Kolektory słoneczne
do podgrzewania wody użytkowej
Efektywność i opłacalność instalacji

Jarosław Dąbrowski

Kolektory słoneczne
do podgrzewania wody użytkowej
Efektywność i opłacalność instalacji

Wrocław

Opiniodawca
prof. dr hab. inż. Jan Pabis

Redaktor merytoryczny
dr hab. inż. Krzysztof Pulikowski, prof. nadzw.

Opracowanie redakcyjne
mgr Elżbieta Winiarska-Grabosz

Korekta
Janina Szydłowska

Łamanie
Halina Sebzda

Projekt okładki
Monika Trypuz

Monografie LXXX

© Copyright by Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław 2009

ISSN 1898–1151
ISBN 978–83–60574–77–5

WYDAWNICTWO UNIWERSYTETU PRZYRODNICZEGO WE WROCŁAWIU
Redaktor Naczelny – prof. dr hab. Andrzej Kotecki
ul. Sopocka 23, 50–344 Wrocław, tel. 71 328–12–77
e-mail: wyd@up.wroc.pl

Nakład 300 + 16 egz. Ark. wyd. 8,5. Ark. druk. 8,0
Druk i oprawa: EXPOL, P. Rybiński, J. Dąbek, Spółka Jawna
ul. Brzeska 4, 87–800 Włocławek

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I JEDNOSTEK

Oznaczenie	Znaczenie	Jednostka
a, b, c	– współczynniki	–
a_1	– rata rozszerzonej reprodukcji	%
C	– cena	zł
C_K	– cena końcowa	zł
$C_{P\text{-}160}$	– cena podgrzewacza o pojemności 160 l	zł
E_D	– energia elektryczna dostarczona	kWh·rok^{-1}
E_{KOL}	– energia cieplna kolektory – podgrzewacz	J
E_{KOT}	– energia cieplna kocioł – podgrzewacz	J
EX, EY	– wartość oczekiwana	–
IT	– promieniowanie całkowite	MJ·m^{-2}
k	– współczynnik cieplny czynnika	J·(K·m^3)$^{-1}$
k_1, k_2	– współczynnik strat ciepła	W·(m^2·K)$^{-1}$
K_C	– koszt wymiany czynnika grzewczego	zł·rok^{-1}
K_E, K_{E1}, K_{E2}	– koszty eksploatacyjne	zł·rok^{-1}
K_I	– końcowy koszt inwestycji	zł
K_J	– koszt jednostkowy	zł
K_M	– koszt montażu z dodatkowymi materiałami	zł
K_N	– koszt 1 GJ energii cieplnej	zł·GJ^{-1}
K_P	– koszt poboru energii elektryczne	zł·rok^{-1}
Q	– ciepło	J
t, T	– temperatura	ºC, K
t_1, t_2, T_1, T_2	– temperatura czynnika na zasilaniu i powrocie	ºC, K
T_Z	– czas zwrotu inwestycji	lata
U	– usłonecznienie	h
V_{KOL}	– przepływ czynnika kolektory – podgrzewacz	m^3
V_{KOT}	– przepływ czynnika kocioł – podgrzewacz	m^3
V_{WOD}	– rozbiór ciepłej wody użytkowej	m^3
W_U	– wartość opałowa	MJ·jednostkę$^{-1}$
X, Y	– zmienne losowe	–
Z	– zysk	zł
η	– sprawność urządzenia	–
σ_X, σ_Y	– odchylenie standardowej	–

Jednostki i czynniki konwersji

1 J (dżul)	= $2{,}778 \cdot 10^{-7}$ kW·h
1 kW·h (kilowatogodzina)	= 3,6 MJ = 0,1 l ropy naftowej
1 GJ (gigadżul)	= 277,8 kW·h
1 PJ (petadżul)	= 34121 tpu (tony paliwa umownego)
1 TW·a (terawatorok)	= 8760 kW·h = 31,54 PJ
1 Mtoe	= 11,63 TW·h (ekwiwalent miliona ton ropy naftowej)
$1^{O}C$	= t + 273,15 K ≈ 274 K

Przedrostki do tworzenia nazw i symboli

Mnożnik	Przedrostek	Skrót	Mnożnik	Przedrostek	Skrót
10^{18}	eksa	E	10^{-1}	decy	d
10^{15}	peta	P	10^{-2}	centy	c
10^{12}	tera	T	10^{-3}	mili	m
10^{9}	giga	G	10^{-6}	mikro	μ
10^{6}	mega	M	10^{-9}	nano	n
10^{3}	kilo	k	10^{-12}	piko	p
10^{2}	hekto	h	10^{-15}	femto	f
10^{1}	deka	da	10^{-18}	atto	a

Wybrane jednostki pochodne

Wielkość	Jednostka miary		Zależność od jednostki podstawowej
	Nazwa	Symbol	
Praca, energia	dżul	J = N·m	1 $m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Moc, strumień energii	wat	W = J·s^{-1}	1 $m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Ciepło, energia	dżul	J = N·m	1 $m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Ciepło właściwe	dżul na kilogram i kelwin	J·$(kg \cdot K)^{-1}$	1 $m^2 \cdot (s^2 \cdot K)^{-1}$
Gęstość strumienia energii	wat na metr kwadratowy	W·m^{-2}	1 kg·s^{-3}
Współczynnik wnikania ciepła	wat na metr kwadratowy i kelwin	W·$(m^2 \cdot K)^{-1}$	1 kg·$(s^3 \cdot K)^{-1}$
Współczynnik przewodzenia ciepła	wat na metr i kelwin	W·$(m \cdot K)^{-1}$	1 m·kg·$(s^3 \cdot K)^{-1}$
Pole powierzchni	metr kwadratowy	m^2	1 m^2
Objętość	metr sześcienny	m^3	1 m^3
Gęstość	kilogram na metr sześcienny	kg·m^{-3}	1 kg·m^{-3}
Siła	niuton	N	1 m·kg·s^{-2}
Moment siły	niutonometr	N·m	1 $m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Ciężar właściwy	niuton na metr szcześcienny	N·m^{-3}	1 kg·$(m^2 \cdot s^2)^{-1}$

1. WPROWADZENIE

Cechą charakterystyczną rozwoju gospodarczego poszczególnych państw jest zwiększające się zużycie energii. Stały przyrost zużycia energii jest wynikiem wykładniczego przyrostu ludności oraz wykładniczego wzrostu jednostkowego zużycia energii, przypadającego na głowę mieszkańca. Coraz większe zużycie energii wiąże się ze wzrostem zapotrzebowania na nośniki energii, które służą do jej wytworzenia.

Nie ulega wątpliwości, iż okres taniej energii pochodzącej z surowców naturalnych, pomimo pewnych wahań cen na rynkach światowych, należy do przeszłości. Perspektywa wyczerpywania się tradycyjnych źródeł energii pierwotnej przy coraz większym zapotrzebowaniu na energię, a przede wszystkim rosnące koszty jej pozyskiwania – silniej, z upływem czasu, oddziaływać będą na wybór technologii i opłacalność inwestycji.

Innym ważnym problemem jest aktualnie narastające zjawisko efektu cieplarnianego, które przyczynia się do powstawania różnego rodzaju anomalii pogodowych. Główną przyczyną wywołującą to zjawisko jest duża i ciągle wzrastająca emisja dwutlenku węgla, której poziom dla Polski w roku 1997 wynosił ok. 330 mln ton (2% w skali emisji światowej) [dane GUS]. Polska jest jednym z państw emitujących znaczne ilości dwutlenku węgla (3,3 razy więcej od średniej światowej) [Miklaszewski 2002]. Aby zapobiec dalszemu narastaniu efektu cieplarnianego, należałoby ograniczyć emisję CO_2 aż o 60% w skali globalnej. Jednym z alternatywnych rozwiązań, które przyczyniłoby się do zmniejszenia między innymi emisji CO_2, jest zastępowanie konwencjonalnych źródeł energii źródłami niekonwencjonalnymi.

W związku z postępującym wzrostem cen energii konwencjonalnej, a z drugiej strony – ekologiczną koniecznością stosowania niekonwencjonalnych źródeł energii, coraz bardziej uzasadnione staje się wykorzystanie źródła czystej energii, którym jest promieniowanie słoneczne. Jednym z najbardziej efektywnych sposobów pozyskania energii Słońca w polskich warunkach jest zastosowanie układu kolektorów słonecznych ze zbiornikiem akumulacyjnym do podgrzewania wody użytkowej.

W budownictwie mieszkaniowym i rolniczym występuje znaczne zapotrzebowanie na energię podczas eksploatacji budynków, do takich celów jak: ogrzewanie pomieszczeń, podgrzewanie wody użytkowej, zasilanie urządzeń elektrycznych. Przy tak dużym zapotrzebowaniu na energię powinniśmy, już w fazie projektowania budynku, podjąć działania w kierunku jej racjonalizacji i oszczędności. Zasadność wykonania w budynku instalacji słonecznej powinno się już uwzględnić na etapie wykonywania projektu budowlanego budynku, co wpłynęłoby na efektywne pozyskiwanie energii, a co za tym idzie, większe oszczędności energii konwencjonalnej. Podczas projektowania budynku, w którym będzie przewidziana instalacja słoneczna służąca do podgrzewania wody użytkowej, powinniśmy odpowiednio zorientować, w stosunku do kierunku południowego, połać dachową, na której będą zainsta-

lowane kolektory słoneczne. Kolejną ważną rzeczą, którą trzeba przewidzieć, jest optymalne nachylenie połaci dachowej budynku do powierzchni poziomej. Natomiast konstrukcja więźby dachowej powinna być prawidłowo zaprojektowana pod względem wytrzymałościowym, aby mogła przenieść dodatkowy ciężar kolektorów słonecznych. Ważne jest także odpowiednie zaprojektowanie pomieszczeń w budynku, aby maksymalnie skrócić odległości połączeń instalacji hydraulicznych.

Postęp technologiczny, jaki dokonał się w ostatnich latach w technice instalacji pozyskujących energię słoneczną, która jest wykorzystywana np. do podgrzewania wody użytkowej, jest olbrzymi, począwszy od kolektorów cieczowych o prostej budowie i wykonanych z łatwo dostępnych materiałów, skończywszy na wprowadzonych na rynek w ostatnich latach kolektorach cieczowych próżniowych, charakteryzujących się bardzo wysoką sprawnością, wykonanych z najbardziej zawansowanych technologicznie materiałów.

W pracy zajęto się kompleksowymi badaniami typowej standardowej instalacji słonecznej, która służyła jako alternatywne niekonwencjonalne źródło czystej energii wykorzystywanej do podgrzewania wody użytkowej. Została dokładnie określona efektywność instalacji, przebieg jej pracy, opłacalność i wpływ warunków meteorologicznych na instalację. Ponadto opracowano dwa modele matematyczne dotyczące możliwości prognozowania maksymalnej ilości wody podgrzanej przez kolektory słoneczne i prognozowania pozyskania energii cieplnej przez kolektory słoneczne. Badania zostały przeprowadzone na podstawie własnych pomiarów wykonanych na specjalnie przygotowanym stanowisku badawczym i danych meteorologicznych uzyskanych z Obserwatorium Wrocław–Swojec.

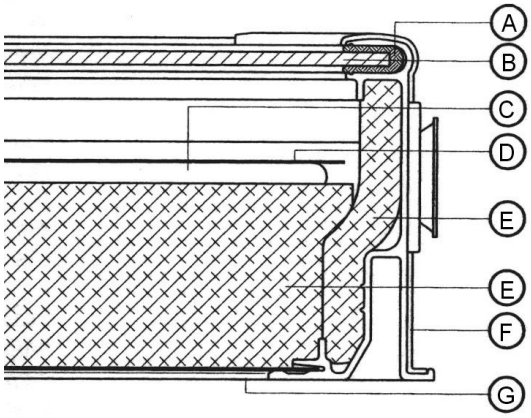
Zagadnienia zamieszczone w podrozdziałach od 5.1. do 5.6. były fragmentarycznie opublikowane w czasopismach i zeszytach naukowych [Dąbrowski i Hutnik 2002 a, b, Dąbrowski 2004 a, b, Dąbrowski i Hutnik 2004, Dąbrowski i in. 2004, Dąbrowski 2004 a, b, Dąbrowski i Hutnik 2005, Dąbrowski 2006, Dąbrowski i in. 2006, Dąbrowski i Hutnik 2007 a, b, Dąbrowski i Tatko 2007, Dąbrowski i Hutnik 2008].

2. MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA ENERGII SŁONECZNEJ DO PODGRZEWANIA WODY UŻYTKOWEJ

W polskich warunkach meteorologicznych najefektywniej działać będzie instalacja kolektorów słonecznych, której zadaniem jest podgrzewanie wody do celów użytkowych w budynkach (jednorodzinnych, wielorodzinnych, wczasowych, szpitalnych itd.). W literaturze polskiej i zagranicznej można znaleźć wiele artykułów poświęconych tej tematyce.

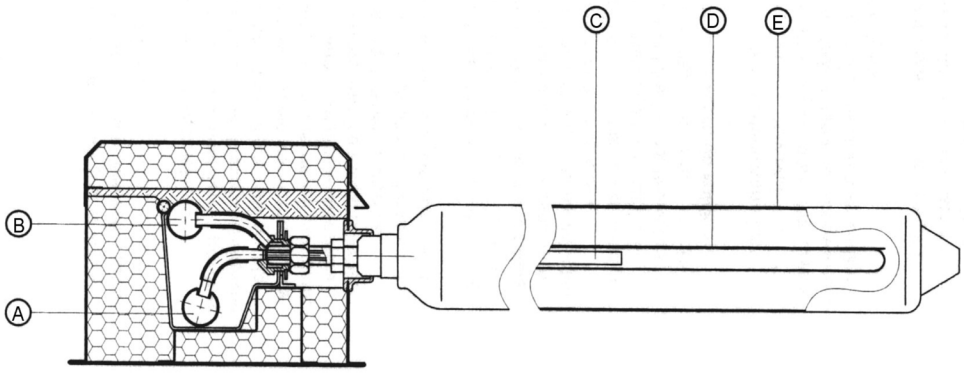
2.1. Charakterystyka techniczna kolektorów słonecznych

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury przedmiotowej można stwierdzić, że w zależności od medium roboczego kolektory dzielą się na cieczowe i powietrzne. Kolektory słoneczne możemy także podzielić na niskotemperaturowe i wysokotemperaturowe w zależności od temperatury maksymalnej, jaką chcemy osiągnąć dla medium roboczego. Kolejnym podziałem kolektorów jest ich podział na kolektory płaskie – tradycyjne i kolektory tubowe – próżniowe. Budowę płaskiego kolektora cieczowego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Kolektor cieczowy płaski: A – profil uszczelniający, B – pokrywa przeźroczysta, C – wężownica, D – płyta absorbera, E – ocieplenie, F – rama profilowa, G – blacha denna

Oprócz tradycyjnych płaskich kolektorów cieczowych na rynku pojawiły się od niedawna nowe, bardziej zawansowane technologicznie, przez co wydajniejsze i droższe, kolektory tubowe próżniowe (rys. 2).



Rys. 2. Kolektor cieczowy próżniowy: A – przewód powrotny (wejście), B – przewód zasilający (wyjście), C – wymiennik ciepła z rurkami współosiowymi, D – płyta absorbera, E – próżniowa rura szklana

Kolektor próżniowy zbudowany jest z kilku do kilkunastu rur szklanych, w których została wytworzona wysoka próżnia. W każdej rurze próżniowej znajduje się płytka absorbera z zamocowaną rurką, przez którą przepływa czynnik roboczy, odbierający ciepło z energii promieniowania słonecznego. Wytworzona próżnia w rurach szklanych gwarantuje bardzo małe straty ciepła nawet przy dużych różnicach temperatur pomiędzy absorberem a otoczeniem. Kolektor próżniowy nawet w okresie zimy, w dni kiedy dopływa tylko promieniowanie rozproszone, potrafi efektywnie przejąć to promieniowanie i zamienić na energię cieplną.

Zamiana energii słonecznej w użytkową energię cieplną w obydwu typach kolektorów dokonuje się na takiej samej zasadzie. W kolektorach została wykorzystana właściwość cieplna czarnych powierzchni. Promienie słoneczne przechodzące przez pokrywę przeźroczystą, którą może być np. szkło, akryl, poliwęglan, padają na powierzchnię absorbera. Zadaniem pokrywy kolektora jest przepuszczenie promieni słonecznych i zatrzymanie ciepła, które jest wypromieniowywane przez absorber. Padające promienie słoneczne na absorber, który może być wykonany z miedzi, aluminium, cynku, żeliwa, stali, pokryty warstwą selektywną: czarny chrom, czarny nikiel, czarna miedź, nagrzewają go. Dobry absorber wykonany z miedzi i pokryty powłoką wysoce selektywną charakteryzuje się dużą zdolnością absorpcji rzędu 95–97% a emisyjnością 8–14%. Wytworzona przez absorber energia cieplna odbierana jest z jego powierzchni przez rurociąg cieczowy i transportowana do miejsca jej wykorzystania.

W systemach podgrzewania ciepłej wody użytkowej możemy wyodrębnić kilka podstawowych układów, które pracują według kilku wariantów sterowania. Za najbardziej racjonalny uznaje się podział instalacji ze względu na:

1) Sposób przekazywania ciepła wodzie użytkowej:
   a) obieg wody bezpośredni – ciepła woda podgrzana w kolektorze trafia bezpośrednio do punktów czerpalnych;
   b) obieg wody pośredni – ciepło uzyskane z kolektora poprzez czynnik roboczy przekazywane jest do wymiennika, w którym ciepło zostaje odebrane przez wodę użytkową;

w tym przypadku tworzą się dwa oddzielne obiegi: pierwotny kolektorowy i drugi właściwy, wody użytkowej.

2) Sposób wymuszenia obiegu czynnika roboczego:
   a) obieg grawitacyjny – cyrkulacja czynnika roboczego pomiędzy kolektorem a zasobnikiem powstaje w wyniku zmiany gęstości cieczy podczas jej podgrzewania;
   b) obieg wymuszony – cyrkulacja zostaje wymuszona przez pompę.
3) Lokalizację źródła konwencjonalnego energii, którym dostarczamy energię przy ewentualnym niedoborze energii otrzymanej ze źródła niekonwencjonalnego:
   a) instalacja w której w tym samym zasobniku pozyskujemy ciepło z kolektorów i ewentualny niedobór uzupełniamy za pomocą energii konwencjonalnej;
   b) instalacja w której ewentualny niedobór energii dostarczany jest autonomicznie poza zasobnikiem.

Spośród wyżej wymienionych wariantów najbardziej opłacalnym i funkcjonalnym rozwiązaniem jest układ z pośrednim obiegiem wymuszonym (instalacja pracuje przez cały rok), z dogrzewaniem wody za pomocą energii konwencjonalnej w zbiorniku akumulacyjnym. Tego typu instalacja jest obiektem badań przedstawionych w tej pracy.

Chociaż dla instalacji z obiegiem bezpośrednim można by uzyskać większą sprawność pozyskiwania energii słonecznej niż dla instalacji z obiegiem pośrednim, charakteryzują się one jednak mniejszą wartością użytkową. Instalację z obiegiem bezpośrednim można eksploatować tylko w okresie ciepłej pory roku, gdy temperatury powietrza otoczenia nie spadają poniżej zera. W tego typu instalacjach kolektor, który jest decydującym elementem odbioru energii, podatny jest na agresywność chemiczną wody, przez co zostaje skrócona jego trwałość techniczna. Także tego typu rozwiązania spotyka się sporadycznie w obiektach o stosunkowo niewielkim zapotrzebowaniu na ciepłą wodę: budownictwo mieszkaniowe jednorodzinne, gospodarstwa rolne i niektóre zakłady rolno-spożywcze [Chochowski i Wójcicka-Migasiuk 1998, Gogół 1993, Janowski i in. 1997, Pabis 1991, Szpryngiel 1996, Tymiński 1997].

Instalacja kolektorów słonecznych, oprócz przygotowywania ciepłej wody użytkowej, może być także wykorzystywana do wspomagania centralnego ogrzewania i podgrzewania wody basenowej. Jeżeli chodzi o wspomaganie centralnego ogrzewania, udział energii wytworzonej prze instalację słoneczną będzie niewielki rzędu 10 do 15 %. W okresie grzewczym, wtedy gdy potrzebujemy najwięcej energii cieplnej do ogrzania budynku, energii promieniowania słonecznego jest najmniej (występuje mijanie się zapotrzebowania z chwilową dostępnością energii słonecznej). Ponieważ w okresie letnim występują duże nadwyżki energii cieplnej wytworzonej przez kolektory, można je efektywnie zagospodarować do podgrzewania wody w basenie.

2.2. Kierunki badań nad wykorzystaniem energii słonecznej

Ważnym kierunkiem badań nad wykorzystaniem energii słonecznej jest badanie ilości promieniowania słonecznego, które dociera do powierzchni terenu i do urządzeń przetwarzających tę energię na formę użyteczną, np. prąd, ciepło itp.

W Polsce pomiary i badania dopływu promieniowania słonecznego do powierzchni Ziemi prowadzone są na stacjach aktynometrycznych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Głównym zadaniem sieci aktynometrycznej jest dostarczenie informacji o rozkładzie

czasowym i przestrzennym oraz jakości i ilości dopływającej do danej powierzchni energii słonecznej, jej przemianach i stratach poniesionych w wyniku oddawania ciepła [Grzybowska 1988].

W oparciu o dostępne dane pogodowe i ilości napromienienia słonecznego określonego dla płaszczyzny poziomej zostały przedstawione w pracach [Bzowska 1996, Bzowska i Kossecka 1992, 1993, Owczarek 1997, Panek i in. 1987–1990] stochastyczne modele klimatu i napromienienia terenu Polski.

Bazując na danych wieloletnich, Chochowski i in. [1997, 1998] opracowali deterministyczny model napromienienia powierzchni pochyłej. Przeprowadzili oni w regionie warszawskim badania natężenia napromienienia na powierzchnię, która była optymalnie skierowana do padających promieni słonecznych, tak aby określić maksymalną możliwą do pozyskania ilość energii promieniowania bezpośredniego. Przeprowadzili oni także badania zasobów energii słonecznej dla regionu warszawskiego [Chochowski i Czekalski 1996].

Na podstawie fundamentalnej teorii w dziedzinie wykorzystania energii promieniowania słonecznego, przedstawionej przez Beckmana i Duffiego [1991], możemy policzyć, ile z docierającej do ziemi energii można przejąć i w sposób użyteczny wykorzystać.

Modele Beckmana i Duffiego [1991] posłużyły do dalszego rozwoju prowadzonych badań w pracach naukowych [Anderson i Wells 1994, Antonopoulos i Vrachopoulos 1996, Harland 1994, Howel i in. 1982, Morgan 1996, Nijegodorov i in. 1996], publikacjach w czasopiśmie Solar Energy [Castro i in. 1996, Coiante i Barra 1996, Hollands i in. 1995, Milburn i Hollands 1995, Norton i in. 1988, Omer i in. 1993, Ong 1995] oraz materiałach konferencyjnych [Carpenter i in. 1986, Carvalho i Costa 1992, Druck i Hahne 1996, Fisch i in. 1996, Folkerts i in. 1996, Furbo i Shah 1996, Kemal Dagsoz i Yuksel Huseyin 1996, Visser i Ree 1996, Wittwer i in. 1996].

Oprócz badań nad ilością promieniowania słonecznego, które dociera do powierzchni terenu i do urządzeń przetwarzających tę energię, prowadzone są także badania analityczno-numeryczne modeli symulacyjnych, wykorzystania instalacji słonecznych.

Na początku lat osiemdziesiątych powstały pierwsze prace [Howell i in. 1982, Paassen 1981], w których modelowano procesy wymiany ciepła pomiędzy budynkiem a otoczeniem.

Norton określił czas ustalania się odpowiedzi kolektora i stałe czasowe z uwzględnieniem podziału procesu wymiany ciepła na nagrzewanie medium transportującego energię cieplną i na odbieranie ciepła od absorbera [Norton i in. 1988]. Wykorzystał on metodę f-chart z zastosowaniem analizy stanów nieustalonych do modelowania i analizy pracy kolektorów słonecznych. Pracę, która także opierała się na metodzie f-chart, przedstawił Khatib, prezentując analizę eksperymentalnych wyników badań przy wykorzystaniu symulatora promieniowania słonecznego [1989].

Hollands w swojej pracy przedstawił sposób modelowania empirycznego pracy całej instalacji [Hollands i in. 1995]. Natomiast Howells zaprezentował analizę symulacyjną instalacji, poświęcając najwięcej uwagi numerycznemu rozwiązaniu tego zagadnienia [1984].

Wykorzystując analogię termoelektryczną, Ong w swojej pracy przedstawił przepływ ciepła w kolektorach przy zastosowaniu sieci cieplnej [1995]. Badania te zostały przeprowadzone tylko dla kolektorów powietrznych.

Wśród polskich publikacji również pojawiły się prace związane z zastosowaniem modeli symulacyjnych [Pluta 1987, Pluta i Wnuk 1997]. Opublikowano dużo prac związanych z projektowaniem poszczególnych elementów oraz całych instalacji [Chybowski 1973,

Gołębiowski i Wiśniewski 1990, Januszewski 1986, Kierlańczyk i Kotte 1996, Owczarek 1998, PN – 91/B02020, Wasilewski 1998, Wiśniewski 1992, Wnuk 1994].

Zagadnieniem związanym z projektowaniem i przeanalizowaniem pracy, jednego z elementów instalacji słonecznej – kolektorów słonecznych, zajmowali się w swoich pracach Januszewski [1986], Owczarek [1998], Wiśniewski [1992] i Wnuk [1994]. Zostały przez tych autorów zaprezentowane zasady, którymi trzeba się kierować przy doborze kolektorów słonecznych. Januszewski, opierając się na metodzie f-chart, przedstawił także zasady kompleksowego projektowania instalacji słonecznych [Januszewski 1986].

Zagadnienia związane z magazynowaniem ciepła zostały opisane w pracach Domańskiego [Domański 1990], Pluty [Pluta i Wnuk 1997] i Hoblera [1979]. Natomiast analiza wymiany ciepła została przedstawiona przez Staniszewskiego [1979] i Wiśniewskiego [Wiśniewski S. i Wiśniewski T.S. 1994].

Chochowski w swojej publikacji [1991] zaprezentował dokładnie metodę tzw. sieci cieplnej oraz w pracy [Chochowski i in. 1996] przedstawił porównawczą analizę metod sterowania obiegiem wody w instalacjach ciepłej wody użytkowej.

Podczas projektowania instalacji słonecznych, które są wykorzystywane do podgrzewania wody użytkowej i przy analizowaniu jej pracy, można oprzeć się na ogólnie przyjętych zasadach, które zaprezentował w swojej pracy Mańkowski [1981], oraz normach i innych wytycznych zawartych w [Chybowski 1973, PN – 91/B02020, Recknagel–Sprenger 1994].

Badania analityczno-numeryczne modeli symulacyjnych, wykorzystania instalacji słonecznych, są tylko pewnym przybliżeniem efektów, jakie możemy otrzymać dla modelowanego układu pracującej instalacji słonecznej. Jednak najbardziej wiarygodne wyniki spodziewanych efektów pracy eksploatowanych i nowo projektowanych instalacji słonecznych może dać tylko analiza eksperymentalna na odpowiednio przygotowanym stanowisku badawczym w całym okresie wykorzystywania instalacji słonecznej i przy powtórzeniu wyników w rozpatrywanym cyklu badań.

Prowadzone dotychczas prace na ten temat są fragmentaryczne, krótkoterminowe i obejmują inne obszary zagadnień oraz inne urządzenia badane w innych warunkach terenowych. Dotychczas nie było polskich publikacji poświęconych całościowemu rocznemu badaniu przebiegu pracy typowej instalacji słonecznej działającej w warunkach zbliżonych do rzeczywistych (dom jednorodzinny na wsi z trzyosobową rodziną).

3. CEL BADAŃ

Można podzielić na główny i szczegółowy. Celem głównym badań jest określenie możliwości wykorzystania kolektorów słonecznych do podgrzewania wody użytkowej w budynkach mieszkalnych, w skali roku, przy występujących lokalnych warunkach pogodowych. Cele szczegółowe podjętych badań są następujące:

- analiza możliwości wykorzystania instalacji słonecznych w budynkach mieszkalnych dla Wrocławia i okolic, w aspekcie efektywności pozyskiwania energii cieplnej;
- analiza wpływu warunków meteorologicznych na pozyskiwanie energii cieplnej przez kolektory słoneczne;
- analiza wpływu kąta nachylenia połaci i położenia budynku na efektywność pozyskiwania energii cieplnej przez kolektory słoneczne;
- stworzenie modelu matematycznego do określenia maksymalnej ilość wody, którą możemy podgrzać, wykorzystując tylko energię pochodzącą z kolektorów słonecznych;
- stworzenie modelu matematycznego do prognozowania ilości pozyskania energii cieplnej przez kolektory słoneczne dla poszczególnych miesięcy roku;
- analiza ekonomiczna opłacalności zastosowania instalacji słonecznych.

Wymienione szczegółowe cele badań kompleksowo obejmują tematykę związaną z możliwościami pozyskiwania energii słonecznej przez instalacje słoneczne.

4. OBIEKT BADAWCZY

W 2001 r. została podjęta współpraca naukowo-badawcza z Firmą Viessmann w celu przeprowadzenia badań naukowych o znaczeniu utylitarnym. Budynek, który wybrano do zamontowania instalacji kolektorów słonecznych, spełniał wszystkie wymagania projektowo-montażowe do całorocznego optymalnego pozyskiwania energii promieniowania słonecznego. Niewielka odległość od Obserwatorium Agrometeorologii i Hydrometeorologii UP też miała wpływ na lokalizację stanowiska badawczego.

