła na olej opałowy. Jak pokazano w [12] pompa ciepła charakteryzuje się niską emisją dwutlenku węgla jedynie w tych krajach, w których znaczny udział w produkcji energii elektrycznej mają źródła odnawialne oraz elektrownie jądrowe.

4. Wnioski

9. Inwestycja z pompą ciepła dla analizowanego domku jednorodzinnego jest czterokrotnie droższa niż kotłownia na groszek energetyczny.

10. Wysokie koszty źródła zasilania z pompą ciepła związane są przede wszystkim z wysoką ceną pomp ciepła, zalecanym montażem zbiornika buforowego (co zwiększa koszty inwestycji) oraz znaczną ceną za wykonanie odwiertów pod sondy gruntowe.
11. Koszty eksploatacyjne obu analizowanych źródeł są praktycznie na równym poziomie. W przypadku kotłowni są to głównie koszty na zakup groszku energetycznego, natomiast w przypadku pompy ciepła, to przede wszystkim opłaty za energię elektryczną.
12. Duża różnica w kosztach inwestycyjnych obu analizowanych źródeł, związana ze znaczącą różnicą w cenie urządzeń oraz niewielka różnica w kosztach eksploatacyjnych składają się na wysoką wartość SPBT.
13. Ogrzewanie domu za pomocą kotła na groszek energetyczny przyczynia się do większej emisji dwutlenku węgla w porównaniu do pompy ciepła.
14. Większa emisja dwutlenku węgla z kotłowni na groszek energetyczny związana jest ze stosowaniem właśnie tego rodzaju paliwa, które produkowane jest z węgla kamiennego.
15. Ogrzewanie domu za pomocą pompy ciepła nie wymaga używania żadnego paliwa, natomiast niezbędna jest tu energia elektryczna. Jednak pomimo, że stosowanie pompy ciepła powoduje niższą emisję dwutlenku węgla, to jest to zaledwie wartość o 20% niższa od emisji pochodzącej z kotła na groszek energetyczny.
16. Stosowanie pomp ciepła w Polsce byłoby bardziej opłacalne pod względem ekologicznym, gdyby energia elektryczna była w większym procencie wytwarzana z odnawialnych źródeł energii (jak ma to miejsce np. w krajach skandynawskich).

Literatura:

1. Pieńkowski K., Krawczyk D., Tumel W.: Ogrzewnictwo, t. I, Politechnika Białostocka, Białystok, 1999.
2. Lewandowski W. M.: Proekologiczne odnawialne źródła energii, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2006.
3. Rodzaje biomasy – serwis poświęcony zmianom klimatycznym i odnawialnym źródłom energii, <http://www.biomasa.org/>, 18.02.2014.
4. Zalewski W.: Pompy ciepła sprężarkowe, sorpcyjne i termoelektryczne: podstawy teoretyczne, przykłady obliczeniowe, Inżynierskie Przedsiębiorstwo Produkcyjno-Usługowe MASTA, Gdańsk, 2001.

5. Ojczyk G., Kotły stałopalne i paliwa stałe. Statystyczne ogrzewanie, <http://www.instalator.pl>, 20.02.2014.
6. Atmospheric CO₂ from Continuous Air Samples at Mauna Loa Observatory, Hawaii, U.S.A. <http://cdiac.ornl.gov/>, 20.10.2013.
7. Vital Climate Graphics. Grid Arendal Publications – Vital Climate Graphics. <http://www.grida.no/publications/vg/climate/>, 20.10.2013.
8. Rubik M., Pompy ciepła, Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie”, Warszawa, 2006.
9. Skoczko I., Piekutin J., Grygorczuk-Petersons E. H., Environmental Engineering – Trough a Young Eye, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2013.
10. Kowalik M., Klos A., Kieloch M., Emisja CO₂ – możliwości jej ograniczenia, www.kolopieczownikow.wip.pcz.pl, 10.02.2014.
11. Niemcy – nowe wymagania dla budynków, Rynek instalacyjny, 2014, p/10.
12. Gajewski A., Siergiejuk J., Szulborski K., Carbon dioxide emission while heating in selected European countries, Energy and Buildings, 2013, p. 197-204.
13. Balcewicz J., Dania emituje ponad 10 ton CO₂ na mieszkańca, Energia Gigawat, 2012, p.4-5, <http://www.cire.pl>, 10.02.2014.
14. Barlinek Naturalne Paliwa, <http://www.pelet.com.pl/>, 02.02.2014.
15. Solińska M.: Efektywność ekonomiczna proekologicznych inwestycji rozwojowych w energetyce odnawialnej, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków, 2003.
16. Polityka klimatyczna Polski. Strategie redukcji emisji gazów cieplarnianych w Polsce do roku 2020, <http://www.mos.gov.pl>, 02.02.2014.
17. Juliszewski T.: Ogrzewanie biomasą, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa 2009.
18. Kotły c.o., <http://www.kostrzewa.com.pl/>, 20.01.2014.
19. Wach E., Grecka K., Polski Instalator, 3, 2008, p. 25-27.
20. Norma PN-92/B-01706, Instalacje wodociągowe. Wymagania w projektowaniu.
21. Taryfa PKP Energetyka S.A., 2014 z dnia 22.02.2014.
22. Wartości opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO₂ (WE) w roku 2010 do raportowania w ramach Wspólnotowego Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji za rok 2013 <http://www.kobize.pl>, 12.02.2014.

23. Brzostkowski M.: E.ON - Wytwarzanie ukierunkowane na sprawność i czyste technologie, Konferencja na temat poprawy bezpieczeństwa energetycznego polski źródeł budowy nowych źródeł energii, Gdańsk, 2008.
24. Ciura Sz., Opłaty dystrybucyjne związane z poborem mocy biernej przez odbiorców Energia Elektryczna nr 2/2011.

mgr inż., Justyna Topolańska¹, dr inż., Dorota Krawczyk²
Politechnika Białostocka, Katedra Ciepłownictwa
ul. Wiejska 45E 15-351 Białystok
e-mail: ¹justynatopolanska@wp.eu, ²d.krawczyk@pb.edu.pl

Gruntowe powietrzne wymienniki ciepła – teoria a praktyka

Słowa kluczowe: *gruntowy wymiennik ciepła, racjonalizacja zużycia energii, ogrzewanie*

Streszczenie: W ostatnich dekadach na coraz większą skalę wprowadzane są rozwiązania proekologiczne, umożliwiające oszczędzanie energii i ochronę środowiska naturalnego. Jednym z takich rozwiązań jest gruntowy powietrzny wymiennik ciepła (GPWC), który służy wstępnemu przygotowaniu powietrza, nawiewanego następnie do pomieszczeń. Zimą powietrze jest ogrzewane, latem jest schładzane. Gruntowe wymienniki ciepła występują w następujących typach: żwirowy, płytowy, rurowy, glikolowy oraz grzebieniowy. Wymiana ciepła z gruntem może zachodzić w sposób przeponowy, bezprzeponowy lub poprzez czynnik pośredniczący. Każde z tych rozwiązań ma swoje wady i zalety. Jako pierwsze pojawiły się w Polsce wymienniki żwirowe. Niektóre z nich funkcjonują od ponad 20 lat. Również w województwie podlaskim można odnaleźć odpowiednie instalacje. Na jednej z nich, pracującej od ok. 2003r. dokonano wstępnych pomiarów. W wybranych godzinach w ciągu dnia mierzono temperaturę powietrza zewnętrznego oraz temperaturę powietrza po jego przepłynięciu przez wymiennik. Uzyskane wyniki pomiarów były zgodne z danymi literaturowymi – GWC stabilizują temperaturę powietrza przy dobowych jej skokach. W analizowanym okresie wymiennik zapewnił oszczędność energii, jednak maksymalnie na poziomie 85 % teoretycznej minimalnej mocy grzewczej. Niestety pełna ocena sprawności instalacji nie była możliwa po wstępnych pomiarach z powodu łagodnej zimy i nie występowania w okresie pomiarowym typowych dla IV strefy klimatycznej temperatur obliczeniowych.

1. Wstęp

Z postępem cywilizacyjnym związane jest powstawanie coraz bardziej zaawansowanych technologii. Jednocześnie kładzie się nacisk, aby technologie te nie wpływały niekorzystnie na środowisko, wykorzystywały energię odnawialną, były energooszczędne. Przykładem takiej technologii są gruntowe powietrzne wymienniki ciepła, które służą do wspomagania instalacji wentylacji mechanicznej. GWC przygotowują wstępnie powietrze, które następnie jest nawiewane do pomieszczeń. Latem, dzięki wymuszeniu jego przepływu pod powierzchnią ziemi o temperaturze niższej niż temperatura powietrza zewnętrznego, powietrze jest schładzane, dzięki czemu uzyskuje się efekt „naturalnego” klimatyzatora. Zimą powietrze zewnętrzne o temp. ujemnej, dzięki przepłynięciu przez grunt o temperaturze wyższej, ogrzewa się, co pozwala na zmniejszenie mocy nagrzewnicy przy centrali wentylacyjnej.

1.2. Podstawowe rodzaje GWC

Zasada działania wymienników gruntowych polega na wymianie ciepła pomiędzy gruntem a powietrzem nawiewanym do instalacji. Zależnie od sposobu wymiany ciepła z gruntem można wyróżnić podstawowe typy GWC. Wymiana ciepła z gruntem może zachodzić na następujące sposoby:

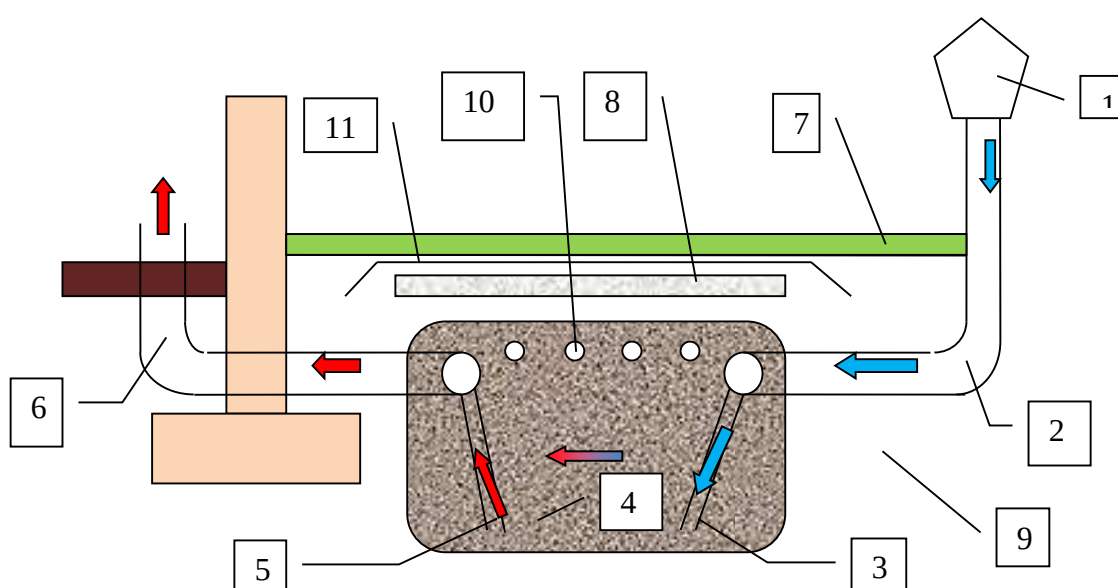
- w wymienniku żwirowym (bezprzeponowo)
 - powietrze przepływa przez grubą warstwę złoża żwirowego (żwir płukany, tłuczeń), złożo może być nawilżane przy wykorzystaniu przewodów zraszających, całość jest przykryta warstwą izolacji termicznej i folią,
- w wymienniku płytowym (bezprzeponowo)
 - powietrze odbiera/oddaje ciepło do gruntu przepływając pod płytami wymiennika i nad warstwą podsypki żwirowej, wymiennik przykryty jest min 12 cm styropianu i folią zabezpieczającą; dzięki zastosowaniu izolacji uzyskuje się symulację warunków z głębszych warstw gruntu i korzystniejszą jego temperaturę,
- w wymienniku rurowym (przeponowo)
 - powietrze przepływa przez system rur, ułożonych w systemie pierścieniowym lub Tichelmann; wymiana ciepła zachodzi przez ściankę rury; rury muszą mieć specjalną powłokę antybakteryjną lub być przystosowane do okresowej dezynfekcji, by nie dopuszczać do zanieczyszczenia mikrobiologicznego powietrza, i muszą być układane ze spadkiem w kierunku studzienki zbierającej kondensat,
- w wymienniku glikolowym (pośrednio)
 - powietrze ogrzewa się lub ochładza w wymienniku typu powietrze/glikol, w gruncie krąży czynnik pośredniczący czyli właśnie glikol,
- w wymienniku grzebieniowym (bezprzeponowo)
 - wymiennik ten stanowi swoiste połączenie wymiennika płytowego i żwirowego.

1.3. Charakterystyka GWC żwirowego

Działania GWC żwirowego opiera się na istnieniu niemal stałej temperatury gruntu w ciągu całego roku na głębokości 1÷4 m. W naszym klimacie na tej głębokości

temperatura gruntu wynosi około $+8$ do $+10$ °C. W praktyce złożę wymiennika jest posadowiony płytko, ale zawsze musi być nad wodami gruntowymi. Wykonanie izolacji termicznej nad złożem GWC symuluje jego posadowienie na głębokości $4\div 5$ m pod powierzchnią ziemi.

Poza poprawą temperatury powietrza nawiewanego, uzyskuje się także korzystniejszą wilgotność świeżego powietrza. Zimą powietrze jest nawilżane, zaś latem wilgoć kondensuje, dzięki czemu powietrze jest osuszane. Eliminuje to odczucie duszności w pomieszczeniach. Ponadto GWC żwirowy przez cały rok filtruje powietrze, usuwając z niego bakterie, grzyby i alergeny.[1, 2, 3]



Rysunek 1. Przekrój GWC typu żwirowego

Źródło: opracowanie własne

Legenda do rysunku 1:

1. Czerpnia powietrza zewnętrznego
2. Kanały rozprowadzający powietrze w poziomie
3. Kanały rozprowadzające powietrze do dna GWC
4. Żwirowe złożę akumulacyjne
5. Kanały zbierające powietrze
6. Poziomy kanał zbierający-ujęcie powietrza do budynku
7. Humus-ziemia, trawa

*8. Styropian**9. Grunt rodzimy**10. Instalacja zraszająca**11. Folia*

Do czerpania powietrza dla wymiennika żwirowego służy czerpnia terenowa powietrza zewnętrznego (patrz rys.1). Powietrze następnie jest rozprowadzane kanałami do złoża. Złoże jest wykonane ze żwiru płukanego o odpowiedniej granulacji. Po przepłynięciu przez złoże ogrzane/schłodzone powietrze jest zbierane kanałami zbierającymi i doprowadzone do budynku. Ponad złożem należy umieścić izolację termiczną, stymulującą głębsze posadowienie wymiennika. W górnej części złoża montuje się instalację zraszającą, która zapewnia nawilżenie powietrza zimą i schłodzenie złoża latem.

GWC żwirowy nie wymaga obsługi i konserwacji. W przeciwieństwie do GWC rurowego nie ma konieczności odprowadzania kondensatu, gdyż samoczynnie spływa on przez złoże i wsiąka do gruntu rodzimego. Skroplona para wodna podczas przepływu przez GWC dodatkowo omywa go z zanieczyszczeń, które osiadają podczas przepływu powietrza zewnętrznego.

Do najważniejszych zalet gruntowego wymiennika żwirowego można zaliczyć [1, 3, 4, 5]:

- efektywną wymianę ciepłą z gruntem,
- chłodzenie i osuszanie powietrza w okresie letnim,
- ogrzewanie i o nawilżenie powietrza w okresie zimowym,
- ograniczenie kosztów ogrzewania/chłodzenia powietrza,
- proste wykonanie, z tanich i łatwo dostępnych materiałów,
- filtrowanie powietrza wchodzącego do budynku (w efekcie jest ono higienicznie czyste).

Wady gruntowego wymiennika żwirowego [2, 4]:

- nie można stosować go przy wysokim poziomie wód gruntowych, zalanie wodą zatrzymuje pracę wymiennika lub może wywoływać zapach stęchlizny,
- konieczność regeneracji złoża (w relatywnie długim czasie 12h) lub budowy złoża tzw. syjamskiego (w jednym wykopie dwa równoległe, pracujące naprzemiennie złoża),
- nie można go lokalizować pod przejazdami samochodowymi, gdyż takie obciążenia mogą wywołać uszkodzenie złoża,

- złoże żwirowe generuje znaczne opory dla przepływającego powietrza, dlatego GWC żwirowy powinien być wyposażony w wentylator wspomagający o wysokim sprężu.

Złoże żwirowe nie może pracować przez cały czas. Należy zapewnić przerwę na „relaksację” złoża żwirowego. Proces ten umożliwia ponowne uzyskanie przez złoże temperatury otaczającej je ziemi. Z tego tytułu system wentylacyjny wyposażony w GWC musi bezwzględnie posiadać dodatkową czerpnię ścienną, z której będzie pobierane powietrze podczas trybu regeneracji złoża, a także umożliwi ona korzystanie z systemu wentylacyjnego z pominięciem GWC. Korzystanie z wymiennika jest niewskazane w okresach przejściowych (tj. wiosną i jesienią), kiedy temperatura powietrza zewnętrznego wynosi od 1 do około 20 °C. Przy takich wartościach temperatur nie ma możliwości uzyskania żadnego efektu energetycznego, ponieważ powietrze po przejściu przez wymiennik będzie miało podobną temperaturę jak na zewnątrz. Wymiennik najlepiej jest włączyć zimą, gdy temperatura powietrza zewnętrznego spada poniżej zera oraz latem, gdy wzrasta powyżej 21-23. [1, 2]

Bezpośredni kontakt żwiru z otaczającym gruntem pozwala uzyskać szybką regenerację złoża. Ponadto złoże żwirowe charakteryzuje się dużą bezwładnością cieplną. W ciągu jednego miesiąca zmiany parametrów powietrza opuszczającego wymiennik są wręcz niezauważalne. Dzięki temu niwelowane są skoki temperatury w ciągu doby, a także w kolejnych następujących po sobie dniach, co jest zjawiskiem korzystnym. Z kolei bezwładność wymiennika może być niekorzystna w sytuacji, gdy dochodzi do szybkiego ocieplenia zimą lub gwałtownego ochłodzenia latem – wtedy znacznie lepiej jest korzystać bezpośrednio z powietrza zewnętrznego, z pominięciem wymiennika gruntowego. [1, 5]

Jednym z najdłużej pracujących gruntowych wymienników ciepła typu żwirowego w Polsce jest wymiennik przy Kieleckim Centrum Biznesu, obecnie biurowcu EXBUD-SKANSKA. Powstał w latach 1989 – 1990, by obsługiwać energooszczędny kompleks budynków o łącznej kubaturze 96.000m³. Do kompleksu budynków zalicza się 15-kondygnacyjny biurowiec, w którym mieszczą się m.in. sale wystawowe, sala kongresowa, bank, zespół hotelowo-rekreacyjny oraz zespół gastronomiczny. Zastosowano tam szereg rozwiązań energooszczędnych, do których można zaliczyć: bezprzeponowe wymienniki gruntowe ciepła oraz rurowy wymiennik gruntowy, rekuperatory obrotowe, pompy ciepła systemu powietrze-woda do podgrzewania ciepłej wody użytkowej, recyrkulację powietrza w pomieszczeniach, w których było to możliwe ze względów higienicznych, wentylację pomieszczeń drugorzędnych za pomocą powietrza wyciąganego z pomieszczeń reprezentacyjnych i inne. [5]

Gruntowe wymienniki ciepła typu żwirowego rozmieszczono na niewielkiej głębokości pod trawnikami wokół zespołu budynków. Złoże akumulacyjno-wymienne stanowi warstwa grys granitowy. Współpracują one z instalacjami wentylacyjnymi większości budynków kompleksu. Natomiast budynek hotelowy dysponuje wymiennikiem gruntowym rurowym. Gruntowe wymienniki ciepła osiągają łącznie wydajność 137 tys. m³ powietrza na godzinę. [5]

W wymiennikach bezprzeponowych zastosowano grys granitowy o granulacji 12 – 20 mm jako złoże akumulacyjne, natomiast w części rozprawdzającej i zbierającej wykorzystano tłuczeń granitowy o granulacji 50 – 100 mm. Największy wymiennik, o wymiarach zewnętrznych 30m x 12,5m x 1,5m (szerokość x długość x wysokość), posiada wydajność 33 500 m³/h i moc 172 kW. Opory złoża to ok. 400 Pa, wyliczony stosunek mocy włożonej do uzyskanej – 1:35. Przy wymienniku rurowym (przeponowy) zastosowano rury żeliwne o śr. 200 mm, ułożone na długości 50 m. Moc tego wymiennika to 5,4 kW, zaś wydajność to 2500 m³/h. [6]

Po rozruchu, w roku 1990 i 1991, wymienniki zostały przebadane przez Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie. Przez następne 6 lat funkcjonowania wymienniki podlegały monitorowaniu. Uzyskane wyniki potwierdziły ich skuteczność. Przy temperaturach powietrza atmosferycznego rzędu -19 ÷ -20°C, za wymiennikiem uzyskiwano powietrze o temperaturze do 0°C w przypadku wyłączania ich na okres nocny (umożliwienie regeneracji) i o temperaturze -5°C przy pracy bez przerwy. Natomiast w okresie letnim przy temperaturze zewnętrznej + 24°C do +26°C, następuje schłodzenie do + 14°C (od +12°C do +16°C), co pozwala na poprawę mikroklimatu w budynkach i efekt klimatyzacji bez udziału urządzeń chłodniczych. Okazało się też, że przewidziana w projekcie i wykonana instalacja służąca do dezynfekcji złożeń nie została nigdy wykorzystana, gdyż nie zaszła taka potrzeba. Dokonano też szacunkowego określenia oszczędności energii, jaką uzyskuje się dzięki zastosowaniu GWC. Oszczędzona moc to 486 kW, co przekłada się na zaoszczędzenie 105,7 t/rok węgla. Chłodne powietrze uzyskane latem po GWC jest wystarczające do zapewnienia odpowiedniego mikroklimatu w pomieszczeniach wentylowanych, bez konieczności stosowania klimatyzacji. [5, 6]

Zimą GWC dobrze współpracuje z rekuperatorami, zaś latem dzięki dużej wydajności i niski kosztom eksploatacji nie ma konieczności zawracania części powietrza wywiewanego – można wykorzystywać tylko powietrze zewnętrzne.

Zyski energii w wymienniku zależą od warunków atmosferycznych – przy łagodnej zimie i niezbyt upalnym lecie stosowanie wymiennika nie wywołuje zbyt dużych oszczędności. Jednak przy wielostopniowych, długo utrzymujących się mrozach GWC zapewni znaczne

oszczędności energii przy ogrzewaniu powietrza. Podobnie latem – przy wysokich temperaturach zapewni chłodne powietrze w pomieszczeniach, bez konieczności zużywania energii na klimatyzatory freonowe.

Na Politechnice Wrocławskiej zostały przeprowadzone badania efektywności wymienników. Na podstawie wyników określono, że jednostkowy strumień mocy chłodniczej wymienników wynosi od 0,33 do 9,67 W/(m³/h), zaś mocy cieplnej od 0,67 do 7,00 W/(m³/h). Znając wydajność wymiennika i możliwą do uzyskania wartość jednostkowego strumienia ciepła, można określić moc chłodniczą/cieplną wymiennika. [7]

W roku 1994 i w 2004 r. SANEPID wykonał badania jakości powietrza. Pierwsze badania pozwoliły ustalić, że w powietrzu po przejściu przez złoża żwirowe znajduje się mniej komórek drobnoustrojów niż w powietrzu niż przy wlocie. Jako uzupełnienie tych danych w 2004 roku przeprowadzono kolejne. Należy zaznaczyć, że nie dokonywano przez cały poprzedzający okres eksploatacji złoża żadnych czynności dezynfekcyjnych. Również te badania potwierdziły, że w powietrzu nawiewanym do pomieszczeń po przejściu przez GWC znajdują się nikłe ilości drobnoustrojów, a ilości wyhodowanych żywych bakterii i grzybów oraz ich chemicznych markerów były znacznie niższe niż na wlocie do wymiennika. Nie stwierdzono, by na złożu żwirowym następował wzmożony wzrost bakterii. [8]

W województwie podlaskim również można znaleźć przykłady pracujących od dawna wymienników żwirowych. Znajdują się one m.in. przy budynkach biurowych.

Jedną ze starszych instalacji w Białymstoku jest złoża żwirowe pracujące przy budynku biurowym należącym do jednego z developerów, mieszczącym się przy ul. Pięknej. Wymiennik pracuje tylko w okresie letnim jako wspomaganie chłodzenia pomieszczeń w budynku. Powstał około 1995 r. Od tamtej pory nie stwierdzono żadnych problemów z jego eksploatacją.

W budynku instalacja ogrzewania rozwiązana jest jako powietrzna, powietrze zewnętrznie jest ogrzewane w kotle olejowym. Niestety nie jest możliwe korzystanie z wymiennika w okresie zimowym do wstępnego podgrzewania powietrza. Natomiast latem powietrze jest schładzane w wymienniku, jednak i tak przechodzi przez kocioł (na jego wyświetlaczu podawana jest wartość temperatury powietrza). W przypadku upałów wymiennik okazuje się być niewystarczający dla schłodzenia pomieszczeń biurowych, w których mają miejsce zyski ciepła od słońca, ludzi i komputerów. Konieczne jest wspomaganie pracy wymiennika chłodnicą kanałową. Przyczyną tego może być dość nieznaczna powierzchnia wymiennika, wynikająca z małej powierzchni działki własnej.

Instalacja zaczyna się czerpnią murowaną z żaluzją, nie ma tam żadnego filtra. Następnie powietrze jest kierowane do złoża kamiennego. Nad złożem jest zamontowana

instalacja wodna do schładzania. Złoże posiada zajmuje powierzchnię 3,2 x 5,0 m, przy wysokości czynnej warstwy 1,5m. Granulacja zastosowanego żwiru płukanego to 16 – 31 mm. Warstwa styropianu nad złożem wynosi 10 cm. Następnie powietrze jest zbierane kanałem murowanym, wchodzi do budynku pod posadzką i jest nawiewane do pomieszczeń. Temperatura za złożem zwykle wynosi 22 – 23 stopnie i jest trochę za wysoka, by zapewnić warunki komfortu cieplnego.



Rysunek 2. Czerpnia do GWC typu żwirowego przy ul. Pięknej w Białymstoku

Źródło: fot. J. Topolańska

Żwirowy gruntowy wymiennik ciepła znajduje się również przy biurowcu firmy zajmującej się wynajmem i sprzedażą podnośników, wózków widłowych itp.. Firma ma swoją siedzibę w Złotorii k. Białegostoku.

Wymiennik żwirowy powstał w 2002 r.. Pracuje on, by wstępnie przygotować powietrze do ogrzewania powietrznego w budynku.



Rysunek 3. Czerpnia do GWC typu żwirowego obsadzona jodłami w Złotorii k. Białegostoku

Źródło: fot. J. Topolańska

Według zapewnień właściciela, zimą temperatura za wymiennikiem nigdy nie była niższa niż 3 – 4 °C, nawet podczas silnych mrozów. Jednocześnie w budynku, pomimo licznych przeszkleń, nie jest konieczne stosowanie instalacji klimatyzacyjnej. Nigdy nie było żadnych problemów z eksploatacją złoża.

Z uwagi, iż firma ma swoją siedzibę przy drodze krajowej, czerpnia jest otoczona jodłami, które wstępnie oczyszczają pobierane powietrze i je jonizują. Następnie powietrze przepływa przez złożo utworzone przez 700 ton żwiru płukanego o granulacji 20 – 30 mm. Zimą powietrze jest dogrzewane w kotle olejowym, zużycie oleju opałowego to około 2000l. Kocioł powietrzny (Logano G215) ma moc znamionową 59 – 70 kW. Z uwagi na zastosowanie wentylatorów o małym zużyciu energii elektrycznej, złożo pracuje całą dobę przez okrągły rok. Nie powoduje to „wyczerpywania się” złoża. Wiosną i jesienią przepływ przez złożo jest ręcznie zmniejszany (przełączenie na niższy bieg wentylatora). Latem (po długotrwałych upałach) po GWC jest uzyskiwana temperatura ok. 18°C.

Kolejny GWC żwirowy znajduje się w Grabówce koło Białegostoku, na nim właśnie przeprowadzono wstępne pomiary temperatury (patrz punkt 2).

1.4. Charakterystyka GWC płytowego

GWC płytowy jest wymiennikiem bezprzeponowym, jednak jego konstrukcja różni się od konstrukcji wymiennika żwirowego.

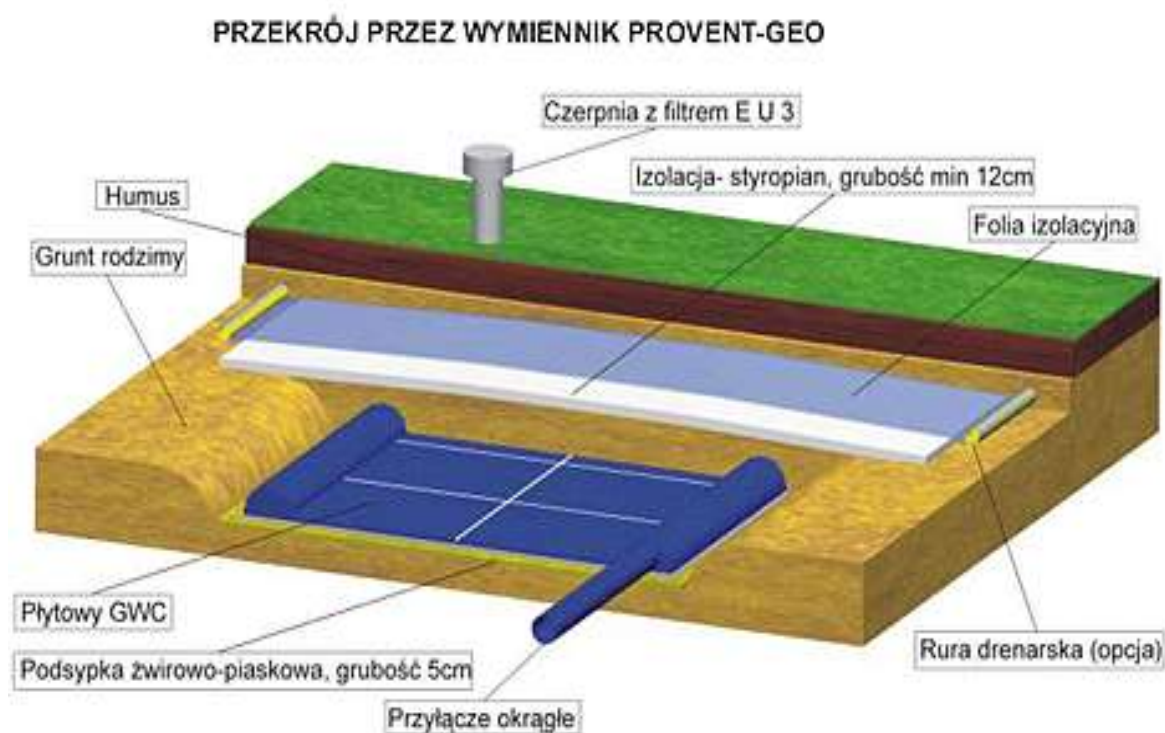
Wymiennik Provent-Geo nie potrzebuje czasu na regenerację, może i powinien pracować ciągle. Również ze względów higienicznych, gdyż ruch powietrza zapobiega rozwojowi drobnoustrojów.

GWC płytowy powinien być posadowiony powyżej poziomu wód gruntowych, min. Głębokość wykopu to ok. 0,7 m. Możliwe jest wyniesienie wymiennika powyżej rzędnej terenu. Wymiennik nie może być zalewany wodą gruntową.

Powietrze do GWC jest pobierane przez czerpnię powietrza, powinien się w niej znajdować filtr. Powietrze jest transportowane do samego wymiennika przez rurę z wkładem antybakteryjnym, już na tym odcinku dochodzi do ogrzewania/chłodzenia powietrza. Wymiennik płytowy składa się z systemu modułów specjalnie opracowanych płyt, których budowa zapewnia bezprzeponowy przepływ powietrza. Po obróbce termicznej powietrze jest zbierane przez kanał odprowadzający i doprowadzane do wentylowanych pomieszczeń. Konstrukcja ma zapewnić minimalne opory dla przepływającego powietrza przy maksymalnej efektywności. [9]

Podsypka żwirowo – piaskowa o grubości warstwy ok. 5cm powinna zostać usypana na rodzimym podłożu. Podsypkę należy wykonać z płukanego żwiru o granulacji ok. 10-20 mm i zagęścić płukanym piaskiem. Wymiennik płytowy jest układany bezpośrednio na podsypce, jest połączony z wentylowanym budynkiem za pośrednictwem przyłącza okrągłego. Przyłącze należy układać ze spadkiem w kierunku wymiennika. Jako izolację stosuje się styropian w postaci płyt, łączna grubość płyt to min. 12 cm. Umożliwia ona uzyskanie temperatury gruntu 8 – 10 °C, właściwej dla głębokości ok. 8 m, na znacznie mniejszej głębokości. Izolację należy ułożyć o min. 1,5 m szerzej niż obrys wymiennika, ze spadkiem ułatwiającym odprowadzenie wody. Z kolei folia izolacyjna zabezpiecza wymiennik przed wodą opadową, układa się ją szczelnie na styropianie. Czerpnia gruntowa powinna być zabezpieczona przed gryzoniami, które mogłyby się przedostawać do wnętrza wymiennika. Powinien się w niej także znajdować filtr klasy EU4. W przypadku dużych powierzchni wymiennika oraz gruntów mało przepuszczalnych należy także zastosować rurę drenarską w celu łatwiejszego odprowadzenia wód opadowych. [9]

W przypadku tego wymiennika bezprzeponowego powietrze przepływa nie pomiędzy kamieniami złoża, ale nad nimi, w przestrzeni pomiędzy podsypką a płytami wymiennika. [2]



Rysunek 4. Przekrój przez GWC płytowy

Źródło: www.wymiennik-gruntowy.pl

Wymiennik płytowy bazuje na akumulacyjnej właściwości gruntu w obszarze pod termoizolacją, zatem praktyczna wielkość wymiennika uwarunkowana jest powierzchnią styropianu a nie tylko płyt. W okresie letnim wymiennik oddaje chłód, który „zgromadził się” w gruncie zimą, powodując tym samym schłodzenie powietrza nawiewanego. O bardzo dobrej wymianie cieplnej układu powietrze – grunt może świadczyć stabilny poziom temperatury na wylocie z wymiennika. Przy kilkudniowych upałach temperatura wzrasta powoli, dzięki odpowiednio dużej akumulacyjności wymiennika. Regeneracji wymiennika sprzyja praca przez całą dobę – gdy powietrze zewnętrzne jest chłodniejsze.

Podczas przepływu powietrza o wysokiej temperaturze i wilgotności przez chłodny wymiennik następuje wykraplanie się wilgoci na powierzchni gruntu. Zatem uzyskuje się schłodzone i osuszone powietrze, czyli lepszy komfort w wentylowanych pomieszczeniach (bez odczucia duszności). By zniwelować odczucie duszności, powietrze musi być schłodzone do 18°C lub niżej. Wykroplony kondensat powstający podczas schładzania powietrza jest odprowadzany poprzez podsypkę żwirową do gruntu rodzimego.

Tabela 1. Przykładowe wymiary i parametry GWC płytowych

Ilość powietrza m ³ /h	Powierzchnia termoizolacji m x m	Temperatura powietrza za wymiennikiem latem		Strata ciśnienia na wymienniku Pa	Średnica przyłącza mm
		Praca 12h/d °C	Praca 24h/d °C		
do 400	7 x 10	14 – 16	14 – 18	45	200
do 600	8 x 10	14 – 16	14 – 18	50	250
do 800	9 x 10	14 – 17	14 – 19	50	250
do 1100	11 x 10	14 – 17	14 – 19	65	315
do 2000	13 x 12	14 – 17	14 – 19	80	400

Źródło: www.wymiennikgruntowy.pl

W okresie zimowym z kolei wymiennik „oddaje” zgromadzone ciepło. Wartość temperatury za GWC również zimą jest bardzo stabilna. Nawet podczas kilkudniowych znacznych spadków temperatury powietrza zewnętrznego temperatura za wymiennikiem jest nieco wyższa od 0°C. Wymiennik ten posiada zdolność podwyższania wilgotności powietrza w okresie zimowym. Wg badań powietrze przechodzące przez wymiennik jest nawilżane do nawet 90% wilgotności względnej. Trwa to do końca grudnia, a dopiero od stycznia (czyli w środku sezonu grzewczego) zaczyna się osuszanie powietrza w ogrzewanych pomieszczeniach. Jest to jednak osłabiane dzięki dalszemu nawiewaniu powietrza dowilżonego z GWC. [9]

Zalety GWC typu płytowego [2, 9, 10]:

- praktycznie 100% wymiana ciepła powietrze – grunt,
- duża powierzchnia wymiany ciepła z gruntem,
- wymiennik można posadowić na niewielkiej głębokości,
- chłodzenie i osuszanie powietrza w okresie letnim,
- ogrzewanie i nawilżanie powietrza w okresie zimowym,
- nieznaczne opory przepływu,
- nie jest wymagana regeneracja złoża – GWC może pracować ciągle,
- może być płytko posadowiony,
- potrzebna jest niewielka ilość podsypki piaskowo – żwirowej, więc znacznie łatwiej jest zapewnić wysoką jakość płukanego materiału
- jest przystosowany do umieszczenia pod posadzką budynku.

Wady GWC typu płytowego [2, 4, 10]:

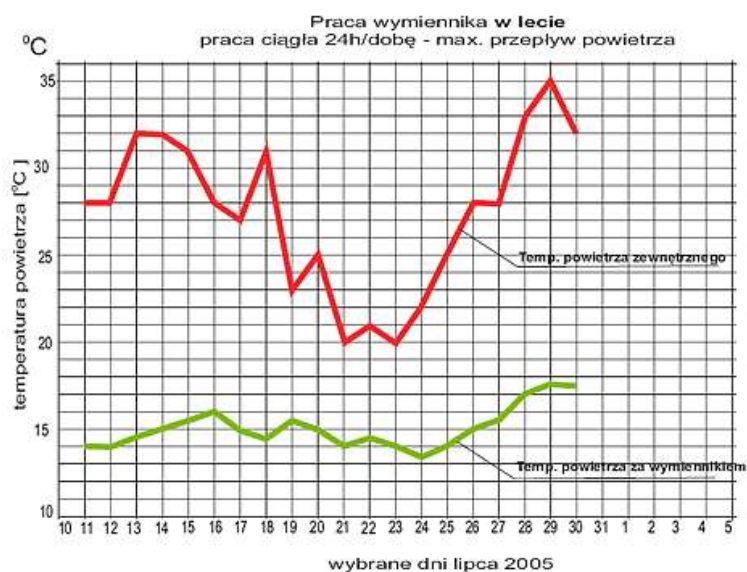
- nie jest rozwiązaniem szczelnym – w przypadku wysokiego poziomu wód gruntowych należy go wykonywać w sposób przemyślany, np. jako wyniesiony ponad teren,
- musi być wykonany przez odpowiednich fachowców lub pod nadzorem producenckim,
- zajmuje trzy – czterokrotnie większą powierzchnię niż złoża żwirowe (które jest głębsze),
- z uwagi na większą powierzchnię - większy koszt materiałów na docieplenie złoża.

Firma Provent-Geo prowadzi cały czas pomiary na wymienniku zamontowanym pod halą produkcyjną firmy, można zobaczyć tam wykresy dla aktualnego dnia, a także zbiorcze – miesięczne i roczne. [9]

W okresie letnim uzyskuje się obniżenie temperatury powietrza nawiewanego do 13 – 17 °C przy temperaturze powietrza zewnętrznego 25 - 32°C. Zimą z kolei powietrze o temperaturze -20 °C jest ogrzewane do ok. 0°C. Uzyskuje się w ten sposób znaczny zysk energetyczny oraz ochronę centrali wentylacyjnej przed zamarznięciem. [9]

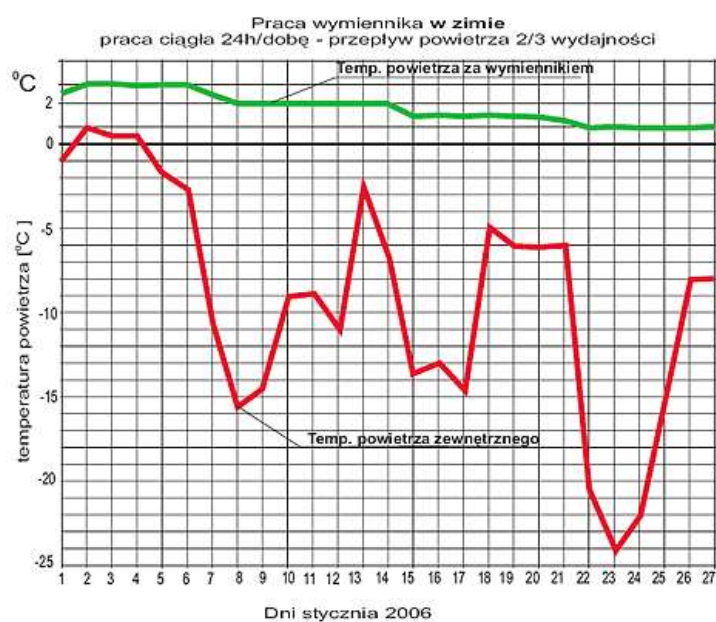
Badania Sanepidu w Opolu również w tym przypadku potwierdziły, że powietrze po przejściu przez wymiennik jest oczyszczone z zarodników grzybów i bakterii. Następuje redukcja stężenia bakterii o 86% i grzybów o 97%. Przepływ bezprzeponowy zapobiega rozwojowi grzybów i pleśni, dzięki stabilizującemu działaniu naturalnej flory gruntowej. Również Państwowy Zakład Higieny wykonał pomiary jakości powietrza przed i po przejściu przez gruntowy wymiennik powietrza, potwierdzając że GWC nie może być źródłem zanieczyszczenia mikrobiologicznego przepływającego przez nie powietrza

Wymiennik nie wymaga czyszczenia, gdyż jest wykonany z antystatycznych płyt. Ponadto niewielka prędkość przepływu sprzyja bezpiecznemu użytkowaniu przez długi okres. Systematycznie musi być wymieniany filtr na czepni (min. raz na trzy miesiące), gdyż zapchany filtr zwiększa opory przepływu nie oczyszcza wstępnie powietrza. Od czasu do czasu można przeczyścić rurę łączącą czepnię z kolektorem wymiennika.