4.1. Metodyka i zakres badań

Badania instalacji słonecznej prowadzone są w Kamieńcu Wrocławskim od 31 października 2001 r. Stanowisko badawcze wykonane zostało w oparciu o systemowe rozwiązania firmy Viessmann – Vitosol 100, lidera w nowoczesnej technice grzewczej. Urządzeniami, które odbierają energię słoneczną, są dwa cieczowe płytowe kolektory słoneczne o całkowitej powierzchni absorbera 5 m^2. W dwusystemowym podgrzewaczu ciepłej wody użytkowej magazynowana jest energia cieplna pozyskana z kolektorów słonecznych. W przypadku niedoboru energii cieplnej potrzebnej do zapewnienia odpowiedniej temperatury wodzie włącza się kocioł jednofunkcyjny uzupełniający ten niedobór. Do podgrzania wody wykorzystywana jest zarówno energia niekonwencjonalna – promieniowanie słoneczne, jak i energia konwencjonalna – gaz ciekły propan. Dla przedstawionej instalacji można wyróżnić dwa układy, które dostarczają energię cieplną. Pierwszy układ: kolektory – podgrzewacz i drugi układ: kocioł – podgrzewacz. Zarówno na pierwszym, jak i drugim układzie zainstalowane zostały ciepłomierze, których zadaniem jest pomiar ilości energii cieplnej pozyskanej przez kolektory słoneczne i uzupełnionej przez kocioł. Na instalacji doprowadzającej zimną wodę do podgrzewacza zainstalowany został wodomierz, którym mierzony jest rozbiór wody z podgrzewacza. Odczyty pomiarów z ciepłomierzy i wodomierza na stanowisku badawczym przeprowadzane były każdego dnia o godzinie $22^{\underline{00}}$, po całodziennym rozbiorze ciepłej wody.

Na podstawie uzyskanych wyników z wyżej wymienionej aparatury pomiarowej określona została możliwość zastosowania, efektywność i opłacalność wykorzystania instalacji słonecznych w budownictwie mieszkaniowym dla Wrocławia i okolic. Otrzymane wyniki badań porównano z wynikami otrzymanymi przy wykorzystaniu programu „ESOP", który służy do modelowania pracy instalacji słonecznych.

Opracowano również model matematyczny, wykorzystując dokonane już pomiary, prognozowania maksymalnej ilości wody, którą mogłyby podgrzać kolektory słoneczne w okre-

sie maja, czerwca, lipca i sierpnia. Na podstawie dziennych dawek promieniowania całkowitego, przy wykorzystaniu modelu matematycznego, będzie można wyliczyć dla tych czterech miesięcy możliwą maksymalną do uzyskania ilość ciepłej wody użytkowej. W tych ciepłych miesiącach występują dość duże nadwyżki energii cieplnej, którą mogłyby przejąć kolektory słoneczne i wykorzystać do podgrzania większej ilości wody użytkowej.

Wyniki uzyskane z Obserwatorium Agrometeorologii i Hydrometeorologii UP, znajdującego się na Swojcu we Wrocławiu, wykorzystane zostały do przeprowadzenia, analizy porównawczej wpływu: usłonecznienia, promieniowania całkowitego oraz temperatury na pozyskiwanie energii cieplnej przez kolektory słoneczne. Obserwatorium położone jest w peryferyjnej, rolniczej części miasta poza obszarem tzw. miejskiej wyspy ciepła. Usytuowane jest w odległości około 4200 m (w linii prostej) w kierunku NW od stanowiska badawczego (fot. 1).

Fot. 1. Usytuowanie względem siebie stanowiska badawczego (1) i Obserwatorium Agrometeorologii i Hydrometeorologii UP (2). © Copyright by Geosystems Polska – zdjęcia wykonane kamerą cyfrową ADS-40 w 2005 r.

Dokładne położenie geograficzne stanowiska badawczego to 17º 10' 17'' długości geograficznej wschodniej i 51º 05' 02'' szerokości geograficznej północnej. Położenie geograficzne Obserwatorium to 17º 08' 27'' długości geograficznej wschodniej i 51º 06' 58'' szerokości geograficznej północnej. Ze względu na stosunkowo niewielką odległość stanowiska

badawczego od Obserwatorium oraz ich podobne warunki lokalizacyjne (strefa podmiejska o niskiej, luźnej zabudowie, z dominacją użytków rolnych i zieleni) przyjęto, że na stanowisku badawczym panują zbliżone warunki meteorologiczne w stosunku do zarejestrowanych w Obserwatorium.

Wykorzystując dane meteorologiczne uzyskane z Obserwatorium na Swojcu i pomiary otrzymane na stanowisku badawczym, został opracowany model matematyczny możliwości pozyskania energii cieplnej przez kolektory słoneczne w poszczególnych miesięcach w zależności od dawek dziennych promieniowania całkowitego. Na podstawie dziennych dawek promieniowania całkowitego, przy wykorzystaniu modelu matematycznego, będzie można prognozować w poszczególnych miesięcach możliwą do pozyskania ilość energii cieplnej, którą kolektory słoneczne mogłyby przechwycić i wykorzystać do podgrzania wody użytkowej.

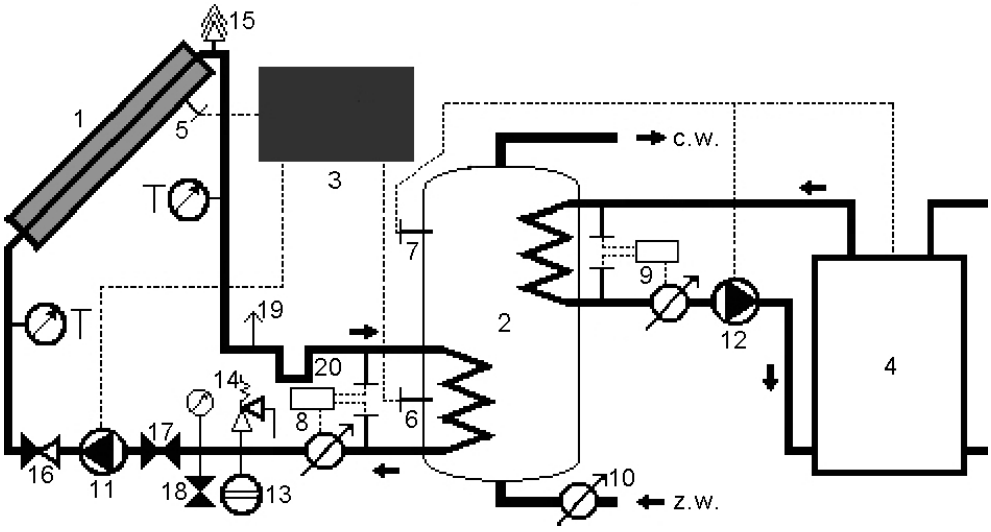
Ponadto, przy wykorzystaniu programu „ESOP" przeprowadzono symulacje pracy układu dla kilku wariantów użytkowych. Decydujący wpływ na pozyskiwanie energii cieplnej przez instalację słoneczną ma zorientowanie powierzchni absorbującej kolektorów względem źródła energii. Na podstawie obliczeń symulacyjnych przy zmiennym kącie nachylenia kolektorów względem powierzchni poziomej i skierowania ich względem kierunku południowego określony został wpływ kąta nachylenia połaci i położenia budynku na efektywność pozyskiwania energii cieplnej przez kolektory słoneczne.

Dodatkowo, w czasie wykonywanych badań wyznaczono kilka dni, podczas których prowadzono kilkunastogodzinne pomiary (od godz. $7^{\underline{00}}$ do $23^{\underline{00}}$) przyrządów badawczych (ciepłomierzy, wodomierza, czujników temperatury w kolektorze, w podgrzewaczu ciepłej wody użytkowej oraz temperatury powietrza otoczenia). Odczyty z aparatury pomiarowej wykonywane były co godzinę w celu zbadania charakteru pracy układu, w zależności od warunków meteorologicznych, w różnych dniach w ciągu roku. Do badań wybrane zostały dni pogodne reprezentatywne dla poszczególnych okresów roku.

Ważnym elementem, który należy dokładnie opisać, jest zasada działania instalacji, jej ustawienia eksploatacyjne i charakterystyka pracy. Dokładny opis tych elementów pomocny będzie przy ewentualnym porównaniu instalacji badanej z instalacjami słonecznymi już eksploatowanymi.

Na rysunku 3 przedstawiony został ogólny schemat stanowiska badawczego. Zasada działania tego układu polega na tym, że jeśli pomiędzy czujnikiem temperatury czynnika w kolektorze (5) i dolnym czujnikiem temperatury w podgrzewaczu (6) zmierzona zostanie różnica temperatur, która jest wyższa niż wartość ustawiona w elektronicznym regulatorze różnicowym temperatury (3), włączana jest pompa obiegu kolektory – podgrzewacz (11) i energia cieplna zostaje przekazana do podgrzewacza pojemnościowego (2). Pompa obiegu kolektory – podgrzewacz (11) pracuje aż do momentu, gdy wartość różnicy temperatur pomiędzy czujnikiem (5) i (6) zmniejszy się poniżej wartości ustawionej w elektronicznym regulatorze różnicowym temperatury (3), lub gdy wartość temperatury w podgrzewaczu zmierzona czujnikiem (6) przekroczy dopuszczalną temperaturę ustawioną w elektronicznym regulatorze różnicowym temperatury (3). W okresie od 1 października do 30 kwietnia temperatura różnicowa ustawiona została na 12ºC, a histereza na 20%. Przy takim ustawieniu w tym okresie włączenie pompy obiegowej nastąpi, gdy elektroniczny regulator zmierzy temperaturę różnicową pomiędzy czujnikiem temperatury czynnika w kolektorze a czujnikiem temperatury w podgrzewaczu większą niż 12ºC. Wyłączenie pompy nastąpi natomiast, gdy temperatura różnicowa spadnie poniżej 9,6ºC, lub gdy temperatura wody zmierzona

czujnikiem w dolnej części podgrzewacza przekroczy 50ºC. W pozostałej części roku, czyli od 1 maja do 30 września, temperatura różnicowa ustawiona została na 16ºC, natomiast histereza na 25%. W tym przypadku włączenie pompy obiegowej nastąpi po zmierzeniu temperatury różnicowej większej niż 16ºC, natomiast pompa zostanie wyłączona, gdy temperatura różnicowa spadnie poniżej 12ºC lub, gdy temperatura wody zmierzona czujnikiem w dolnej części podgrzewacza przekroczy 40ºC.



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego: 1 – kolektory, 2 – dwusystemowy podgrzewacz c.w.u., 3 – elektroniczny regulator różnicowy temperatury, 4 – kocioł, 5 – czujnik temp. czynnika w kolektorze, 6 – czujnik temp. w dolnej części podgrzewacza, 7 – czujnik temp. w górnej części podgrzewacza, 8 – ciepłomierz, 9 – ciepłomierz, 10 – wodomierz, 11 – pompa, 12 – pompa, 13 – naczynie wzbiorcze, 14 – zawór bezpieczeństwa, 15 – odpowietrznik, 16 – zawór zwrotny, 17 – zawór zamykający, 18 – armatura do napełniania instalacji, 19 – separator powietrza, 20 – pętla termoizolacyjna

Podczas okresu, w którym temperatura wody zmierzona czujnikiem, w górnej części podgrzewacza (7), jest niższa od ustawionej na module obsługowym kotła (4), następuje uzupełnienie niedoboru energii cieplnej w podgrzewaczu (2) za pomocą kotła jednofunkcyjnego (4) aż do momentu osiągnięcia zaprogramowanej maksymalnej temperatury, zmierzonej przez czujnik (7). Temperatura ciepłej wody podgrzanej przez kocioł w przypadku, gdy energia nie jest pozyskiwana przez kolektory, zawarta jest w przedziale od 41 do 46ºC. W ciągu każdej doby jest okres, kiedy nie ma zapotrzebowania na ciepłą wodę użytkową dla mieszkańców budynku. Są to przeważnie godziny późnego wieczoru, nocne i wcześnie rano. Dla tych okresów występujących w ciągu doby nie ma potrzeby uzupełniania ewentualnego niedoboru energii cieplnej przez kocioł, co wiązałoby się z niepotrzebnym zużyciem energii konwencjonalnej. Dopływ energii cieplnej z kotła następuje tylko w ustalonych przedziałach czasowych zaprogramowanych w module obsługowym, sterującym pracą kotła. Okres dostarczania ciepłej wody dla mieszkańców domu został zaprogramowany w taki sposób, aby w momencie porannego poboru wody jak i przez cały dzień ciepła woda użytkowa była dostępna i miała żądane parametry użytkowe. W ciągu tygodnia od poniedziałku do piątku, gdy wystąpi niedobór energii cieplnej w godzinach od $7^{\underline{00}}$ do $22^{\underline{00}}$, kocioł ją uzupełnia.

Natomiast dla soboty i niedzieli przedział godzinowy, w którym kocioł uzupełnia ewentualne braki energii cieplnej, zawarty jest w przedziale od godziny $9^{\underline{00}}$ do $22^{\underline{00}}$.

Wykorzystane modele oraz metody:

Oba zagadnienia, które będą opisywane w dalszej części pracy, wymagają wyboru pewnego modelu opisującego rzeczywistość, następnie – estymacji parametrów do danego modelu. Końcowym etapem jest wybór najlepszego modelu.

Modele, które pojawiają się w pracy, to:

Model liniowy z jedną zmienną:

$$Z = a\,X + b \tag{1}$$

Odzwierciedla prostą zależność pomiędzy dwoma parametrami.

Model liniowy z dwiema zmiennymi:

$$Z = a\,X\,Y + b \tag{2}$$

Odzwierciedla zależność pomiędzy iloczynem dwóch zmiennych a trzecią zmienną. Każda ze zmiennych wejściowych wpływa addytywnie na wynik.

Model liniowy z dwiema zmiennymi ze średnią równą zero:

$$Z = a\,X\,Y \tag{3}$$

Odzwierciedla zależność pomiędzy iloczynem dwóch zmiennych a trzecią zmienną. Każda ze zmiennych wejściowych wpływa addytywnie na wynik. Z modelu został usunięty czynnik (b) ze względy na wymóg – jeżeli zmienne predykcyjne $X = 0$ lub $Y = 0$, to zmienna przewidywana (Z) powinna być równa 0.

Model kwadratowy:

$$Z = a\,X\text{^}2 + b\,X + c \tag{4}$$

Odzwierciedla zależność pomiędzy dwoma parametrami, dającą zamodelować się funkcją kwadratową.

Po wybraniu współczynników kolejnym krokiem jest estymacja współczynników.

Do tego etapu użyto metody Kalmana ze względu na to, że posiadane dane są silnie skorelowane (informacja o ilości podgrzanej wody i wydajności kolektorów zależy silnie od poborów wody). Metoda Kalmana to metoda regresji, która zostanie zastosowana do wybranego modelu (z modeli przedstawionych powyżej). Jeżeli model zapiszemy macierzowo jako:

$$Y = \beta X + \varepsilon \tag{5}$$

gdzie:

X – mierzona zmienna na podstawie której będziemy wykonywać predykcję,

β – to wektor parametrów modelu,
ε – to szum (w naszym przypadku skorelowany).
Wartości zmiennej *Y* wyznaczyć można z zależności:

$$\hat{Y} = \beta X \tag{6}$$

Współczynniki β otrzymujemy, minimalizując błąd:

$$S_X(\beta) = \sum_{i=1...n} (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum_{i=1..n} \hat{v}_i^2 \tag{7}$$

W przypadku modeli liniowych optymalnym estymatorem wartości β jest:

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \tag{8}$$

Końcowym krokiem analizy jest weryfikacja, który model okazał się najlepszy.

Na tym etapie można posłużyć się dwoma kryteriami, porównując szum pozostały po dopasowaniu modelu oraz prognozy. Szum pozostały po dopasowaniu modelu to różnica pomiędzy rzeczywistymi parametrami obiektów poddanych analizie a przewidzianymi, modelem wartościami. Jest to suma kwadratów odległości pomiędzy krzywą regresji a punktem opisującym dany obiekt:

$$S^2 = \sum_{i=1...n} (z_i - \hat{z}_i)^2 \tag{9}$$

gdzie:
z – obserwowana wartość,
$\hat{z}$ – wartość wyznaczona z modelu.

Im mniejszy szum , tym model lepiej dobrany. Drugim kryterium jest porównanie jakości predykcji. Mając określony model, można wyznaczać dla obiektów nie biorących udziału w analizie pewne ich cechy, a następnie porównywać te wyestymowane cechy z rzeczywistymi wartościami danych obiektów. Różnica to błąd, który również należy minimalizować.

$$M = \frac{|z_i - \hat{z}_i|}{z_i} \cdot 100\% \tag{10}$$

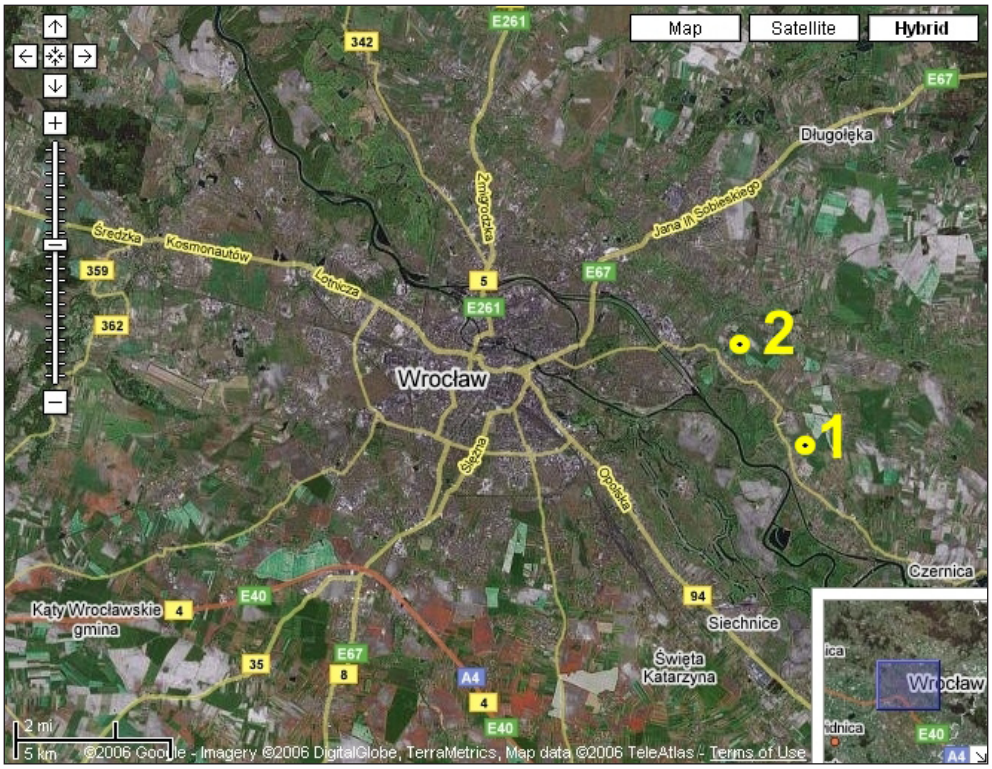
Wykresy i obliczenia dla modeli matematycznych, przedstawione w pracy, zostały wykonane za pomocą programu komputerowego MATLAB V 6.5, STATISTICA 99 i EXCEL 2003.

4.2. Lokalizacja i charakterystyka obiektu badawczego

Badania zlokalizowano w miejscowości Kamieniec Wrocławski. Miejscowość ta położona jest w gminie Czernica, w województwie dolnośląskim. Liczba mieszkańców tej podwrocławskiej wsi wynosi około 1800 osób. Kamieniec Wrocławski pełni funkcję „sypialni"

Wrocławia ze względu na swe położenie bliskie aglomeracji wrocławskiej. W miejscowości tej przeważa zabudowa mieszkaniowa jednorodzinna.

Stanowisko badawcze wykonano w budynku jednorodzinnym wolno stojącym. Odległość stanowiska badawczego od granic Wrocławia wynosi niecałe dwa kilometry. Dokładne położenie geograficzne stanowiska badawczego to 17°10^{I} 17^{II} E 51°05^{I} 02^{II} N.



Fot. 2. Położenie stanowiska badawczego (1) i Obserwatorium UP we Wrocławiu (2).
© Copyright by Google Polska

Dom jednorodzinny, w którym zainstalowano stanowisko badawcze, wybudowano w 1995 r. Źródło energii wykorzystywane do ogrzewania domu i podgrzewania wody użytkowej to gaz ciekły propan zmagazynowany w butli naziemnej o V = 2700 l znajdującej się na terenie działki. Przed wykonaniem instalacji słonecznej w budynku do podgrzewania ciepłej wody użytkowej wykorzystywany był kocioł dwufunkcyjny gazowy, GCO – DP – 23 – 07 widoczny na fotografii 3.

Fot. 3. Widok kotła w kotłowni przed modernizacją

W 2001 r. kotłownia została gruntownie zmodernizowana i wyposażona w instalację słoneczną firmy Viessmann wspomagającą podgrzewanie wody użytkowej. Stary dwufunkcyjny kocioł gazowy zastąpiony został nowoczesnym kotłem jednofunkcyjnym firmy Viessmann.

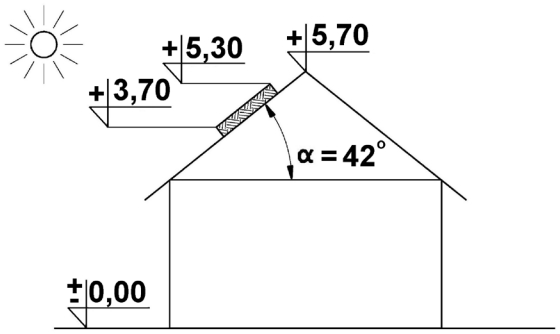
Na fotografiach 4 i 5 pokazano, jaki wpływ miało zainstalowanie kolektorów słonecznych na wygląd elewacji budynku. Połać południowa dachu została w połowie powierzchni zagospodarowana poprzez zamontowanie dwóch kolektorów. W przyszłości istnieje możliwość rozbudowy instalacji o jeden dodatkowy kolektor, który można by zainstalować na wolnej połowie powierzchni południowej połaci dachu. Jak widać wprowadzona zmiana nie wpływa negatywnie na wygląd elewacji. Kolektory słoneczne łagodnie wkomponowują się w wygląd elewacji, nadając nawet pewne ożywienie monotonnej płaskiej powierzchni dachu.

Fot. 4. Widok budynku przed zainstalowaniem kolektorów

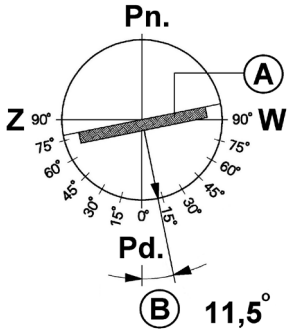
Fot. 5. Widok budynku po zainstalowaniu kolektorów

Instalacja badawcza zbudowana została z kompletnego typowego systemu solarnego Vitosol 100 i kotła gazowego Vitopend 100 firmy Viessmann. Dwa kolektory cieczowe, płytowe zainstalowano na południowej połaci dachu budynku, nachylonej pod kątem 42º do powierzchni terenu (rys. 4). Azymut kolektorów względem południa wynosi 11,5º skierowania

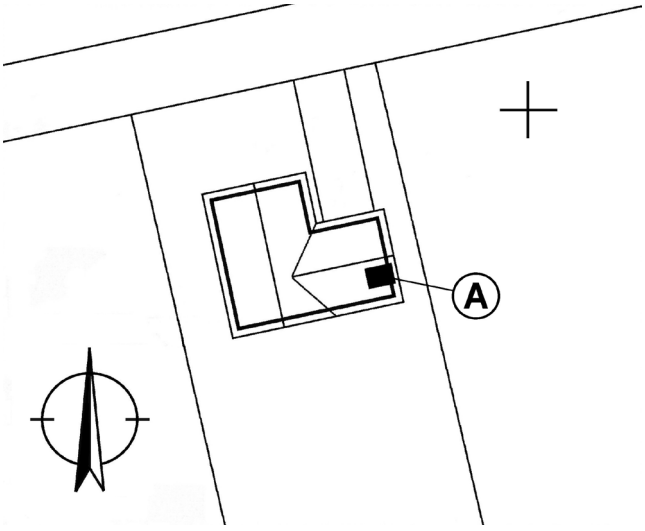
w kierunku wschodnim (rys. 5). Na podstawie literatury [Kaiser 1995] jest to optymalne położenie kolektorów do pozyskiwania energii w cyklu dwunastomiesięcznym.



Rys. 4. Kąt nachylenia i położenie kolektorów względem powierzchni terenu

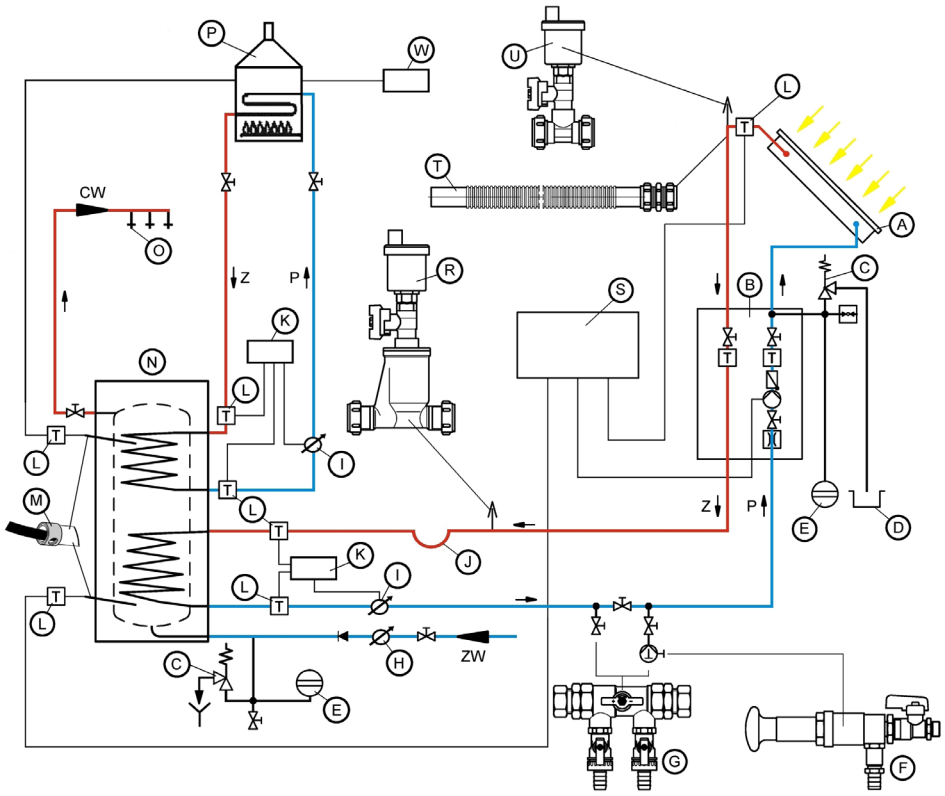


Rys. 5. Azymut kolektorów względem południa. A – powierzchnia kolektorów, B – kąt azymutu



Rys. 6. Lokalizacja zainstalowanych kolektorów na połaci dachowej (widok z góry).
A – powierzchnia kolektorów

Schemat stanowiska badawczego został pokazany na rysunku poniżej:



Ⓐ Kolektory słoneczne 2 x 2,5 m² VITOSOL-100
Ⓑ Zestaw pompowy SOLAR-DIVICON
Ⓒ Zawór bezpieczeństwa
Ⓓ Zbiornik na czynnik roboczy
Ⓔ Naczynie wzbiorcze
Ⓕ Pompa ręczna do napełniania układu solarnego
Ⓖ Armatura do napełniania
Ⓗ Wodomierz
Ⓘ Przepływomierz
Ⓙ Pętla termoizolacyjna
Ⓚ Licznik ciepła
Ⓛ Czujnik temperatury
Ⓜ Tuleja zanurzeniowa
Ⓝ Dwuwężownicowy pojemnościowy podgrzewacz wody VITOCELL-100
Ⓞ Punkty czerpalne
Ⓟ Kocioł jednofunkcyjny VITOPEND-100
Ⓡ Separator powietrza
Ⓢ Automatyka SOLARTROL-E
Ⓣ Elastyczny przewód przyłączeniowy
Ⓤ Odpowietrznik
Ⓦ Moduł obsługowy kotła
Z Zasilanie
P Powrót
CW Ciepła woda
ZW Zimna woda

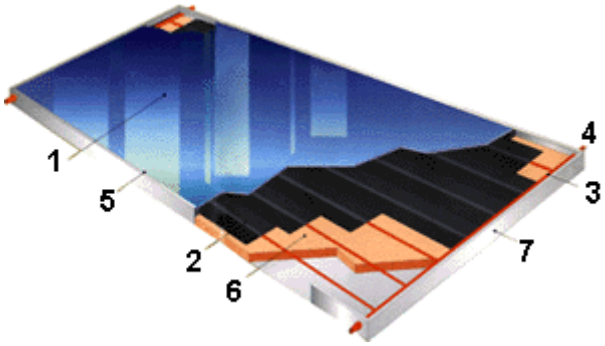
Rys. 7. Schemat stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze (instalacja pozyskująca energię promieniowania słonecznego do podgrzewania wody użytkowej – Vitosol 100 i kocioł Vitopend 100 wraz z oprzyrządowaniem) składa się z następujących elementów:

A – dwa cieczowe kolektory słoneczne Vitosol 100 o powierzchni całkowitej 5 m².

Dwa kolektory Vitosol 100, widoczne na fotografiach 6 i 7, są podstawowymi elementami instalacji słonecznej. Ich zadaniem jest przechwycenie energii promieniowania słonecznego i w postaci energii cieplnej przekazanie do podgrzewacza. Główny element kolektora

Vitosol 100 stanowi płyta miedziana z powłoką absorpcyjną Sol – Titan. Wysoce selektywna powłoka zapewnia maksymalne pochłanianie promieniowania słonecznego przy jednoczesnej minimalnej emisji promieniowania cieplnego. Do płyty absorbera przymocowana jest od spodu wężownica wykonana z rurki miedzianej, przez którą przepływa czynnik grzewczy. W ten sposób odbierane jest ciepło wytwarzane na płycie absorbera.