Rysunek 5. Wykres pracy GWC płytowego w wybranym okresie letnim

Źródło: www.wymiennikgruntowy.pl



Rysunek 6. Wykres pracy GWC płytowego w wybranym okresie zimowym

Źródło: www.wymiennikgruntowy.pl

Na powyższych wykresach można zobaczyć skuteczność wymiennika w wybranych dniach lipca 2005 i stycznia 2006. W ekstremalnych przypadkach następowało schłodzenie powietrza o 17 °C i ogrzanie o 25 °C.

Dodatkowym atutem wymiennika płytowego jest równomierny rozkład ciśnienia, osiągany dzięki jego konstrukcji. Całkowite opory są nieznaczne.

Wymiennik płytowy jest chroniony w Urzędzie Patentowym. Producent oferuje „Kalkulator ciepła i chłodu”, czyli program obliczeniowy wymiennika ciepła.

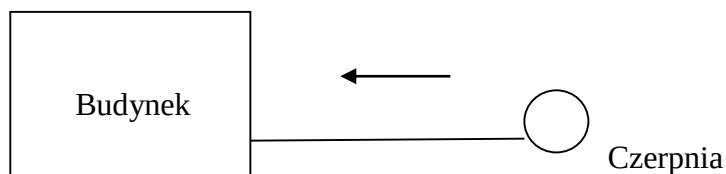
1.5. Charakterystyka GWC rurowego

GWC rurowy stanowi system rur ułożonych poziomo, na głębokości ok. 1,5m poniżej poziomu terenu. W tym przypadku także wykorzystywana jest zdolność akumulacyjna gruntu, jednak wymiana ciepła zachodzi przez przeponę – ścianki rur. Stała temperatura gruntu (na poziomie 8 – 10 °C) jest wykorzystywana do ogrzania lub schłodzenia powietrza płynącego w systemie rurowym. Zimą do centrali wentylacyjnej jest kierowane wstępnie ogrzane powietrze. Natomiast latem uzyskuje się temperaturę za wymiennikiem w granicach 16 °C, co pozwala na uniknięcie konieczności montowania instalacji klimatyzacyjnej.

Wymiennik rurowy może być wykonywany w następujących konfiguracjach [1, 2]:

- jako prosty odcinek rury,

- rura ułożona ze spadkiem (ok. 2%) od czerpni do budynku,
- niski koszt wymiennika,
- niskie opory wymiennika,
- łatwe czyszczenie wymiennika w razie potrzeby,
- potrzebny jest stosunkowo duży obszar by ułożyć odcinek prosty rury.

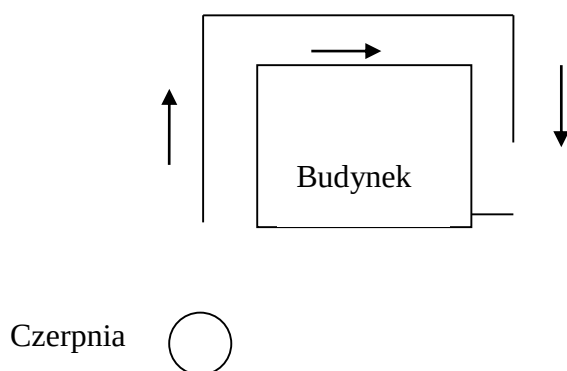


Rysunek 7. GWC rurowy jako odcinek prosty

Źródło: Opracowanie własne

- jako odcinek łamany,

- może być ułożony jako litera „U” lub „S”,
- układ pierścieniowy – wokół budynku, przy zachowaniu min. 0,8 m odległości od fundamentów budynku,
- nieco wyższy koszt z uwagi na zastosowanie kształtek,
- nieco wyższe opory wymiennika,
- wymiennik potrzebuje mniejszego obszaru,
- nieco trudniejsze czyszczenie wymiennika.

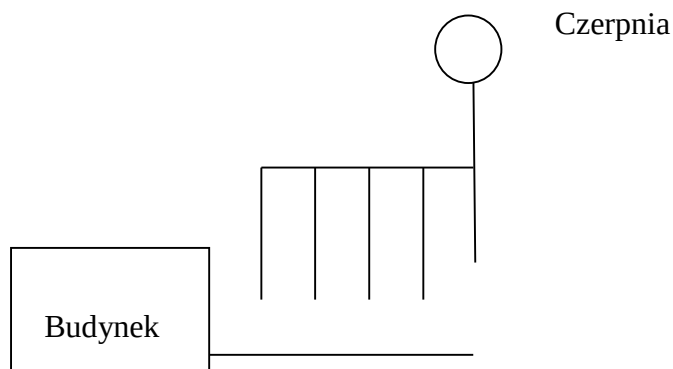


Rysunek 8. GWC rurowy w układzie pierścieniowym

Źródło: Opracowanie własne

- w układzie Tichelmanna

- rura wiodąca od czerpni do wymiennika rozgałęzia się na kilka równoległe biegnących przewodów, które ponownie się łączą i wchodzi do budynku jako jedna rura,
- w przypadku dużych (przemysłowych) instalacji można zmniejszyć średnicę rur równoległych, w przypadku małych – nie jest to zalecane, by nie spowodować zbyt dużych oporów przepływu.



Rysunek 9. GWC rurowy w układzie Tichelmanna

Źródło: Opracowanie własne

Przy wykonywaniu załamań najlepiej jest korzystać z kolanek 45° niż 90° , gdyż powodują one mniejsze straty przepływu.

Wymiarując GWC rurowy należy pamiętać, że przy mniejszych średnicach uzyskuje się lepszą wydajność cieplną, ale i też większy spadek ciśnienia. Czym dłuższy rurociąg, tym może zajść większa wymiana cieplna, ale i potrzebny będzie wentylator o większym sprężu. Zastosowanie systemu Tichelmanna zmniejsza spadek ciśnienia i umożliwia lepszą wymianę cieplną. [11]

Wpływ różnych czynników środowiskowych i geometrycznych dla rurowego GWC został omówiony w [12].

Zastosowanie gruntowego wymiennika ciepła typu rurowego do ogrzewania domów pasywnych opisał V. Badescu, np. w [13].

Należy pamiętać o konieczności zapewnienia odpływu kondensatu. Rurociąg powinien być układany ze spadkiem w kierunku studzienki odwadniającej. [3]

Wymiennik gruntowy można wykonywać ze zwykłych rur PVC, które okresowo muszą być poddawane dezynfekcji, lub z rur systemu AWADUKT Thermo firmy Rehau. W dalszej części przedstawione zostaną informacje bazujące na systemie oferowanym przez firmę Rehau.

Producent oferuje pomoc przy projektowaniu i wymiarowaniu wymiennika. Ponadto na stronie internetowej jest dostępny program obliczeniowy, w którym są analizowane następujące parametry:

- strumień powietrza,
- głębokość ułożenia,
- typ materiału,
- typ gruntu oraz wpływ wody gruntowej,
- strefy klimatyczne w Polsce.

Rury stosowane do gruntowego wymiennika ciepła muszą posiadać antybakteryjną warstwę wewnętrzną, która będzie minimalizowała niebezpieczeństwo rozwoju mikroorganizmów. Ponadto rury te zostały opracowane w taki sposób, aby zintensyfikować wymianę ciepła przez ścianki rur. Wykonanie systemu z rur polipropylenowych o współczynniku przewodności cieplnej $\lambda=0,3 \text{ W/mK}$ (czyli trzykrotnie większym niż przy rurach ze zwykłego PVC) pozwala na uzyskanie bardzo dobrych parametrów temperaturowych powietrza opuszczającego wymiennik. Rury te ponadto są bardzo wytrzymałe i odporne na uderzenia, nadają się zatem do układania w gruntach rodzimych o cząstkach gruboziarnistych, a także w gruntach pod dużym obciążeniem statycznym i dynamicznym oraz pod budynkami w obrysie fundamentów (sztywność obwodowa systemu mieści się w klasie SN6). Rury te

posiadają również podwyższoną sztywność wzdłużną, która nie pozwala na powstawanie syfonów zastoiskowych kondensatu. System, dzięki specjalnej konstrukcji mufy połączeniowej (uszczelka jest zamocowana na stałe w mufie i zabezpieczona przed wypięciem), odporny jest na przenikanie wód gruntowych i radonu. Może być montowany wszędzie tam, gdzie występuje wysoki stan wód. System ten został poddany badaniom określającym bezpieczeństwo jego stosowania w aspekcie ochrony przeciwpożarowej budynków. Opinia Centrum Naukowo – Badawczego w Józefowie potwierdziła bezpieczeństwo jego stosowania. System można czyścić wodą pod ciśnieniem do 120 bar. System można dopasować do potrzeb wszystkich użytkowników, dzięki szerokiemu zakresowi średnic – od DN200 do DN1200. Pozwala to na transport powietrza w ilości od 300 do nawet 20 000 m³/h. [13]

Optymalna prędkość przepływu powietrza przez rurę wymiennik ciepła powinna wynosić 2 – 4 m/s. Przy tym zakresie prędkości wymiana cieplna jest najlepsza, ponadto zapewniony jest odpowiedni stosunek pomiędzy czasem zatrzymania powietrza w wymienniku, stratą ciśnienia zależną od przepływu oraz współczynnikiem przekazywania ciepła. Przy prędkości poniżej 1 m/s wymiana cieplna jest znacznie gorsza, zaś przy prędkości przewyższającej 4 m/s czas zatrzymania powietrza w rurze jest zbyt krótki. Do stosowania jako wymiennik ciepła zalecane są rury o średnicy do DN315. Przy rurze rozdzielacza ważniejszy niż wymiana ciepła jest transport dużej ilości powietrza. Dlatego też stosuje się tu rury o dużych średnicach, a prędkość przepływu powinna wynosić od 5 do 7 m/s. Powyżej 7 m/s mogą się już pojawić szумы w instalacji. [14]

Straty ciśnienia w wymienniku rurowym zależą od prędkości przepływu i średnicy rury. Wybrane wartości dla systemu firmy Rehau przedstawia poniższa tabela.

Tabela 2. Straty ciśnienia w wymienniku rurowym dla wybranych średnic i prędkości przepływu

Średnica rury mm	Prędkość przepływu m/s	Strata ciśnienia na 1 mb wymennika Pa/m
DN 200	1,0	0,10
	1,5	0,20
	2,0	0,32
	2,5	0,48
	3,0	0,66
	3,5	0,88
	4,0	-
DN 250	1,0	0,08

	1,5	0,14
	2,0	0,24
	2,5	0,36
	3,0	0,50
	3,5	0,66
	4,0	0,84
DN 315	1,0	0,06
	1,5	0,11
	2,0	0,18
	2,5	0,28
	3,0	0,38
	3,5	0,50
	4,0	0,64
	4,5	0,8
DN 400	1,0	0,04
	1,5	0,08
	2,0	0,18
	2,5	0,28
	3,0	0,38
	3,5	0,37
	4,0	0,48
	4,5	0,59
DN 500	1,0	0,03
	1,5	0,07
	2,0	0,10
	2,5	0,16
	3,0	0,22
	3,5	0,28
	4,0	0,36
	4,5	0,44

Źródło: opracowanie własne na podstawie [14]

Zalety GWC rurowego [4, 13]:

- powietrze, dzięki cząstkom srebra w wewnętrznej warstwie antybakteryjnej, po przepłynięciu przez wymiennik gruntowy jest higieniczne i czyste,
- zapobiega zawilgoceniu i zagrzybieniu budynków,
- dobrze sprawdza się przy wysokim poziomie wód gruntowych,
- ogrzewanie powietrza wentylacyjnego w okresie zimowym,
- pozwala uzyskać nawet 30% rocznych oszczędności w ogrzewaniu,
- chłodzenie i osuszanie powietrza wentylacyjnego w okresie letnim,
- ochrona centrali wentylacyjnej przed zamarznięciem,

- dzięki obniżeniu zapotrzebowania na moc cieplną pozwala na redukcję emisji CO₂ i zrezygnowanie ze stosowania freonu,
- oferowany jest kompletny system, od czerpni do przejścia szczelnego przez ścianę, wraz z szerokim zakresem kształtek,
- łatwość konfiguracji wymiennika dzięki szerokiej gamie kształtek.

Wady GWC rurowego [4,10]:

- konieczne jest dość głębokie posadowienie,
- nie uzyskuje się dowilżania powietrza w okresie zimowym,
- należy pilnować spadku rur by kondensat spływał prawidłowo,
- rury należy okresowo czyścić.

1.6. Charakterystyka GWC glikolowego

Jest to kolejne rozwiązanie gruntowego wymiennika ciepła. Zastosowany jest tu czynnik pośredniczący, czyli roztwór glikolu. Powietrze zewnętrzne nie ogrzewa się w tym przypadku od gruntu, ale od glikolu ogrzanego w gruncie poprzez wymiennik ciepła typu powietrze/glikol. [1]

Przy tym typie wymiennika należy zapewnić odpowiednie opory przepływu powietrza, opory przepływu czynnika pośredniczącego i odpowiednią powierzchnię wymiany ciepła. Wszystkie te czynniki wpływają na rzeczywistą wydajność energetyczna systemu i jego koszty eksploatacyjne.

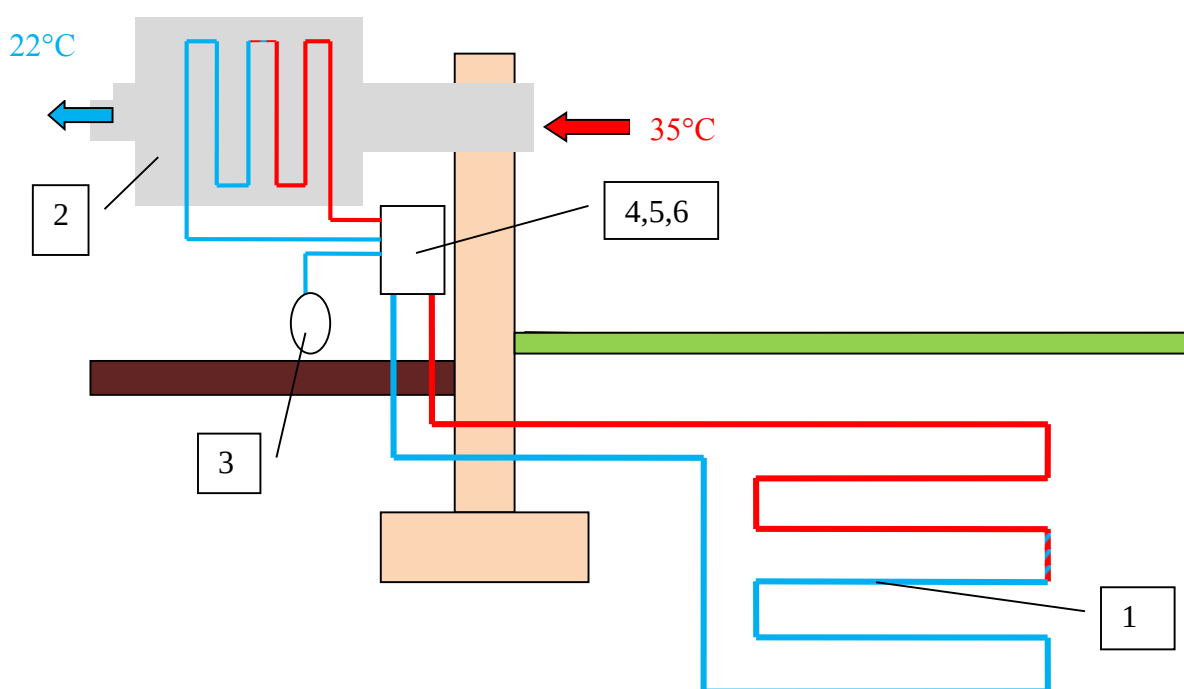
Wymiennik glikolowy najlepiej jest wykonywać przy najniższym stanie wód gruntowych – tak aby ułożone w gruncie plastikowe rury były podczas eksploatacji zalewane wodą. Sytuacja taka znacznie poprawia wydajność wymiany cieplnej. Rury po wyprowadzeniu z gruntu należy podłączyć do wymiennika i zalać roztworem glikolu. Układ należy wyposażyć w armaturę hydrauliczną i automatykę sterującą. [1]

Rura umieszczona w ziemi powinna mieć długość od 120 do 150 metrów, a jej średnica powinna wynosić od 2 do 4 cm. Cyrkulacja glikolu wymuszana jest przez niewielką pompkę. Wymiennik powietrze/ glikol umieszczany jest na kanale pomiędzy czerpnią a centralą wentylacyjną. Zapewnia on przekazanie energii z glikolu do powietrza kierowanego do centrali wentylacyjnej. Działanie GWC polega jedynie na odpowiednim załączaniu się pompki wymuszającej cyrkulację glikolu. [2]

Wymienniki glikolowe mogą być dedykowane konkretnym rodzajom central, ale też przy odpowiednim doborze długości rurki i określeniu oporów mogą one współpracować z

różnymi typami central.

Ciepło jest czerpane z gruntu, z głębokości ok. 1,5 – 1,8 m pod powierzchnią terenu. Na tym poziomie temperatura gruntu zimą wynosi ok. 7°C. Powietrze zewnętrzne o temperaturze -20°C ogrzane zostanie do +4 – +5°C. Natomiast latem, gdy temperatura zewnętrzna sięga +30°C, a temperatura gruntu wynosi +18°C, wymiennik pozwala na ochłodzenie powietrza nawet do 19°C. Korzystnie jest, aby w okresie letnim wymiennik pracował również w nocy. W okresach przejściowych powinna następować regeneracja złoża. Jesienią regeneracji sprzyja deszcz, a wiosną – topniejący śnieg i lód. Dzięki temu stabilizuje się temperatura i wilgotność gleby na poziomie ułożenia rur wymiennika. Urządzenie najlepiej sprawdza się przy wysokiej wilgotności gleby. [16]



Rysunek 10. Schemat GWC glikolowego

Źródło: opracowanie własne

Legenda do rysunku 10:

- 1 – wężownica z glikolem
- 2 – wymiennik ciepła powietrze/glikol
- 3 – naczynie przeponowe
- 4 – pompa cyrkulacyjna
- 5 – zawór
- 6 – filtr siatkowy

Zalety GWC glikolowego [1, 2, 10]:

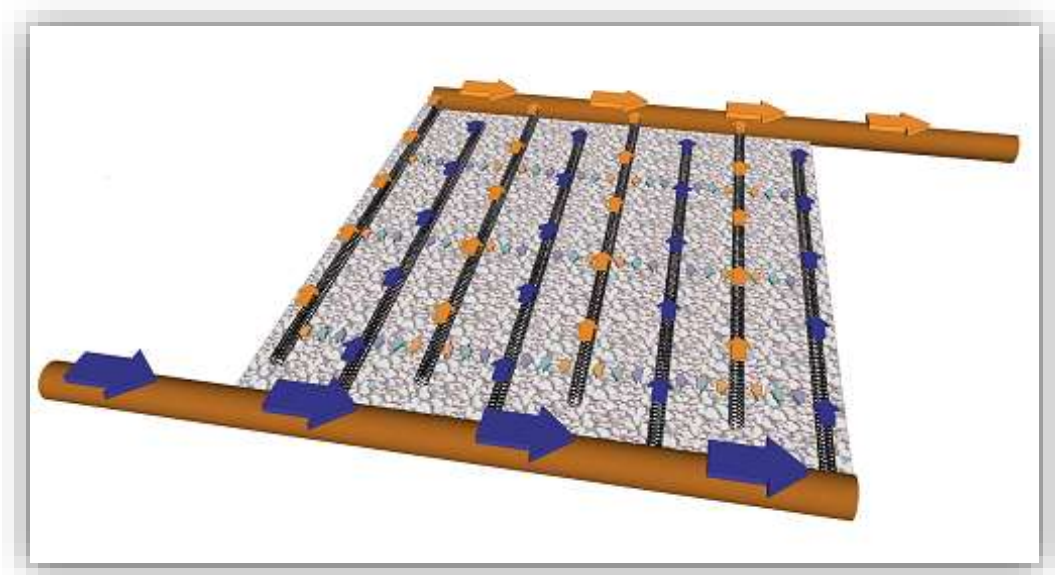
- możliwość wykonania w trudnych warunkach gruntowych
 - bagnistych
 - sezonowo zalewanych,
 - nasypowych (grunt nieznanego pochodzenia)
 - w pobliżu wysypisk śmieci i innych źródeł potencjalnych zanieczyszczeń
- czystość higieniczna elementów mających kontakt w powietrzu ogrzewanym/chłodzonym,
- łatwy dostęp do wszystkich elementów stykających się z powietrzem wentylacyjnym,
- wysoka wydajność energetyczna,
- nie ma elementów wymagających czyszczenia,
- nie ma żadnego ryzyka przypadkowego zanieczyszczenia powietrza,
- chłodzenie powietrza latem i ogrzewanie w zimie,
- nie ma konieczności stosowania dwóch czepni (ściennej dla okresu przejściowego i gruntu dla lata i zimy).

Wady GWC glikolowego [1, 10]:

- brak oczyszczania powietrza,
- brak regulacji wilgotności powietrza,
- duże gabaryty urządzeń wewnątrz budynku,
- niższa sprawność,

1.7. Charakterystyka GWC grzebieniowego [17]

Gruntowy wymiennik ciepła typu grzebieniowego jest swoistym połączeniem wymiennika żwirowego i płytowego. Rozwiązanie wymiennika jest chronione patentem, nadanym firmie ArsTECH. Ponadto urządzenie posiada też atest higieniczny. Wymiennik można stosować do wspomagania wentylacji budynków mieszkalnych, użyteczności publicznej i zakładów przemysłowych.



Rysunek 11. Schemat GWC grzebieniowego

Źródło: www.arstech.pl

Wymiennik żwirowy tworzy złożo o określonej powierzchni i grubości warstwy 0,2 m. Powietrze jest doprowadzane kolektorem doprowadzającym i kierowane do centrali kolektorem odprowadzającym. Na powierzchni złoża żwirowego rozmieszczone są kanały perforowane, które również rozprowadzają i odbierają powietrze. Powietrze płynie więc z kolektora rozprowadzającego do perforowanych kanałów, przepływa przez złożo i jest zbierane perforowanymi kanałami odbierającymi do kolektora zbiorczego. Opór całego wymiennika, wraz z oporami kolektorów i kanałów perforowanych to 20 do 30 Pa. [17]

Grzebieniowy wymiennik ciepła posadowiony jest zazwyczaj na głębokości jednego metra. W razie konieczności (z uwagi na wysoki poziom wód gruntowych) może być posadowiony płycej, przy założeniu wypiętrzenia całego wymiennika ponad teren. Można też zastosować opaskę drenażową. Jako kanały prowadzące powietrze stosowane są rury polipropylenowe, zaś samo złożo jest wykonane z żwiru płukanego. W celu ochrony przed zanieczyszczeniami złożo jest owinięte geowłókniną.

W celu schładzania złoża i szybszej regeneracji w okresie letnich upałów nad złożem umieszcza się instalacje zraszającą. Pozwala to obniżyć temperaturę powietrza nawiewanego o ok. 2°C.

Nad złożem powinna się znaleźć izolacja termiczna, którą stanowi 15 cm styropianu. By nie doszło do jego zawilgocenia, przykrywa się go folią. Całość należy układać z 4% spadkiem, by był możliwy odpływ wody deszczowej. W razie konieczności stosuje się też instalację drenażową.

Styropian pokryty jest ziemią o grubości 0,6 m. Warstwa ta chroni GWC i symuluje jego zagłębienie na około 8m. Nad nią powinien się znajdować trawnik, jednak w przypadku zastosowania specjalnej folii można nad złożem posadzić krzewy, a przy użyciu specjalnego styropianu można wykonać parking lub drogę dojazdową. Same rury mieszczą się w klasie sztywności obwodowej SN8, a ponieważ żwir jest nieściśliwy, możliwe jest by zlokalizować wymiennik pod budynkiem.

Uzyskanie zmniejszonych oporów przepływu nastąpiło dzięki zwiększeniu pola przekroju złoża, przez które przepływa powietrze. Przy tym samym strumieniu objętościowym, im większy przekrój, tym mniejsza prędkość. Przy mniejszej prędkości opory stają się mniejsze. Podcinek pomiędzy kanałem rozpraszającym i odprowadzającym jest nie duży, co również wpływa na zmniejszenie oporu. Zostało to potwierdzone na instalacji pilotażowej.

GWC wykorzystuje ciepło (chłód) zgromadzone w głębszych warstwach gruntu. W złożu nie dochodzi do akumulowania ciepła. Parametry termiczne nie ulegają zmianie pomimo pracy ciągłej. Na wyjściu z wymiennika uzyskuje się powietrze o temperaturze o $0,5^{\circ}\text{C}$ wyższej niż temperatura gruntu rodzimego pod złożem. Nawet przy długotrwałych upałach możliwe jest utrzymanie temperatury nawiewu na poziomie około 16°C .

Okresowe zalanie złoża wodami gruntowymi nie wpływa negatywnie na pracę GWC – wręcz przeciwnie wspomaga regenerację termiczną i przemywa złożo. Jednak zjawisko takie nie może zachodzić permanentnie.

Wielka zaleta wymienników żwirowych – oczyszczanie powietrza – jest obecna również w tym przypadku. Na powierzchni żwiru zatrzymywane są drobinki zanieczyszczeń, zarodniki grzybów, alergeny. Powietrze nawiewane do budynku zawiera znacznie mniej zanieczyszczeń.

GWC rurowy i płytowy wymagają zastosowania filtra wstępnego na czerpni, który powinien być często wymieniany. Jego zadaniem jest zatrzymanie wszystkich zanieczyszczeń mogących osadzać się wewnątrz GWC. Wymiennik grzebieniowy potrzebuje jedynie niewymiennego filtra na czerpni, którego zadaniem jest zatrzymywanie dużych zanieczyszczeń (tj. liści, owadów). Drobne zanieczyszczenia osiadają na ziarenkach żwiru i są spłukiwane z powierzchni złoża, zatrzymując się na jego dnie. Część robocza jest cały czas czysta.

Pomiary prowadzone w okresie letnim na instalacji pilotażowej wymiennika grzebieniowego (wyposażonej w 16 czujników temperatury) potwierdziły, że:

- opór GWC jest nieznaczny i zgodny z wartością teoretyczną,

- temperatura powietrza opuszczającego GWC przy pracy ciągłej przez kilka dni jest o $0,5^{\circ}\text{C}$ wyższa niż temperatura gruntu rodzimego pod złożem (świadczy to o 100% wymianie cieplnej),
- złożo pracuje poprawnie – przepływ powietrza następuje równomiernie.

Zalety GWC grzebieniowego: [17]

- nieznaczne opory przepływu powietrza,
- wykonanie z tanich materiałów,
- chłodzenie i osuszanie powietrza w lecie,
- ogrzewanie i nawilżanie powietrza zimą,
- łatwa regeneracja,
- oczyszczanie powietrza.

Wady:

- stosowanie w przypadku wysokiego poziomu wód gruntowych może niekorzystnie wpływać na jakość powietrza,
- maksymalna wydajność pojedynczego złoża to $2200\text{ m}^3/\text{h}$ przy powierzchni $27 \times 10\text{ m}$ [17], by zapewnić potrzebną ilość powietrza dla większych budynków trzeba wykonać kilka równoległych GWC, co zwiększa zapotrzebowanie na teren.

2. Teren i metodyka badań

Wstępne pomiary temperatury przeprowadzono na gruntowym powietrznym wymienniku ciepła typu żwirowego.

Wymiennik, który był przedmiotem badań powstał około roku 2003. Znajduje się on przy ul. Modrzewiowej w Grabówce k. Białegostoku. W przybliżeniu zajmuje on powierzchnię $2,5 \times 10\text{ m}$. Wymiennik zapewnia wstępny podgrzew powietrza dla budynku usługowego, w którym znajdują się gabinety rehabilitacyjne oraz siłownia wraz z salą fitness.

Powietrze jest pobierane przez trzy równoległe do siebie czerpnie gruntowe, zabezpieczone siatką o dużych oczkach. Powietrze poddane obróbce termicznej jest następnie transportowane dwoma kanałami wylotowymi do centrali wentylacyjnej, wyposażonej w wymiennik krzyżowy odzyskujący ciepło z powietrza usuwanego z budynku.



Rysunek 12. Czerpnia GWC żwirowego w Grabówce – miejsce pomiaru temperatury zewnętrznej

Źródło: fot. J. Topolańska



Rysunek 13. Kanał wylotowy GWC żwirowego w Grabówce – miejsce pomiaru temperatury za wymiennikiem

Źródło: fot. J. Topolańska

Powietrze jest w razie konieczności dogrzewane nagrzewnicą elektryczną o mocy 9 kW typu EN-50x50-9,0-3-C firmy Termex. Latem powietrze jest usuwane z budynku z pominięciem odzyska ciepła. Wszystkie pomieszczenia są wentylowane powietrzem schłodzonym w wymienniku i nie ma potrzeby ich klimatyzowania. Wyjątek stanowi sala

fitness, gdzie jest zamontowany klimatyzator ścienny. Centrala wentylacyjna jest jednobiegowa – przy jej załączeniu wentylowane są wszystkie pomieszczenia bez regulacji wydatku powietrza.

Złoże jest wyłączane na okres nocny i w tym czasie zachodzi jego regeneracja. Nie wykonywano nad nim instalacji zraszającej. Nie odnotowano żadnych problemów ani awarii złoża. Złoże zostało wykonane w sposób prawidłowy powyżej poziomu wód gruntowych i nigdy nie generowało zapachu stęchlizny.

Powietrze z wymiennika obsługuje następujące pomieszczenia w ilościach wg tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie pomieszczeń obsługiwanych przez wymiennik wraz z ilością powietrza

Lp.	Pomieszczenie	Powierzchnia m ²	Ilość powietrza nawiewanego m ³ /h
1.	Recepcja	20,2	35
2.	Komunikacja 1	32,3	175
3.	Siłownia 1	63,3	395
4.	Sala fitness	62,0	261
5.	Szatnia męska	11,3	83
6.	Umywalnia męska	9,9	94
7.	Szatnia damska wraz z umywalnią	11,0	87
8.	Pomieszczenie socjalne	8,5	44
9.	Siłownia 2	36,6	55
10.	Komunikacja 2	4,4	25
11.	Pomieszczenie rehabilitacji	18,8	36
12.	Sauna	6,7	60
13.	Pomieszczenie odnowy biologicznej	7,3	33
Łączna ilość powietrza nawiewanego:			1383

Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników pomiarów wentylacji z dn. 13.02.2014r.

Z powyższej tabeli wynika, że wydajność gruntowego wymiennika wynosi 1383 m³/h. W dniach od 17 lutego do 21 lutego przeprowadzone zostały pomiary temperatury powietrza zewnętrznego oraz powietrza wychodzącego z wymiennika. Mierniki temperatury zostały umieszczone przy jednej z czerpni powietrza oraz w jednym z kanałów wylotowych ze złoża wymiennika.

Mierniki zostały umieszczone na stałe, dzięki czemu nie było konieczności oczekiwania na ustabilizowanie się pomiaru temperatury. Odczytów temperatury dokonywano 3 razy dziennie – o godzinie 8:00, 12:00 oraz 16:00.

3. Wyniki badań i dyskusja

W trakcie badań uzyskano wartości temperatur powietrza zewnętrznego i za gruntowym żwirowym wymiennikiem ciepła, z których wybrane przedstawione w tabeli 4.

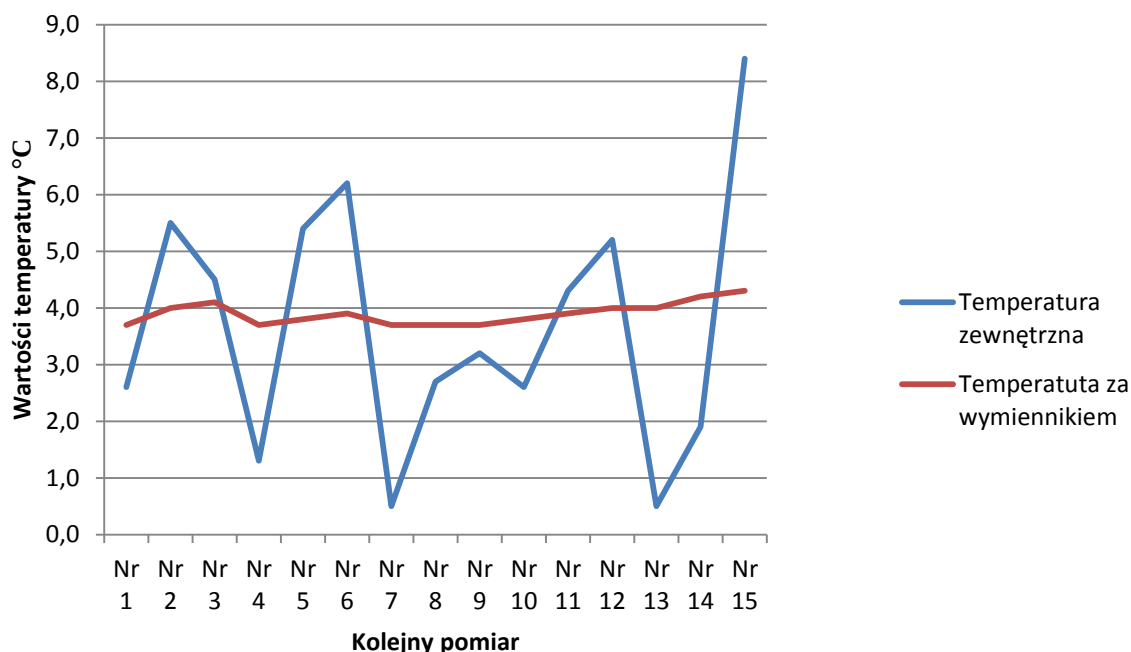
Tabela 4. Wyniki pomiarów na GWC żwirowym w Grabówce

Data pomiaru	Lp. pomiaru	Godzina pomiaru	Temperatura powietrzna zewnętrznego °C	Temperatura powietrza za wymiennikiem °C
17.02.2014	1	8:00	2,6	3,7
	2	12:00	5,5	4,0
	3	16:00	4,5	4,1
18.02.2014	4	8:00	1,3	3,7
	5	12:00	5,4	3,8
	6	16:00	6,2	3,9
19.02.2014	7	8:00	0,5	3,7
	8	12:00	2,7	3,7
	9	16:00	3,2	3,7
20.02.2014	10	8:00	2,6	3,8
	11	12:00	4,3	3,9
	12	16:00	5,2	4,0
21.02.2014	13	8:00	0,5	4,0
	14	12:00	1,9	4,2
	15	16:00	8,4	4,3

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie wyników pomiarów można stwierdzić, że temperatura za wymiennikiem gruntowym, pomimo zmian temperatury powietrza zewnętrznego, pozostaje na zbliżonym poziomie. Jest to zgodne z danymi przedstawianymi w literaturze [1, 5], gdzie mówi się o niwelowaniu skoków temperatury powietrza zewnętrznego.

Do dalszych obliczeń przyjęte zostaną wartości średnie temperatur z trzech wykonanych pomiarów. Na tej podstawie obliczona zostanie równica temperatury, czyli przyrost jej wartości po przejściu przez wymiennik. Zestawienie tych temperatur zawiera tabela 5.



Rysunek 14. Wykres temperatury powietrza zewnętrznego i za wymiennikiem

Źródło: opracowanie własne

Niestety, pomimo że pomiary były prowadzone w lutym, czyli w miesiącu ze statystycznie najniższymi temperaturami dobowymi, w tym roku pomiary bardziej charakteryzują okres przejściowy niż typowo zimowy. W związku z tym w niektórych dniach następował zysk energii dzięki zastosowaniu wymiennika, w innych strata. Wartość energii jaka została wymieniona w wymienniku gruntowym można obliczyć z następującego równania (1), opisującego nieustalone przewodzenie ciepła.

W wymienniku dochodzi do akumulacji ciepła - czyli do przyrostu lub ubytku ilości ciepła w [J] w danej objętości na jednostkę czasu w [s] [$J/s = W$]. Jeśli akumulacja jest dodatnia ciało nagrzewa się, jeśli ujemna chłodzi się – zmienia się energia wewnętrzna układu. Gdy akumulacja jest niezerowa – proces wymiany ciepła jest nieustalony.

Akumulację obliczamy ze wzoru:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot dT \quad [W] \quad (1)$$

Gdzie:

dT – różnica temperatury, [deg],

$\dot{m}$ - przepływ masowy, [kg/s],

c_p – ciepło właściwe, [J/kg·deg].

Przepływ masowy można obliczyć z przepływu objętościowego mnożąc go przez gęstość powietrza:

$$\dot{m} = \frac{V \cdot \rho}{3600} \quad [\text{kg/s}] \quad (2)$$

Gdzie:

V – przepływ objętościowy, [m³/h],

ρ – gęstość powietrza, [kg/m³].

$$\dot{m} = \frac{1383 \cdot 1,27}{3600} = 0,49 \text{ kg/s}$$

Tabela 5. Uśrednione wyniki pomiarów na GWC żwirowym w Grabówce

Data pomiaru	Temperatura powietrzna zewnętrznego °C	Temperatura powietrza za wymiennikiem °C	Przyrost temperatury w wymienniku deg
17.02.2014	4,2	3,9	-0,3
18.02.2014	4,3	3,8	-0,5
19.02.2014	2,1	3,7	+1,6
20.02.2014	4,0	3,9	-0,1
21.02.2014	3,6	4,2	+0,6

Źródło: opracowanie własne

Obliczono jakie zyski i straty energii w wymienniku miały miejsce dla każdego z dni, w których prowadzono pomiary, a następnie zsumowane je. Należy stwierdzić, że badany wymiennik, w dniach 17.02 – 21.02. , przyniósł 640,3 W zysku energii.

Według danych literaturowych [7] jednostkowy strumień ciepła, jaki można uzyskać z wymiennika żwirowego przy ogrzewaniu powietrza, wynosi od 0,67 do 7,00 W/(m³h). Ponieważ wstępne badania wymiennika odbywały się przy niezbyt sprzyjających temperaturach powietrza zewnętrznego, zatem uzyskiwane wartości mocy grzewczej zostaną odniesione do minimalnej teoretycznej mocy grzewczej wymiennika żwirowego.

$$Q = q_{min} \cdot V \quad (3)$$

Gdzie:

V – przepływ objętościowy, [m³/h],

q_{min} – minimalny jednostkowy strumień ciepła, [W/(m³h)].

$$Q = 0,67 \cdot 1383 = 926,6 \text{ W}$$

Teoretyczna minimalna moc grzewcza wymiennika żwirowego przy danym przepływie objętościowym wynosi więc 926,6 kW. Tylko przy jednym dniu pomiarów uzyskana z wymiennika moc grzewcza zbliżyła się do tego poziomu (85% minimalnej mocy teoretycznej). Ponieważ pomiary nie odbywały się w odpowiednich warunkach temperaturowych, nie można jednoznacznie stwierdzić, że sprawność wymiennika jest niska. Jeżeli przy dużych temperaturach ujemnych uzyskiwana moc chłodnicza nie przekroczyłaby średniej mocy teoretycznej wtedy można byłoby uznać sprawność badanego wymiennika za niską.

Konieczne są dalsze pomiary na badanym wymienniku ciepła, przy różnych, znacznie niższych i typowych dla okresu zimowego temperaturach.

4. Podsumowanie i wnioski

Gruntowe powietrzne wymienniki ciepła zdobywają coraz większą popularność, gdyż są rozwiązaniem godnym uwagi ze względów ekonomicznych i ekologicznych. Zyskują one coraz szersze zastosowanie w budynkach mieszkalnych jednorodzinnych, gdzie zastosowano ogrzewanie powietrzne i rekuperację. Wstępny podgrzew powietrza w okresie zimowym (a chłodzenie w okresie letnim) po przejściu przez gruntowy wymiennik powietrzny pozwala na zmniejszenie mocy źródła ciepła i zwiększenie efektywności pracy systemu. Oczywiście rozwiązania takie są także wykorzystywane w obiektach użyteczności publicznej.