Rys. 8. Kolektor cieczowy płaski: 1 – pokrywa przezroczysta, 2 – płyta absorbera, 3 – wężownica, 4 – wyjścia boczne, 5 – profil uszczelniający, 6 – ocieplenie, 7 – rama profilowa

Tabela 1

Dane techniczne kolektora słonecznego Vitosol 100

Wyszczególnienie	Jednostka	Wartość
Typ	–	s 2,5
Powierzchnia absorbera	m^2	2,53
Powierzchnia czynna absorbera	m^2	2,50
Wymiary (szer. · wys. · gł.)	mm	1138 · 2385 · 102
Sprawność optyczna	%	83
Współczynnik straty ciepła k_1	$W\cdot(m^2\cdot K)^{-1}$	3,68
Współczynnik straty ciepła k_2	$W\cdot(m^2\cdot K)^{-1}$	0,011
Ciężar	kg	60
Zawartość płynu (nośnik ciepła)	litry	2,2
Dopuszczalne nadciśnienie robocze	bar	6
Maksymalna temperatura postojowa	°C	211

Płyta absorbera otoczona jest z boków i od spodu skuteczną izolacją cieplną wykonaną z wełny mineralnej. Dzięki temu straty ciepła kolektora są zmniejszane do minimum. Izolacja cieplna jest odporna na wysokie temperatury robocze kolektora. Kolektor przykryty jest szybą ze specjalnego szkła solarnego, grubości 4 mm, o zmniejszonej zawartości tlenków żelaza. Pozwala to na zminimalizowanie odbić promieni słonecznych docierających do kolektora. Obudowa kolektora wykonana jest z ramy aluminiowej. Przykrycie kolektora ze szkła solarnego jest osadzone w ramie za pomocą profilu gumowego w całości wulkanizowanego.

Fot. 6. Widok kolektorów zainstalowanych na południowej połaci dachowej budynku

Fot. 7. Dwa kolektory płaskie cieczowe Vitosol 100

N – dwusystemowy podgrzewacz ciepłej wody użytkowej Vitocell 100, typ CVB.

Dwusystemowy podgrzewacz Vitocell 100 (fot. 8), o pojemności 300 l, wykonany jest ze stali zabezpieczonej przed korozją powłoką emaliowaną ceraprotect. Ochronę zbiornika przed oddawaniem energii cieplnej do otoczenia tworzy skuteczna warstwa izolacyjna wykonana z pianki poliuretanowej.

Energia cieplna, pozyskana przez kolektory słoneczne, przekazywana jest do podgrzewacza ciepłej wody użytkowej poprzez dolną wężownicę o pojemności 10 l i powierzchni grzejnej wynoszącej 1,5 m^2. Niedobór energii cieplnej, uzupełniany przez kocioł, przekazywany jest do podgrzewacza poprzez górną wężownicę o pojemności 6 l i powierzchni grzejnej 0,9 m^2.

Fot. 8. Pojemnościowy podgrzewacz wody użytkowej Vitocell 100

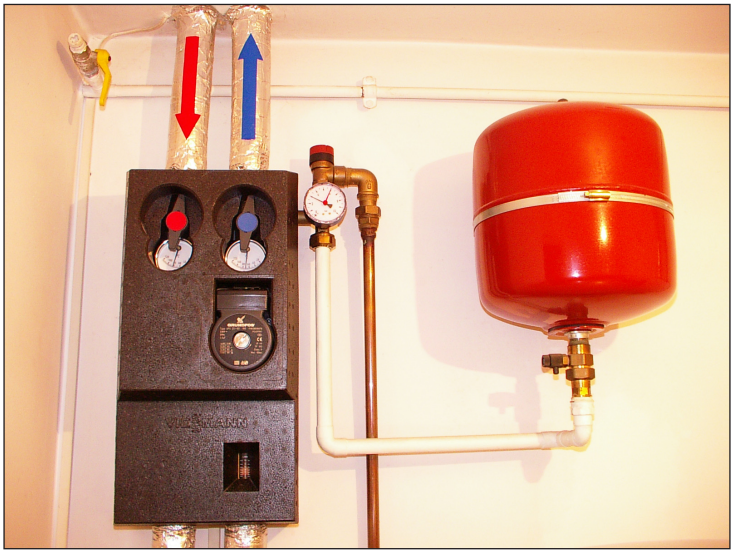
S – elektroniczny regulator różnicowy temperatury.

Pracą układu kolektory – podgrzewacz steruje elektroniczny regulator (fot. 9). Regulator odbiera sygnały przekazywane z dwóch czujników temperatury. Pierwszy czujnik przekazuje dane o temperaturze w górnej części zasilającej kolektora; natomiast drugi – wartość temperatury zmierzonej w dolnej części podgrzewacza. W zależności od ustawień parametrów w regulatorze włącza on i wyłącza pompę, która wymusza obieg czynnika transportującego energię cieplną w układzie kolektory – podgrzewacz.

Fot. 9. Elektroniczny regulator różnicowy temperatury

B – rozdzielacz Solar – divicon z pompą obiegową.

Na fotografii 10 pokazany został zespół pompowy, którego zadaniem jest wprowadzenie w ruch czynnika transportującego energię cieplną, zabezpieczenie instalacji przed nagłym wzrostem ciśnienia i zapewnienie odpowiedniej szybkości przepływu czynnika.



Fot. 10. Rozdzielacz Solar – divicon z pompą obiegową

Zestaw pompowy składa się z następujących elementów:

- pompy obiegowej,
- zaworu regulującego szybkość przepływu czynnika,
- przepływomierza,
- przeponowego naczynia wzbiorczego,
- manometru,
- dwóch termometrów.

P – kocioł jednofunkcyjny Vitopend 100.

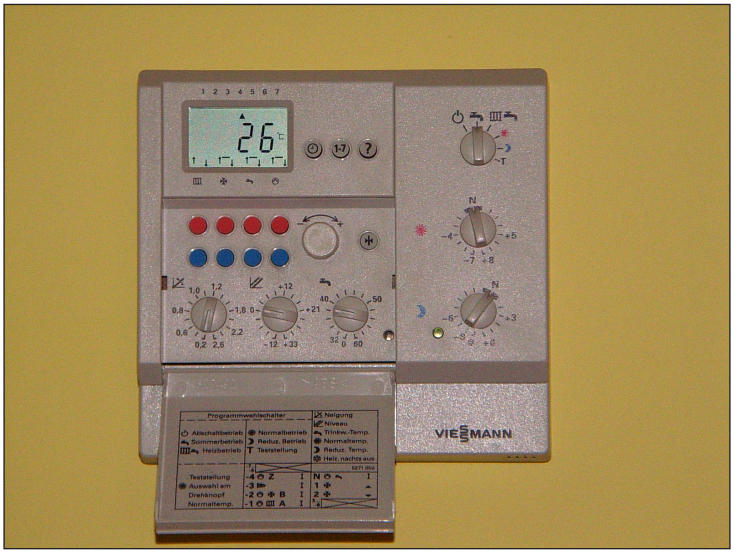
W przypadku gdy dopływ energii cieplnej dostarczanej z kolektorów słonecznych jest niewystarczający do zapewnienia odpowiedniej żądanej temperatury ciepłej wody użytkowej, w podgrzewaczu włącza się kocioł, który zapewnia osiągnięcie żądanej temperatury przez wodę. Ten niedobór energii cieplnej uzupełnia kocioł jednofunkcyjny, gazowy Vitopend 100 widoczny na fotografii 11.

Fot. 11. Kocioł jednofunkcyjny Vitopend 100

Kocioł do uzyskania energii cieplnej wykorzystuje nośnik energii konwencjonalnej, którym jest gaz płynny propan. Sprawność znormalizowana kotła wynosi 94% przy temperaturze systemu grzewczego 75/60ºC.

W – moduł obsługowy kotła.

Pracą układu kocioł – podgrzewacz steruje widoczny na fotografii 12 moduł obsługowy kotła. Za pomocą modułu ustawiamy czas i okres podgrzewania wody oraz określamy temperaturę ciepłej wody użytkowej w zakresie od 32 do 60ºC. Moduł odbiera sygnał przekazany z czujnika temperatury, zainstalowanego w górnej części podgrzewacza. W przypadku zmierzenia przez czujnik temperatury niższej niż wymagana, następuje wysłanie sygnału do kotła o uzupełnienie energii cieplnej w podgrzewaczu.



Fot. 12. Moduł obsługowy kotła Vitopend 100

4.3. Aparatura pomiarowa

Głównymi elementami pomiarowym są dwa ciepłomierze (widoczne na fot. 13) zainstalowane na układzie:

- kolektory – podgrzewacz,
- kocioł – podgrzewacz.

Wartość energii cieplnej wyznaczana jest z zależności:

$$Q = \Sigma\, \Delta\, Q_n, \text{ [J]} \tag{11}$$

$$\Delta Q_n = k_n\, \Delta V_n\, (T_{ln} - T_{2n}), \text{ [J]} \tag{12}$$

gdzie:

Q – suma pobranego ciepła [J],
ΔQ_n – ilość ciepła pobranego w n-tym okresie integracji [J],
ΔV_n – objętość przepływającego czynnika w n-tym okresie integracji [m^3],
k_n – współczynnik cieplny czynnika dla n-tego okresu integracji [J·(K·m^3)$^{-1}$],
T_{1n} – temperatura czynnika na zasilaniu w n-tym okresie integracji [K],
T_{2n} – temperatura czynnika na powrocie w n-tym okresie integracji [K].

Fot. 13. Widok zainstalowanych ciepłomierzy.

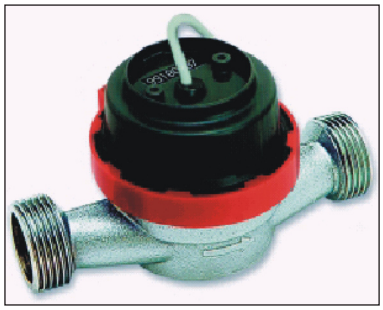
Pomiar ilości zużytej energii cieplnej sprowadza się do pomiaru objętości przepływającego czynnika grzewczego i różnicy temperatur. Wielkość energii cieplnej stanowi całkę ograniczoną objętościami z iloczynu współczynnika cieplnego i różnicy temperatur. Do pomiaru objętości przepływającego czynnika grzewczego wykorzystywany jest przepływomierz wirnikowy z wyjściem impulsowym. Odczyt pomiaru temperatury czynnika grzewczego jest zsynchronizowany z impulsami przepływomierza. Po przesłaniu danych do przelicznika następuje obliczenie energii cieplnej. Współczynnik cieplny k_n wyznaczany jest w oparciu o algorytm opracowany przez konstruktorów licznika i zależny jest od T_{1n} i T_{2n}. Zawartość rejestrów RAM przepisywana jest do stałej pamięci EPROM, co godzinę w momencie wywołania przez użytkownika funkcji transmisji do czytnika. Obliczenia energii cieplnej są pomijane w przypadku, gdy $T_1 - T_2 < 0$. Przyrosty objętości z kolejnych okresów integracji stanowią sumę objętości nośnika ciepła, a poszczególne przyrosty wyznaczane są jako iloczyny stałej przetwornika i liczby impulsów zliczonych w tym okresie.

Moc chwilowa jest wyznaczana po zakończeniu okresu integracji, gdy różnica temperatur jest większa od zera i obliczana jako iloraz przyrostu energii cieplnej przez długość okresu integracji. Okres integracji wyznaczany jest przez impulsy pochodzące z przepływomierza. Impulsy są zliczane i w chwili, gdy ich ilość zrówna się z pewną stałą liczbą (tzw. podziałem), kończy się jeden okres integracji, a zaczyna drugi. Jeżeli od początku okresu integracji minie minuta, a zliczana ilość impulsów jest mniejsza od podziału, to pierwszy

pojawiający się impuls spowoduje zakończenie okresu integracji. Wartość mocy chwilowej za okres jednej godziny stanowi moc maksymalną. Przepływ chwilowy i maksymalny obliczany jest analogicznie jak odpowiednia moc.

K_1 – ciepłomierz CQM – II – K / JS – 15 – 1.5 zainstalowany został na układzie kocioł – podgrzewacz, w którego skład wchodzi:

- przepływomierz JS – 15 – 1.5



Podstawowe dane techniczne:

– średnica nominalna 15 mm,
– przepływ nominalny 1,5 $m^3 \cdot h^{-1}$,
– impulsowanie 60 $impulsów \cdot l^{-1}$,
– maksymalna temp. czynnika 90ºC (363 K),
– przepływ minimalny 30 $l \cdot h^{-1}$.

- przelicznik CQM – II – K

Podstawowe dane techniczne:

– najmniejsza zliczana jednostka energii cieplnej 0,001 GJ,
– najmniejsza zliczana jednostka objętości nośnika 0,001m^3,
– zakres temperatur nośnika 1–180ºC (274 – 453 K),
– zakres różnicy temperatur 3–160ºC (3–160 K),
– graniczny błąd dopuszczalny + – ($0,5+3 \cdot \Delta T^{-1}$) %.

- para czujników temperatury TS – 310

Podstawowe dane techniczne:

– zakres pomiarowy 0–105ºC (273 – 378 K),
– zakres różnicy temperatur $\Delta T > 3$ºC (3 K),
– rezystor termometryczny Pt 100 wg PN,
Pt 500 wg DN,
– materiał osłony czujnika mosiądz M 60,
– dokładność pary czujników temperatury:
dla 2ºC (2 K) < ΔT < 5ºC (5 K) $E_{\Delta T}$ = + – 2%,
dla 5ºC (5 K) < ΔT < 150ºC (150 K) $E_{\Delta T}$ = + – 1%,
– dokładność pomiaru 0,01ºC (0,01 K).

K_2 – ciepłomierz CQM – II / WS – 15 – 1 zainstalowany został na układzie kolektory – podgrzewacz, w którego skład wchodzi:

- przepływomierz WS – 15 – 1

Podstawowe dane techniczne:

– średnica nominalna 15 mm,
– przepływ nominalny 1 $m^3 \cdot h^{-1}$,
– impulsowanie 1 impuls$\cdot l^{-1}$,
– maksymalna temp. czynnika 120ºC (393 K),
– przepływ minimalny 40 $l \cdot h^{-1}$.

- przelicznik CQM – II

Podstawowe dane techniczne:

– najmniejsza zliczana jednostka energii cieplnej 0,001 GJ,
– najmniejsza zliczana jednostka objętości nośnika 0,001 m^3,
– zakres temperatur nośnika 1–180ºC (274–453 K),
– zakres różnicy temperatur 3–160ºC (3–160 K),
– graniczny błąd dopuszczalny + – $(0{,}5+3 \cdot \Delta T^{-1})$ %.

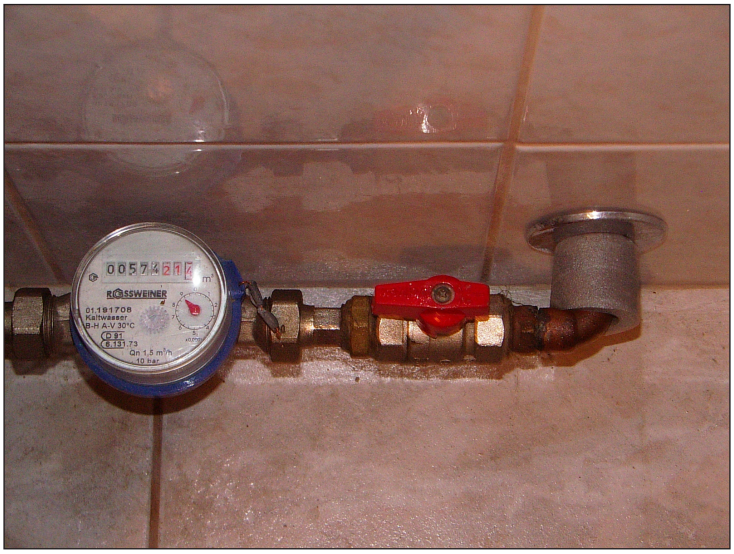
- para czujników temperatury TS – 200

Podstawowe dane techniczne:

– zakres pomiarowy 0–180ºC (273–453 K),
– zakres różnicy temperatur $\Delta T > 3$ºC (3 K),
– rezystor termometryczny Pt 100 wg PN, Pt 500 wg DN,
– materiał osłony czujnika mosiądz M 60,
– materiał osłony zewnętrznej mosiądz M 60, stal IHI8N9,
– dokładność pary czujników temperatury:
dla 2ºC (2 K) < ΔT < 5ºC (5 K) $E_{\Delta T}$ = + – 2%,
dla 5ºC (5 K) < ΔT < 150ºC (150 K) $E_{\Delta T}$ = + – 1%,
– dokładność pomiaru 0,01ºC (0,01 K).

Czujniki dostarczane są w parach. Dobór w pary odbywa się komputerowo w oparciu o wymagania określone w międzynarodowym zaleceniu dotyczącym ciepłomierzy „Heat Meters" OIML R75. Dokładność doboru w pary jest zawężona do 0,04ºC – spełnia wymagania klasy IV (DIN IEC 751).

H – wodomierz do pomiaru zużycia ciepłej wody użytkowej, widoczny na fotografii 14, zainstalowany został na instalacji doprowadzającej zimną wodę do podgrzewacza.

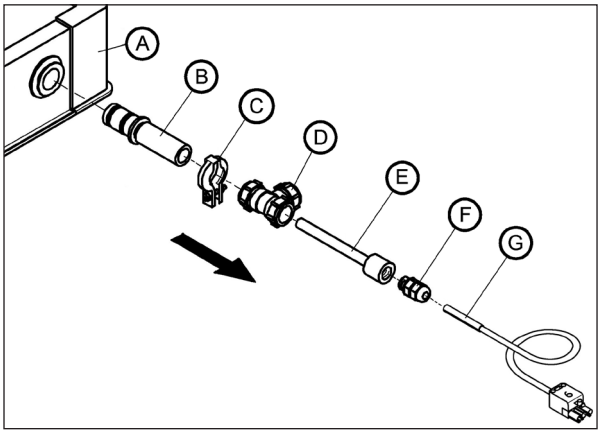


Fot. 14. Wodomierz

Podstawowe dane techniczne:

– maksymalna temperatura wody 30ºC,
– przepływ nominalny 1,5 $m^3 \cdot h^{-1}$.

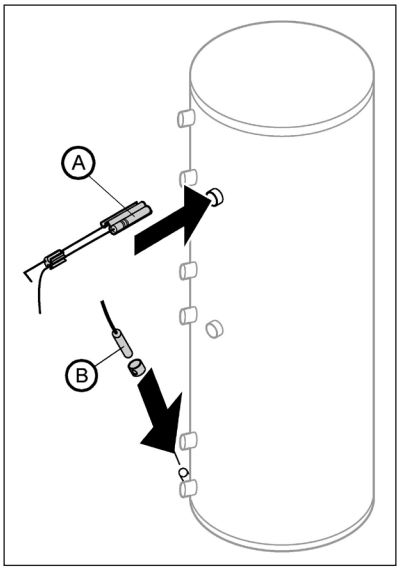
L_1 – czujnik temperatury w kolektorze, którego zamocowanie i lokalizacja przedstawiona została na rysunku 9.



Rys. 9. Zamocowanie czujnika temperatury w kolektorze: A – górna część kolektora, B – rurka przyłączeniowa, C – obejma profilowa, D – trójnik, E – tuleja zanurzeniowa, F – skręcana złączka odprężająca, G – czujnik temperatury

W kolektorze (A) umieszczona jest rurka przyłączeniowa (B), która przymocowana jest do kolektora za pomocą obejmy profilowej (C). Następnie do rurki przyłączeniowej (B) za pomocą złączki zaciskowej pierścieniowej przymocowany jest trójnik (D), do którego wprowadzona jest tuleja zanurzeniowa (E). Czujnik temperatury (G) został umieszczony w tulei zanurzeniowej (E) i za pomocą skręcanego złącza odprężającego (F) zabezpieczony przed wypadnięciem z tulei.

L_2, L_3 – czujniki temperatury w dolnej i górnej części dwusystemowego podgrzewacza ciepłej wody użytkowej.



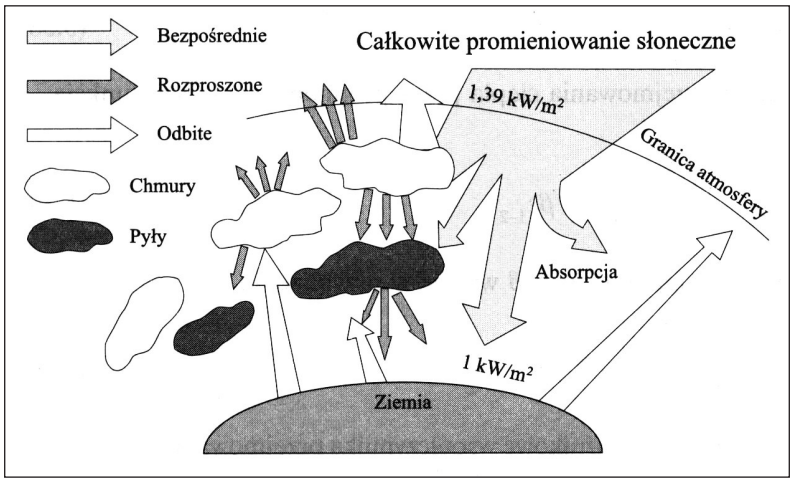
Rys. 10. Usytuowanie tulei zanurzeniowych w podgrzewaczu, w których umieszczone zostały czujniki temperatury: A – czujnik temperatury przekazujący pomiar do modułu obsługowego kotła, B – czujnik temperatury przekazujący pomiar do elektronicznego regulatora różnicowego

5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

W rozdziale piątym została przeprowadzona wnikliwa analiza badań dotycząca badanej instalacji słonecznej.

5.1. Możliwość wykorzystania instalacji słonecznych w budownictwie mieszkaniowym

Najwięcej uwagi poświęca się obecnie badaniom możliwości wykorzystania energii słonecznej. Zasilana przez Słońce przyroda jest praktycznie niewyczerpalnym źródłem energii. Energia słoneczna jest bezpieczna, czysta i dostępna dla całego globu ziemskiego. Słońce emituje energię w formie promieniowania elektromagnetycznego. Docierające do Ziemi promieniowanie składa się z promieniowania bezpośredniego i rozproszonego – w zależności od stopnia zachmurzenia (rys. 11).



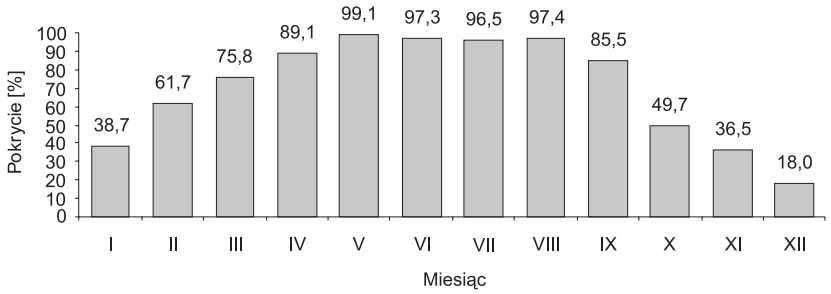
Rys. 11. Elementy promieniowania całkowitego [Lewandowski 2001]

Około 30% promieniowania docierającego do atmosfery zostaje odbite w postaci promieniowania widzialnego i ultrafioletowego z powrotem do przestrzeni kosmicznej, ok. 47% ulega pochłanianiu i remitowaniu ponownie do kosmosu w postaci promieniowania pod-

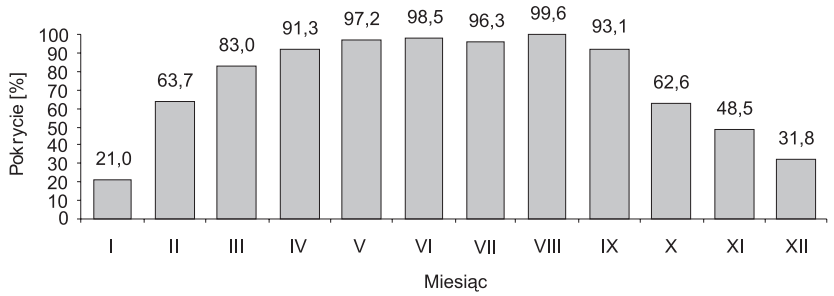
czerwonego. Pozostałe 23%, to rzeczywisty strumień promieniowania słonecznego, który uczestniczy w obiegu hydrologicznym [Lewandowski 2001]. Tylko około 0,03% energii promieniowania słonecznego zostaje zużyte przez fotosyntezę. Jak wielka ilość energii słonecznej dociera do powierzchni ziemi (mimo filtracyjnego działania atmosfery), wskazuje fakt, że jest ona około dwadzieścia tysięcy razy większa od całkowitej energii produkowanej aktualnie przez ludzkość. Wykorzystaniu tych ogromnych ilości energii słonecznej stały do niedawna na przeszkodzie względy techniczne, a obecnie w coraz mniejszym stopniu – ekonomiczne.

W idealnych warunkach, w naszych szerokościach geograficznych, suma promieniowania bezpośredniego i rozproszonego docierającego do powierzchni terenu osiąga maksymalną wartość chwilową 1 $kW \cdot m^{-2}$. Po odjęciu strat kolektora, które wahają się w granicach ok. 30%, otrzymujemy maksymalną moc użytkową kolektora słonecznego, która wynosi 0,7 $kW \cdot m^{-2}$. Wartość energii dopływającej do kolektora jest różna i zależy od pory roku, warunków atmosferycznych i ustawienia płaszczyzny kolektora względem padania promieni słonecznych.

Na rysunkach 12 i 13 zaprezentowano wyniki badań (stanowisko badawcze w Kamieńcu Wrocławskim) z dwóch lat kalendarzowych 2002 i 2003. Procentowo zostało przedstawione pokrycie zapotrzebowania na energię cieplną do podgrzewania wody użytkowej przez instalację słoneczną w poszczególnych miesięcach.



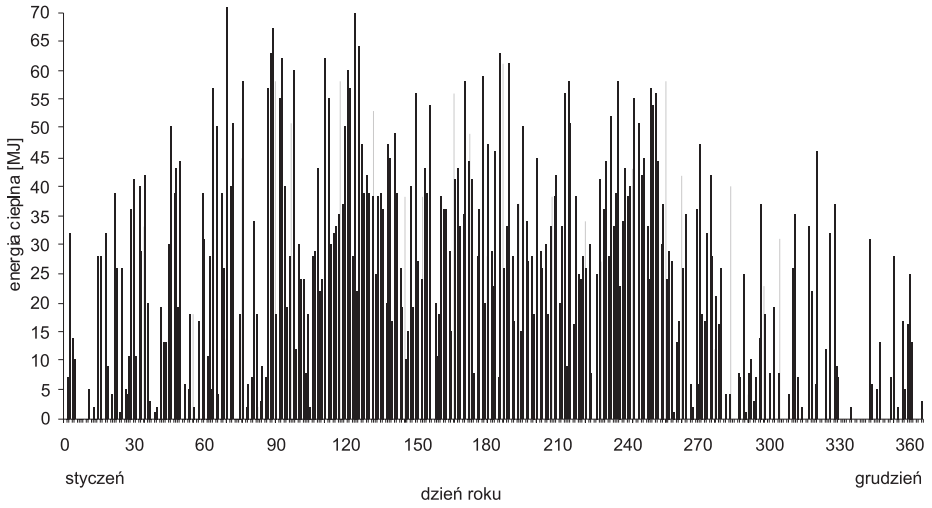
Rys. 12. Pokrycie zapotrzebowania na energię cieplną przez instalację słoneczną dla okresu I–XII 2002 r.



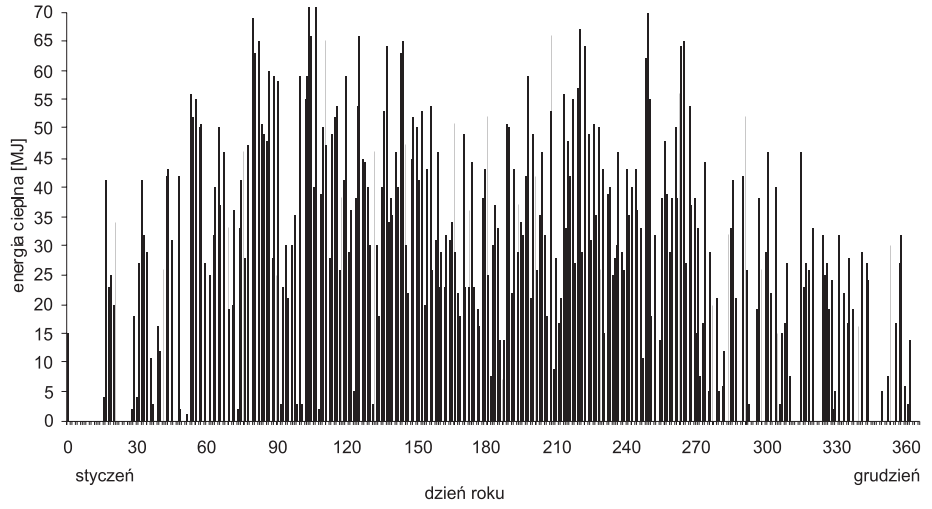
Rys. 13. Pokrycie zapotrzebowania na energię cieplną przez instalację słoneczną dla okresu I–XII 2003 r.

Jak wynika z wykresów, od kwietnia aż do września energia cieplna była pozyskiwana efektywnie na poziomie ponad 85%. W pozostałych miesiącach efektywność pozyskiwania energii cieplnej była mniejsza i spadła w grudniu 2002 r. aż do 18%. W skali roku 2002 efektywność pozyskiwania energii cieplnej przez instalację słoneczną wyniosła 72,59%, natomiast w roku 2003 – 76,0%.

Na rysunkach 14 i 15 zostały przedstawione słupkowo dzienne ilości energii cieplnej, która została pozyskana z energii promieniowania słonecznego i dostarczona do podgrzewacza do podgrzania wody użytkowej.



Rys. 14. Dzienne ilości energii cieplnej pozyskanej przez kolektory słoneczne (powierzchnia 5 m^2) dla okresu I–XII 2002 r.



Rys. 15. Dzienne ilości energii cieplnej pozyskanej przez kolektory słoneczne (powierzchnia 5 m^2) dla okresu I–XII 2003 r.

Ilość energii cieplnej pozyskanej w roku 2002 przez kolektory słoneczne wyniosła 8,846 GJ, a w roku 2003 było 10,061 GJ. W roku 2002 największy dopływ energii cieplnej, jaki zaobserwowano, wystąpił dnia 11 marca i wyniósł 71 MJ. Z kolei w roku 2003 największy dopływ energii był w dniach 14, 17 kwietnia i liczył on także 71 MJ. W marcu, kwietniu i maju zaobserwowano dość znaczny wzrost ilości energii cieplnej potrzebnej do podgrzewania wody użytkowej przez instalację słoneczną i kocioł. W tych wiosennych miesiącach było możliwe sprawniejsze pozyskiwanie energii cieplnej przez kolektory, ponieważ występowała większa ilość godzin usłonecznienia, promienie słoneczne w południe padały pod kątem prostym w stosunku do powierzchni kolektorów i zimna woda doprowadzana do podgrzewacza miała niską temperaturę (tab. 2).

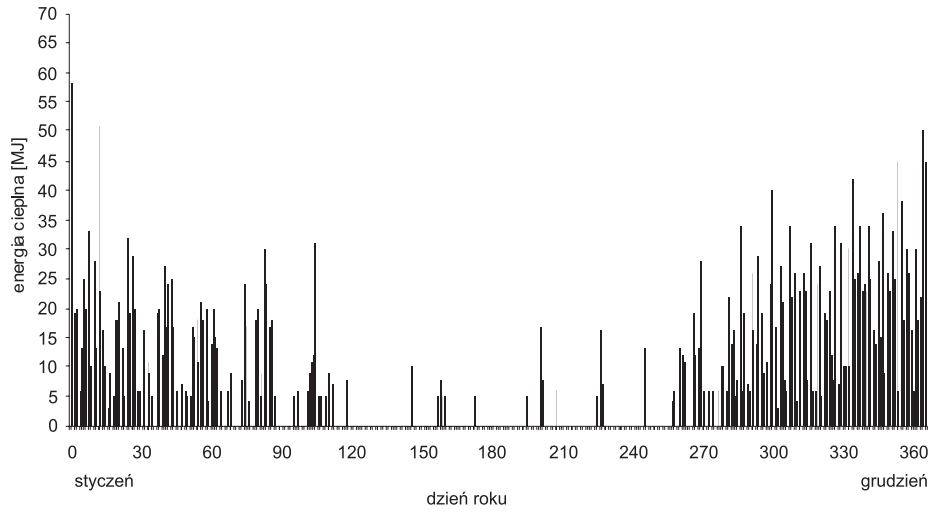
Tabela 2

Zbadana temperatura doprowadzanej zimnej wody do podgrzewacza w różnych okresach prowadzonych badań

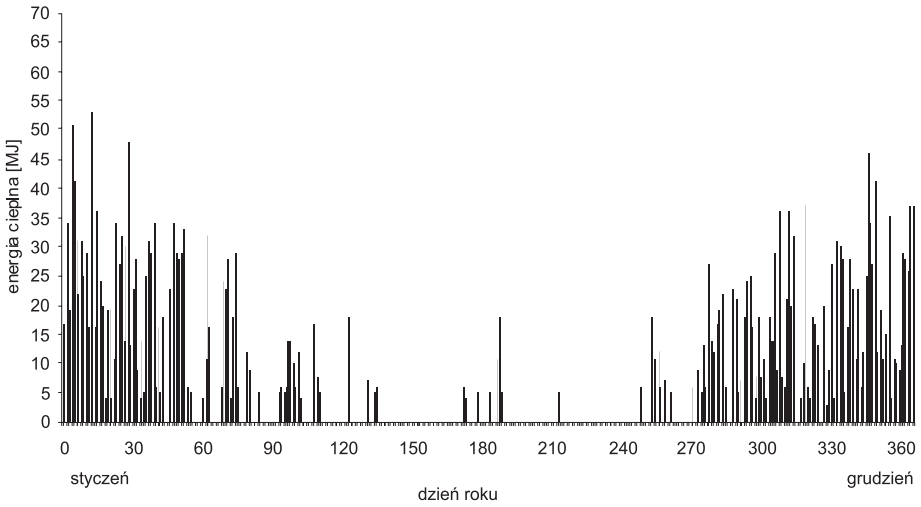
Data	3 stycznia 2002 r.	17 lutego 2003 r.	29 marca 2002 r.	23 maja 2003 r.	5 lipca 2002 r.
Temperatura [°C]	7	7	10	15	20

Na rysunkach 16 i 17 zostały przedstawione słupkowo dzienne ilości energii cieplnej, uzupełnionej przez kocioł jednofunkcyjny, która została dostarczona do podgrzewacza i posłużyła do podgrzania wody użytkowej.

Ilość energii cieplnej uzupełnionej przez kocioł w roku 2002 wyniosła 3,341 GJ, a w roku 2003 było 3,169 GJ. Z wykresów wynika, że uzupełnianie energii cieplnej przez kocioł od kwietnia do września odbywało się sporadycznie, jako pojedyncze włączenia, a uzupełniana energia cieplna była na niewielkim poziomie.



Rys. 16. Dzienne ilości energii cieplnej uzupełnionej przez kocioł jednofunkcyjny dla okresu I–XII 2002 r.



Rys. 17. Dzienne ilości energii cieplnej uzupełnionej przez kocioł jednofunkcyjny dla okresu I–XII 2003 r.

Przedstawione wyniki badań pokazują m.in. faktyczną ilość energii cieplnej dostarczonej do podgrzewacza z pominięciem strat cieplnych występujących na kolektorach i instalacji transportującej czynnik, który przenosi energię cieplną. Czujniki temperatury, mierzące temperaturę czynników transportujących energię cieplną zostały umieszczone jak najbliżej wejść i wyjść wężownic z podgrzewacza (fot. 15).

Fot. 15. Wejścia instalacyjne i miejsca zainstalowania czujników temperatury w pojemnościowym dwusystemowym podgrzewaczu ciepłej wody użytkowej Vitocell 100

Należy zaznaczyć, że pewna część energii cieplnej zmagazynowana w podgrzewaczu zostaje oddana do otoczenia. Według normy DIN 4753 – 8 przy temperaturze pomieszczenia wynoszącej 20ºC i temperaturze wody użytkowej 65ºC straty te będą wynosić 2,2 kWh·(24 h)$^{-1}$.

Wyniki uzyskane ze stanowiska badawczego dla okresów XI–XII 2001 r., I–XII 2002 r., I–XII 2003 r. w rozbiciu na poszczególne miesiące zostały przedstawione w tabeli 3. Ilość energii cieplnej dostarczonej przez kolektory słoneczne do podgrzewacza wyniosła w ciągu roku 2002 – 8,846 GJ, natomiast ilość energii cieplnej uzupełnionej przez kocioł to 3,341 GJ. W sumie do podgrzania wody w podgrzewaczu zużyte zostało 12,187 GJ energii cieplnej. W czasie 57 dni w roku 2002 kolektory słoneczne nie pracowały, co oznacza, że ilość energii promieniowania całkowitego była na niskim poziomie, niewystarczającym, aby kolektory tę energię mogły przejąć. Kocioł w ciągu roku nie pracował przez 160 dni, co oznacza, że podczas tych dni w 100% energię cieplną do podgrzewania wody użytkowej dostarczyły kolektory słoneczne. Przepływ czynnika transportującego energię cieplną w układzie kolektory – podgrzewacz w ciągu roku 2002 wyniósł 342,118 m^3, natomiast przepływ czynnika transportującego energię cieplną w układzie kocioł – podgrzewacz w ciągu tego roku to 76,215 m^3. Ilość ciepłej wody użytkowej podgrzanej w podgrzewaczu w ciągu roku 2002 wyniosła 70,088 m^3.

Tabela 3

Wyniki badań dla listopada, grudnia 2001 r. oraz dla miesięcy 2002 r. i 2003 r.

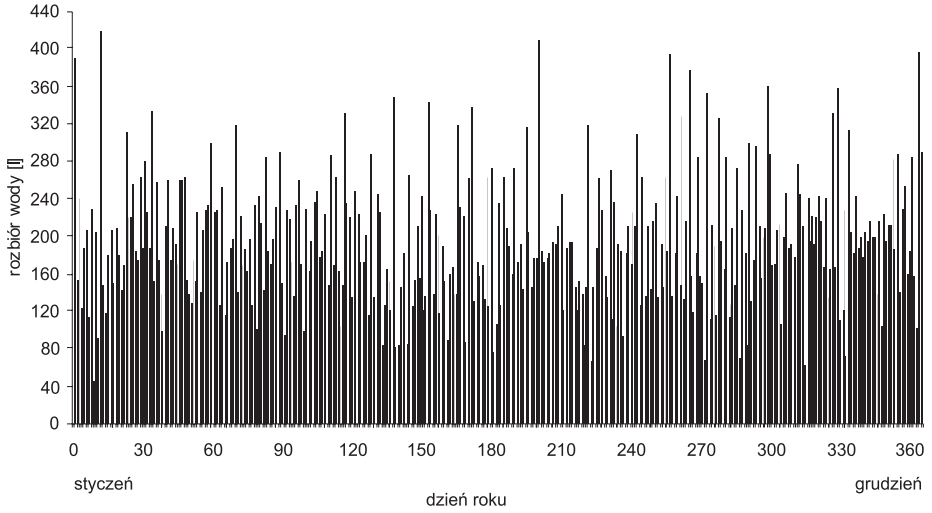
Data	Energia kolektory–podgrzew.	Energia kocioł–podgrzew.	Σ E	Procentowy udział E_{KOL}	Postój kolektorów	Postój kotła	Przepływ kolektory–podgrzew.	Przepływ kocioł–podgrzew.	Wodomierz
	E_{KOL} [GJ]	E_{KOT} [GJ]	[GJ]	[%]	[dni]	[dni]	V_{KOL} [m^3]	V_{KOT} [m^3]	V_{WOD} [m^3]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lis.-01	0,299	0,471	0,770	38,831	11	1	13,754	12,077	5,793
Gru.-01	0,109	0,818	0,927	11,758	20	0	4,977	16,651	6,536
Σ	**0,408**	**1,289**	1,697		**31**	**1**	**18,731**	**28,728**	**12,329**
Sty.-02	0,371	0,588	0,959	38,686	10	0	16,378	11,818	6,053
Luty-02	0,545	0,339	0,884	61,652	4	3	23,545	7,667	5,570
Mar.-02	0,881	0,282	1,163	75,752	2	11	34,071	6,219	6,108
Kwi.-02	1,010	0,123	1,133	89,144	0	16	45,362	3,494	5,791
Maj.-02	1,164	0,010	1,174	99,148	0	30	41,735	0,426	5,251
Cze.-02	1,027	0,028	1,055	97,346	1	25	36,243	1,008	5,529
Lip.-02	1,002	0,036	1,038	96,532	0	27	36,379	1,327	5,786
Sie.-02	1,062	0,028	1,090	97,431	1	28	37,798	1,001	5,520
Wrz.-02	0,877	0,149	1,026	85,478	2	17	34,548	4,999	5,994
Paź.-02	0,425	0,431	0,856	49,650	5	3	16,911	10,385	6,094
Lis.-02	0,309	0,538	0,847	36,482	15	0	11,915	11,386	5,943
Gru.-02	0,173	0,789	0,962	17,983	17	0	7,233	16,485	6,449
Σ	**8,846**	**3,341**	**12,187**	**72,586**	**57**	**160**	**342,118**	**76,215**	**70,088**

Tabela 3 cd.

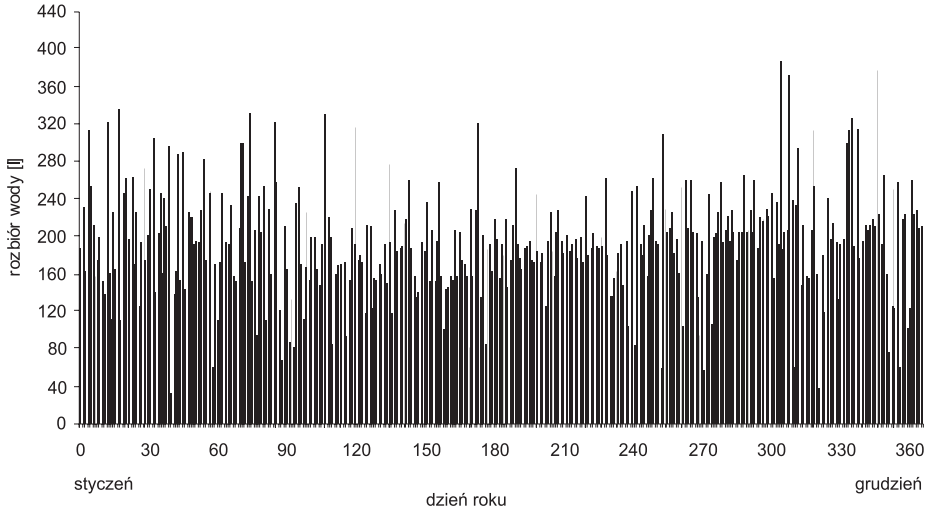
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sty.-03	0,213	0,799	1,012	21,047	20	0	8,014	15,289	6,278
Luty-03	0,684	0,389	1,073	63,747	6	7	24,394	7,863	5,656
Mar.-03	1,110	0,227	1,337	83,022	4	16	41,672	5,211	6,092
Kwi.-03	1,182	0,112	1,294	91,345	0	17	46,033	2,819	5,326
Maj-03	1,249	0,036	1,285	97,198	0	27	43,121	1,132	5,599
Cze.-03	0,998	0,015	1,013	98,519	0	27	35,604	0,578	5,267
Lip.-03	1,005	0,039	1,044	96,264	0	27	36,586	1,405	5,818
Sie.-03	1,207	0,005	1,212	99,587	0	30	40,249	0,215	5,620
Wrz.-03	1,071	0,080	1,151	93,050	1	21	35,589	2,676	5,758
Paź.-03	0,612	0,365	0,977	62,641	8	5	22,492	8,871	6,681
Lis.-03	0,428	0,455	0,883	48,471	10	4	18,772	10,074	5,954
Gru.-03	0,302	0,647	0,949	31,823	15	0	12,830	13,784	6,336
Σ	**10,061**	**3,169**	13,230	76,047	64	181	365,356	69,917	70,385

Rozbiór wody z podgrzewacza był dokonywany przez wszystkie dni w okresie roku 2002 (rys. 18). Średnio w ciągu doby pobierane było 192,02 l ciepłej wody użytkowej z podgrzewacza. Rozbiór wody był oczywiście zróżnicowany od najmniejszego 45 l (9 stycznia 2002 r.) na dobę do 418 l (12 stycznia 2002 r.) na dobę.

W roku 2003 ilość energii cieplnej dostarczonej przez kolektory słoneczne do podgrzewacza wyniosła 10,061 GJ, natomiast ilość energii cieplnej uzupełnionej przez kocioł to 3,169 GJ. W sumie w roku 2003 do podgrzania wody w podgrzewaczu zużyte zostało 13,230 GJ energii cieplnej. Przez 64 dni w ciągu roku 2003 kolektory słoneczne nie pracowały, co oznacza, że ilość energii promieniowania całkowitego była na niewielkim poziomie, niewystarczającym, aby kolektory tę energię mogły przejąć. Kocioł w 2003 roku nie pracował przez 181 dni. Oznacza to, że podczas tych dni w 100% energię cieplną do podgrzewania wody użytkowej dostarczyły kolektory słoneczne. Przepływ czynnika transportującego energię cieplną w układzie kolektory – podgrzewacz w ciągu roku 2003 wyniósł 365,356 m^3, natomiast przepływ czynnika transportującego energię cieplną w układzie kocioł – podgrzewacz w ciągu tego roku to 69,917 m^3. Ilość ciepłej wody użytkowej podgrzanej w podgrzewaczu w ciągu roku 2003 wyniosła 70,385 m^3.



Rys. 18. Dzienne ilości pobranej ciepłej wody z podgrzewacza dla okresu I–XII 2002 r.



Rys. 19. Dzienne ilości pobranej ciepłej wody z podgrzewacza dla okresu I–XII 2003 r.

Rozbiór wody z podgrzewacza był dokonywany przez wszystkie dni w okresie roku 2003 (rys. 19). Średnio w ciągu doby pobierane było 192,84 l ciepłej wody użytkowej z podgrzewacza. Rozbiór wody był zróżnicowany od najmniejszego 31 l (9 lutego 2003 r.) na dobę do 385 l (31 października 2003 r.) na dobę.

Miesiącem o najmniejszej efektywności pozyskiwania energii cieplnej w czasie trwania badań był grudzień 2001 r., w którym aż przez dwadzieścia dni wystąpił brak jej dopływu z układu kolektory – podgrzewacz przy codziennym uzupełnieniu tej energii z układu kocioł – podgrzewacz. Ilość energii cieplnej uzyskana z kolektorów wyniosła 0,109 GJ,

co stanowiło 11,8% zapotrzebowania w tym miesiącu. W kolejnym miesiącu styczniu 2002 r. także wystąpiło codzienne uzupełnianie energii cieplnej z układu kocioł – podgrzewacz, ale już tylko przy dziesięciodniowym postoju układu kolektory – podgrzewacz. Ilość energii cieplnej w styczniu 2002 r., którą otrzymano z kolektorów, była już 3,4 razy większa niż ilość tej energii, którą uzyskano w grudniu 2001 r. i zaspokoiła ona zapotrzebowanie do podgrzewania wody w 38,7%.

W marcu 2002 r. ilość energii cieplnej całkowitej zużytej do podgrzewania wody użytkowej wyniosła 323,1 kWh. W stosunku do stycznia 2002 r. ilość energii cieplnej dostarczonej do podgrzewacza wzrosła o 21,3%, co wiązało się między innymi ze zwiększonym zużyciem ciepłej wody. Od maja 2002 r. można było uzyskać większą ilość energii cieplnej, którą mogliśmy zmagazynować w podgrzewaczu. Ze względu jednak na zabezpieczenie zasobnika przed kamieniem kotłowym w górnej jego części następowało podgrzewanie wody maksymalnie do 64ºC przy ustawieniu wyłączenia dopływu energii cieplnej z kolektorów po osiągnięciu 50ºC przez czujnik w dolnej części podgrzewacza. W maju temperaturę w dolnej części podgrzewacza ograniczono do 40ºC, aby w jego górnej części temperatura wody nie przekroczyła 65ºC.

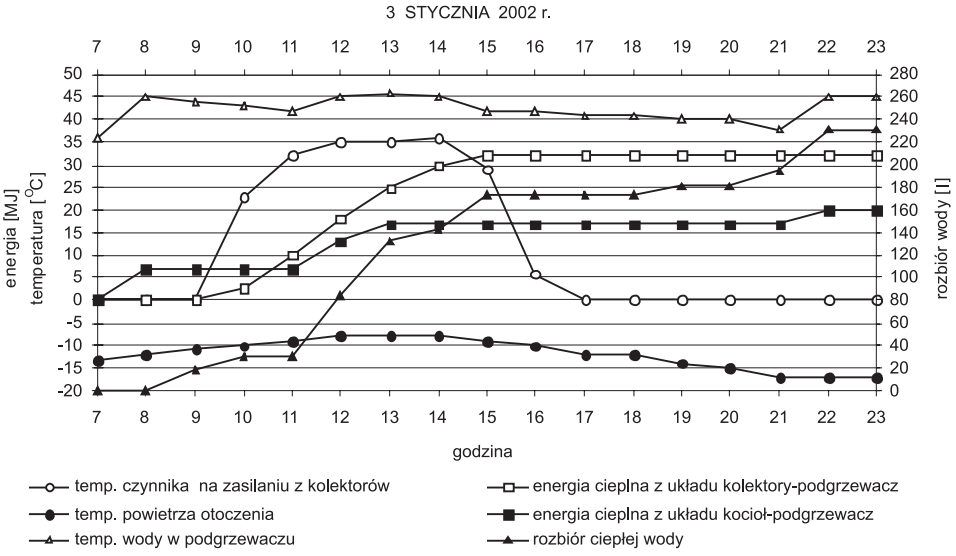
Miesiącem o największej efektywności pozyskiwania energii cieplnej w czasie trwania badań był sierpień 2003 r., w którym aż przez trzydzieści jeden dni wystąpił dopływ tej energii z układu kolektory – podgrzewacz przy tylko jednodniowym uzupełnieniu energii cieplnej z układu kocioł – podgrzewacz. Ilość energii cieplnej uzyskana z kolektorów wyniosła 1,207 GJ, co stanowiło 99,6% zapotrzebowania tej energii do podgrzania wody w tym miesiącu. W maju, zarówno w 2002 r. (1,164 GJ), jak i 2003 r. (1,249 GJ) pozyskano najwięcej energii cieplnej z układu kolektory – podgrzewacz do podgrzania wody użytkowej. Związane to jest z tym, iż po okresie zimowym doprowadzana woda do podgrzewacza jest jeszcze stosunkowa chłodna przy występujących już wysokich temperaturach powietrza otoczenia i dużym usłonecznieniu.

Na kolejnych stronach zostały przedstawione wykresy obrazujące szesnastogodzinny charakter pracy instalacji słonecznej dla charakterystycznych dni w skali roku. Badania instalacji prowadzone były od godziny $7^{\underline{00}}$ do $23^{\underline{00}}$ z cogodzinnym odczytem pomiarów z przyrządów badawczych (ciepłomierzy, wodomierza, czujnika temperatury powietrza otoczenia, czujników temperatury: w kolektorze i w górnej części dwusystemowego podgrzewacza ciepłej wody użytkowej).

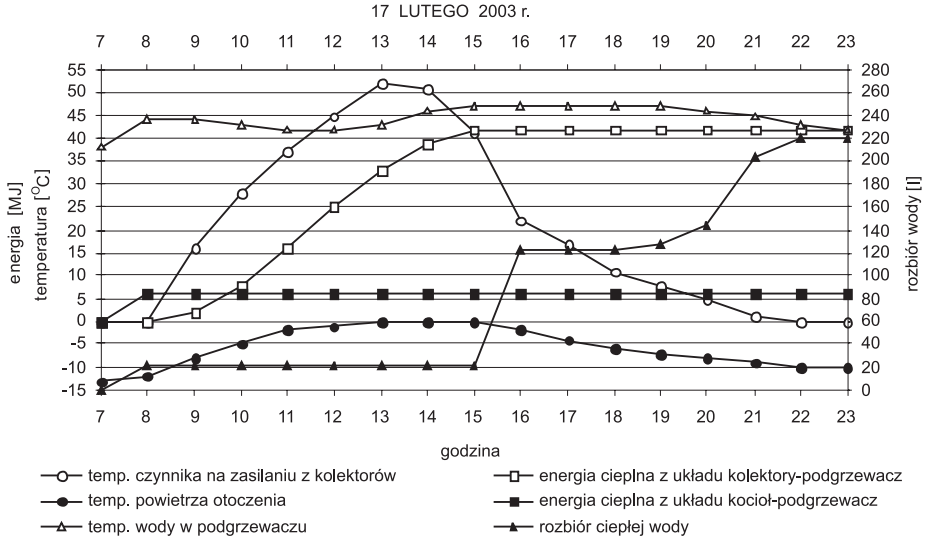
Rysunek 20 przedstawia wyniki badań przy długości dnia od wschodu do zachodu Słońca wynoszącej 8 godzin, 2 minuty i 29 sekund. W tym czasie na zewnątrz budynku panowały dość niskie temperatury powietrza otoczenia od -13ºC o godzinie $7^{\underline{00}}$, -8ºC o $12^{\underline{00}}$ do -17ºC o $21^{\underline{00}}$. Przy tak krótkim dniu, małym usłonecznieniu wynoszącym 6,5 h, niskiej temperaturze powietrza otoczenia i dość dużym rozbiorze wody, rzędu 231 l, uzyskano 32 MJ energii cieplnej z kolektorów słonecznych, co stanowiło aż 61,54% pokrycia zapotrzebowania na energię cieplną w ciągu całej doby. Maksymalna temperatura czynnika transportującego energię cieplną na zasilaniu dla układu kolektory – podgrzewacz, którą uzyskano w ciągu tego dnia, wyniosła 36ºC przy temperaturze powietrza otoczenia -8ºC i mocy chwilowej 2 kW.

Rysunek 21 przedstawia wyniki badań przy długości dnia od wschodu do zachodu Słońca wynoszącej 10 godzin, 8 minut i 2 sekundy. W tym czasie na zewnątrz budynku panowały niskie temperatury powietrza otoczenia od -13ºC o godzinie $7^{\underline{00}}$, 0ºC o $13^{\underline{00}}$ do -10ºC o $22^{\underline{00}}$. Przy dłuższym dniu, usłonecznieniu wynoszącym 5,9 h, niskiej temperaturze powietrza otoczenia i dość dużym rozbiorze wody, rzędu 220 l, uzyskano 42 MJ energii cieplnej z kolekto-

rów słonecznych, co stanowiło 87,50% pokrycia zapotrzebowania na energię cieplną w ciągu całej doby. Maksymalna temperatura czynnika transportującego energię cieplną na zasilaniu dla układu kolektory – podgrzewacz, którą uzyskano w ciągu tego dnia, wyniosła 52ºC przy temperaturze powietrza otoczenia 0ºC i mocy chwilowej 2,5 kW.

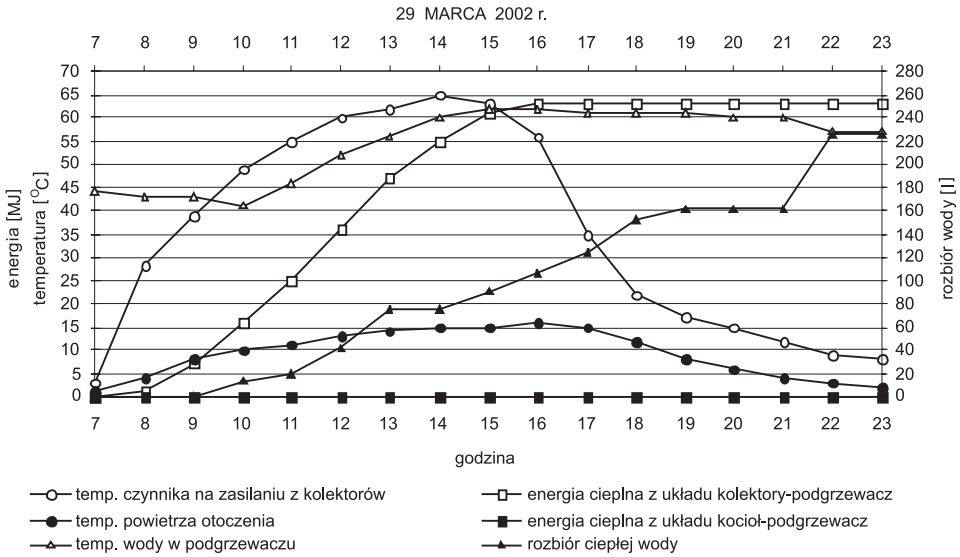


Rys. 20. Przebieg pracy instalacji badawczej dnia 3 stycznia 2002 r.



Rys. 21. Przebieg pracy instalacji badawczej dnia 17 lutego 2003 r.

Rysunek 22 przedstawia wyniki badań przy długości dnia od wschodu do zachodu Słońca wynoszącej 12 godzin, 46 minuty i 8 sekund. W czasie tych badań na zewnątrz budynku panowały już dość dobre dla wydajnej pracy kolektorów temperatury powietrza otoczenia od 1ºC o godzinie $7^{\underline{00}}$, 13ºC o $12^{\underline{00}}$ do 4ºC o $21^{\underline{00}}$. Przy dłuższym dniu, większym usłonecznieniu wynoszącym 10,1 h, umiarkowanej temperaturze powietrza otoczenia i dość dużym rozbiorze wody, rzędu 225 l, uzyskano 63 MJ energii cieplnej z kolektorów słonecznych, co stanowiło 100,00% pokrycia zapotrzebowania na tę energię w ciągu całej doby. Maksymalna temperatura czynnika transportującego energię cieplną na zasilaniu dla układu kolektory – podgrzewacz, którą uzyskano w ciągu tego dnia, wyniosła 65ºC przy temperaturze powietrza otoczenia 15ºC i mocy chwilowej 2 kW.

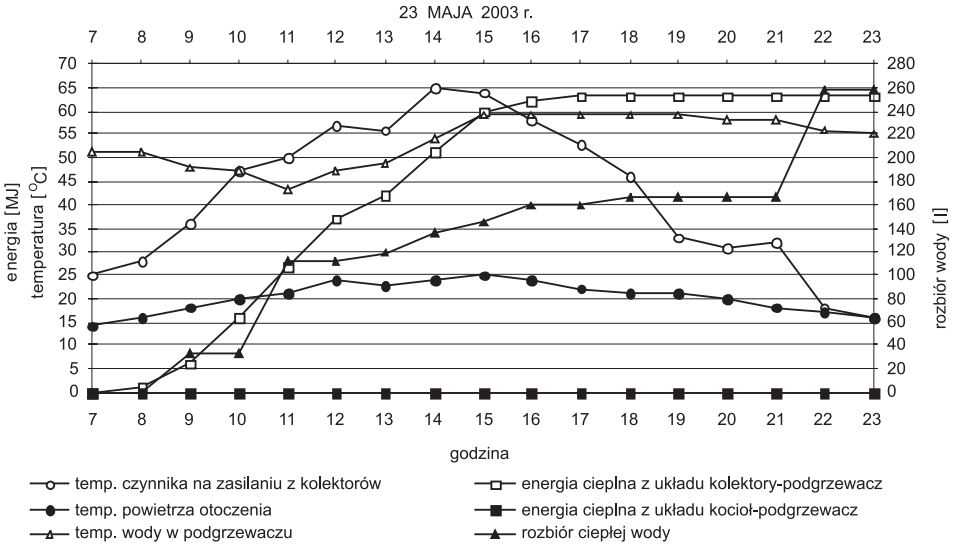


Rys. 22. Przebieg pracy instalacji badawczej dnia 29 marca 2002 r.