Pojawia się coraz większa ilość rozwiązań technicznych, ulepszających i ich funkcjonowanie, czego przykładem może być popularyzowany ostatnio wymiennik grzebieniowy. Każdy z typów GWC posiada swoje zalety i wady, wskazania i przeciwwskazania do stosowania. Wybór rodzaju wymiennika należy zawsze skonfrontować z warunkami glebowymi i powierzchniowymi w miejscu montażu, a także z zamierzonymi do osiągnięcia efektami w obróbce powietrza (czy wystarczy tylko zmienić jego temperaturę, czy też tylko osuszać latem bez nawilżania w zimie, czy też może i osuszać i nawilżać zależnie od sezonu).

Dodatkową korzyścią z zastosowania GWC jest możliwość zmniejszenia wskaźnika EP, czyli zapotrzebowania na energię pierwotną do celów ogrzewania, wentylacji, podgrzewu ciepłej wody, chłodzenia i oświetlenia. Wskaźnik ten jest obliczany zgodnie z rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku (...) [18], z kolei w rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dn. 12 kwietnia 2002r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie i jego późniejszych zmianach [19] podawane są wartości maksymalne współczynnika EP dla poszczególnych typów budynków. Zapotrzebowanie energii nieodnawialnej pierwotnej można zmniejszyć, stosując jakieś źródło energii odnawialnej, czyli np. kolektory słoneczne, pompy ciepła czy też wspomaganie instalacji wentylacji mechanicznej (z odzyskiem ciepła) poprzez zastosowanie gruntowych wymienników ciepła. Z jednej strony uzyskuje się tu zmniejszenie mocy nagrzewnicy wstępnej w centrali, z drugiej eliminuje się konieczność stosowania instalacji klimatyzacyjnej, a zatem nie uwzględnia się ilości energii pierwotnej nieodnawialnej na potrzeby chłodnictwa

Przebadano wymiennik żwirowy pracujący w województwie podlaskim. Właściciele obiektu w 11 – letnim okresie funkcjonowania nie zaobserwowali żadnych nieprawidłowości, ani problemów eksploatacyjnych. W związku z tym można wywnioskować, że zastosowanie GWC jest inwestycją na lata, z długim okresem prawidłowej i bezawaryjnej pracy.

Na podstawie wyników pomiarów wstępnych można stwierdzić, że zgodnie z danymi literaturowymi, badany wymiennik niweluje skoki temperatury zewnętrznej.

Przy niższych wartościach temperatury powietrza zewnętrznego zauważalny jest efekt ogrzewania powietrza po przepływie przez GWC. Temperatury powietrza zewnętrznego powyżej 0 °C w ciągu dnia w miesiącach zimowych nie są reprezentatywne dla IV strefy klimatycznej. Ponieważ ilość zaoszczędzonej energii dzięki wymiennikowi zależy od warunków zewnętrznych, w przypadku łagodnej zimy (np. 2013/2014) zysk energii jest nieznaczny. Jednak gdyby wartości temperatury zewnętrznej przez długi okres utrzymywałyby się dużo poniżej 0 °C, wtedy zastosowanie gruntowego wymiennika ciepła przyniosłoby znaczne korzyści ekonomiczne, dlatego badania będą powtórzone w przyszłym sezonie grzewczym. Tylko w jednym z dni pomiarowych uzyskana moc grzewcza zbliżyła się do teoretycznej minimalnej mocy, jaką można uzyskać z GWC typu żwirowego. Do poprawnego określenia sprawności wymiennika po dłuższym okresie eksploatacji konieczne są szersze badania, przy różnych wartościach temperatur w okresie zimowym, jak i letnim. Celowe jest kontynuowanie pomiarów.

Literatura:

1. www.linkgwc.pl (21.02.2014 r.)
2. www.gwc.com.pl (21.02.2014 r.)
3. www.gruntowy-wymiennik-ciepla.pl (21.02.2014 r.)
4. www.jak-budowac.pl/gruntowe-wymienniki-ciepla-wady-i-zalety (21.02.2014 r.)
5. www.taniaklima.pl (21.02.2014 r.)
6. Jędrzejewski L.: *GWC – tania energia z własnego podwórka. Gruntowne oszczędności.* Magazyn Instalatora, nr 11 (63) 2003, str. 50-51.
7. Piecha W.: *Grunt to tanie ciepło.* Magazyn Instalatora, nr 3 (55) 2003, str. 38-39 oraz nr 5 (57) 2003 str. 62-64.
8. Szponar B., Iwanicka M., *Gruntowy wymiennik ciepła. Mikrobiologiczna czystość.* Magazyn Instalatora, nr 2 (90) 2006, str. 18-19.
9. www.wymiennikgruntowy.pl (22.02.2014 r.)
10. Laskowski P.: *Jak zbudować GWC? Porównaj wady i zalety różnych gruntowych wymienników ciepła.* muratordom.pl
11. De Paepe M., Janssens A., *Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers*, Energy and Buildings, nr 35 2003, str. 389 – 397.
12. Trząski A., Zawada B., *The influence of environmental and geometrical factors on air-ground tube heat exchanger energy efficiency*, Building and Environment, nr 46 2011, str. 1436-1444.
13. Badescu V., *Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house*, Renewable Energy, nr 32 2007, str. 845 – 855.
14. www.rehau.com (23.02.2014 r.)
15. Informacja techniczna o systemie AWADUKT Thermo firmy Rehau.
16. www.hvacr.pl (23.02.2014 r.)
17. www.arstech.pl (24.02.2014 r.)
18. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku i lokalu mieszkalnego lub części budynku stanowiącej samodzielną całość techniczno - użytkową oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw ich charakterystyki energetycznej (Dz.U.2008, Nr 201 poz.1240)
19. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.(Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690).

mgr inż. Rafał Dąbrowa¹, Angelika Frosik²

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

e-mail: ¹dabrowarafal@gmail.com, ²angelikafrosik@gmail.com

Systemy uzdatniania i dystrybucji powietrza dla bloków operacyjnych na przykładzie projektów klimatyzacji w obiektach szpitalnych

Słowa kluczowe: *wentylacja bloków operacyjnych, klimatyzacja precyzyjna szpitali, nawiew laminarny, szafa klimatyzacji precyzyjnej, system uzdatniania powietrza, centrala klimatyzacyjna*

Streszczenie: Przedmiotem referatu jest omówienie różnych systemów zaopatrzenia w powietrze pomieszczeń bloku operacyjnego szpitali. Zostaną przeanalizowane dwa obiekty:

- szpital A (obiekt rzeczywisty-modernizowany)
- szpital B (obiekt projektowany)

pod względem proponowanych rozwiązań układów wentylacyjno - klimatyzacyjnych.

Podstawą analizy są pomieszczenia bloku operacyjnego (przede wszystkim sale operacyjne), ich zróżnicowane wymagania w zakresie temperatury, wilgotności względnej, jakości i świeżości powietrza oraz sposoby ich osiągania.

Referat sporządzony jest na bazie projektów wykonawczych dla w/w obiektów. Uwzględniono:

- proces zmiany parametrów powietrza na drodze urządzeń niezbędnych do osiągnięcia wymagań użytkowników,
- dystrybucję powietrza m. in. rozprowadzenie instalacji, lokalizacja i rodzaje elementów nawiewno - wywiewnych, bilans powietrza dla bloków operacyjnych itp.

Na podstawie opracowania przedstawiono wnioski jako proponowane przez autorów wytyczne do projektowania instalacji klimatyzacyjnych dla pomieszczeń o podwyższonej klasie czystości bloków operacyjnych oraz indywidualnie sal operacyjnych.

Legenda

	WYMIENNIK KRZYŻOWY		KANAŁOWY CZUJNIK TEMPERATURY
	WYMIENNIK OBROTOWY		KANAŁOWY PRZETWORNIK RÓŻNICY CIŚNIEŃ
	PRZEPUSTNICA PRZECIWBIEŻNA		KANAŁOWY CZUJNIK WILGOTNOŚCI
	POŁĄCZENIE ELASTYCZNE		PRESOSTAT RÓŻNICY CIŚNIEŃ
	NAWILZACZ PAROWY		DWUSTAWNY SIŁ. PRZEPUSTNICY ZE SPRĘŻYNĄ ZWROTNA I Z ŁĄCZNIKIEM KRAŃCOWYM
	WENTYLATOR Z FALOWNIKIEM		TERMOSTAT PRZECIWZAMROZENIOWY NAGRZEWNICY WODNEJ
	FILTR KIESZENIOWY		TRÓJDROGOWY ZAWÓR REGULACYJNY
	NAGRZEWNICA		NAWILZACZ PAROWY
	CHŁODNICA		NAGRZEWNICA KANAŁOWA ELEKTRYCZNA
	TLUMIK AKUSTYCZNY		PRZEPUSTNICA POWIETRZA
	PRZEPUSTNICA		FILTR POWIETRZA
	NAWIEWNIK WIROWY Z FILTREM HEPA		1 – NAGRZEWNICA 2 – CHŁODNICA
	NAGRZEWNICA ELEKTRYCZNA		WENTYLATOR PROMIENIOWY
	KLAPA ZWROTNA		WYMIENNIK ODZYSKU CIEPŁA KRZYŻOWY
	POWIERZCHE NAWIEWANE POWIERZCHE WYWIEWANE POWIERZCHE ŚWIEŻE POWIERZCHE USUWANE URZĄDZENIA		WYMIENNIK ODZYSKU CIEPŁA OBROTOWY

Rysunek 1. Legenda do schematów. Po lewej legenda do schematów wentylacyjnych po prawej do schematów uzdatniania powietrza

Źródło: [6]

Punkty przemian powietrza na wykresie Mollier'a:

Z - parametry powietrza zewnętrznego

R - parametry powietrza za rekuperatorem

C - parametry powietrza za chłodnicą

B - parametry powietrza za nagrzewnicą

N - parametry powietrza nawiewanego

P - parametry powietrza w pomieszczeniu (wywiewanego)

M - parametry powietrza po recyrkulacji (zmieszaniu)

S - parametry warstwy przyściennej ścianki chłodnicy

1. Wstęp

1.1. Prawo. Wytyczne projektowe

Projektowanie systemów klimatyzacji dla pomieszczeń bloku operacyjnego opiera się na istniejącym prawodawstwie [1], w którym zawarto ogólne informacje o konieczności stosowania wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej lub klimatyzacji zapewniającej jakość powietrza odpowiednią do funkcji pomieszczeń bloku operacyjnego. Bardziej szczegółowo rozporządzenie to stanowi o dystrybucji powietrza w salach operacyjnych, w których stosowany jest podtlenek azotu do znieczuleń pacjentów, wskazując na konieczność zastosowania nawiewu górnego i wywiewu w 20% górnego i 80% dolnego. Równocześnie mówi o konieczności zastosowania nadciśnienia w stosunku do korytarza, jednak jest to wg autorów artykułu informacja nieprecyzyjna, ponieważ do sali operacyjnej mogą przylegać inne pomieszczenia, z których również nie może dopływać powietrze do sali.

Rozporządzenie zwraca uwagę na konieczność serwisowania instalacji klimatyzacyjnej nie rzadziej niż raz w roku, co jest koniecznością przy tego typu pomieszczeniach, w których nie można pozwolić na nieprawidłową pracę urządzeń i kanałów wentylacyjnych.

W praktyce projektowej w/w regulacje są zbyt ogólne a niektóre z nich szeroko interpretowane. Dlatego zachodzi konieczność oparcia projektu o założenia zawarte w konkretnych wytycznych projektowych [3]. Zawarto w nich informacje dot.:

- dopuszczalnego zakresu temperatury wewnętrznej,
- wilgotności względnej,
- maksymalnej prędkości powietrza w pomieszczeniu,
- układu ciśnień w stosunku do korytarza,
- minimalnej krotności wymian,
- klasy filtrów powietrza na nawiewie,

w zależności od:

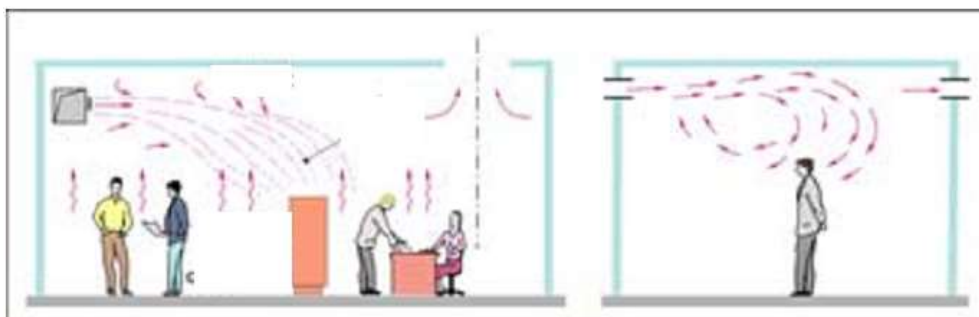
- klasy czystości pomieszczenia,
- rodzaju (funkcji) pomieszczenia.

1.2. Systemy nawiewu powietrza do pomieszczenia

Wyróżniamy cztery podstawowe systemy umożliwiające nawiew powietrza do pomieszczenia i są to:

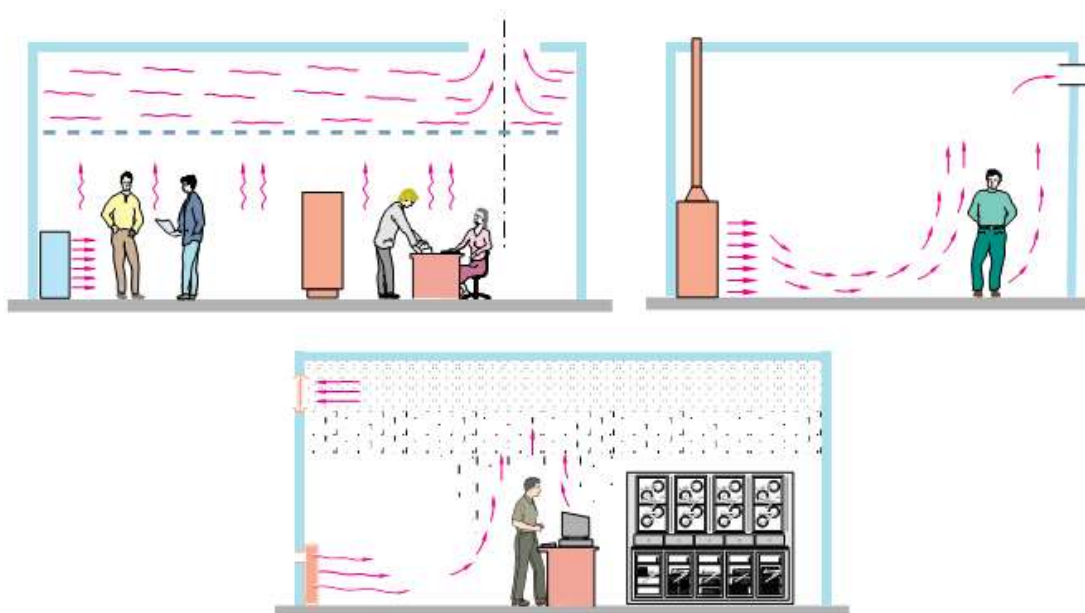
- system indukcyjny

- system wyporowy
- system częściowo laminarny
- system laminarny



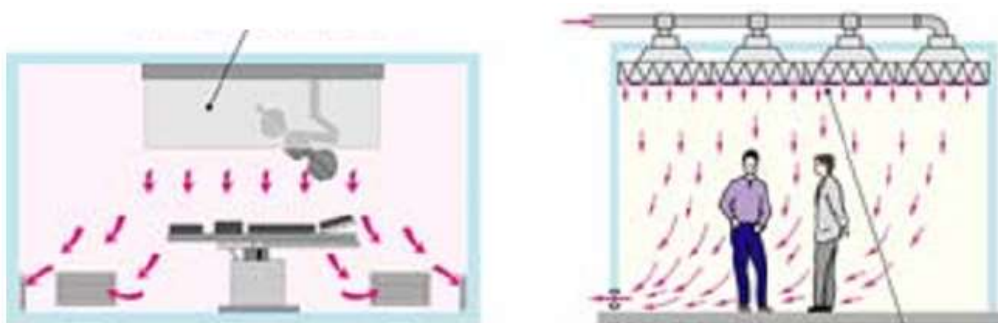
Rysunek 2. System indukcyjny

Źródło: [5]



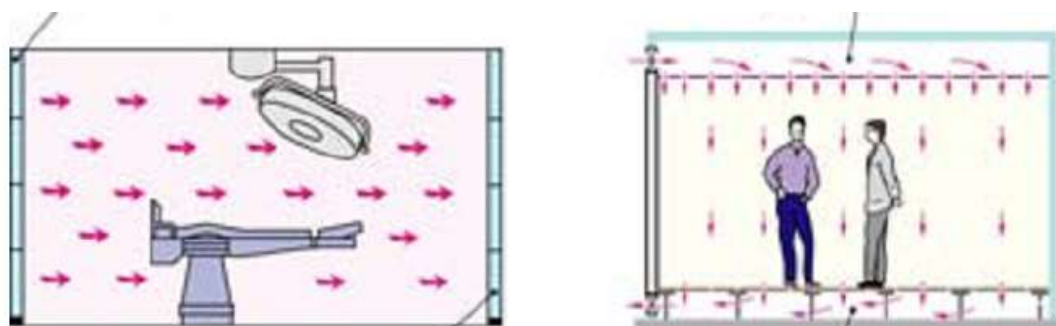
Rysunek 3. System wyporowy

Źródło: [5]



Rysunek 4. System częściowo laminarny

Źródło: [5]



Rysunek 5. System laminarny

Źródło: [5]

1.3. Źródła zanieczyszczeń powietrza w salach operacyjnych

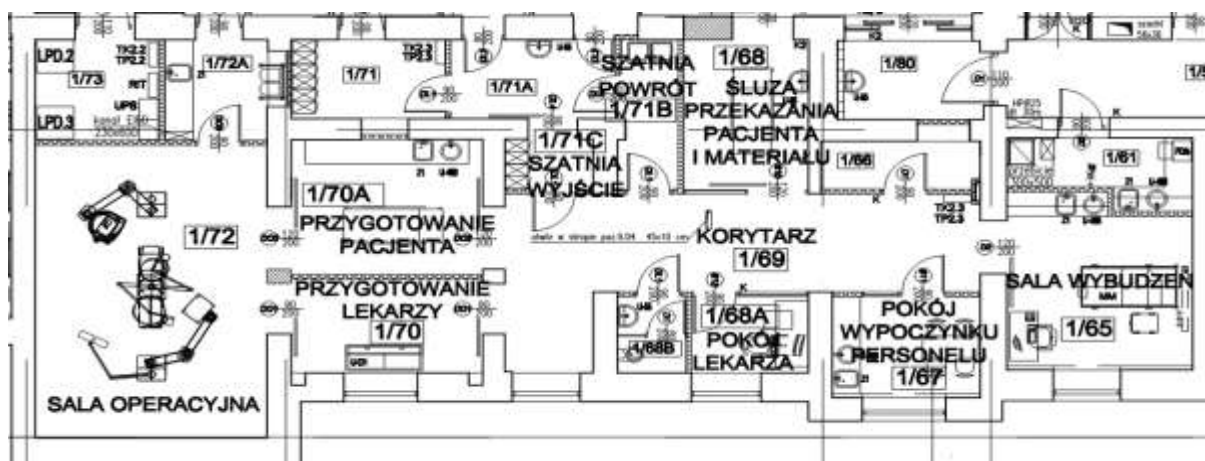
Do głównych źródeł zanieczyszczeń powietrza trzeba zaliczyć mikroorganizmy emitowane przez zespół chirurgiczny (w zależności od aktywności oraz noszonej odzieży ochronnej) oraz samego pacjenta. Dodatkowo należy wymienić zanieczyszczenia pochodzące od używanych narzędzi, aparatury medycznej oraz każdego wyposażenia sali operacyjnej [4]. Wszelkie zanieczyszczenia w sali operacyjnej pochodzą z jej wnętrza, ponieważ powszechnie stosowane nadciśnienie 20 Pa zapobiega przedostawaniu się mikroorganizmów i pyłów z zewnątrz. Zadaniem systemu wentylacyjnego jest odpowiednie oczyszczanie powietrza nawiewanego do sali, aby utrzymać je na odpowiednim poziomie czystości.

1.4. Opis bloku operacyjnego w szpitalu A

Pierwszym rozpatrywanym układem funkcjonalnym (Rysunek 6) jest blok operacyjny szpitala A w skład którego wchodzi:

- szatnia wyjście
- korytarz
- pokój lekarza
- pomieszczenie do przygotowania pacjenta
- pomieszczenie do przygotowania lekarzy
- sala operacyjna
- sala wybudzeń
- pokój wypoczynku personelu
- szatnia powrót.

Szczególnie ważna jest sala operacyjna. Służy do zabiegów takich jak m.in.: gastroscopia, kolonoskopia, bronchoskopia, wycinki, punkcja rdzenia kręgowego. To owa sala wraz z pozostałymi pomieszczeniami bloku operacyjnego stanowić będą podstawę do rozważań propozycji rozwiązania kwestii wentylacji.



Rysunek 6. Blok operacyjny szpitala A – układ funkcjonalny

Źródło: [6]

1.5. Opis bloku operacyjnego w szpitalu B

Układ funkcjonalny szpitala składa się z 3 sal operacyjnych (zabiegowych):

- chirurgicznej,
- ginekologicznej,
- ortopedycznej.

Wszystkie sale wchodzą w skład jednego bloku operacyjnego.

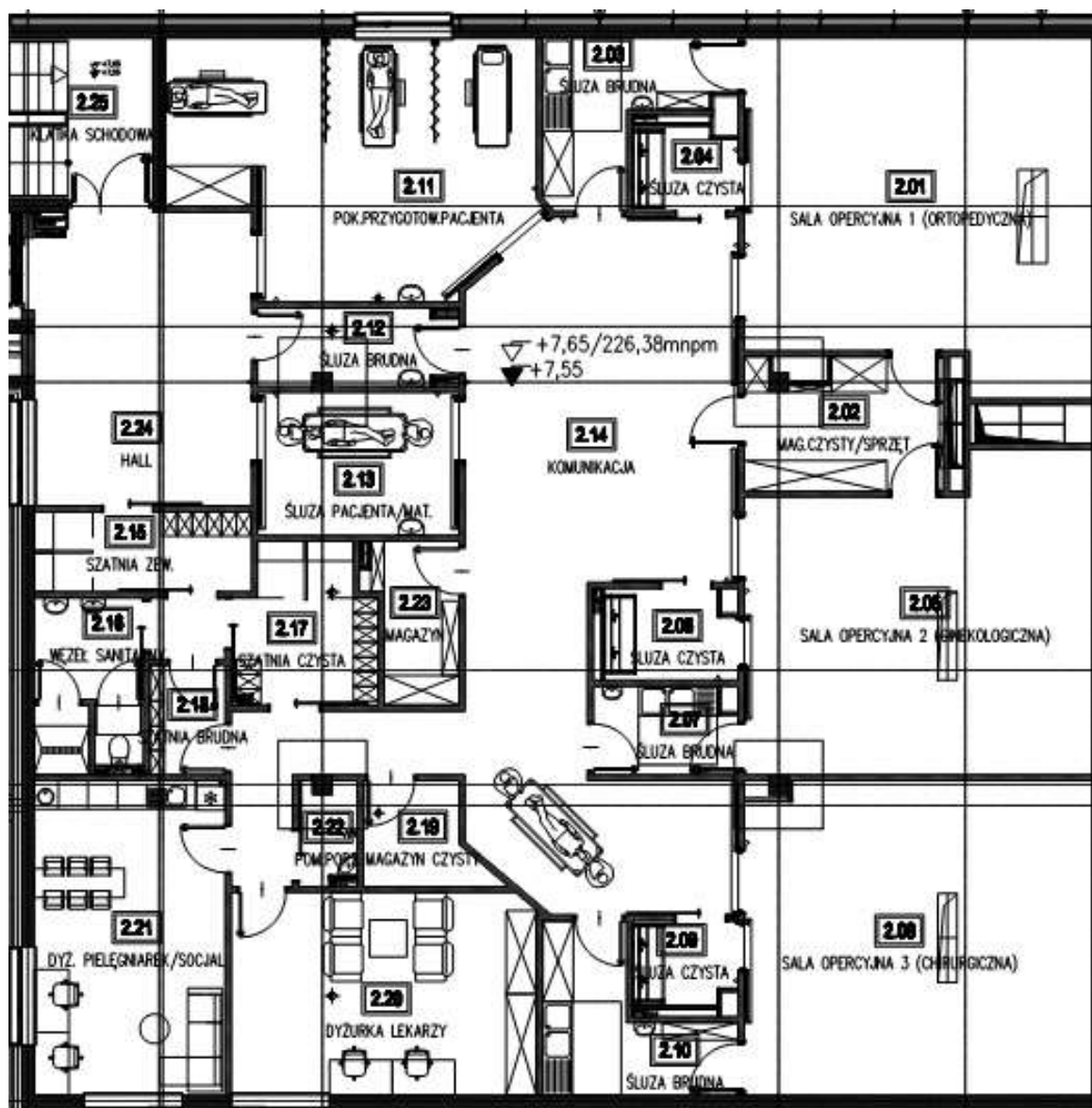
Każda sala operacyjna posiada indywidualne pomieszczenia pomocnicze (podblok operacyjny):

- śluza czysta,
- śluza brudna,

Pozostałe pomieszczenia tj. pomieszczenia higieniczno-sanitarne, magazyny, dyżurki lekarzy i pielęgniarek oraz komunikacji są wspólne w obrębie bloku operacyjnego.

Cały układ funkcjonalny bloku operacyjnego pokazany został poniżej (Rysunek 7).

W niniejszym artykule z uwagi na zaproponowane rozwiązania instalacji wentylacyjnej przedmiotem rozważań jest sala ortopedyczna oraz chirurgiczna.



Rysunek 7. Blok operacyjny szpitala B – układ funkcjonalny

Źródło: [6]

2. Rozwiązania układu wentylacji w salach operacyjnych

2.1. Rozwiązanie układu wentylacji sali operacyjnej w szpitalu A

Układ dystrybucji powietrza (Rysunek 8) stanowi nawiew za pomocą 4 nawiewników sufitowych ($V_{naw}=4 \times 300=1200 \text{ m}^3/\text{h}$) wyposażonych w filtr klasy H13. Z kolei wywiew odbywa się poprzez kratki wentylacyjne ($V_{wyw}=960 \text{ m}^3/\text{h}$) przy czym 80% powietrza wywiewane będzie w dolnej części pomieszczenia a 20% w górnej. Warunki te spełniają wymagania rozporządzenia [1].

By zapewnić prawidłowy rozkład ciśnień w pomieszczeniach bloku operacyjnego wszystkie centrale wentylacyjne w strefach przyległych do tego bloku powinny pracować w trybie ciągłym (Rysunek 9). Centrala wentylacyjna K3 pracuje ze stałym wydatkiem.

W sali operacyjnej zastosowano krotność wymian $n=10/\text{h}$

Wskaźnik SFP (moc właściwa wentylatora) wentylatora nawiewnego dla centrali K3 (obsługującej salę operacyjną) wynosi:

$$SFP_{K3N} = 1,94 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}}$$

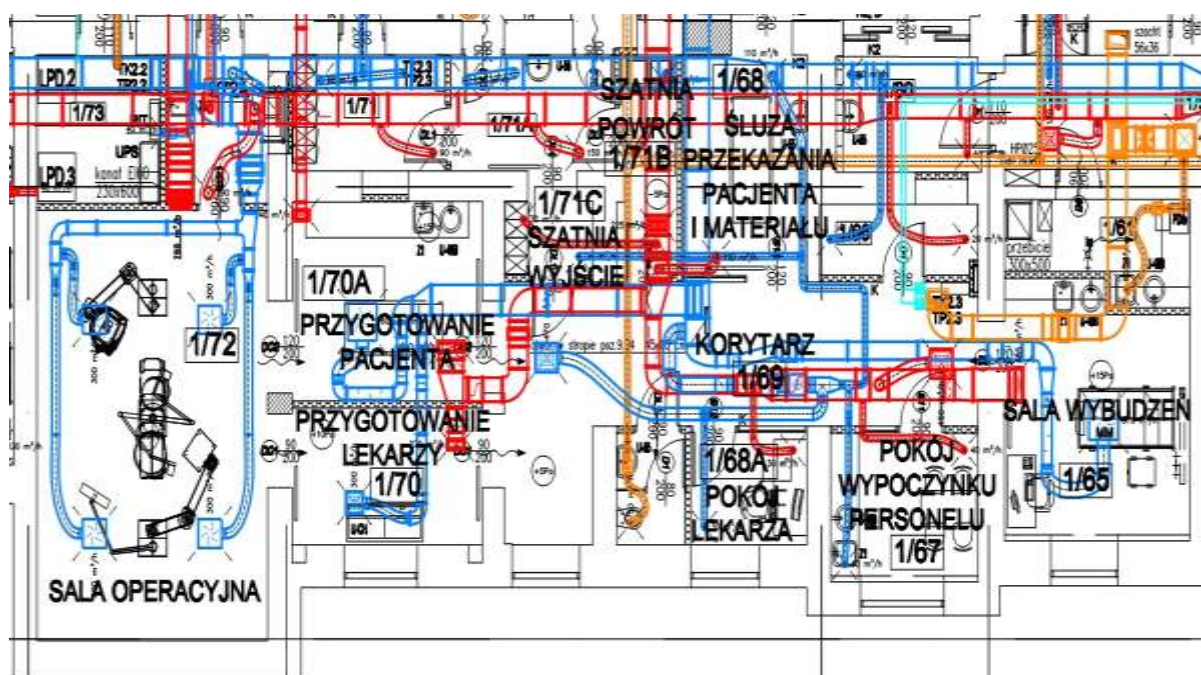
Wskaźnik SFP dla wentylatora wywiewnego wynosi natomiast:

$$SFP_{K3N} = 1,44 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}}$$

Zgodnie z [2] dla instalacji klimatyzacji lub wentylacji nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła (zakładając poprawkę dot. dodatkowego stopnia filtracji powietrza z filtrami klasy H10 i wyższej) SFP wentylatora nawiewnego wynosi: $1,60 + 0,6 = 2,20 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}}$ a wywiewnego:

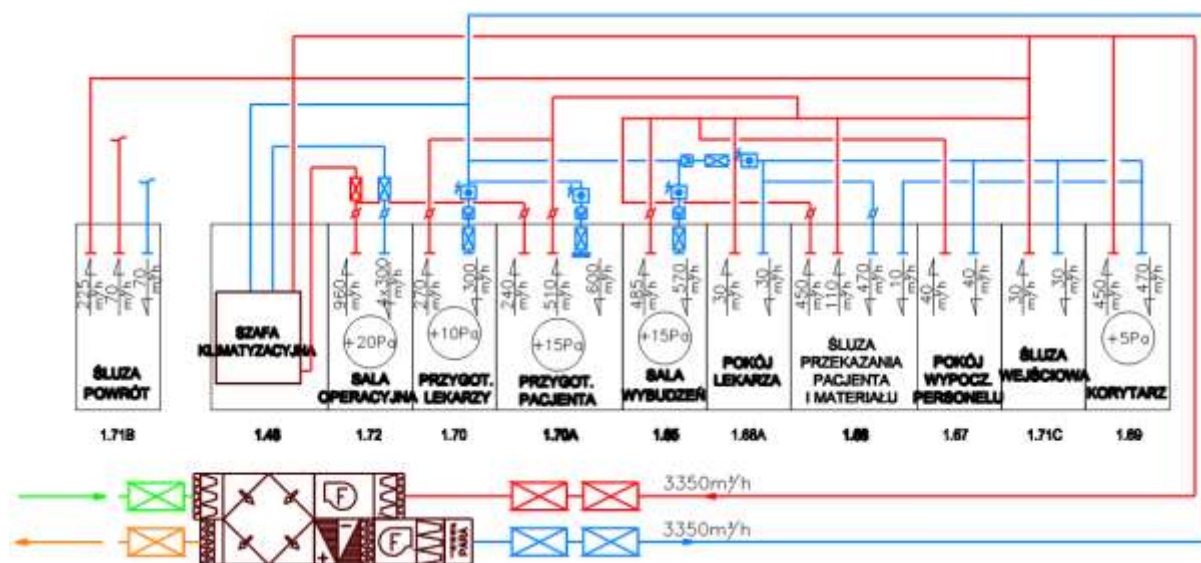
$$1,00 + 0,6 = 1,60 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}}$$

Stąd wniosek, że zaprojektowane instalacje spełniają wymagania Rozporządzenia [2].



Rysunek 8. Układ wentylacyjny (dystrybucji) powietrza w bloku operacyjnym – szpital A

Źródło: [6]



Rysunek 9. Schemat wentylacyjny (dystrybucji) powietrza w bloku operacyjnym – szpital A

Źródło: [6]

2.2. Rozwiązanie układu wentylacji sal operacyjnych w szpitalu B

Układ dystrybucji powietrza w obydwu salach, będących przedmiotem rozważań jest zróżnicowany (Rysunek 10).

W przypadku sali operacyjnej ortopedycznej zastosowano nawiew laminarny za pomocą sufitu laminarnego ($V_{naw}=8500 \text{ m}^3/\text{h}$) natomiast wywiew odbywa się górną poprzez 2 kratki wywiewne ($V_{wyw}=2 \times 3245 \text{ m}^3/\text{h}$) oraz dołem za pomocą 1 kratki wywiewnej

($V_{wyw}=1620 \text{ m}^3/\text{h}$). Odpowiednie ustawienie wydatków na wywiewie pozwala na spełnienie wymagań rozporządzenia [1].

W przypadku sali operacyjnej chirurgicznej zdecydowano się zrealizować nawiew turbulentny przy pomocy 6 nawiewników wirowych wyposażonych w filtry HEPA 13 każdy ($V_{naw}=3500 \text{ m}^3/\text{h}$). Wywiew powietrza odbywa się na podobnej zasadzie tj. w rozwiązaniu dla sali ortopedycznej z uwzględnieniem odpowiedniego zmniejszenia ilości powietrza wywiewanego.

W celu obliczenia wymaganej ilości powietrza przyjęto następującą (minimalną) krotność wymian:

- dla sali ortopedycznej $n=30 \text{ [1/h]}$
- dla sali chirurgicznej $n=15 \text{ [1/h]}$

tym samym spełniając wymagania zawarte w wytycznych [3], które mówią o zastosowaniu nawiewu wyporowego w przypadku wentylowania pomieszczeń o najwyższej możliwej aseptyce (I klasa czystości – sala ortopedyczna) oraz pomieszczeń o niskim poziomie bakterii (II klasa czystości – sala chirurgiczna) dla których zaleca się zachowanie krotności wymian powietrza w zakresie $n=12-15 \text{ [1/h]}$.

W celu zachowania odpowiedniej prędkości w strefie przebywania ludzi (SPL) zwiększono ilość powietrza ponad wymaganą tak, że krotność projektowana wymian powietrza wynosi w przybliżeniu:

- dla sali ortopedycznej $n=50 \text{ [1/h]}$
- dla sali chirurgicznej $n=20 \text{ [1/h]}$

co gwarantuje znacznie lepszą jakość i świeżość powietrza dostarczanego do sal a tym samym mniejsze zagęszczenie bakterii, które mogą wydzielać się podczas operacji. Dodatkowym zabezpieczeniem jest zastosowanie nadciśnienia 20 Pa [3] dla obydwu sal co wpływa korzystnie na aseptykę pomieszczeń.

Poniżej (Rysunek 11, 12) pokazano schematy dystrybucji powietrza dla central obsługujących pomieszczenia sal operacyjnych. Zasadniczo proces obróbki i przygotowywania powietrza na cele klimatyzacji nie różni się w obydwu rozwiązaniach. Zaznaczono pomieszczenia do których powietrze odpływa z sal operacyjnych i dzięki temu następuje bilansowanie układu wentylacyjnego. Centrale pobierają $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ powietrza świeżego co przy większej ilości powietrza nawiewanego świadczy o zastosowaniu recyrkulacji powietrza w centralach.

Wskaźnik SFP (moc właściwa wentylatora) wentylatora nawiewnego dla centrali K1 (obsługującej salę ortopedyczną) wynosi:

$$SFP_{K1N} = \frac{P_c}{\dot{V}} = \frac{\frac{P_w}{\eta_{tot}}}{\dot{V}} = \frac{P_w}{\eta_{tot} \cdot \dot{V}} = \frac{\frac{\dot{V} \cdot \sum \Delta p}{\eta_w}}{\eta_{tot} \cdot \dot{V}} = \frac{\dot{V} \cdot \sum \Delta p}{\eta_{tot} \cdot \dot{V} \cdot \eta_w} = \frac{\sum \Delta p}{\eta_w \cdot \eta_{tot}}$$

$$SFP_{K1N} = \frac{\sum \Delta p}{\eta_w \cdot \eta_{tot}} = \frac{1,27 kPa}{0,775 \cdot 0,872} = 1,88 \frac{kW}{m^3/s}$$

gdzie:

P_c – moc całkowita pobierana z sieci elektrycznej [W],

P_w – moc na wale wentylatora [W],

η_{tot} – sprawność wentylatora na drodze poboru prądu elektrycznego z sieci do wału wentylatora (sprawność elektryczna i przekładni) [-],

η_w – sprawność wentylatora na drodze od wału wentylatora do jego łopatek (sprawność mechaniczna) [-],

$\sum \Delta p$ – całkowity spadek ciśnienia na odcinku instalacji obsługiwanej przez wentylator (część czerpna od przepustnicy czerpnej przez centralę aż do najbardziej niekorzystnego pod względem hydraulicznym elementu zakańczającego na nawiewie) [Pa]

$\dot{V}$ – strumień objętościowy przepływu powietrza przetłaczanego przez wentylator [m^3/s].

Wskaźnik SFP dla centrali K1 (obsługującej salę chirurgiczną) wentylatora wywiewnego wynosi natomiast:

$$SFP_{K1W} = \frac{0,85 kPa}{0,786 \cdot 0,838} = 1,29 \frac{kW}{m^3/s}$$

Dla centrali K2 wskaźnik SFP przedstawia się następująco:

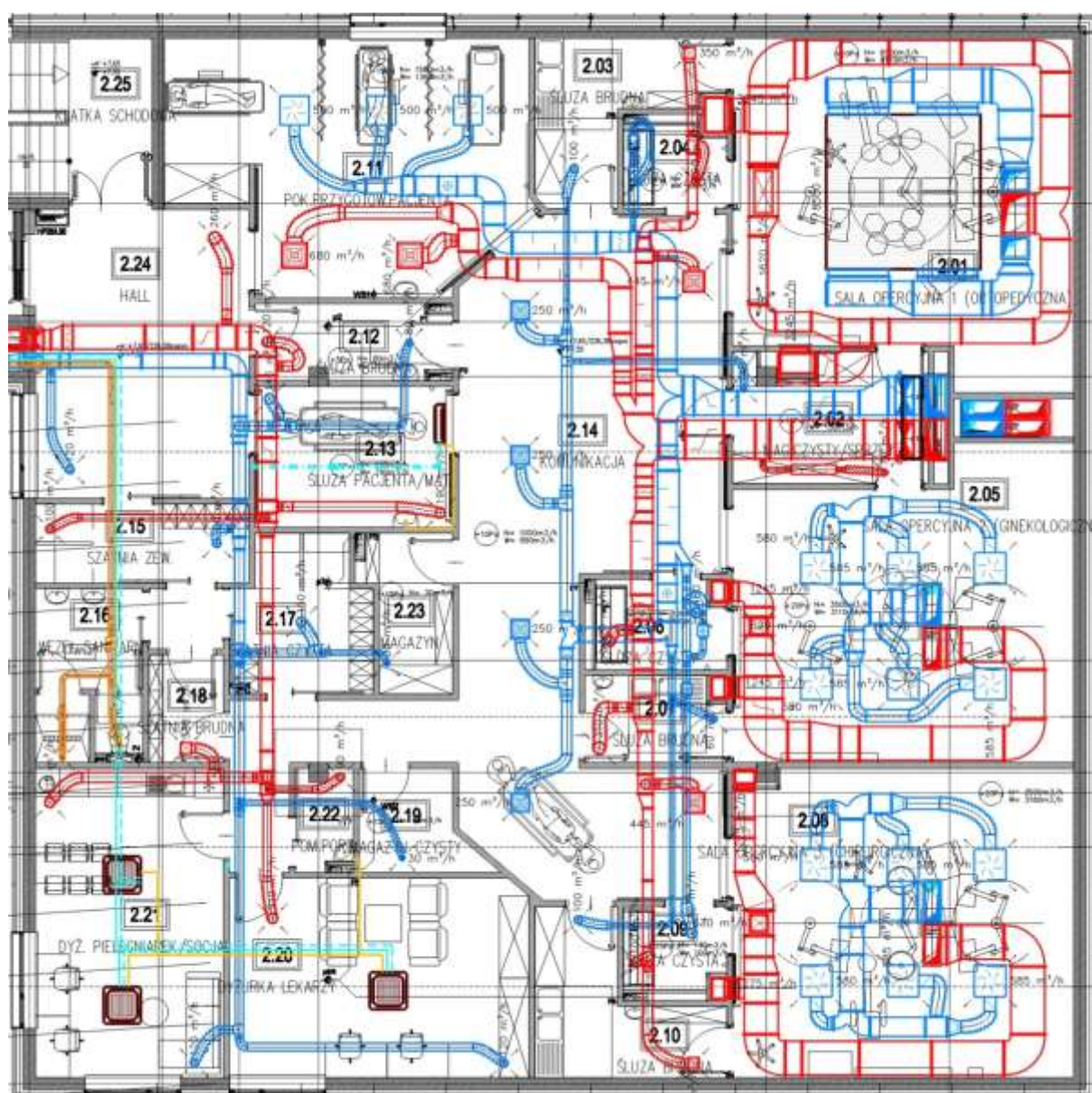
- dla wentylatora nawiewnego: $SFP_{K2N} = 1,80 \frac{kW}{m^3/s}$