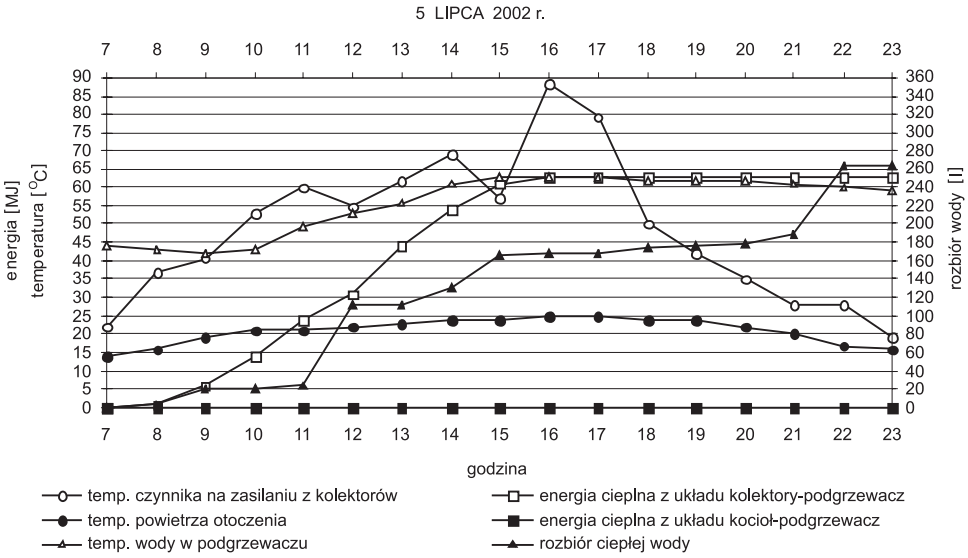
Rysunek 23 przedstawia wyniki badań przy długości dnia od wschodu do zachodu Słońca wynoszącej 15 godzin, 55 minuty i 17 sekund. W czasie badań na zewnątrz budynku panowały dobre temperatury powietrza otoczenia dla wydajnej pracy kolektorów od 14ºC o godzinie $7^{\underline{00}}$, 25ºC o $15^{\underline{00}}$ do 16ºC o $23^{\underline{00}}$. Przy dłuższym dniu, większym usłonecznieniu wynoszącym 8,2 h, wysokiej temperaturze powietrza otoczenia i dość dużym rozbiorze wody, rzędu 258 l, uzyskano 63 MJ energii cieplnej z kolektorów słonecznych, co stanowiło 100,00 % pokrycia zapotrzebowania na energię cieplną w ciągu całej doby. Maksymalna temperatura czynnika transportującego energię cieplną na zasilaniu dla układu kolektory – podgrzewacz, którą uzyskano w ciągu tego dnia, wyniosła 65ºC przy temperaturze powietrza otoczenia 24ºC i mocy chwilowej 3 kW.

Rysunek 24 przedstawia wyniki badań przy długości dnia od wschodu do zachodu Słońca wynoszącej 16 godzin, 22 minuty i 52 sekundy. W okresie badań na zewnątrz budynku panowały dobre dla wydajnej pracy kolektorów temperatury powietrza otoczenia od 14ºC o godzinie $7^{\underline{00}}$, 25ºC o $16^{\underline{00}}$ do 16ºC o $23^{\underline{00}}$. Przy dłuższym dniu, większym usłonecznieniu wynoszącym 13,6 h, wysokiej temperaturze powietrza otoczenia i dość dużym rozbiorze

wody, rzędu 264 l, uzyskano 63 MJ energii cieplnej z kolektorów słonecznych, co stanowiło 100,00% pokrycia zapotrzebowania na energię cieplną w ciągu całej doby. Maksymalna temperatura czynnika transportującego energię cieplną dla pracującej instalacji, na zasilaniu dla układu kolektory – podgrzewacz, którą uzyskano w ciągu tego dnia, wyniosła 69ºC przy temperaturze powietrza otoczenia 24ºC i mocy chwilowej 2,8 kW.



Rys. 23. Przebieg pracy instalacji badawczej dnia 23 maja 2003 r.



Rys. 24. Przebieg pracy instalacji badawczej dnia 5 lipca 2002 r.

Według danych Polskiego Towarzystwa Energetyki Słonecznej w Polsce na powierzchnię 1 m^2 dociera rocznie 950–1250 kWh energii promieniowania słonecznego. Po analizie przeprowadzonych badań można założyć, że dla instalacji podobnych do badanej uzyska się ponad 2400 kWh energii w skali roku (525,2 $kWh \cdot m^{-2}$ pow. kolektorów). Efektywność tego typu instalacji pracujących we Wrocławiu i okolicach ocenić można na ponad 72% pokrycia zapotrzebowania na energię cieplną przez instalację słoneczną potrzebną do podgrzania wody użytkowej w okresie rocznym. Nawet przy niesprzyjających warunkach meteorologicznych i dla okresu o najmniejszym możliwym usłonecznieniu kolektory słoneczne płaskie, cieczowe są w stanie przejąć tę tak niewielką ilość energii promieniowania słonecznego z aż ponad 61% efektywnością (badania instalacji dla 3 stycznia 2002 r.).

5.2. Warunki meteorologiczne

Istotnym problemem w odbiorze energii słonecznej przez kolektory jest niska gęstość strumienia promieniowania i różny dopływ tej energii w różnych porach dnia i roku. Ilość energii promieniowania słonecznego, jaka dociera do powierzchni Ziemi, zależy od wielu czynników. Główne czynniki, które mają decydujący wpływ na ilość promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi, to stan atmosfery i uwarunkowania astronomiczne.

Energia docierająca do kolektora przy bezchmurnym niebie w czerwcu, kiedy Słońce jest najwyżej nad horyzontem (62,4º), jest największa. Natomiast w grudniu, kiedy Słońce znajduje się najniżej nad horyzontem (15,5º), wartość tej energii jest najmniejsza. Różnica w ilości energii słonecznej, jaka dociera do powierzchni Ziemi, pomiędzy tymi dwoma okresami, jest wręcz kontrastowa. W analizowanej szerokości geograficznej – do górnej granicy atmosfery dopływa w grudniu około 6 razy mniej energii niż w czerwcu [Podogrocki 1976]. Przy powierzchni Ziemi kontrasty te są jeszcze większe i w Obserwatorium na Swojcu dochodzą w poszczególnych latach, przy maksimum letnim przesuwającym się pomiędzy majem a lipcem (czasami sierpień), do 12–15-krotności [Bryś K., Bryś T. 2001]. Decydują o tym nie tylko sezonowe zmiany w kącie padania promieni słonecznych, lecz również długość dnia, zachmurzenie oraz wilgotność i zmętnienie powietrza (czyli obecność w powietrzu pary wodnej i aerozoli, które kształtują jego przeźroczystość i właściwości absorpcyjne).

Wpływ na ilość energii dochodzącej do kolektora ma także zachmurzenie nieba. Jak wiadomo, największa liczba godzin usłonecznienia występuje w miesiącach letnich. Przy bezchmurnym niebie i w warunkach idealnej przejrzystości promieniowanie bezpośrednie może stanowić 90% promieniowania całkowitego docierającego do powierzchni Ziemi, osiągając wartość w miesiącach letnich w południe 1050 $W \cdot m^{-2}$. Natomiast przy całkowitym zachmurzeniu nieba w tym samym okresie do Ziemi dociera tylko promieniowanie rozproszone, którego wartość waha się od 50 do 150 $W \cdot m^{-2}$ [Chochowski i Czekalski 1999]. Najmniejsza liczba godzin usłonecznienia przypada na okres zimnych pór roku (październik – marzec). Dodatkowo odbiór i tak niewielkiej ilości energii, przypadającej na okres zimnej pory roku, obniżają występujące o tej porze silniejsze wiatry i niższe temperatury powietrza otoczenia.

Jak widać z powyższych stwierdzeń, głównymi czynnikami meteorologicznymi, które mają wpływ na pozyskiwanie energii Słońca przez kolektory słoneczne, są: usłonecznienie, promieniowanie całkowite i temperatura powietrza otoczenia. W dalszej części pracy, opisane

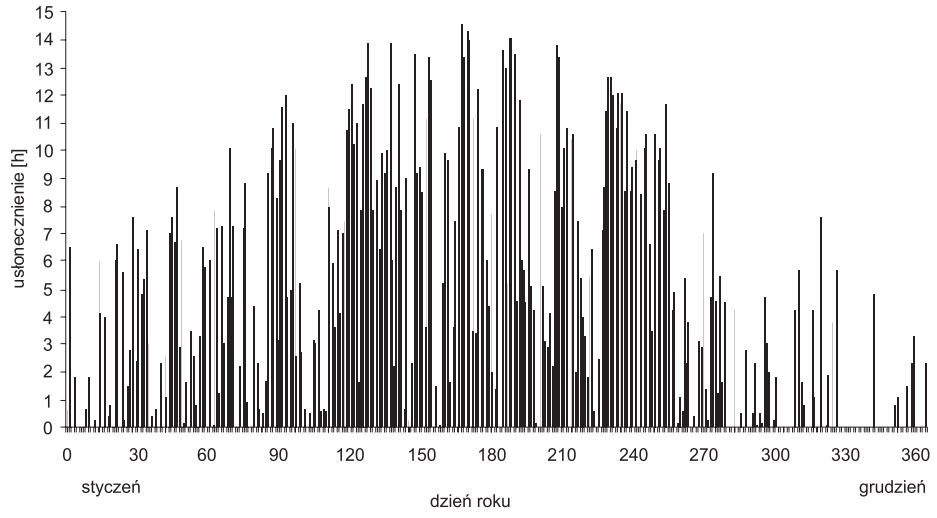
zostaną warunki meteorologiczne zmierzone w Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologii Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu-Swojcu, które znajduje się w bliskiej odległości od stanowiska badawczego w odniesieniu do danych meteorologicznych z wielolecia.

Dane meteorologiczne: usłonecznienie (mierzone heliografem Campbell – Stokesa na wysokości 1,5 m), natężenie promieniowania słonecznego całkowitego (napromienienie na wysokości 1,5 m, mierzone pyranometrem Janiszewskiego) oraz temperatura powietrza (z wysokości 2 m) w postaci wartości sum lub średnich dobowych uzyskane zostały z Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologii Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu-Swojcu.

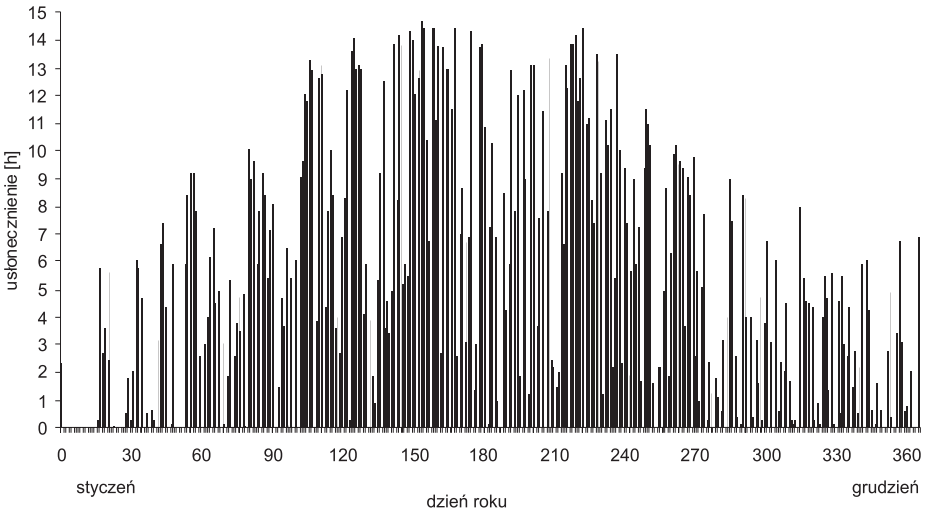
Stanowisko badawcze znajduje się na obszarze agroklimatycznym umiarkowanie wilgotnym, ciepłym i umiarkowanie słonecznym. Według mapy klimatycznej Polski Romera panuje tutaj klimat stosunkowo łagodny w szczególności nad Odrą (najdłuższe lato i najkrótsza zima w kraju). Na Nizinie Śląskiej okres wiosenno-letni odpowiada warunkom przeciętnym w Polsce, a okres jesienno-zimowy jest przeważnie suchy [Bac i Rojek 1979]. Zgodnie z rejonizacją rolniczo-klimatyczną [Schmuck 1959] stanowisko badawcze leży w „Dzielnicy wrocławskiej", obejmującej Nizinę Śląską, która jest najcieplejszym rejonem Polski. Średnia wieloletnia (1961–1995) średnio roczna temperatura powietrza dla Obserwatorium Wrocław – Swojec wynosi 8,54ºC [Bryś 1997]. Natomiast średnia wieloletnia (1961–1995) suma roczna usłonecznienia kształtuje się na poziomie 1418,2 h [Bryś 1997]. Suma roczna promieniowania całkowitego dla średniej wieloletniej (1961–1995) osiąga wartość 3719,9 $MJ \cdot m^{-2}$ [Bryś 1997]. Średnie wieloletnie (1961–1995) sumy opadów atmosferycznych w rejonie nizinnym Dolnego Śląska wynoszą 550–600 mm.

5.2.1. Usłonecznienie

Usłonecznienie oceniono na podstawie danych uzyskanych z Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologii Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu-Swojcu. Przebieg sum dobowych usłonecznienia dla lat 2002 i 2003 przedstawiono na rysunkach 25 i 26.

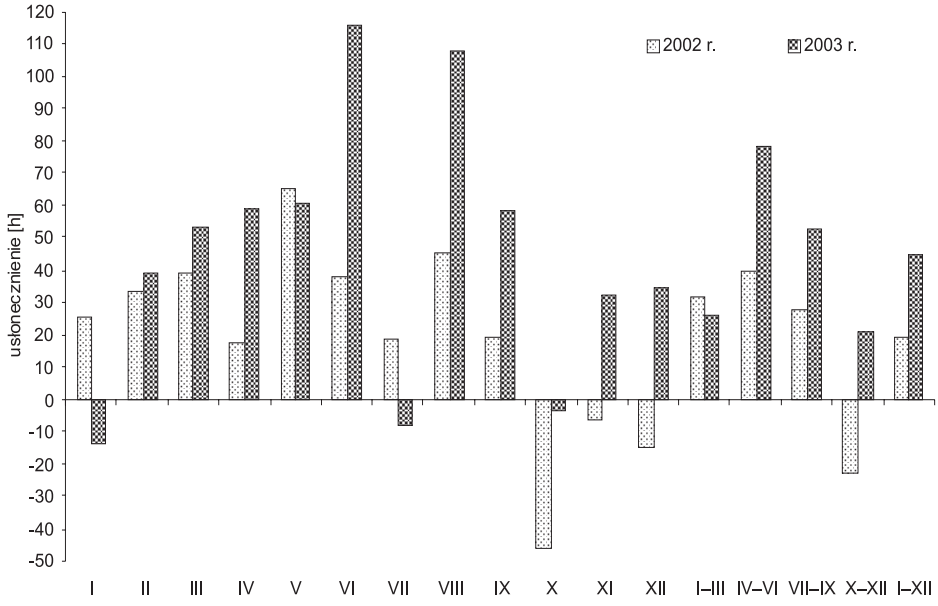


Rys. 25. Usłonecznienie dla 2002 r.



Rys. 26. Usłonecznienie dla 2003 r.

Rozpatrywano je w porównaniu z wartościami średnimi z wielolecia 1961–1995. Na rysunku 27 zostały przedstawione wartości odchylenia sum miesięcznych, średnich okresowych i rocznych od średniego wieloletniego usłonecznienia dla analizowanego okresu lat 2002 i 2003.



Rys. 27. Odchylenie sum miesięcznych, średniego rocznego i okresowego usłonecznienia od wartości średnich z wielolecia 1961–1995 dla Obserwatorium Wrocław-Swojec w latach kalendarzowych 2002 i 2003

Tabela 4

Miesięczne, średnie okresowe i roczne usłonecznienie [h] na tle wielolecia według Obserwatorium Wrocław-Swojec [Bryś 1997]

Lata	Miesiąc						Okres		
1961–1995	I	II	III	IV	V	VI	I–III	IV–VI	I–XII
	41,1	58,5	95,9	136,4	194,7	189,8	65,17	173,63	118,18
	VII	VIII	IX	X	XI	XII	VII–IX	X–XII	
	203,0	194,0	129,5	100,6	43,4	31,3	175,5	58,43	

Suma roczna usłonecznienia w roku 2002 wyniosła 1649,1 godzin, przekraczając o 230,9 godziny wartość wieloletnią. Od stycznia do września miesięczne sumy usłonecznienia były przekroczone powyżej 17,4 godzin w stosunku do wartości miesięcznych z wielolecia. Największe odchylenie miesięcznej sumy usłonecznienia od wieloletniej wystąpiło w maju i liczyło 64,9 godzin. W październiku, listopadzie i grudniu sumy usłonecznienia kształtowały się poniżej wieloletniej. Największe odchylenie wystąpiło dla października i wyniosło -46,3 godzin.

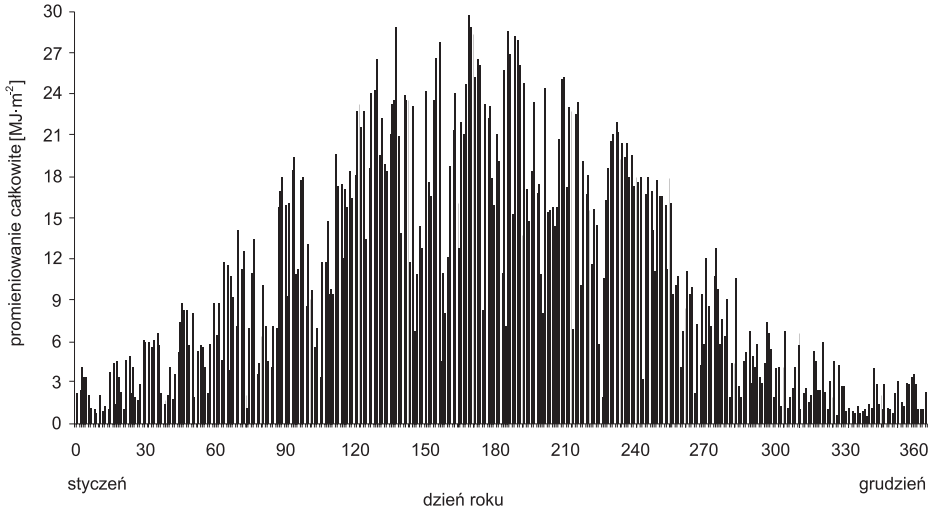
W roku 2003 roczna suma usłonecznienia osiągnęła wartość 1951,8 godzin i przekroczyła aż o 533,6 godzin wartość wieloletnią. W roku 2003 (poza styczniem, lipcem i październikiem) miesięczne sumy usłonecznienia były przekroczone powyżej 32,4 godzin w stosunku do wartości miesięcznych z wielolecia. Największe odchylenie miesięcznej sumy usłonecznienia od wieloletniej wystąpiło w czerwcu i wyniosło aż 116,1 godzin. W styczniu, lipcu i październiku sumy usłonecznienia kształtowały się poniżej wieloletniej. Największe odchylenie wystąpiło w styczniu i wyniosło tylko -13,5 godzin.

Podsumowując przebieg usłonecznienia, można stwierdzić, że cały rozpatrywany okres (lata 2002 i 2003) był wyjątkowo sprzyjający do efektywnego pozyskiwania energii promieniowania bezpośredniego przez kolektory słoneczne. We wszystkich kwartałach roku kalendarzowego 2002 i 2003 wartości średnich sum miesięcznych usłonecznienia osiągały wartości powyżej wartości z wielolecia poza czwartym kwartałem 2002 r.

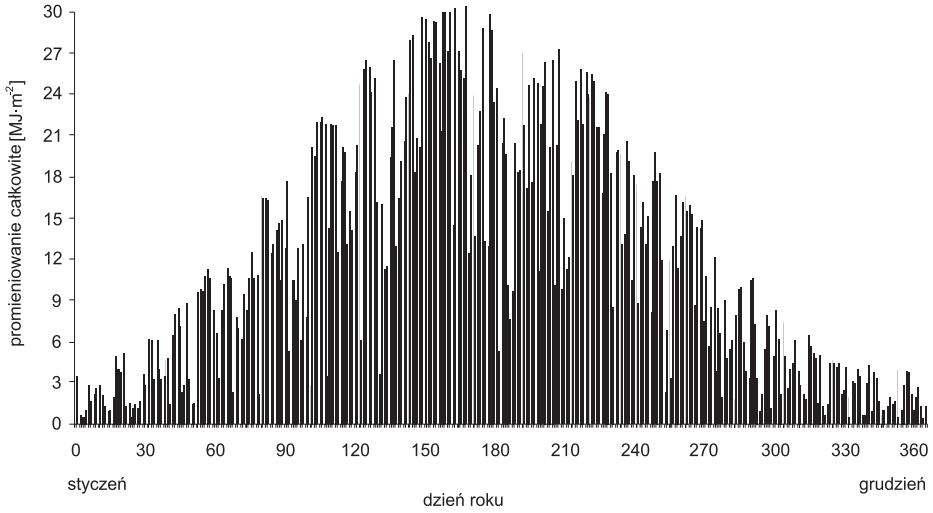
5.2.2. Promieniowanie całkowite

Promieniowanie całkowite oceniono na podstawie danych uzyskanych z Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologii Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu-Swojcu. Przebieg sum dobowych promieniowanie całkowitego dla lat 2002 i 2003 został przedstawiony na rysunkach 28 i 29.

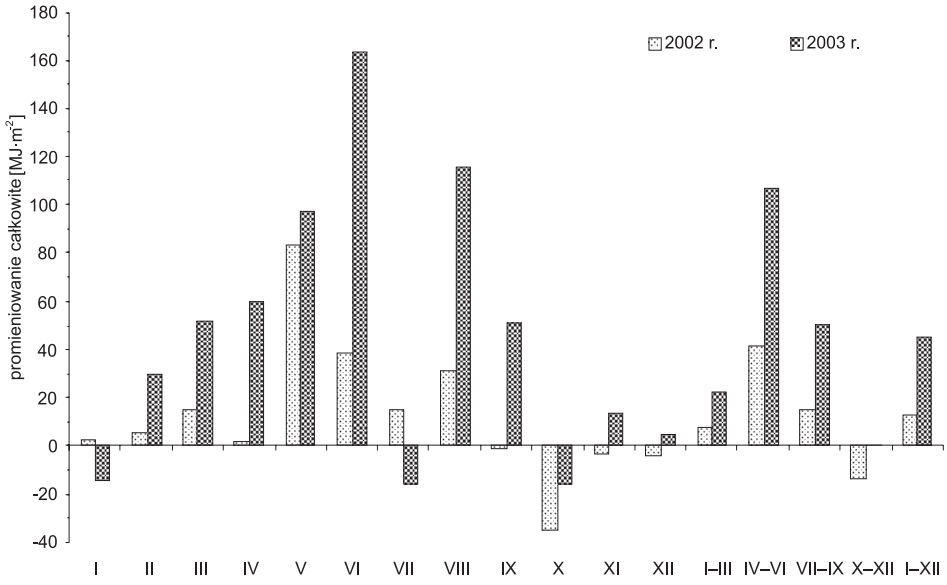
Rozpatrywano je w porównaniu z wartościami średnimi z wielolecia 1961–1995. Na rysunku 30 zostały przedstawione odchylenia wartości sum miesięcznych, średnich okresowych i rocznych od średnich wieloletnich promieniowania całkowitego dla analizowanego okresu lat 2002 i 2003.



Rys. 28. Promieniowanie całkowite dla 2002 r.



Rys. 29. Promieniowanie całkowite dla 2003 r.



Rys. 30. Odchylenie sum miesięcznych, średniego rocznego i okresowego promieniowania całkowitego od wartości średnich z wielolecia 1961–1995 dla Obserwatorium Wrocław-Swojec w latach kalendarzowych 2002 i 2003

Tabela 5

Miesięczne, średnie okresowe i roczne promieniowanie całkowite [MJ·m^{-2}] na tle wielolecia według Obserwatorium Wrocław-Swojec [Bryś 1997]

Lata	Miesiąc						Okres		
1961–1995	I	II	III	IV	V	VI	I–III	IV–VI	I–XII
	81,9	134,6	260,0	393,2	540,8	565,4	158,83	499,80	309,99
	VII	VIII	IX	X	XI	XII	VII–IX	X–XII	
	576,7	490,4	328,3	201,7	87,6	59,3	465,13	116,20	

Suma roczna promieniowania całkowitego w roku 2002 wyniosła 3868,34 MJ·m^{-2} i przekroczyła wartość z wielolecia o 148,44 MJ·m^{-2}. Od stycznia do sierpnia miesięczne sumy promieniowania całkowitego były przekroczone od 1,60 MJ·m^{-2} (kwiecień) do 83,93 MJ·m^{-2} (maj) w stosunku do wartości miesięcznych z wielolecia. W okresie od września do grudnia sumy promieniowania całkowitego kształtowały się poniżej wieloletniej. Największe odchylenie wystąpiło w październiku i wyniosło -35,64 MJ·m^{-2}.

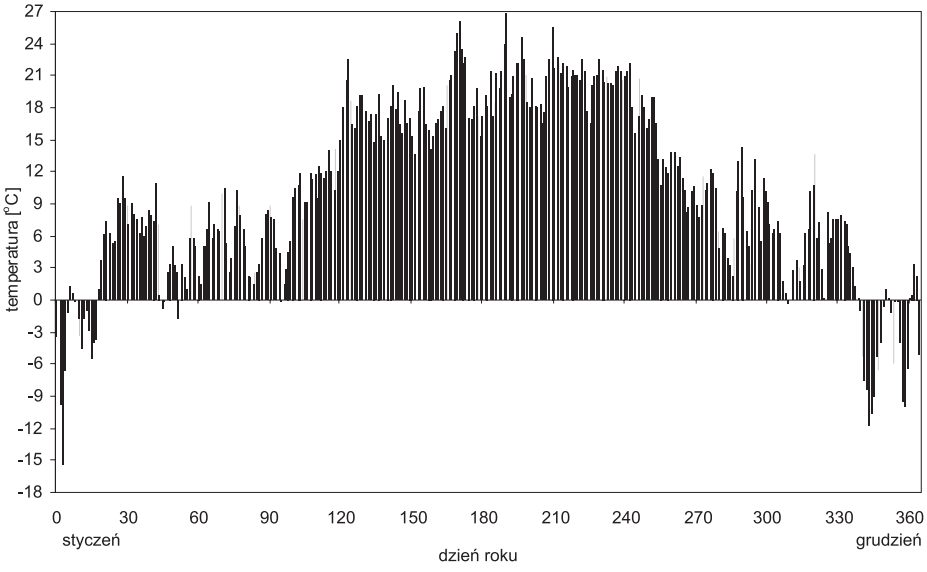
Dla roku 2003 zmierzona roczna suma promieniowania całkowitego wyniosła 4258,78 MJ·m^{-2} i przekroczyła aż o 538,88 MJ·m^{-2} wartość wieloletnią. W ciągu roku 2003 (poza styczniem, lipcem i październikiem) miesięczne sumy promieniowania całkowitego były przekroczone powyżej 4,29 MJ·m^{-2} w stosunku do wartości miesięcznych z wielolecia. Największe odchylenie miesięcznej sumy promieniowania całkowitego od wieloletniej wystąpiło

w czerwcu i było to aż 163,14 MJ·m^{-2}. W styczniu, lipcu i październiku sumy promieniowania całkowitego kształtowały się poniżej wieloletniej. Największe odchylenie zanotowano w październiku i wyniosło ono zaledwie -16,28 MJ·m^{-2}.

Podsumowując przebieg promieniowania całkowitego, można stwierdzić, że lata 2002 i 2003 były sprzyjające dla efektywnego pozyskiwania energii promieniowania całkowitego (bezpośredniego i rozproszonego) przez kolektory słoneczne. W I i IV kwartale roku, kiedy zwiększa się udział energii promieniowania rozproszonego w stosunku do promieniowania bezpośredniego, zanotowano większy udział promieniowania całkowitego od wartości wieloletniej. Tylko dla IV kwartału 2002 r. zanotowano wartości średnie miesięczne promieniowania całkowitego niższe od danych z wielolecia.

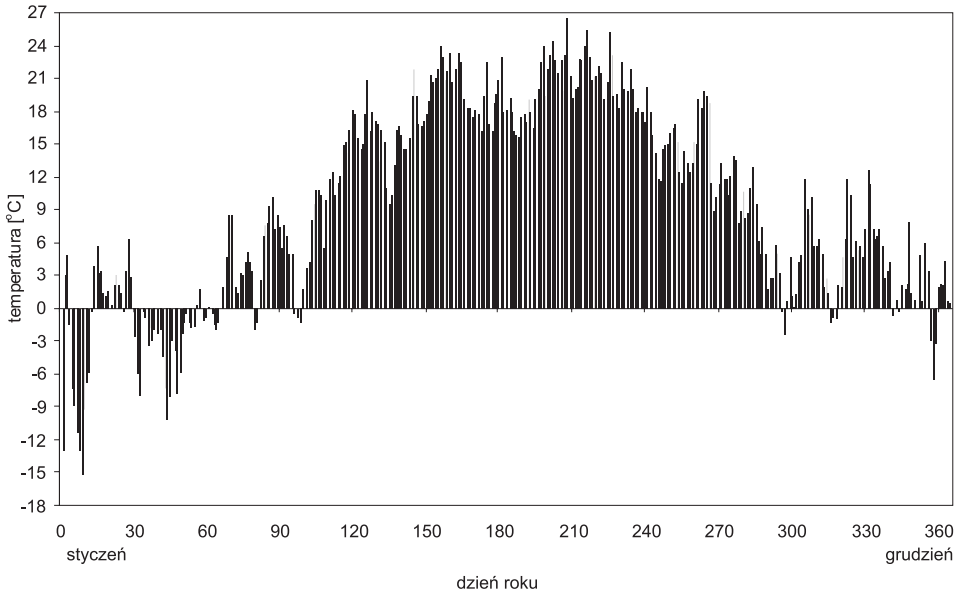
5.2.3. Temperatura powietrza

Temperatury powietrza zostały ocenione na podstawie danych uzyskanych z Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologii Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu-Swojcu. Przebieg temperatur średnich dobowych w latach 2002 i 2003 przedstawiono na rysunkach 31 i 32.

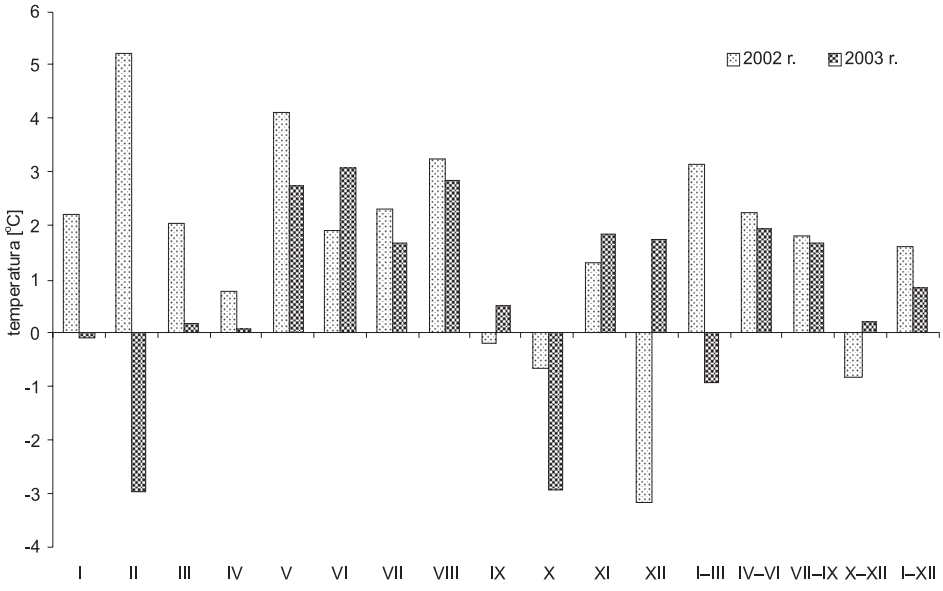


Rys. 31. Średnie dobowe wartości temperatur powietrza dla 2002 r.

Rozpatrywano je w porównaniu z wartościami średnimi z wielolecia 1961–1995. Na rysunku 33 zostały przedstawione odchylenia średnich wartości okresowych i rocznych od średnich wieloletnich temperatur dla analizowanego okresu lat 2002 i 2003.



Rys. 32. Średnie dobowe wartości temperatur powietrza dla 2003 r.



Rys. 33. Odchylenie średnich rocznych i okresowych temperatur powietrza od wartości średnich z wielolecia 1961–1995 dla Obserwatorium Wrocław-Swojec w latach kalendarzowych 2002 i 2003

Tabela 6

Średnie miesięczne, okresowe i roczne temperatury powietrza [ºC] na tle wielolecia według Obserwatorium Wrocław-Swojec [Bryś 1997]

Lata	Miesiąc						Okres		
1961–1995	I	II	III	IV	V	VI	I–III	IV–VI	I–XII
	-1,4	-0,2	3,5	8,2	13,3	16,6	0,63	12,70	8,54
	VII	VIII	IX	X	XI	XII	VII–IX	X–XII	
	18,2	17,6	13,7	8,9	3,9	0,2	16,50	4,33	

Średnia roczna temperatura powietrza w roku 2002 wyniosła 10,16ºC, przekraczając o 1,62ºC wartość wieloletnią. We wszystkich miesięcach roku 2002 (poza wrześniem, październikiem i grudniem) średnie miesięczne temperatury powietrza przekraczały wartości z wielolecia. Największe odchylenie wystąpiło w lutym i wyniosło 5,20ºC, a najmniejsze w kwietniu 0,78ºC. Odchylenie poniżej wartości z wielolecia zanotowano we wrześniu, październiku i grudniu. Odchylenie to kształtowało się na poziomie od minimalnego -0,18ºC (wrzesień) do maksyma -3,19ºC (grudzień).

W roku 2003 średnia roczna temperatura powietrza wyniosła 9,36ºC i przekroczyła o 0,82ºC wartość wieloletnią. W styczniu, lutym i październiku średnie miesięczne temperatury powietrza były niższe od średnich miesięcznych temperatur powietrza z wielolecia. Największe odchylenie średniej miesięcznej temperatury powietrza od wieloletniej zanotowano w lutym i wyniosło ono -2,97ºC. Odchylenie średniej miesięcznej temperatury powietrza dla pozostałych miesięcy roku 2003 kształtowało się powyżej wieloletniej od 0,08ºC (kwiecień) do 3,07ºC (czerwiec).

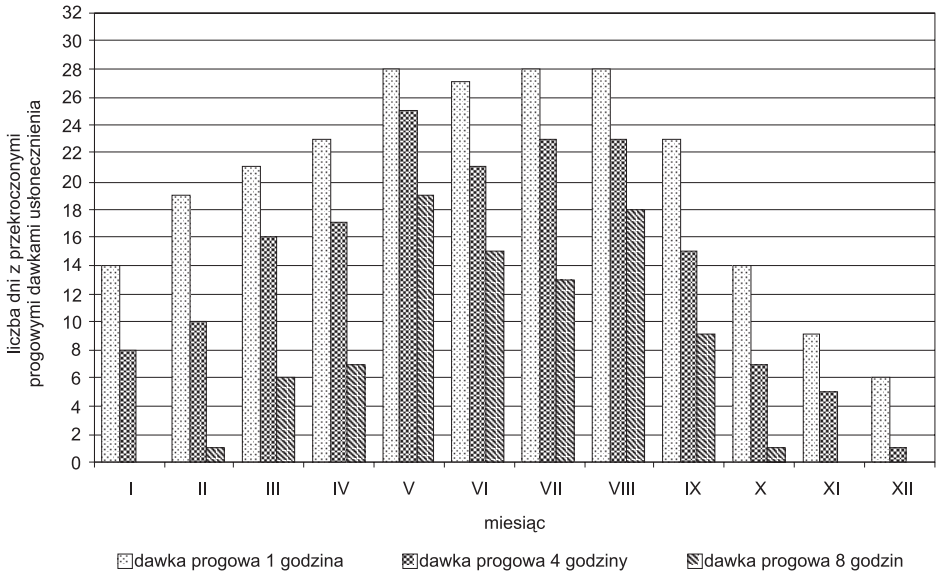
Podsumowując przebieg średnich temperatur powietrza, można stwierdzić, że rok 2002 i 2003 był korzystny dla efektywnego pozyskiwania energii cieplnej przez kolektory słoneczne. Przy wyższych temperaturach powietrza kolektory podczas pozyskiwania energii cieplnej osiągały większą sprawność i straty cieplne kolektorów do otoczenia były mniejsze. W rozpatrywanych kwartałach roku kalendarzowego 2002 i 2003 wartości średnich temperatur powietrza osiągały wartości powyżej wartości z wielolecia z wyjątkiem czwartego kwartału 2002 r. i pierwszego kwartału 2003 r.

5.2.4. Wpływ warunków meteorologicznych na pozyskiwanie energii cieplnej przez kolektory słoneczne

Kolektory słoneczne pracują najwydajniej, kiedy na ich powierzchnie padają promienie słoneczne w postaci energii promieniowania bezpośredniego. Spośród 8760 godzin (suma roczna godzin) w Obserwatorium zmierzono 1649,1 godzin usłonecznienia (tab. 7) w roku 2002 roku. W ciągu sześciu miesięcy od kwietnia do września liczba godzin usłonecznienia zmierzona w Obserwatorium Wrocław-Swojec wyniosła 1250,5, co stanowiło 75,80% godzin usłonecznienia zmierzonego dla całego 2002 r. Pozostała część usłonecznienia, czyli 24,20% przypada na okres zimnych pór roku (październik – marzec). Natomiast w 2003 roku liczba godzin usłonecznienia osiągnęła wartość 1951,8 godzin. W tym podczas sześciu miesięcy od kwietnia do września liczba godzin usłonecznienia zmierzona w Obserwatorium wyniosła 1440,7 godzin, co stanowiło 73,81% godzin usłonecznienia zmierzonego

w całym 2003 r. Pozostała część usłonecznienia, czyli 26,19% przypada na okres zimnych pór roku (październik – marzec). W roku 2003 wystąpił wzrost liczby godzin usłonecznienia o 15,51% w stosunku do roku 2002 przy tylko 3,46% wzroście pokrycia przez kolektory słoneczne zapotrzebowania na energię cieplną potrzebną do podgrzewania wody. Wzrost pokrycia zapotrzebowania na energię cieplną potrzebną do podgrzewania wody przez kolektory słoneczne nie był proporcjonalny do wzrostu liczby godzin usłonecznienia. Ten wzrost nie był proporcjonalny, ponieważ duży przyrost godzin usłonecznienia nastąpił w miesiącach półrocza ciepłego, kwiecień – wrzesień (kwiecień, czerwiec, sierpień, wrzesień o ponad 20% w stosunku do tych samych miesięcy roku 2002), kiedy występują duże nadwyżki energii.

Na rysunkach 34 i 35 została przedstawiona liczba dni z dawkami liczbowymi usłonecznienia przekraczającymi wartości progowe 1 godziny, 4 godzin oraz 8 godzin. W roku 2002 wystąpiło 240 dni a w roku 2003 aż 269 dni o usłonecznieniu przekraczającym 1 godzinę. Próg 4 godzin usłonecznienia w roku 2002 przekroczyło 171 dni, a w 2003 roku 192 dni.

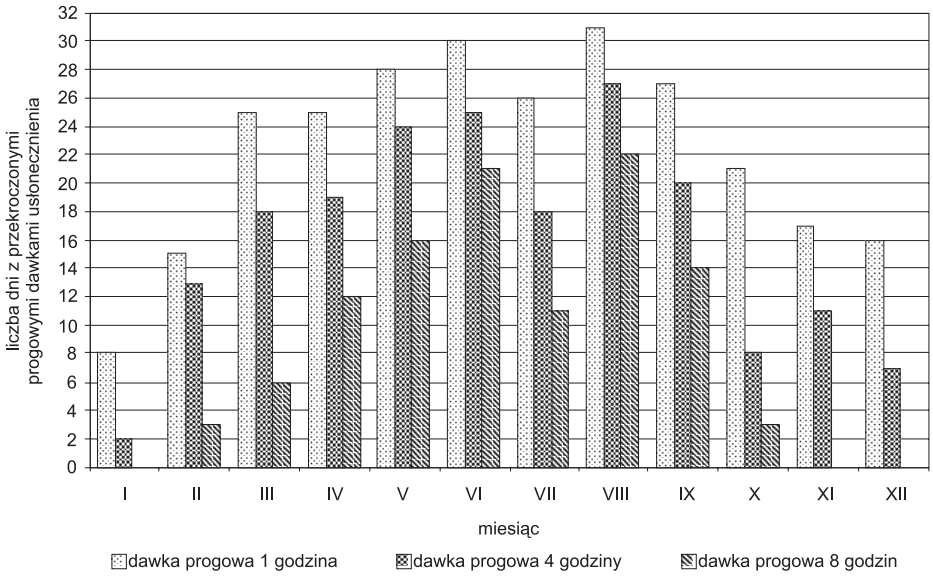


Rys. 34. Liczba dni z dawkami usłonecznienia powyżej wartości progowych dla 2002 r.

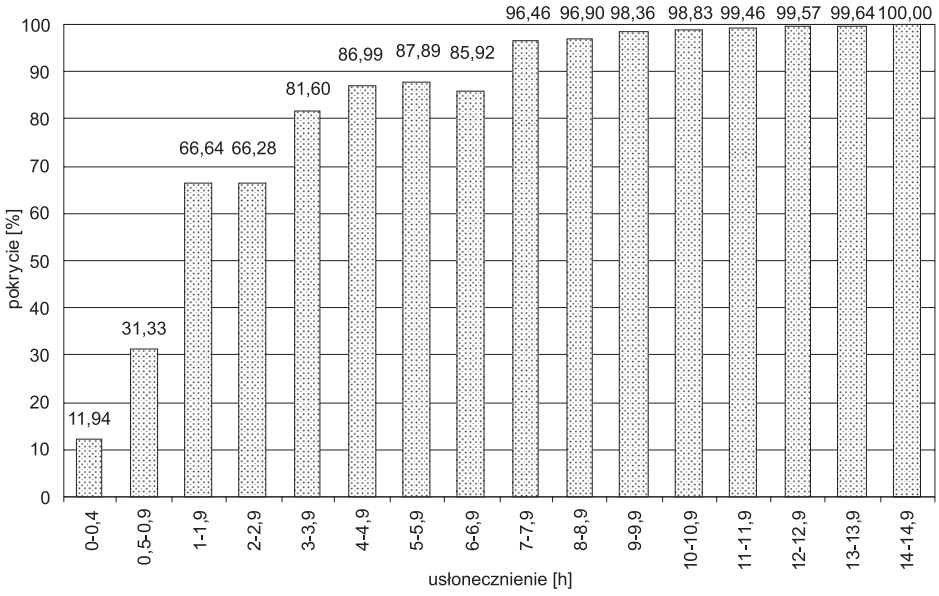
Przy ilości usłonecznienia ponad 8 godzin kocioł w roku 2002 dostarczył tylko 1,38% energii cieplnej, a w roku 2003 kocioł uzupełnił 1,96% tej energii w stosunku do dostarczonej energii przez kocioł dla poszczególnych rocznych okresów. Przy wartości progowej 4 godzin usłonecznienia kocioł dostarczył do podgrzewacza w 2002 r. 10,30% energii cieplnej, a w 2003 r. 12,97%. Dla kolejnego progu, usłonecznienia wynoszącego 1 godzinę kocioł uzupełnił energię cieplną w 2002 r. o 27,87% a w 2003 r. o 33,51%.

Energia cieplna najefektywniej pozyskiwana jest, kiedy promienie słoneczne padają bezpośrednio na powierzchnię kolektora. Na rysunku 36 została przedstawiona zależność pokrycia energii cieplnej przez instalację od spodziewanej liczby godzin usłonecznienia w ciągu doby. Od liczby godzin usłonecznienia z przedziału 7–7,9 h do przedziału 14–14,9 h można się spodziewać ponad 96% pokrycia przez kolektory słoneczne zapotrzebowania

energii cieplnej do podgrzania wody. Nawet przy liczbie godzin usłonecznienia mieszczącego się w przedziale od 1–1,9 h instalacja słoneczna jest w stanie pokryć ponad 66% zapotrzebowania na energię cieplną wykorzystywaną do podgrzewania wody.



Rys. 35. Liczba dni z dawkami usłonecznienia powyżej wartości progowych dla 2003 r.



Rys. 36. Spodziewane pokrycie zapotrzebowania na energię cieplną przez instalację słoneczną w zależności od ilości godzin usłonecznienia

W ciągu 2002 roku ilość promieniowania całkowitego zmierzonego w Obserwatorium na Swojcu wyniosła 3868,34 MJ·m^{-2}. Dopływ energii słonecznej był bardzo nierównomierny w ciągu roku. Największe sumy miesięczne promieniowania całkowitego wystąpiły w maju i wynosiły 624,73 MJ·m^{-2}. Najmniejsze wartości zmierzono w grudniu i osiągnęły wartość tylko 55,16 MJ·m^{-2}. Energia promieniowania całkowitego otrzymana od października do marca stanowiła zaledwie 20,8% sumy rocznej. Z kolei w 2003 r. ilość promieniowania całkowitego zmierzonego w Obserwatorium na Swojcu wyniosła 4258,78 MJ·m^{-2}. Dopływ energii słonecznej był także zdecydowanie nierównomierny w ciągu roku. Największe sumy miesięczne promieniowania całkowitego wystąpiły w czerwcu i liczyły aż 728,54 MJ·m^{-2}. Najmniejsze wartości zmierzono w grudniu i wynosiły 63,59 MJ·m^{-2}.

Tabela 7

Wyniki badań uzyskane na stanowisku badawczym i dane meteorologiczne według Obserwatorium Wrocław-Swojec dla lat 2002 i 2003

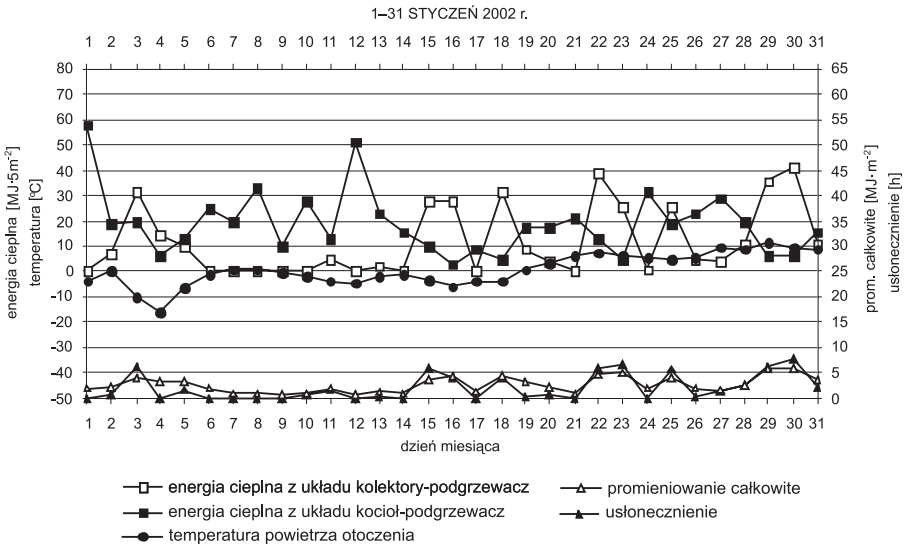
Data	Energia kolektory – podgrzew.	Energia kocioł – podgrzew.	Σ E	Procentowy udział E_{KOL}	Temp. średnia miesięczna	Usłonecznienie	Prom. całkowite
	E_{KOL} [MJ·(m^2 ·pow.kol.)$^{-1}$]	E_{KOT} [MJ·(m^2 ·pow.kol.)$^{-1}$]	[MJ·(m^2 ·pow. kol.)$^{-1}$]	[%]	[ºC]	[h]	[MJ·m^{-2}]
Lis.-01	59,8	94,2	154,0	38,831	3,66	48,3	87,05
Gru.-01	21,8	163,6	185,4	11,758	-1,50	17,3	52,50
Σ	**81,6**	**257,8**	**139,4**		**1,04**	**65,6**	**139,55**
Sty.-02	74,2	117,6	191,8	38,686	0,79	66,4	84,31
Luty-02	109,0	67,8	176,8	61,652	5,00	91,9	140,05
Mar.-02	176,2	56,4	232,6	75,752	5,55	132,6	274,90
Kwi.-02	202,0	24,6	226,6	89,144	8,98	153,8	394,88
Maj-02	232,8	2,0	234,8	99,148	17,40	259,6	624,73
Cze.-02	205,4	5,6	211,0	97,346	18,49	227,5	603,65
Lip.-02	200,4	7,2	207,6	96,532	20,52	221,2	592,04
Sie.-02	212,4	5,6	218,0	97,431	20,85	239,6	521,43
Wrz.-02	175,4	29,8	205,2	85,478	13,52	148,8	326,79
Paź.-02	85,0	86,2	171,2	49,650	8,22	54,3	166,06
Lis.-02	61,8	107,6	169,4	36,482	5,23	37,0	84,34
Gru-02	34,6	157,8	192,4	17,983	-2,99	16,4	55,16
Σ	**1769,2**	**668,2**	**2437,4**	**72,586**	**10,16**	**1649,1**	**3868,34**
Sty.-03	42,6	159,8	202,4	21,047	-1,51	27,6	67,10
Luty-03	136,8	77,8	214,6	63,747	-3,17	96,5	164,63
Mar.-03	222,0	45,4	267,4	83,022	3,68	149,3	311,82
Kwi.-03	236,4	22,4	258,8	91,345	8,28	195,3	452,78
Maj-03	249,8	7,2	257,0	97,198	16,04	255,0	638,12
Cze.-03	199,6	3,0	202,6	98,519	19,67	305,9	728,54
Lip.-03	201,0	7,8	208,8	96,264	19,87	194,7	560,88
Sie.-03	241,4	1,0	242,4	99,587	20,44	301,8	605,84
Wrz.-03	214,2	16,0	230,2	93,050	14,20	188,0	379,32
Paź.-03	122,4	73,0	195,4	62,641	5,96	96,6	185,42
Lis.-03	85,6	91,0	176,6	48,471	5,72	75,8	100,74
Gru.-03	60,4	129,4	189,8	31,823	1,93	65,3	63,59
Σ	**2012,2**	**633,8**	**2646,0**	**76,047**	**9,36**	**1951,8**	**4258,78**

Energia promieniowania całkowitego otrzymana w 2003 r. od października do marca stanowiła tylko 21,0% sumy rocznej. Dodatkowo odbiór i tak niewielkiej ilości energii, przypadającej na okres zimnych pór roku, obniżają występujące podczas tych pór roku silniejsze wiatry i niższe temperatury powietrza otoczenia. W roku 2003 wystąpił wzrost ilości godzin promieniowania całkowitego o 9,17% w stosunku do roku 2002.

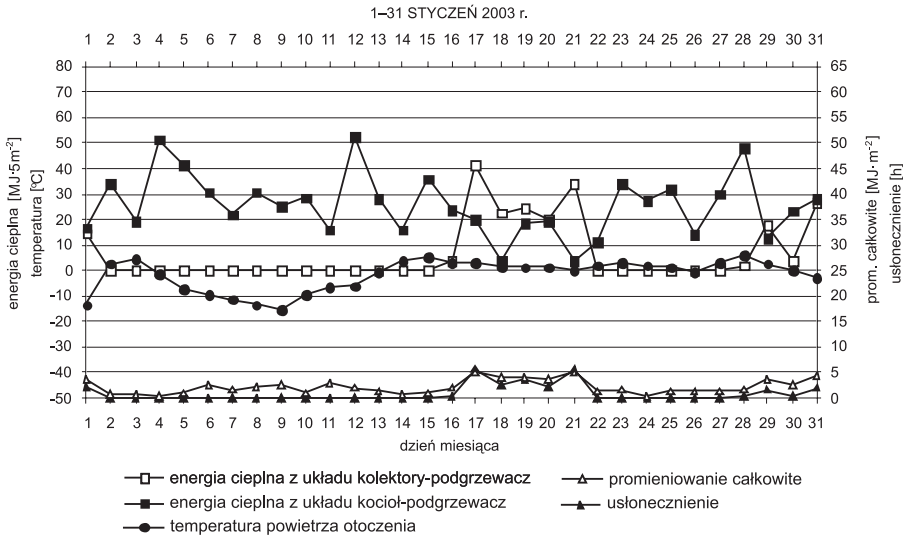
Na wykresach od 37 do 60 przedstawiony został miesięczny przebieg pracy instalacji słonecznej z danymi meteorologicznymi uzyskanymi z Obserwatorium Wrocław-Swojec. Są to dobowe sumy usłonecznienia, promieniowania całkowitego i temperatury powietrza (wartość średnia dobowa) oraz wartości energii cieplnej pozyskanej przez kolektory słoneczne i uzupełnionej przez kocioł.

Przedstawienie przebiegu warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym pozwala na ocenę zasobów energii słonecznej i wpływu tych warunków meteorologicznych na przebieg pozyskiwanej energii słonecznej przez kolektory w poszczególnych okresach roku.

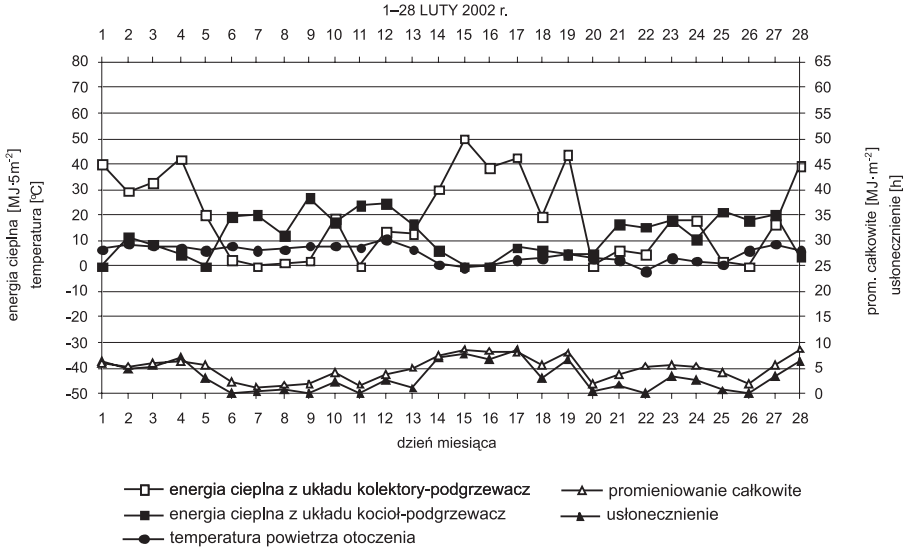
W pierwszym kwartale roku (styczeń, luty, marzec), czyli w miesięcach zimowych kolektory słoneczne pozyskały 20,31% (2002 r.) i 19,95% (2003 r.) energii cieplnej w stosunku do sumy rocznej pozyskanej przez kolektory energii cieplnej. W tym okresie kolektory słoneczne przez 16 dni (2002 r.) i 30 dni (2003 r.) nie pracowały, ponieważ warunki meteorologiczne były niesprzyjające. Natomiast kocioł nie musiał uzupełniać energii cieplnej przez 14 dni (2002 r.) i 23 dni (2003 r.), gdyż wystąpiły wystarczające warunki meteorologiczne na pokrycie zapotrzebowania energetycznego do podgrzania wody przez kolektory. Pokrycie zapotrzebowania na energię cieplną przez instalację słoneczną w tym okresie było najmniejsze w styczniu 2003 r. (21,0%), a największe w marcu 2003 r. (83,0%). W tym okresie 54 dni (2002 r.) i 48 dni (2003 r.) charakteryzowały się ilością godzin usłonecznienia przekraczającą 1 godzinę, w tym 34 dni (2002 r.) i 33 dni (2003 r.) przekroczyły 4 godziny usłonecznienia. 8 godzin usłonecznienia przekroczyło 7 dni (2002 r.) i 9 dni (2003 r.). Liczba dni o całkowitym zachmurzeniu dla pierwszego kwartału roku wyniosła odpowiednio 22 (2002 r.) i 31 (2003 r.). W styczniu odbiór energii cieplnej kształtował się na niskim poziomie poniżej 39% pokrycia zapotrzebowania. Natomiast w lutym i marcu odbiór energii cieplnej kształtował się już na poziomie ponad 61% zapotrzebowania. Styczeń charakteryzuje się niewielką liczbą godzin usłonecznienia i najniższymi temperaturami powietrza. Niezłym już warunkom słonecznym w lutym i marcu towarzyszą jednak niskie zimowe temperatury powietrza oraz najwyższe w ciągu całego roku prędkości wiatru. Odbiór energii cieplnej w tych zimowych miesiącach może zakłócić także zalegający na kolektorach śnieg i zaszronienie ich powierzchni. Rozpatrywany okres pierwszego kwartału roku charakteryzuje się średnimi warunkami do pozyskiwania energii cieplnej przez kolektory słoneczne.



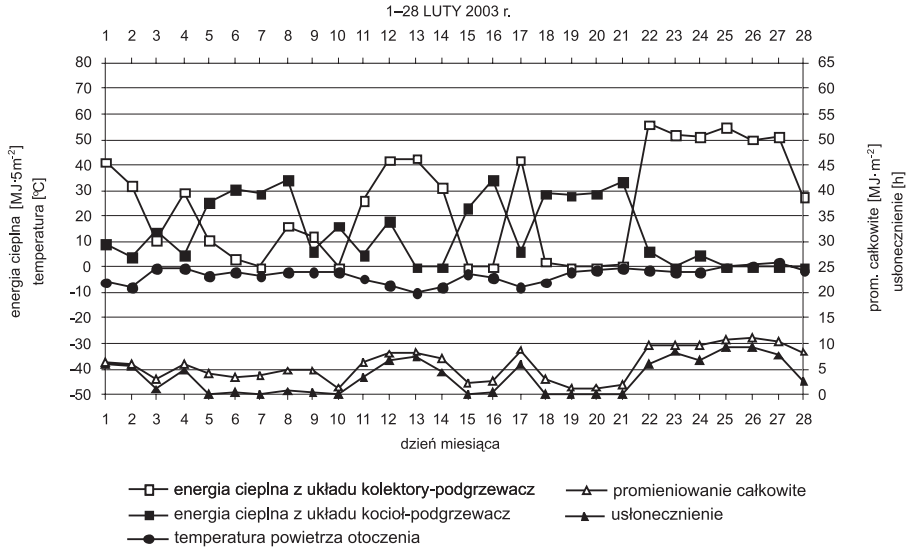
Rys. 37. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w styczniu 2002 r.



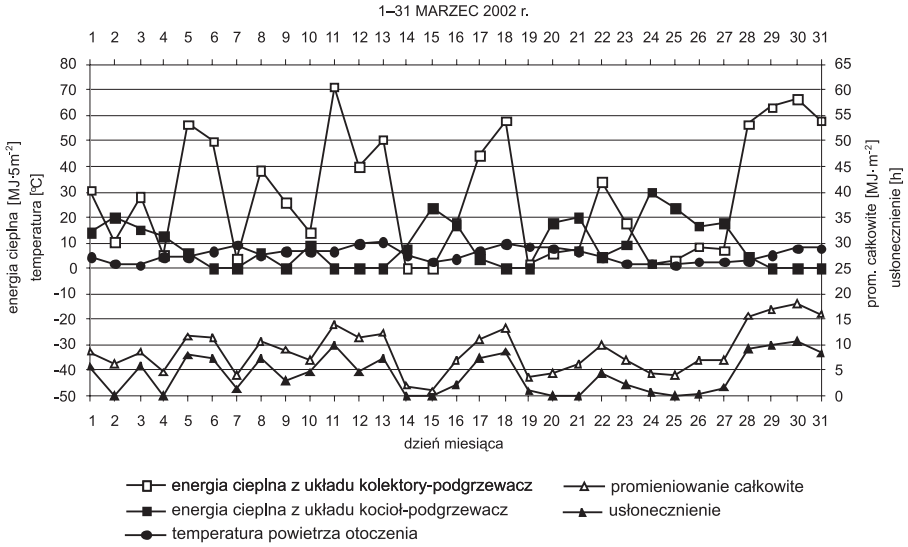
Rys. 38. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w styczniu 2003 r.



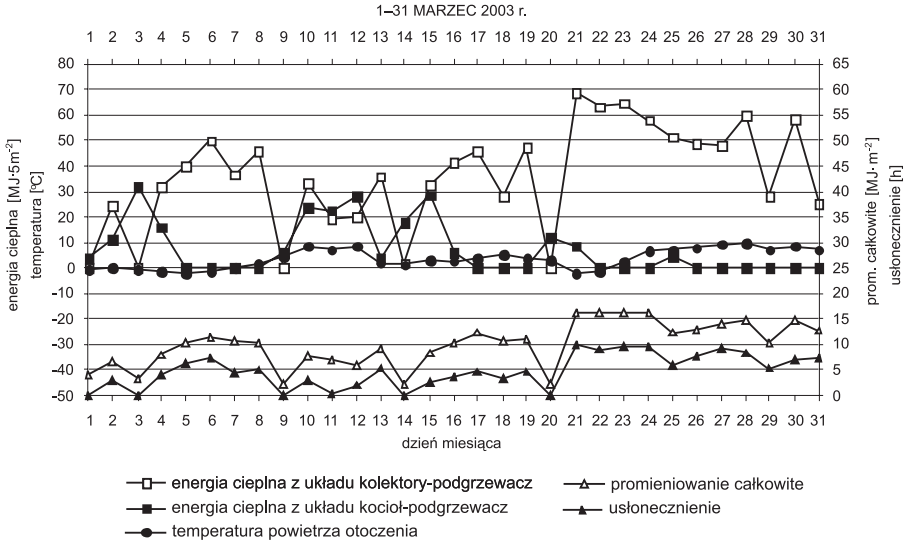
Rys. 39. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w lutym 2002 r.