- dla wentylatora wywiewnego: $SFP_{K2W} = 1,26 \frac{kW}{m^3/s}$

Zgodnie z [2] dla instalacja klimatyzacji lub wentylacji nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła (zakładając poprawkę dot. dodatkowego stopnia filtracji powietrza z filtrami klasy H10 i wyższej) SFP wentylatora nawiewnego wynosi: $1,60 + 0,6 = 2,20 \frac{kW}{m^3/s}$ a wywiewnego:

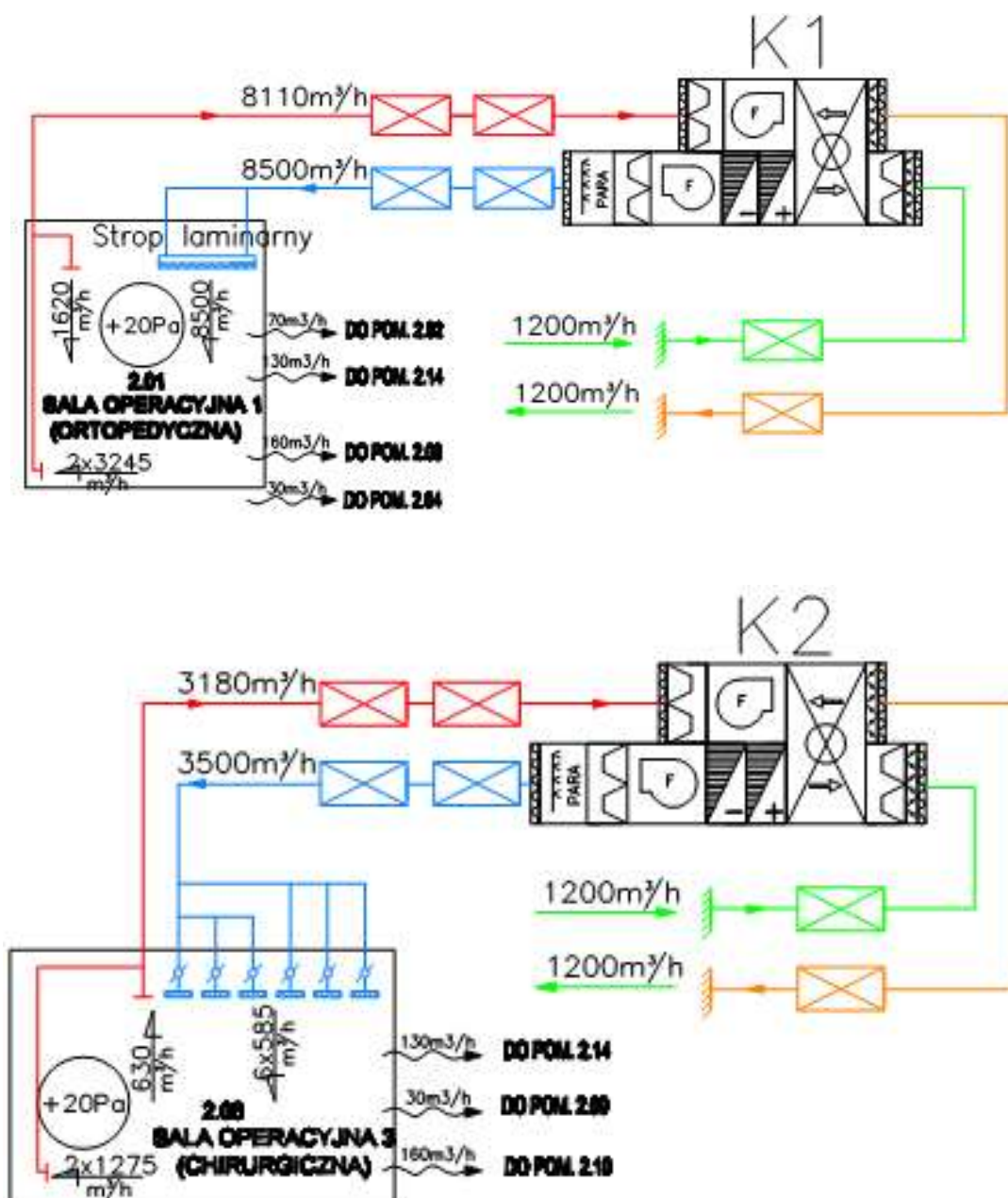
$$1,00 + 0,6 = 1,60 \frac{kW}{m^3/s}$$

Stąd wniosek, że zaprojektowane instalacje spełniają wymagania Rozporządzenia [2].



Rysunek 10. Układ wentylacyjny (dystrybucji) powietrza w bloku operacyjnym – szpital B

Źródło: [6]



Rysunek 11. Schematy wentylacyjne (dystrybucji) powietrza w salach operacyjnych – szpital B

Źródło: [6]

3. Rozwiązania układu klimatyzacji sal operacyjnych

3.1. Uzdatnianie powietrza dla sali operacyjnej szpitala

Powietrze w centrali wentylacyjnej K' ma za zadanie uzdatnić powietrze do wymagań jakie panują w blokach operacyjnych. Część powietrza kierowana jest na szafę klimatyzacyjną, której zadaniem jest obsługiwanie sali operacyjnej i zapewnienie odpowiednio w niej klimatu wewnętrznego (Rysunek 13).

Powietrze świeże przygotowane zostanie w centrali wentylacyjnej K3, która składa się z następujących sekcji (Rysunek 8):

Nawiew:

- przepustnica z siłownikiem,
- filtr F5,
- krzyżowy wymiennik odzysku ciepła,
- nagrzewnica wodna,
- chłodnica wodna,
- wentylator nawiewny z przetwornicą częstotliwości,
- filtr F9
- nawilżacz parowy.

Wywiew:

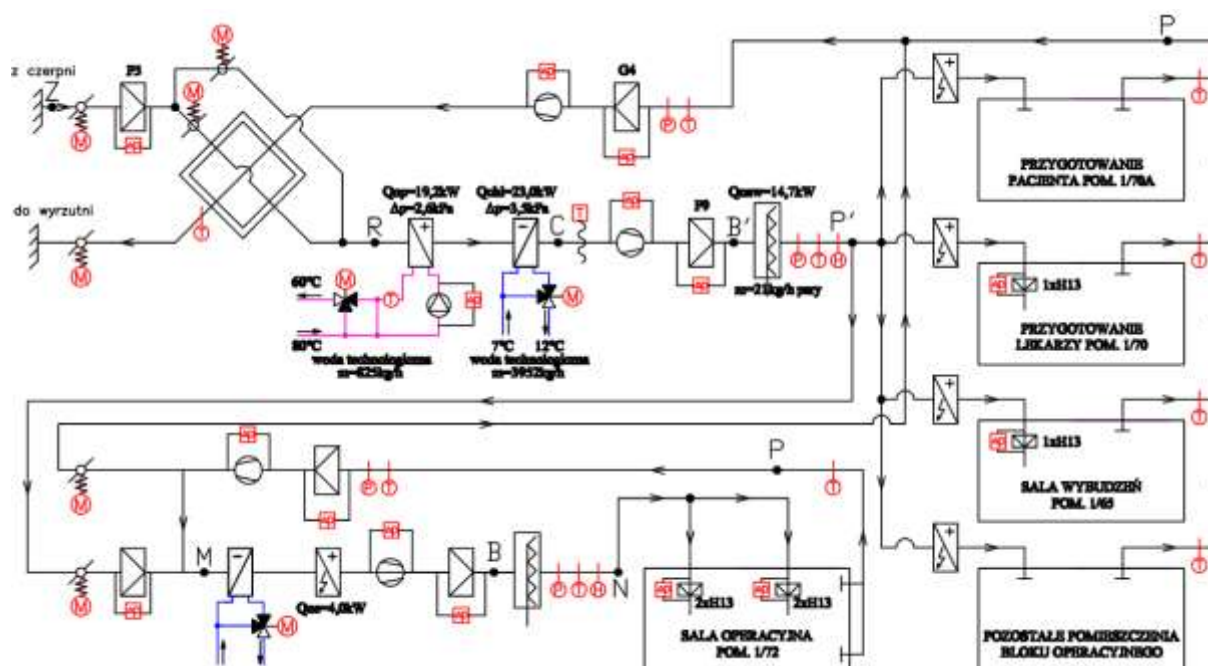
- króciec elastyczny
- filtr G4,
- wentylator z przetwornicą częstotliwości,
- krzyżowy wymiennik odzysku ciepła,
- przepustnica z siłownikiem.

Centrala wentylacyjna zlokalizowana jest w wentylatorowni w piwnicy.

W ramach systemu obsługującego salę operacyjną dodatkowo została zastosowana szafa klimatyzacyjna w wersji higienicznej (wyposażona w dodatkową chłodnicę wodną oraz nagrzewnicę elektryczną), pozwalająca na indywidualne dopasowanie parametrów temperatury i wilgotności w pomieszczeniu.

Szafa zlokalizowana jest w sąsiedztwie sali operacyjnej i ma możliwość sterowania parametrami powietrza w sali.

Centrala klimatyzacyjna wraz z szafą klimatyzacyjną wyposażona jest w pełną automatykę tak, aby zapewnić logiczną i sprawną pracę całego systemu (czujniki pomiaru ciśnienia, temperatury, wilgotności względnej powietrza; urządzenia zabezpieczające; sygnały sterujące oraz elementy wykonawcze). Oba urządzenia muszą być ze sobą kompatybilne.



Rysunek 12. Schemat uzdatniania powietrza w bloku operacyjnym – szpital A

Źródło: [6]

3.2. Uzdatnianie powietrza dla sali operacyjnej szpitala B (Rysunek 15, 16)

Z charakterystyki pomieszczeń sal operacyjnych (przemiana epsilon ε) wynika przeważający udział zysków ciepła jawnego w całkowitym bilansie zysków ciepła (ok. 90%) co świadczy o braku nadmiernych ilości zysków wilgoci w tych pomieszczeniach (priorytetem jest osiągnięcie temperatury w pomieszczeniu) (Rysunek 13, 14).

System uzdatniania powietrza jest scentralizowany, oparty o indywidualne centrale klimatyzacyjne dla każdej z sal operacyjnych. Niezależnie od sposobu dystrybucji powietrza, droga jego przygotowania w celu osiągnięcia wymaganych parametrów powietrza w pomieszczeniu jest praktycznie identyczna dla obydwu. Różnica tkwi w wydajnościach wymienników.

Centrala reprezentatywna K1 (np. dla pom. 2.01) składa się z następujących sekcji (Rysunek 9):

Nawiew:

- przepustnica z siłownikiem,
- filtr F5,
- wymiennik obrotowy odzysku ciepła,
- komora mieszania,
- chłodnica,

- nagrzewnica,
- wentylator nawiewny,
- filtr F9,
- nawilżacz parowy.

Wywiew:

- filtr F5,
- wentylator wywiewny,
- wymiennik obrotowy odzysku ciepła,
- przepustnica z siłownikiem.

Ponieważ obie centrale znajdują się na dachu budynku, chłodnice zostały napełnione niezamarzającym (przy najbardziej niekorzystnych parametrach powietrza zewnętrznego w zimie) roztworem glikolu etylenowego 35% o parametrach 7/12. Zadaniem chłodnicy jest schładzanie oraz osuszanie powietrza w okresie lata. Ze względu na wymagane obniżenie temperatury (2,5 K) oraz na bardzo dużą ilość powietrza przepływającego przez wymiennik, jego moc cieplna wynosi:

$$Q_{chl,K1} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta t = \frac{8500}{3600} \cdot 1,2 \cdot 1,005 \cdot 2,5 \cong 7,0 kW$$

Regulacja wydajności chłodnicy odbywa się przy pomocy zaworu trójdrogowego działającego na zasadzie upustu czynnika w ilości odpowiadającej wymaganej mocy wymiennika (regulacja ilościowa).

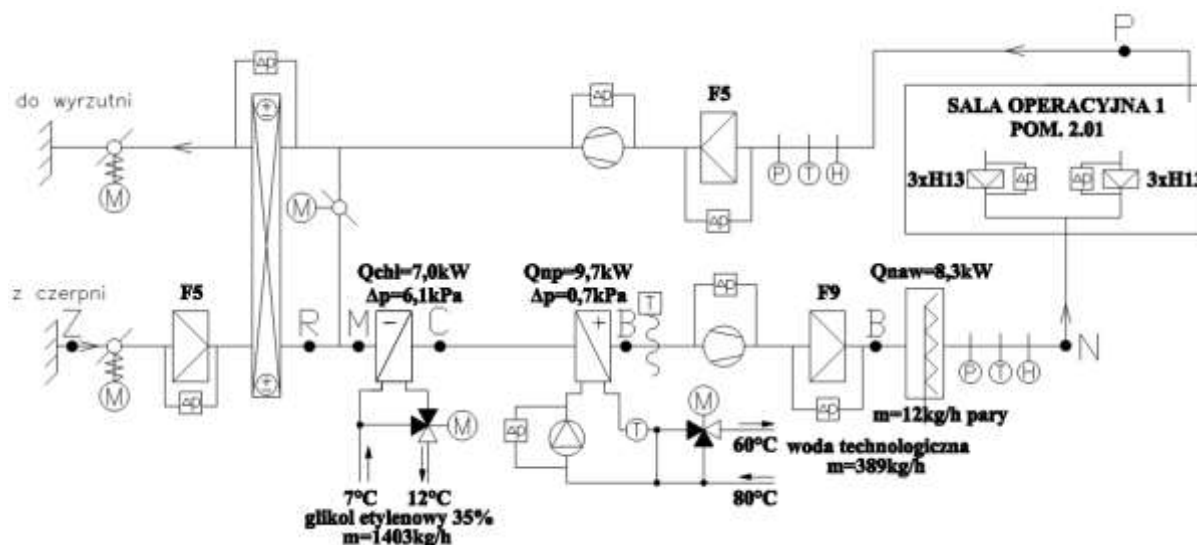
Zadaniem nagrzewnicy w centrali jest podwyższanie temperatury powietrza nawiewanego w okresie zimowym. Regulacja wydajności odbywa się podobnie jak przy chłodnicy przy pomocy zaworu trójdrogowego. W obiegu zasilania nagrzewnicy wodą o parametrach 80/60, zaprojektowano również spinkę, która w przypadku awarii zasilania nagrzewnicy pozwoli na swobodny przepływ wody w obiegu zamkniętym (wtórnym), utrudniając możliwość zamarznięcia wody w wymienniku. Ponad to spinka stabilizuje układ ciśnień w obiegu wymiennika. Nagrzewnica jest wyposażona w zabezpieczenie antyzamrozeniowe, które w przypadku zadziałania (mierzona temp. powietrza za nagrzewnicą obniży się do poziomu ok. 5°C), spowoduje pełne otwarcie zaworu regulacyjnego na nagrzewnicę (w celu rozgrzania wymiennika), wyłączenie wentylatorów oraz wymiennika obrotowego, a także zamknięcie przepustnic na wejściu i wyjściu z centrali po stronie czepni i wyrzutni.

Nawilżacz parowy o wydajności pary 12 kg/h doprowadza parametry powietrza nawiewanego do pożądanych zgodnie z wykresem Mollier'a (Rysunek 11).

Wymiennik obrotowy jaki zastosowano w połączeniu z komorą mieszania (recyrkulacji powietrza) przynosi bardzo duże oszczędności w procesie eksploatacji instalacji. Dodatkowo w zimie obrotowiec umożliwia odzysk wilgoci (oprócz odzysku temperaturowego). Istotnym jest cecha niezamarzania wymiennika obrotowego (nie szroni praktycznie w ogóle) wpływająca na stabilną pracę systemu.

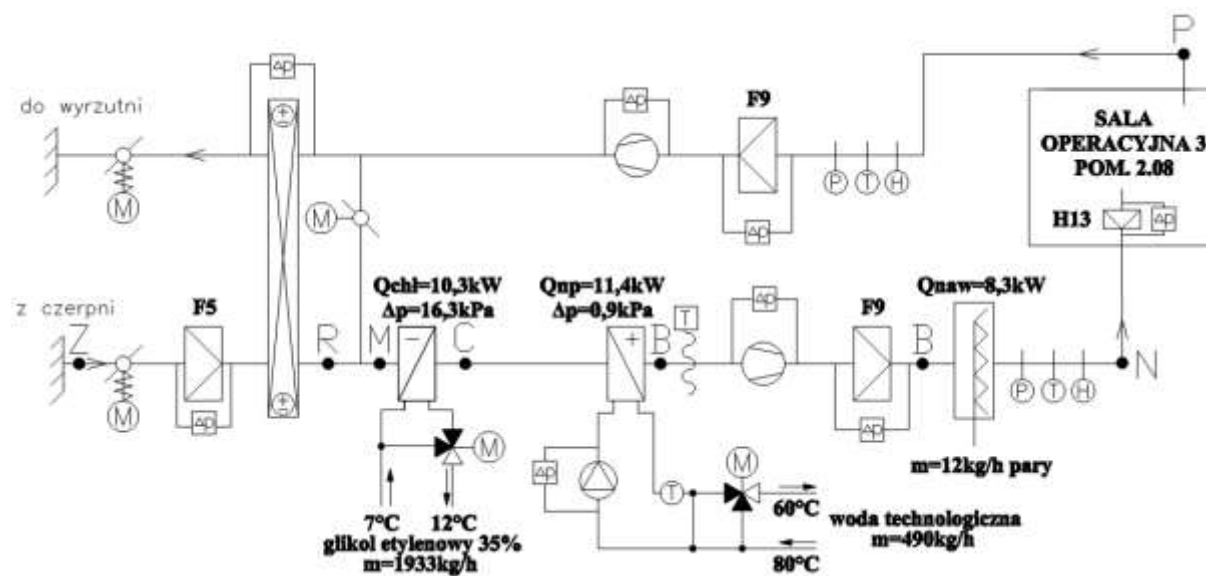
Kwestia możliwego przenikania powietrza wywiewanego do nawiewanego (poniżej 5% strumienia objętości powietrza w odniesieniu do ciśnienia 400 Pa) nie wpływa na pracę systemu, ponieważ ewentualna ilość powietrza, które dostanie się do nawiewu zostanie odpowiednio oczyszczona na filtrach (F9 i HEPA13) i przygotowana na wymiennikach ciepła.

Centrala klimatyzacyjna wyposażona jest w pełną automatykę tak, aby zapewnić logiczną i sprawną pracę całego systemu (czujniki pomiaru ciśnienia, temperatury, wilgotności względnej powietrza; urządzenia zabezpieczające; sygnały sterujące oraz elementy wykonawcze).