Rys. 40. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w lutym 2003 r.



Rys. 41. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w marcu 2002 r.

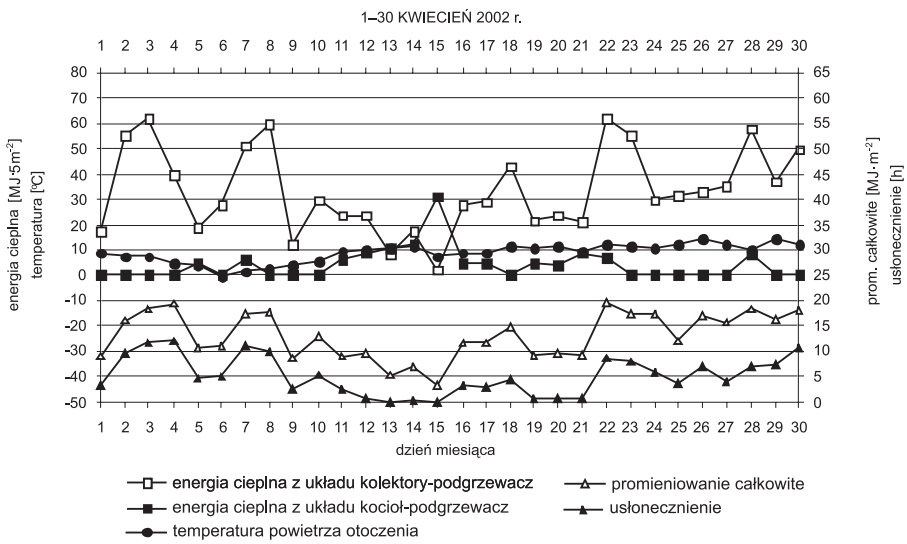


Rys. 42. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w marcu 2003 r.

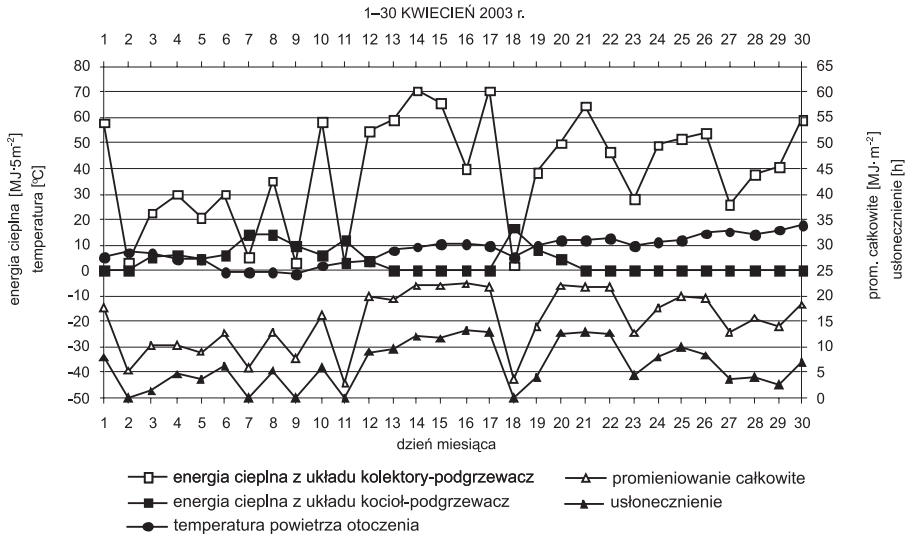
W kolejnych trzech miesiącach wiosennych – kwietniu, maju i czerwcu kolektory słoneczne pozyskały 36,19% (2002 r.) i 34,08% (2003 r.) energii cieplnej w stosunku do sumy rocznej energii cieplnej pozyskanej przez kolektory. W tym okresie w latach 2002 i 2003 tylko podczas 1 dnia (2002 r.) kolektory słoneczne nie pracowały, ponieważ nie wystąpi-

ły sprzyjające warunki meteorologiczne do pozyskiwania przez kolektory energii cieplnej. Kocioł przez 71 dni (2002 r.) i także 71 dni (2003 r.) nie musiał uzupełniać energii cieplnej, ponieważ wystąpiły odpowiednie warunki meteorologiczne do 100% pokrycia zapotrzebowania energetycznego do podgrzania wody przez kolektory. Najmniejsze pokrycie zapotrzebowania na energię cieplną przez instalację słoneczną w tym okresie zanotowano w kwietniu 2002 r. (89,1%) a największe w sierpniu 2003 r. (99,6%). W rozpatrywanym okresie drugiego kwartału roku 78 dni (2002 r.) i 83 dni (2003 r.) przekroczyły wartość progową 1 godziny usłonecznienia, w tym 63 dni (2002 r.) i 68 dni (2003 r.) przekroczyło 4 godziny usłonecznienia. Natomiast granica 8 godzin usłonecznienia została przekroczona dla 41 dni (2002 r.) i 49 dni (2003 r.). W drugim kwartale roku wystąpiło tylko 5 dni (2002 r.) i także 5 dni (2003 r.) o całkowitym zachmurzeniu. Począwszy od kwietnia temperatury powietrza są już znacznie wyższe niż dla pierwszego kwartału roku. Warunki klimatyczne panujące w tym okresie sprzyjają już intensywnemu pozyskiwaniu energii słonecznej przez kolektory (pokrycie zapotrzebowania przez kolektory na energię cieplną wyniosło w drugim kwartale 95,21% w 2002 r. i 95,46% w 2003 r.). W maju i czerwcu występują już dość znaczne nadwyżki energii słonecznej, którą mogłyby przejąć kolektory słoneczne. Podsumowując powyższe rozważania, należy stwierdzić, że w drugim kwartale roku kolektory słoneczne powinny być intensywnie eksploatowane, gdyż występują bardzo dobre warunki meteorologiczne.

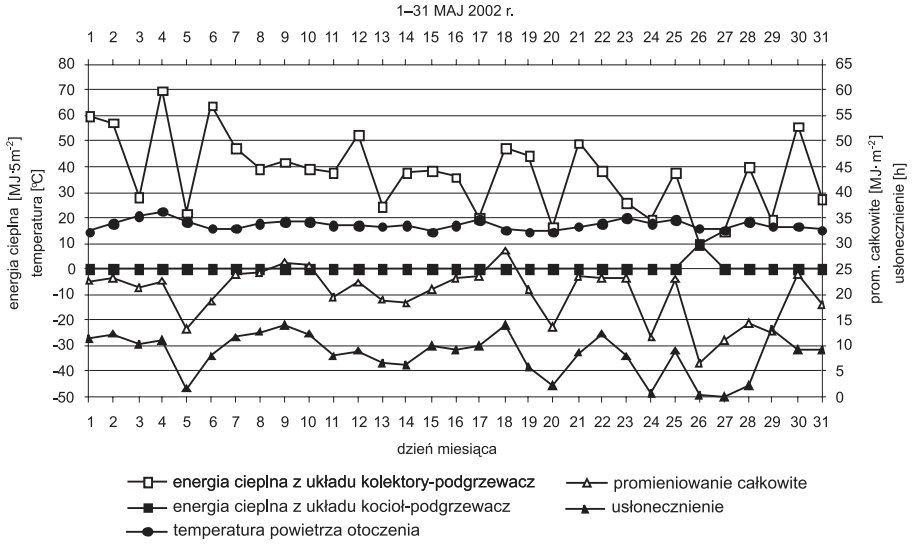
Rysunek 45 obrazuje wyniki badań pracy instalacji badawczej zestawione z przebiegiem warunków meteorologicznych w miesiącu o największej efektywności pozyskiwania energii cieplnej przez kolektory słoneczne w roku 2002. W maju wystąpił tylko jeden dzień o całkowitym zachmurzeniu. liczba godzin usłonecznienia w maju wyniosła aż 259,6 godzin. Natomiast ilość promieniowania całkowitego zmierzona w maju wyniosła 624,73 $MJ \cdot m^{-2}$. Sumy dzienne promieniowania całkowitego nie spadały poniżej 10 $MJ \cdot m^{-2}$ z wyjątkiem dnia 26 maja, kiedy to wartość promieniowania całkowitego osiągnęła tylko 6,7 $MJ \cdot m^{-2}$.



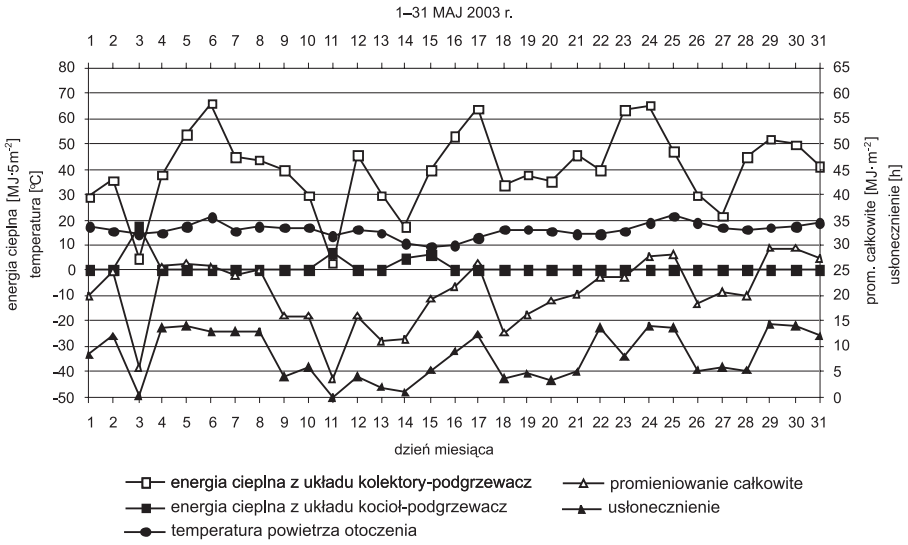
Rys. 43. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w kwietniu 2002 r.



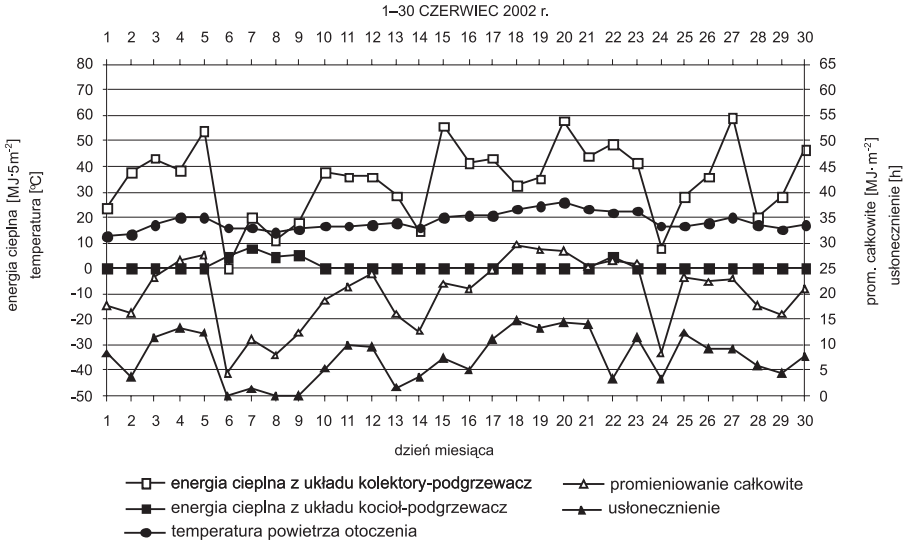
Rys. 44. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w kwietniu 2003 r.



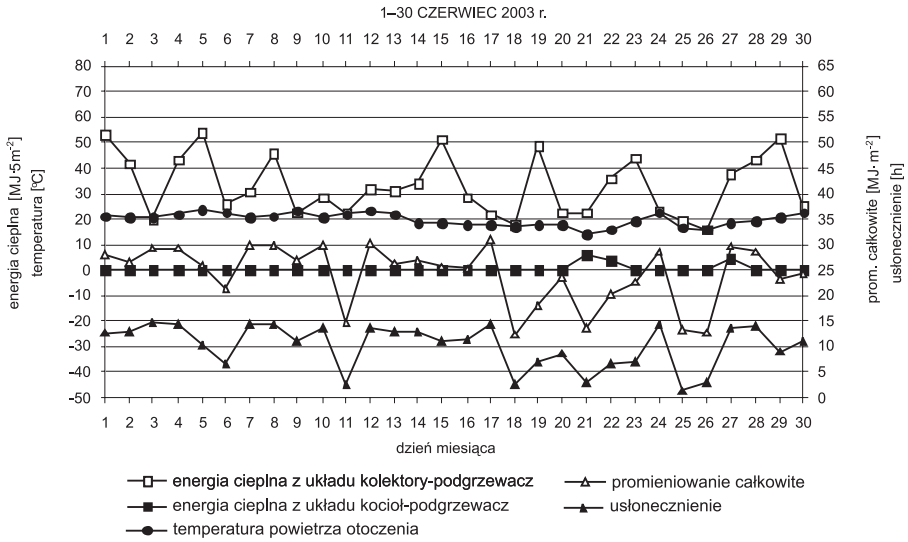
Rys. 45. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w maju 2002 r.



Rys. 46. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w maju 2003 r.



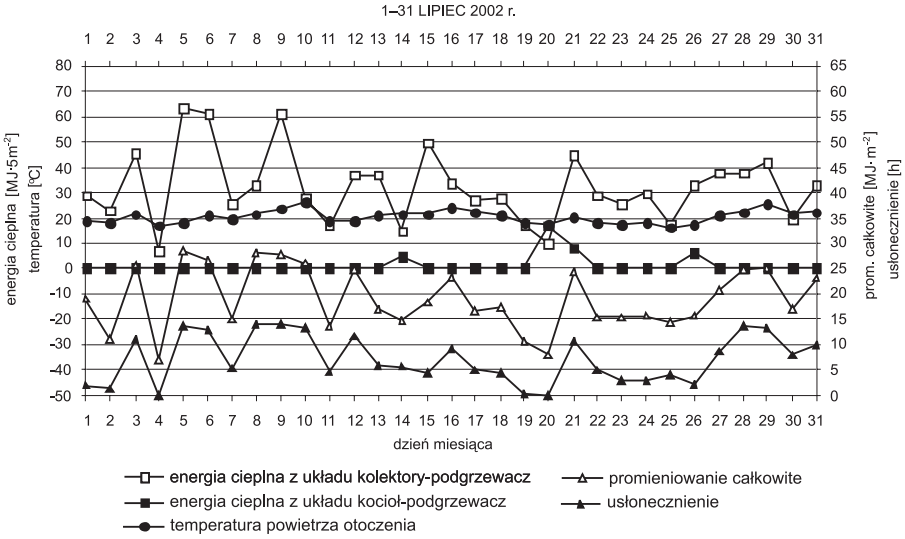
Rys. 47. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w czerwcu 2002 r.



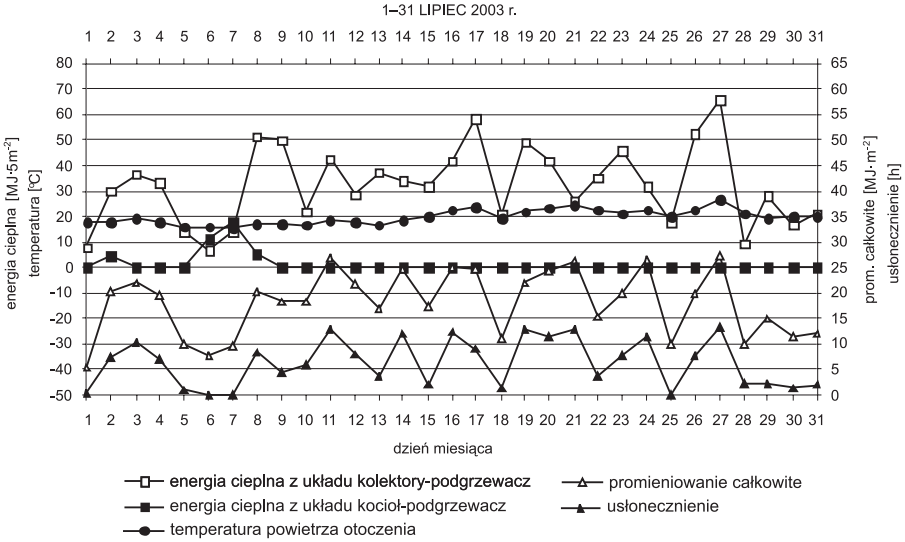
Rys. 48. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w czerwcu 2003 r.

W okresie letnim (lipiec, sierpień i wrzesień) kolektory słoneczne pozyskały 33,25% (2002 r.) i 32,63% (2003 r.) energii cieplnej w stosunku do ilości energii cieplnej przejętej przez kolektory w skali roku. W trzecim kwartale roku kolektory słoneczne przez 3 dni (2002 r.) i 1 dzień (2003 r.) nie pozyskiwały energii cieplnej, ponieważ warunki meteorologiczne były niesprzyjające. Kocioł nie uzupełniał energii cieplnej przez 72 dni (2002 r.) i 78 dni (2003 r.), gdyż warunki meteorologiczne były sprzyjające do 100% pokrycia przez kolektory słoneczne zapotrzebowania na energię cieplną do podgrzania wody. Pokrycie zapotrzebowania na energię cieplną przez instalację słoneczną w tych trzech miesięcach było najmniejsze we wrześniu 2002 r. (85,5%) a największe w sierpniu 2003 r. (99,6%). Podczas tego okresu 79 dni (2002 r.) i 84 dni (2003 r.) charakteryzowały się ilością godzin usłonecznienia przekraczającą 1 godzinę, w tym 61 dni (2002 r.) i 65 dni (2003 r.) przekroczyło 4 godziny usłonecznienia oraz 40 dni (2002 r.) i 47 dni (2003 r.) przekroczyło 8 godzin usłonecznienia. 7 dni (2002 r.) i 5 dni (2003 r.) charakteryzowało się całkowitym zachmurzeniem nieba. W trzecim kwartale roku występują najwyższe temperatury powietrza. Okres letni (lipiec, sierpień i wrzesień) podobnie jak okres wiosenny (kwiecień, maj i czerwiec) cechują bardzo dobre warunki meteorologiczne, które sprzyjają efektywnemu pozyskiwaniu energii słonecznej przez kolektory (pokrycie zapotrzebowania przez kolektory na energię cieplną wyniosło w trzecim kwartale 93,25% w 2002 r. i aż 97,48% w 2003 r.). W lipcu i sierpniu, podobnie jak w maju i czerwcu, występują dość duże nadwyżki energii słonecznej, które nie są wykorzystywane.

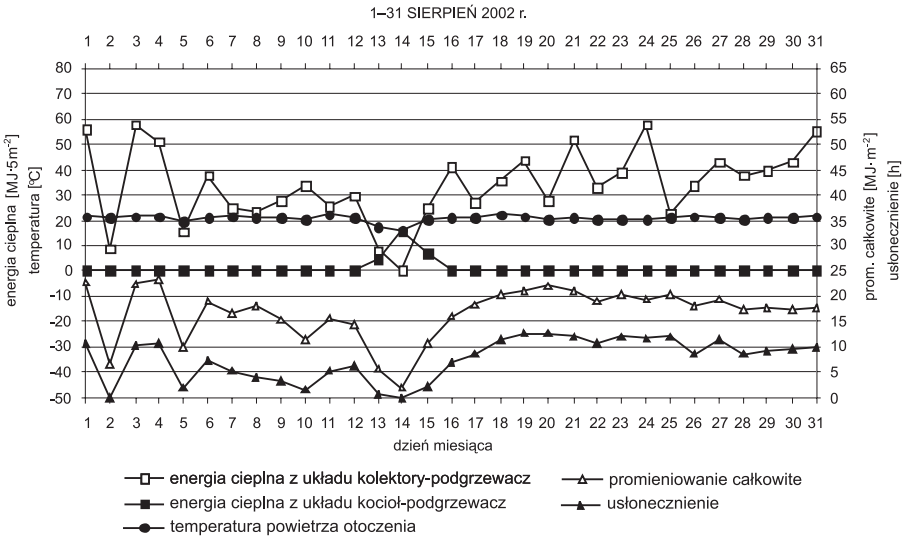
Na rysunku 52 przedstawiono wyniki badań pracy instalacji badawczej zestawione z przebiegiem warunków meteorologicznych w miesiącu o największej efektywności pozyskiwania energii cieplnej przez kolektory słoneczne w roku 2003. W sierpniu nie wystąpił ani jeden dzień o całkowitym zachmurzeniu. Liczba godzin usłonecznienia w sierpniu wyniosła aż 301,8 godzin. Natomiast ilość promieniowania całkowitego zmierzona w sierpniu osiągnęła 605,84 MJ·m^{-2}. Sumy dzienne promieniowania całkowitego nie spadały poniżej 8,5 MJ·m^{-2}.



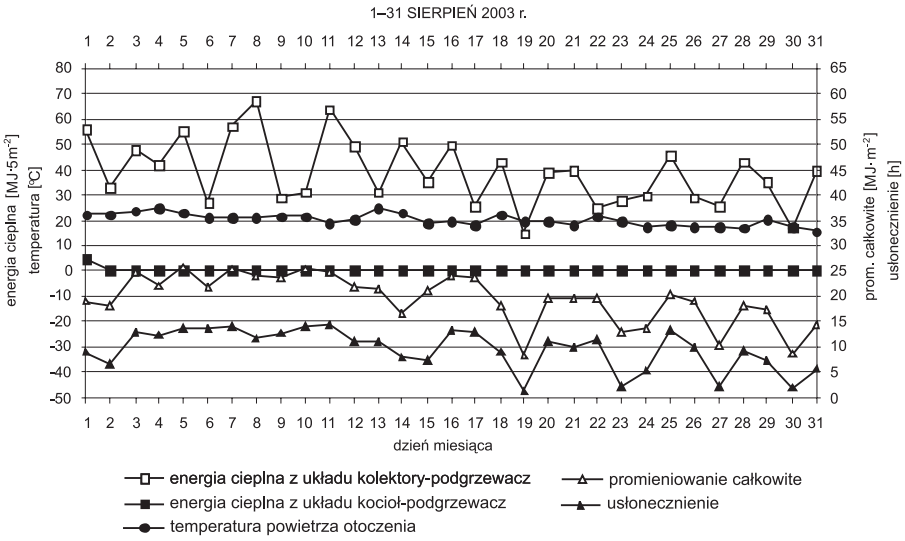
Rys. 49. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w lipcu 2002 r.



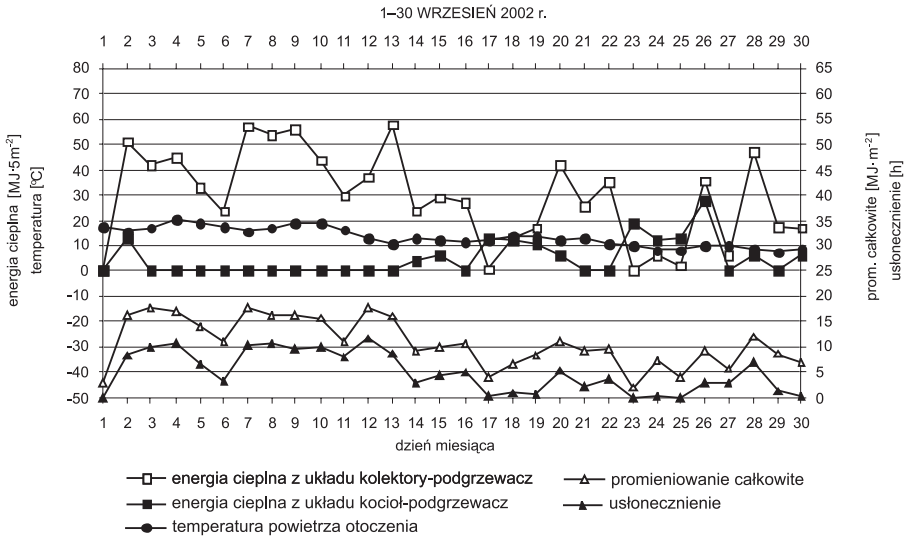
Rys. 50. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w lipcu 2003 r.



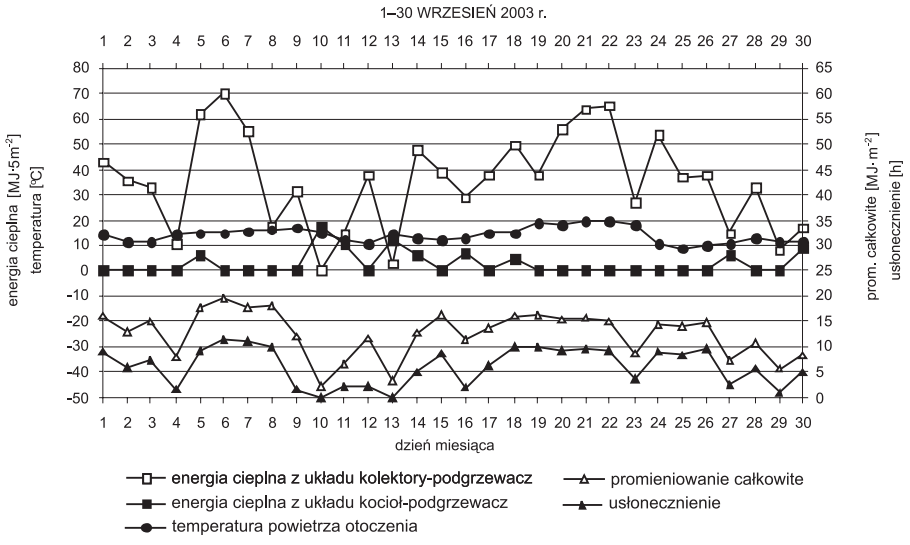
Rys. 51. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w sierpniu 2002 r.



Rys. 52. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w sierpniu 2003 r.

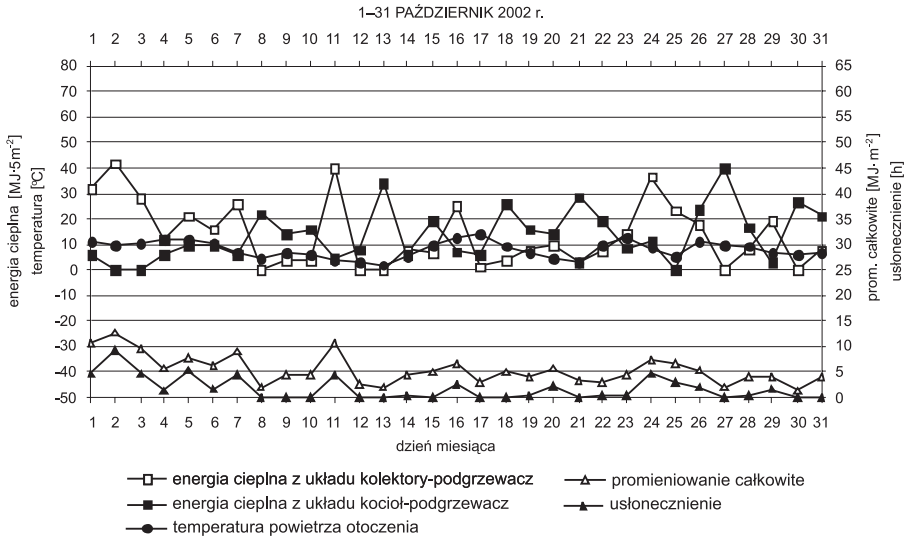


Rys. 53. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym we wrześniu 2002 r.

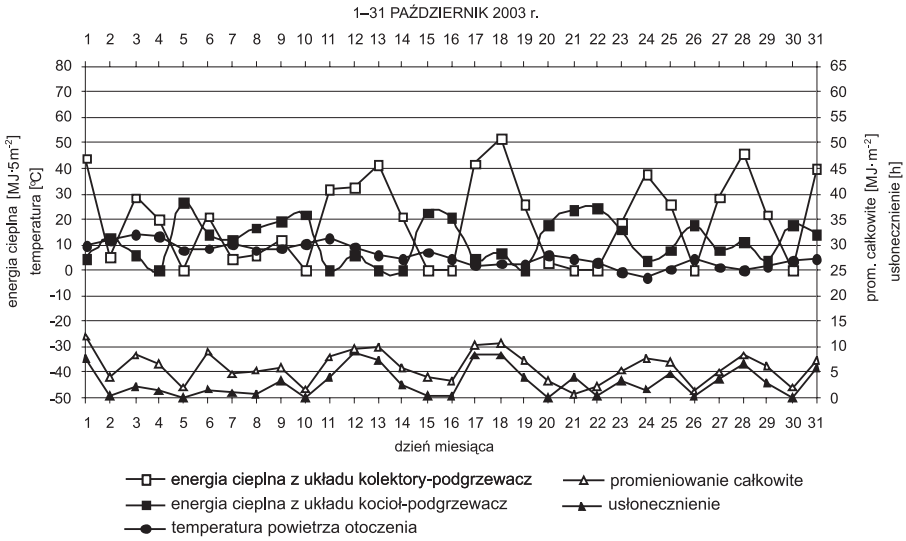


Rys. 54. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym we wrześniu 2003 r.