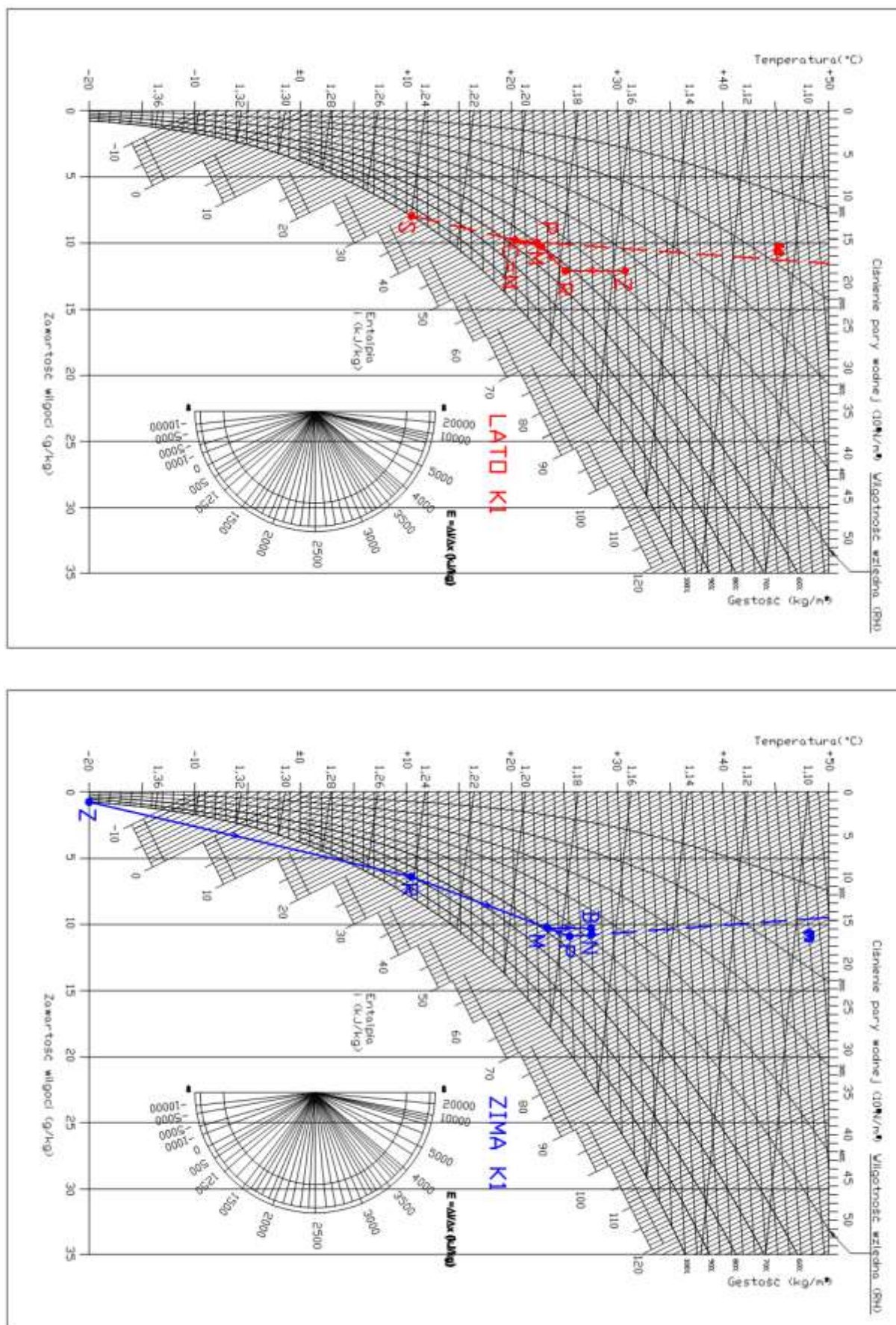
Rysunek 13. Schemat uzdatniania powietrza w sali operacyjnej 1 – szpital B

Źródło: [6]

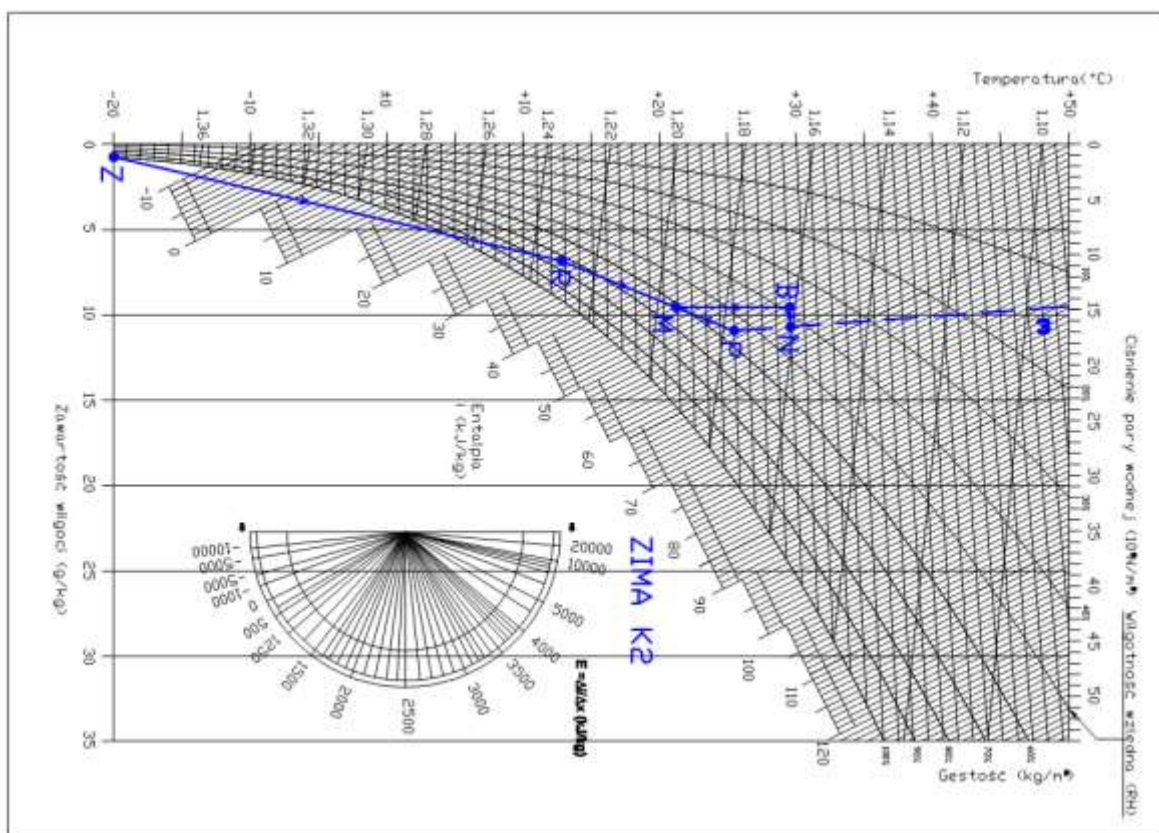
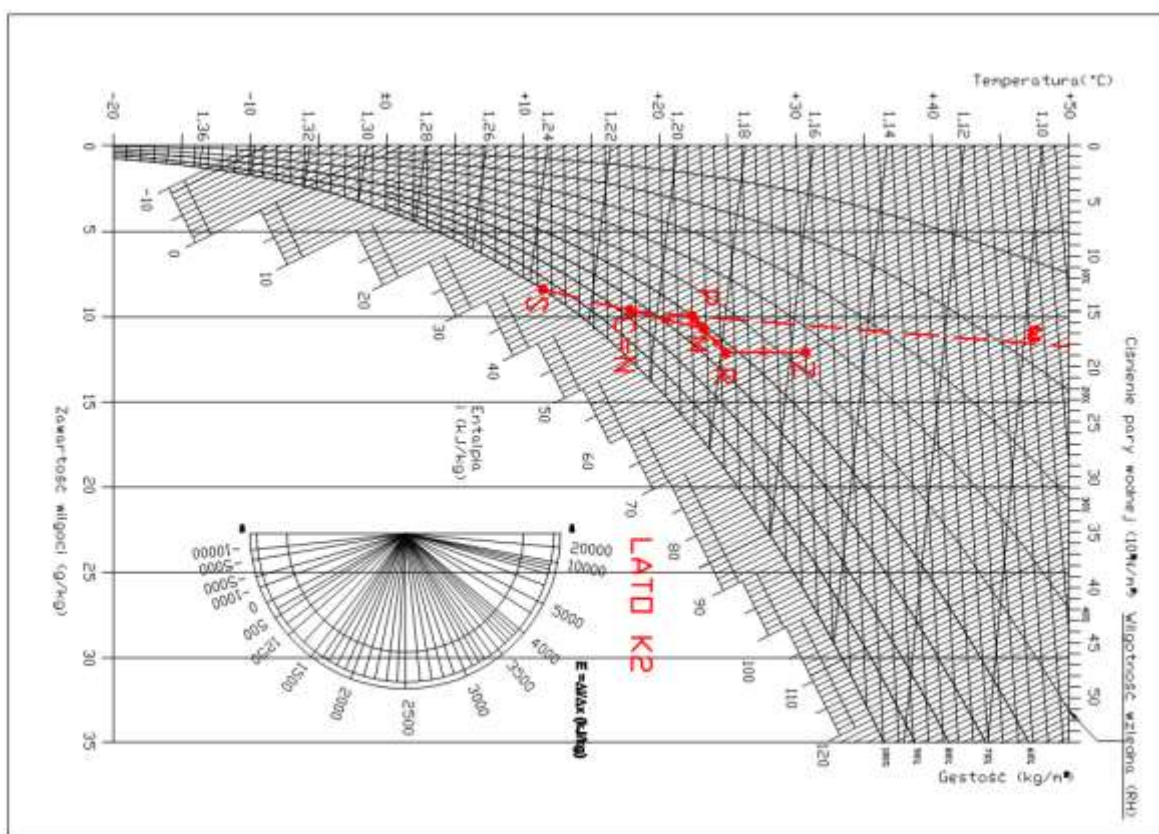


Rysunek 14. Schemat uzdatniania powietrza w sali operacyjnej 3– szpital B

Źródło: [6]

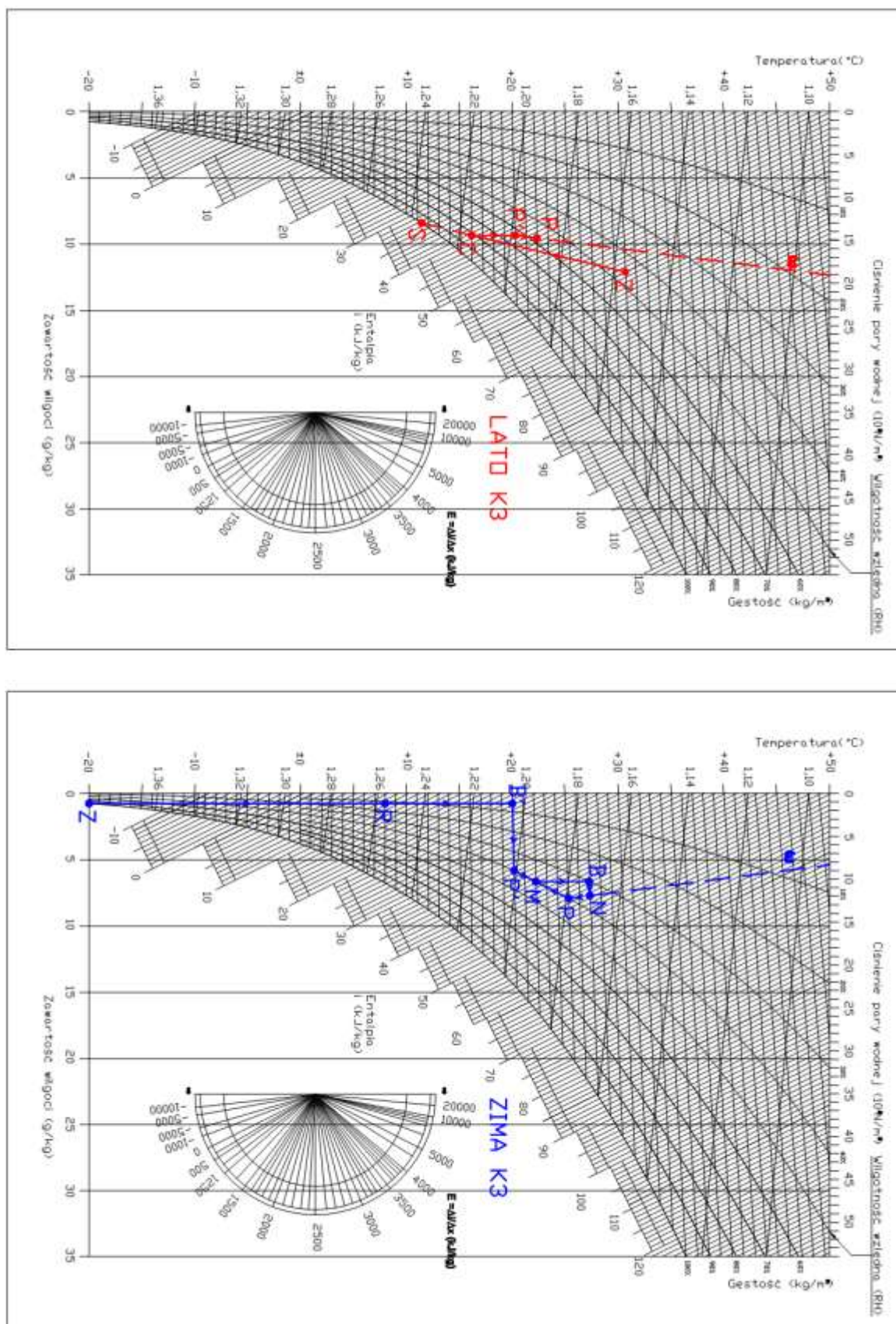


Rysunek 15. Wykresy Mollier'a dla sali operacyjnej 1– szpital B
Źródło: [6]



Rysunek 16. Wykresy Mollier'a dla sali operacyjnej 3– szpital B

Źródło: [6]



Rysunek 17. Wykresy Mollier'a dla sali operacyjnej 1/72– szpital A
Źródło: [6]

4. Zestawienie wybranych parametrów sal operacyjnych i ich systemów uzdatniania powietrza

Na podstawie przeanalizowanych sposobów klimatyzacji sal operacyjnych zamieszczono poniżej (Tabela 1) podstawowe parametry porównawcze systemów:

Tabela 1. Zestawienie parametrów urządzeń obsługujących sale operacyjne

Parametr		Jedn.	Sala 2.01 (K1)	Sala 2.08 (K2)	Blok oper. (K3')	Sala 1/72 (K3)
Kubatura pomieszczenia		m ³	161	149	zróżnicowany	117
Ilość powietrza nawiewanego		m ³ /h	8500	3500	3350	1200
Rodzaj nawiewu		-	sufit laminarny	4xanemostat	zróżnicowany	4xanemostat
Klasa filtrów powietrza:		-	1. F5→F9→H13 2. F5	1. F5→F9→H13 2. F9	1. F5→F9 2. G4	
SFP wentylatora nawiewnego		kW/ m ³ /s	1,88	1,80	1,94	
SFP wentylatora wywiewnego		kW/ m ³ /s	1,29	1,26	1,44	
Odzysk ciepła rodzaj/sprawność		-/%	rotor/68	rotor/73	krzyżowo- płytkowy/46	brak
Parametry nagrzewnicy	Wydaźność	kW	11,4	9,7	19,2	4
	Medium	-	woda	woda	woda	elektryczna
	Parametry	°C/° C	80/60	80/60	80/60	
	Przepływ medium	kg/h	490	417	825	
	Spadek ciśnienia	kPa	0,9	0,7	2,6	
	Sposób regulacji	-	zawór trójdrożny/ regulacja jakościowa	zawór trójdrożny/ regulacja jakościowa	zawór trójdrożny/ regulacja jakościowa	stopniowy
Wydaźność		kW	10,3	7,0	23,0	

Parametry chłodnicy	Medium	-	glikol etylen. 35%	glikol etylen. 35%	woda	
	Parametry	°C/°C	7/12	7/12	7/12	
	Przepływ medium	kg/h	2060	1400	3952	
	Spadek ciśnienia	kPa	16,3	6,1	3,5	
	Sposób regulacji	-	zawór trójdrożny/ regulacja ilościowa	zawór trójdrożny/ regulacja ilościowa	zawór trójdrożny/ regulacja ilościowa	
Parametry nawilżacza	Rodzaj	-	parowy	parowy	parowy	
	Wydajność	kg/h	12,0	12,0	21,2	
	Moc	kW	8,3	8,3	14,7	

Zródło: [6]

Odwołując się do powyższego zestawienia oraz rysunków zawartych w artykule można stwierdzić, że w praktyce projektowej:

- dystrybucja powietrza oznacza zastosowanie nawiewników sufitowych wyposażonych w filtr HEPA (powyżej 10) bądź sufitu laminarnego również z filtrem HEPA, w zależności od klasy czystości pomieszczenia wentylowanego,
- krotność wymian zależy od klasy czystości ale również od rodzaju zastosowanego sposobu nawiewu powietrza (krotność wymian zwiększa się przy zastosowaniu sufitu laminarnego),
- stosuje się odzysk ciepła w postaci wymienników obrotowych, bądź krzyżowo - płytowych o wysokiej sprawności odzysku ciepła i wilgoci,
- stosowane nagrzewnice w centralach napełniane są wodą technologiczną o wysokiej temperaturze a ich regulacja odbywa się na zasadzie podmieszania wody powrotnej przy pomocy pompy na obiegu wtórnym tuż przy wymienniku. Układ hydrauliczny dodatkowo jest wyposażony w spinkę umożliwiającą pełny obieg tylko przez nagrzewnicę na wypadek awarii układu hydraulicznego obiegu pierwotnego w zimie,
- stosowane chłodnice w centralach napełniane są glikolem etylenowym (gdy urządzenie znajduje się w sąsiedztwie powietrza zewnętrznego np. na dachu) bądź wodą technologiczną (gdy urządzenie znajduje się w pomieszczeniu ogrzewanym np. wentylatorowni w piwnicy) o niskim parametrze. Regulacja wymienników odbywa się na zasadzie upuszczania czynnika

chłodniczego (regulacja ilościowa). Pompy układu chłodniczego znajdują się w pomieszczeniu ogrzewanym,

- stosuje się nawilzacze parowe, ponieważ wszelkie mikroorganizmy wywołujące choroby są unicestwiane podczas zagotowania wody w nawilzaczu.

5. Wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonego porównania różnych systemów uzdatniania i dystrybucji powietrza dla pomieszczeń czystych typu bloki operacyjne, a w szczególności sale operacyjne, należy sprecyzować zastosowanie pomieszczeń (jakie pełnią funkcje) oraz wynikające z nich wymagania w dziedzinie panującego klimatu.

Spośród różnorodnych, sprawdzonych w praktyce rozwiązań, zaleca się:

1. Wydzielenie strefy klimatu panującego na sali operacyjnej z klimatu panującego w bloku operacyjnym – zastosowanie 1 centrali klimatyzacyjnej dla 1 sali operacyjnej.
2. Zastosowanie stropu laminarnego z filtrami o większej dokładności filtracji niż HEPA10, w przypadku pomieszczenia o najwyższej klasie czystości i najwyższych wymaganiach w zakresie klimatu.
3. Zastosowanie anemostatów z filtrami o większej dokładności filtracji niż HEPA10, w przypadku pomieszczenia o II klasie czystości.
4. Zastosowanie nadciśnienia w sali operacyjnej oraz odpowiedni rozkład ciśnień w pomieszczeniach bloku operacyjnego (podciśnienie w pomieszczeniach sanitarnych). Kaskada ciśnień wymaga ciągłej pracy wszystkich wentylatorów wchodzących w skład systemu.
5. Zwrócenie uwagi na stabilność pracy systemu oraz jego bezawaryjność w trakcie całego roku kalendarzowego, poprzez zastosowanie sprawdzonych układów hydraulicznych oraz odpowiednio dobrana automatykę systemu.

Dopuszcza się zastosowanie centrali wentylacyjnej obsługującej blok operacyjny, jednak pomieszczenie sali operacyjnej powinno mieć możliwość indywidualnego dopasowania parametrów powietrza wewnętrznego. Wówczas należy zastosować dodatkowe urządzenie jakim jest szafa klimatyzacyjna.

Zastosowanie dwóch central klimatyzacyjnych, odpowiednio jedna obsługująca blok operacyjny i druga obsługująca salę operacyjną jest uzasadnione.

Projektując należy dbać o koszty eksploatacyjne oraz utrzymanie urządzeń w dobrej jakości. Systemy uzdatniania powietrza dla pomieszczeń czystych są drogie ze swojej natury, jednak nie można w nich szukać oszczędności, ponieważ istnieje poważne ryzyko wystąpienia infekcji u operowanych pacjentów oraz powikłań. Życie ludzkie jest ważniejsze od ilości inwestowanych pieniędzy w utrzymanie obiektów pożytku publicznego.

Literatura:

- [1] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 26 czerwca 2012 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać pomieszczenia i urządzenia podmiotu wykonującego działalność leczniczą (aktualne na dzień 28.02.2014).
- [2] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dn. 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (aktualne na dzień 28.02.2014).
- [3] „Wytyczne projektowania szpitali ogólnych. Instalacje sanitarne. Zeszyt 5. Wentylacja i klimatyzacja”; P. Kruczkowski; Warszawa 1984.
- [4] „Czyste powietrze w salach operacyjnych” - materiały szkoleniowe dla pielęgniarek epidemiologicznych. Zeszyt IV; D. Gregorowicz – Warpas, A. Pałubicka, A. Wolski, K. Kaiser; Wrocław 2005.
- [5] Materiały z wykładów; K. Wojtas; Kraków 2011.
- [6] Materiały własne autorów.