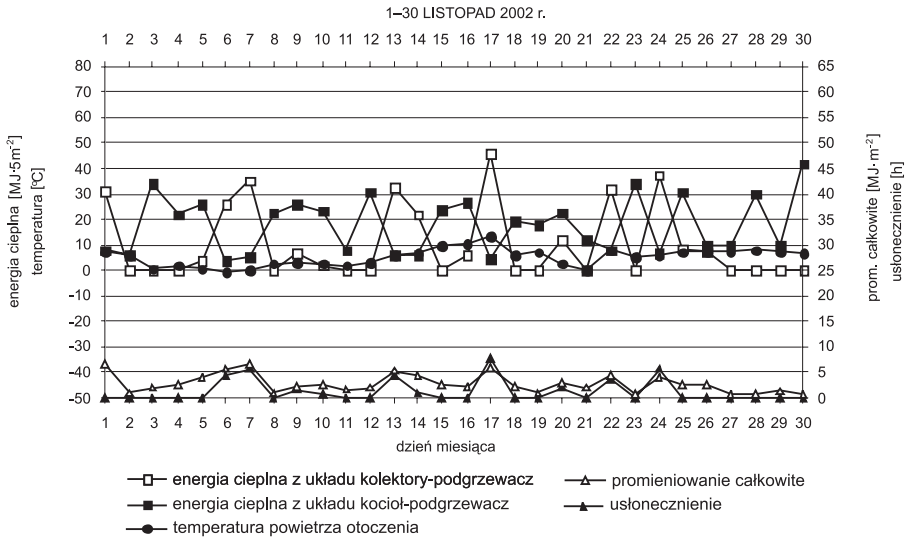
W ostatnim kwartale roku, czyli październiku, listopadzie i grudniu kolektory słoneczne pozyskały 10,25% (2002 r.) i 13,34% (2003 r.) energii cieplnej w stosunku do ilości energii cieplnej przejętej przez kolektory w skali roku. W tym okresie kolektory słoneczne przez 37 dni (2002 r.) i 33 dni (2003 r.) nie pozyskiwały energii cieplnej, ponieważ nie wystąpiły sprzyjające warunki meteorologiczne do pozyskiwania przez kolektory energii cieplnej. Kocioł przez 3 dni (2002 r.) i 9 dni (2003 r.) nie musiał uzupełniać energii cieplnej, ponieważ wystąpiły warunki meteorologiczne odpowiednie do pokrycia całego zapotrzebowania energetycznego do podgrzania wody przez kolektory. Najmniejsze pokrycie zapotrzebowania na energię cieplną przez instalację słoneczną dla czwartego kwartału roku zanotowano w grudniu 2002 r. (18,0%) a największe w październiku 2003 r. (62,6%). W rozpatrywanym okresie trzech miesięcy (październik, listopad i grudzień) 29 dni (2002 r.) i 54 dni (2003 r.) przekroczyło wartość progową 1 godziny usłonecznienia, w tym 13 dni (2002 r.) i 26 dni (2003 r.) przekroczyło 4 godziny usłonecznienia. Próg 8 godzin usłonecznienia przekroczył tylko 1 dzień (2002 r.) i 3 dni (2003 r.). W czwartym kwartale roku wystąpiło aż 52 dni (2002 r.) i 15 dni (2003 r.) o całkowitym zachmurzeniu. W skali roku grudzień jest miesiącem o najmniejszej efektywności pozyskiwania energii cieplnej. Miesiąc ten charakteryzują niskie temperatury powietrza i najniższa w roku liczba godzin usłonecznienia. Październik i listopad charakteryzuje się wyższymi temperaturami powietrza niż miesiące z pierwszego kwartału roku, lecz mniejszą liczbą godzin usłonecznienia. Mała liczba godzin usłonecznienia w tych dwóch miesięcach i duże prędkości wiatru niekorzystnie wpływają na pozyskiwanie energii słonecznej przez kolektory. Podsumowując powyższe rozważania, należy stwierdzić, że rozpatrywany okres w skali roku jest niekorzystny do podgrzewania wody przez instalację słoneczną.



Rys. 55. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w październiku 2002 r.



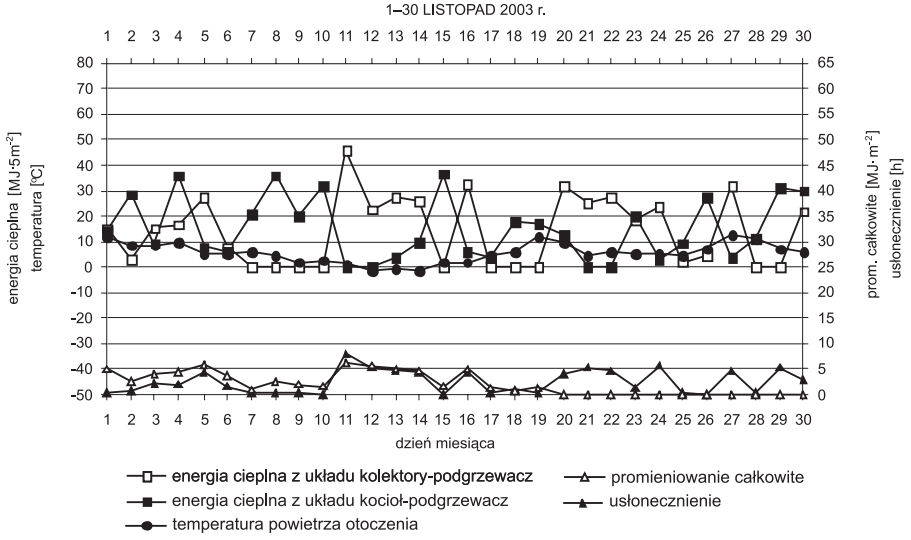
Rys. 56. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w październiku 2003 r.



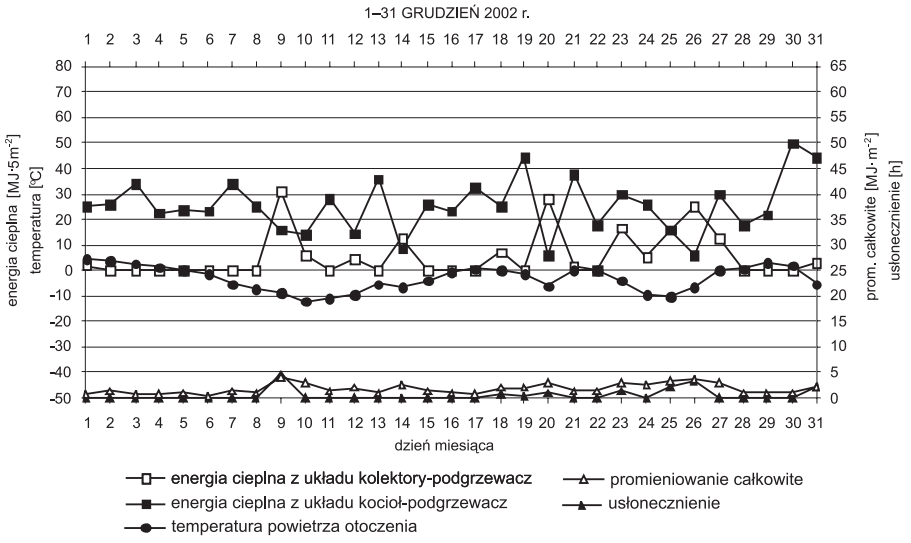
Rys. 57. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w listopadzie 2002 r.

Rysunek 59 obrazuje wyniki badań pracy instalacji badawczej zestawione z przebiegiem warunków meteorologicznych dla miesiąca o najmniejszej efektywności pozyskiwania energii cieplnej przez kolektory słoneczne w roku 2002. W grudniu 2002 r. wystąpiły aż dwadzieścia trzy dni o całkowitym zachmurzeniu. Liczba godzin usłonecznienia w grudniu tego roku wyniosła tylko 16,4 godziny i było to zaledwie 6,3% ilości usłonecznienia zmierzonego

w maju 2002 r. Natomiast ilość promieniowania całkowitego zmierzona w grudniu 2002 r. wyniosła 55,16 MJ·m^{-2}, co stanowiło tylko 8,8% promieniowania całkowitego, które wystąpiło w maju 2002 r. Sumy dzienne promieniowania całkowitego nie przekroczyły 4 MJ·m^{-2}.

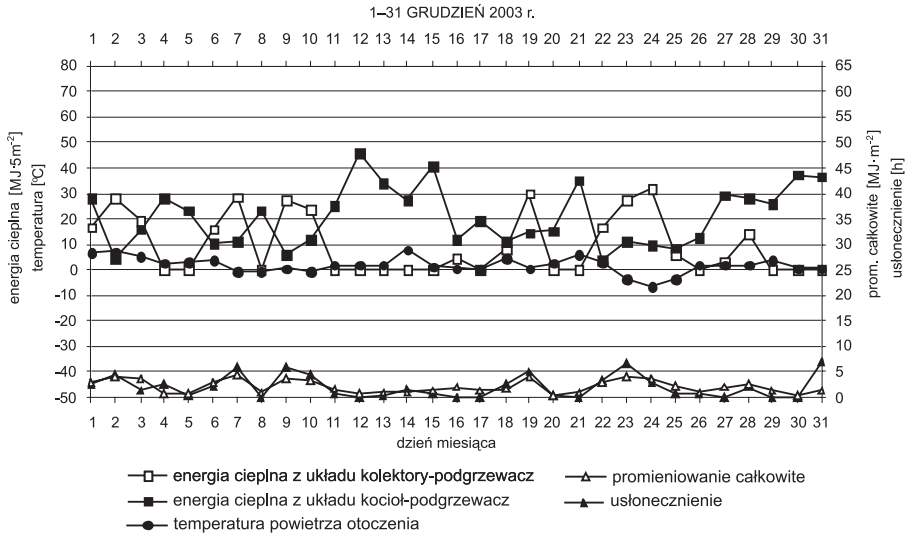


Rys. 58. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w listopadzie 2003 r.



Rys. 59. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w grudniu 2002 r.

Rysunek 60 przedstawia wyniki badań pracy instalacji badawczej zestawione z przebiegiem warunków meteorologicznych w miesiącu o najmniejszej efektywności pozyskiwania energii cieplnej przez kolektory słoneczne w roku 2003. W grudniu 2003 r. wystąpiło osiem dni o całkowitym zachmurzeniu. Liczba godzin usłonecznienia w grudniu tego roku wyniosła 65,4 godziny i było to 21,3% ilości usłonecznienia zmierzonego w czerwcu 2003 r. Natomiast ilość promieniowania całkowitego zmierzona w grudniu 2003 r. wyniosła 63,59 $MJ \cdot m^{-2}$, co stanowiło tylko 8,7% promieniowania całkowitego, które wystąpiło w czerwcu 2003 r. Sumy dzienne promieniowania całkowitego nie przekroczyły 4 $MJ \cdot m^{-2}$ z wyjątkiem dnia 7 grudnia, kiedy suma dzienna wyniosła 4,22 $MJ \cdot m^{-2}$.



Rys. 60. Przebieg warunków meteorologicznych w zestawieniu z pomiarami instalacji słonecznej pracującej na stanowisku badawczym w grudniu 2003 r.

5.3. Wpływ kąta nachylenia połaci i położenia budynku na efektywność pozyskiwania energii cieplnej przez kolektory słoneczne

Przy projektowaniu instalacji słonecznej dość ważnym zagadnieniem, wpływającym na wydajność całego układu, jest optymalizacja nachylenia płaszczyzny kolektora w osi poziomej i pionowej względem Słońca. Przy założeniu, że chcemy uzyskać maksymalną ilość energii słonecznej, która dociera do kolektora, musimy korygować położenie absorbera względem Słońca w taki sposób, aby promienie słoneczne padały cały czas prostopadle do jego powierzchni.

W grudniu występują najkrótsze dni, podczas których droga Słońca przebyta nad horyzontem trwa około ośmiu godzin. Minimalną wysokość nad horyzontem Słońce osiąga 22 grudnia i wynosi ona 15,5º. Natomiast 21 czerwca Słońce znajduje się najwyżej nad horyzontem i promienie słoneczne padają na powierzchnię poziomą pod kątem 62,4º. W czerwcu

droga Słońca przebyta nad horyzontem trwa ponad szesnaście godzin. Kolektor nieruchomy, ustawiony w kierunku południowym pod optymalnym kątem, może uzyskać tylko 76% energii względem absorbera nastawialnego w osi pionowej i poziomej. Natomiast w miesięcu letnich, kiedy występują najdłuższe dni w roku, ilość energii, którą można uzyskać z nieruchomego absorbera, jest mniejsza aż o 60% od tej, jaką by można uzyskać za pomocą kolektora nastawialnego w osi poziomej i pionowej.

W instalacjach słonecznych przydomowych nie wykorzystuje się przeważnie mechanizmów korygujących położenie kolektorów względem Słońca, ponieważ jest to nieopłacalne. Dodatkowo konstrukcje budynków, na których projektuje się montaż kolektorów, przeważnie wykluczają możliwość zamontowania absorberów nastawialnych.

Przy wykorzystaniu programu „ESOP" w wersji 1.0 do modelowania pracy instalacji słonecznych przeprowadzono symulacje pracy instalacji dla kilku wariantów użytkowych. W tabeli 10 porównane zostały wyniki badań instalacji słonecznej w latach 2001, 2002, 2003 z wynikami przeprowadzonej symulacji. Do przeprowadzenia symulacji zostały przyjęte i wprowadzone dane do programu, które jak najbardziej odpowiadały parametrom działającej instalacji słonecznej na stanowisku badawczym. Poniżej przedstawiono warunki i parametry, które zostały przyjęte do przeprowadzenia symulacji:

- azymut kolektorów względem południa 11,5º skierowania w stronę wschodnią, kąt nachylenia kolektorów względem powierzchni poziomej 42º;
- położenie – 51º szerokości geograficznej północnej, 110 m n.p.m.;
- średnia temperatura roczna 9,6ºC, średnie promieniowanie całkowite roczne 1005 $kWh \cdot m^{-2}$;
- elementy instalacji słonecznej identyczne i o tych samych parametrach jak na stanowisku badawczym;
- niedobór energii cieplnej uzupełnia kocioł gazowy VITOGAS 100;
- rozbiór wody z podgrzewacza codziennie przez cały okres roczny;
- przepływ czynnika transportującego energię cieplną 50 $l \cdot h^{-1}$ na 1 m^2 powierzchni kolektora;
- temperatura wody zimnej doprowadzanej do podgrzewacza od 8ºC (okres zimowy) do 14ºC (okres letni);
- średnia roczna temperatury powietrza w kotłowni 20ºC;
- maksymalna temperatura wody w podgrzewaczu 65ºC;
- szacunkowy rozbiór wody w ciągu dnia:

Tabela 8

Szacunkowy dzienny rozbiór wody

Godzina	7–9	15–17	20–22
%	12,5	37,5	50

- szacunkowy rozbiór wody w ciągu roku w rozbiciu na miesiące (przyjęty rozbiór dobowy 260 l):

Tabela 9

Szacunkowy miesięczny rozbiór wody

	Miesiąc											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XII	XII
%	76,92	76,92	76,92	84,62	92,31	100,00	100,00	92,31	84,62	76,92	76,92	76,92

- brak elementów zacieniających kolektory słoneczne podczas przesuwania się tarczy słonecznej po horyzoncie;
- górna krawędź kolektorów znajduje się na wysokości 5,3 m natomiast dolna 3,7 m nad powierzchnią terenu.

W roku 2002 pokrycie energii cieplnej do podgrzewania wody użytkowej przez energię słoneczną wyniosło 72,6% przy wykorzystaniu 2457,22 kWh tej energii. Natomiast w roku 2003 pokrycie energii cieplnej do podgrzewania wody użytkowej przez energię słoneczną wyniosło 76,0% przy wykorzystaniu 2794,72 kWh energii słonecznej.

Z przeprowadzonej symulacji otrzymano wynik 62,5% pokrycia energii cieplnej do podgrzewania wody przez energię słoneczną przy wykorzystaniu 2107,4 kWh energii Słońca. Jak widać, procentowy udział energii cieplnej otrzymanej z energii słonecznej na stanowisku badawczym jest większy o 10,1% w roku 2002 i większy o 13,5% w roku 2003 od przeprowadzonej symulacji programem do modelowania pracy układów instalacji słonecznych „ESOP".

W maju, czerwcu, lipcu, sierpniu w latach 2002 i 2003 udział energii cieplnej pozyskanej przez kolektory słoneczne podczas badań wyniósł od min. 96,3 do mak. 99,6%. W tych samych miesięcach dla przeprowadzonej symulacji udział energii cieplnej pozyskanej przez kolektory słoneczne wyniósł od min. 77,8 do mak. 89,9%. W maju, czerwcu, lipcu, sierpniu występowały podczas badań dość duże nadwyżki energii. Po kilku godzinach pozyskiwania energii cieplnej przez kolektory następowało zatrzymanie pracy instalacji, ponieważ podgrzewacz zmagazynował żądaną ilość ciepłej wody o żądanej temperaturze. Podczas tych miesięcy temperatura wody w górnej części podgrzewacza dochodziła często do 65ºC. Przy dziennym rozbiorze pokazanym w tabeli 8 dla danych wyjściowych do symulacji, w godzinach od 7 do 17 następował rozbiór wody z podgrzewacza w około 50% rozbioru dziennego. Czyli, jeżeli z podgrzewacza pobierane było np. 85 l wody o temperaturze około 60ºC do godziny 17, to zimna woda, która została wprowadzona do podgrzewacza, była jeszcze podgrzewana przy sprzyjających warunkach pogodowych przez instalację słoneczną. Po wybraniu dalszych 85 l ciepłej wody po godzinie 17, kiedy to nie było już możliwości uzupełnienia energii cieplnej przez kolektory, ponieważ promienie słoneczne nie padały już na ich powierzchnie, w podgrzewaczu pozostawało jeszcze 215 l ciepłej wody. Ta ilość zmagazynowanej ciepłej wody wystarczała na pokrycie zapotrzebowania na ciepłą wodę kolejnego dnia, przy braku warunków sprzyjających pozyskiwaniu energii cieplnej przez kolektory i bez potrzeby uzupełniania energii cieplnej przez kocioł gazowy.

Zmiennymi, które mają decydujący wpływ na pozyskiwanie energii cieplnej przez kolektory słoneczne, są kąt nachylenia kolektorów względem powierzchni poziomej i ich skierowanie względem kierunku południowego.

W tabeli 11 przedstawiono wyniki przeprowadzonych symulacji pracy instalacji słonecznej. Podczas przeprowadzania symulacji wszystkie parametry były niezmienne poza azymutem kolektorów względem kierunku południowego. Azymut kolektorów względem południa przyjmowano od 90º do -90º z krokiem co 10º przy stałym kącie nachylenia kolektorów względem płaszczyzny poziomej wynoszącym 45º.

Tabela 10

Wyniki badań i symulacji pracy instalacji słonecznej w okresie rocznym

Azymut – 11,5° kąt nachylenia 42°		Sty.	Luty	Mar.	Kwi.	Maj	Cze.	Lip.	Sie.	Wrz.	Paź.	Lis.	Gru.	Σ rok
Stanowisko badawcze 2001 r.	E_{KOL} [kWh]	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	83,06	30,28	–
	E_{KOT} [kWh]	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	130,83	227,22	–
	Σ E_{KOL}+ E_{KOT} [kWh]	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	213,89	257,50	–
	% udział E_{KOL}	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	38,8	11,8	–
Stanowisko badawcze 2002 r.	E_{KOL} [kWh]	103,06	151,39	244,72	280,56	323,33	285,28	278,33	295,00	243,61	118,06	85,83	48,06	2457,22
	E_{KOT} [kWh]	163,33	94,17	78,33	34,17	2,78	7,78	10,00	7,78	41,39	119,72	149,44	219,17	928,06
	Σ E_{KOL}+ E_{KOT} [kWh]	266,39	245,56	323,05	314,73	326,11	293,06	288,33	302,78	285,00	237,78	235,27	267,23	3385,28
	% udział E_{KOL}	38,7	61,7	75,8	89,1	99,1	97,3	96,5	97,4	85,5	49,7	36,5	18,0	72,6
Stanowisko badawcze 2003 r.	E_{KOL} [kWh]	59,17	190,00	308,33	328,33	346,94	277,22	279,17	335,28	297,50	170,00	118,89	83,89	2794,72
	E_{KOT} [kWh]	221,94	108,06	63,06	31,11	10,00	4,17	10,83	1,39	22,22	101,39	126,39	179,72	880,28
	Σ E_{KOL}+ E_{KOT} [kWh]	281,11	298,06	371,39	359,44	356,94	281,39	290,00	336,67	319,72	271,39	245,28	263,61	3675,00
	% udział E_{KOL}	21,0	63,7	83,0	91,3	97,2	98,5	96,3	99,6	93,05	62,64	48,47	31,82	76,05
Symulacja	E_{KOL} [kWh]	60,4	98,3	171	229	248	252	290	261	221	164	72,8	39,9	2107,4
	E_{KOT} [kWh]	207	150	113	67,8	70,7	71,2	32,7	35,3	45,7	87,6	166	219	1266,0
	Σ E_{KOL}+ E_{KOT} [kWh]	267,4	248,3	284	296,8	318,7	323,2	322,7	296,3	266,7	251,6	238,8	258,9	3373,4
	% udział E_{KOL}	22,6	39,6	60,2	77,1	77,8	78,0	89,9	88,1	82,8	65,2	30,5	15,4	62,5

Tabela 11

Symulacja pracy instalacji słonecznej dla różnych wartości azymutu kolektorów

Nr sym. dla kąta 45^{o}		Azymut	Sty.	Luty	Mar.	Kwi.	Maj	Cze.	Lip.	Sie.	Wrz.	Paź.	Lis.	Gru.	∑ rok
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	E_{KOL} [kWh]	90	17,6	48,2	126	197	253	246	295	257	178	94,9	23,3	6,89	1742,89
	E_{KOT} [kWh]		248	197	147	89,8	63,5	71,5	25,1	36	76	146	216	250	1565,9
	% E_{KOL}		6,63	19,7	46,2	68,7	79,9	77,5	92,2	87,7	70,1	39,3	9,75	2,68	52,7
2	E_{KOL} [kWh]	80	25,6	57,7	137	208	256	248	294	260	190	109	32,1	12	1829,4
	E_{KOT} [kWh]		240	188	137	80,9	61,2	71,8	26,3	33,8	66,4	132	207	245	1489,4
	% E_{KOL}		9,64	23,5	50,2	72	80,7	77,6	91,8	88,5	74,1	45,2	13,4	4,65	55,1
3	E_{KOL} [kWh]	70	34	67,8	147	216	257	249	295	262	200	124	40,2	17,4	1909,4
	E_{KOT} [kWh]		232	178	130	74,4	60,7	72,4	26	32,2	59,8	119	200	240	1424,5
	% E_{KOL}		12,8	27,6	53	74,3	80,9	77,5	91,9	89,1	77	51	16,8	6,76	57,3
4	E_{KOL} [kWh]	60	42,2	76,8	154	221	257	250	294	264	206	137	49,5	22,9	1974,4
	E_{KOT} [kWh]		224	169	124	72,6	59,9	72,3	26,9	31,4	56	107	191	235	1369,1
	% E_{KOL}		15,8	31,2	55,4	75,2	81,1	77,6	91,6	89,4	78,6	56	20,6	8,89	59,1
5	E_{KOL} [kWh]	50	49,3	85,2	161	224	256	250	293	264	210	147	57,4	28,2	2025,1
	E_{KOT} [kWh]		218	162	119	69,3	61,6	72,7	27,9	31,2	52,4	98,9	182	229	1324
	% E_{KOL}		18,5	34,5	57,5	76,4	80,6	77,5	91,3	89,4	80	59,8	24	10,9	60,5
6	E_{KOL} [kWh]	40	56,2	91,9	166	229	252	250	292	264	213	155	64,9	33,2	2067,2
	E_{KOT} [kWh]		211	156	116	64,5	65,7	72	29	31,7	49	95	174	225	1288,9
	% E_{KOL}		21	37,1	59	78	79,3	77,6	91	89,3	81,3	62	27,1	12,9	61,6
7	E_{KOL} [kWh]	30	61	97,8	168	231	253	250	294	263	215	163	70,1	37,4	2103,3
	E_{KOT} [kWh]		206	151	114	63,2	64,4	70,7	26,8	33,1	49,2	88,2	169	221	1256,6
	% E_{KOL}		22,8	39,3	59,6	78,6	79,7	78	91,6	88,8	81,4	64,8	29,3	14,5	62,6
8	E_{KOL} [kWh]	20	65	101	170	232	251	250	291	263	218	167	73,8	40,4	2122,2
	E_{KOT} [kWh]		203	148	111	63,6	66	71,9	30	32,7	46,3	85,7	165	218	1241,2
	% E_{KOL}		24,2	40,7	60,6	78,5	79,2	77,7	90,7	88,9	82,5	66,1	30,8	15,6	63,1
9	E_{KOL} [kWh]	10	66,2	104	171	230	249	250	290	263	221	169	76,6	42,4	2132,2
	E_{KOT} [kWh]		201	146	111	66	68,2	72,2	30,9	33	45,3	84,9	163	216	1237,5
	% E_{KOL}		24,8	41,6	60,7	77,7	78,5	77,6	90,4	88,8	83	66,6	32	16,4	63,3
10	E_{KOL} [kWh]	0	65,4	103	172	230	248	250	289	261	221	169	76,9	42,6	2127,9
	E_{KOT} [kWh]		203	145	112	66	69,4	72,9	32,3	34,1	46,3	84,9	162	216	1243,9
	% E_{KOL}		24,4	41,5	60,6	77,7	78,1	77,4	89,9	88,5	82,7	66,6	32,2	16,5	63,1
11	E_{KOL} [kWh]	-10	64	101	170	228	242	250	287	259	220	165	75,2	41,7	2102,9
	E_{KOT} [kWh]		204	147	114	67,8	75,4	72,2	33,8	37,7	46,2	87,4	164	217	1266,5
	% E_{KOL}		23,9	40,8	59,8	77,1	76,2	77,6	89,5	87,3	82,6	65,4	31,4	16,1	62,4
12	E_{KOL} [kWh]	-20	58,9	96,7	169	223	247	250	285	259	220	162	72,7	39,3	2082,6
	E_{KOT} [kWh]		209	151	115	71,7	71,7	72,9	36,2	37,4	46,3	89	166	219	1285,2
	% E_{KOL}		22	39	59,5	75,7	77,5	77,4	88,7	87,4	82,6	64,5	30,4	15,2	61,8

Tabela 11 cd.

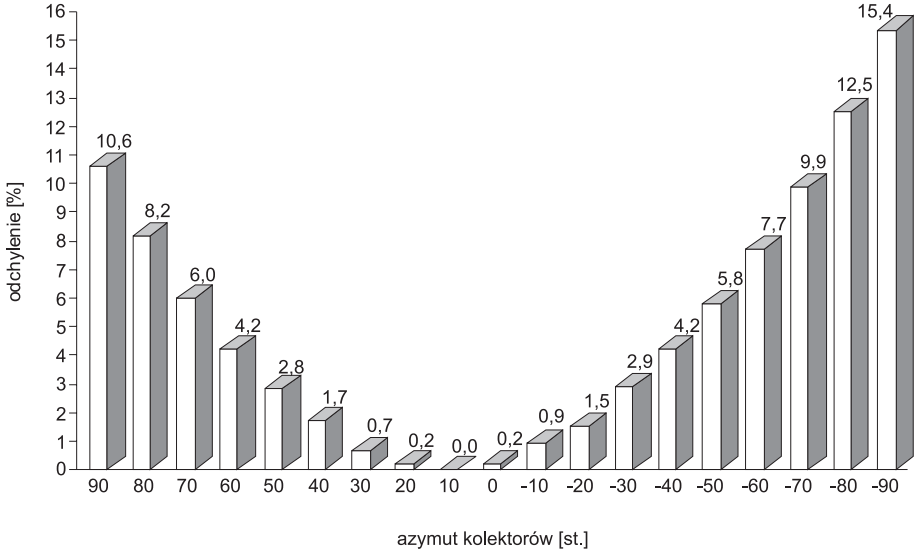
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
13	E_{KOL} [kWh]	-30	52,7	91,4	164	218	243	250	283	257	218	154	67	35,6	2033,7
	E_{KOT} [kWh]		215	155	119	77	75,4	73,2	38,3	39,5	47,3	95,5	173	223	1331,2
	% E_{KOL}		19,7	37,1	58,1	73,9	76,3	77,4	88,1	86,7	82,2	61,8	27,9	13,8	60,4
14	E_{KOL} [kWh]	-40	46,7	83,9	162	212	242	251	281	255	214	145	61,5	31,2	1985,3
	E_{KOT} [kWh]		220	162	120	81,3	75,9	72,7	40,1	41,8	51,2	102	178	227	1372
	% E_{KOL}		17,5	34,2	57,5	72,3	76,2	77,5	87,5	85,9	80,7	58,7	25,7	12,1	59,1
15	E_{KOL} [kWh]	-50	40,2	75,8	156	206	241	251	279	253	211	134	54	26,1	1927,1
	E_{KOT} [kWh]		226	170	124	87,2	77,3	73	40,8	43,3	53,3	110	186	232	1422,9
	% E_{KOL}		15,1	30,8	55,7	70,2	75,7	77,5	87,2	85,4	79,8	54,9	22,5	10,1	57,5
16	E_{KOL} [kWh]	-60	32,6	67,7	150	199	238	252	277	251	204	121	45,6	20,6	1858,5
	E_{KOT} [kWh]		234	178	129	92,1	79,9	72,7	42	45,3	56,6	124	196	237	1486,6
	% E_{KOL}		12,2	27,6	53,8	68,4	74,9	77,6	86,8	84,7	78,3	49,4	18,9	7,98	55,6
17	E_{KOL} [kWh]	-70	25,1	58,1	138	191	237	250	274	248	196	108	36,8	15,2	1777,2
	E_{KOT} [kWh]		241	186	138	98	81	73,8	43,3	47,3	63,8	132	204	242	1550,2
	% E_{KOL}		9,44	23,8	50	66,1	74,5	77,2	86,4	84	75,4	45	15,2	5,92	53,4
18	E_{KOL} [kWh]	-80	17,5	48,8	126	181	233	249	270	244	184	93,2	27,9	10,1	1684,5
	E_{KOT} [kWh]		248	195	148	106	85	74,3	47,6	48,4	72,1	147	211	247	1629,4
	% E_{KOL}		6,6	20	46,1	63,1	73,2	77	85	83,4	71,8	38,7	11,7	3,93	50,8
19	E_{KOL} [kWh]	-90	11,4	39,4	114	171	227	247	265	237	168	78,4	19,7	5,86	1583,76
	E_{KOT} [kWh]		254	204	159	117	87,7	74,6	50,9	53,7	87,6	162	219	251	1720,5
	% E_{KOL}		4,29	16,2	41,7	59,4	72,2	76,8	83,9	81,5	65,7	32,6	8,27	2,28	47,9

Najwięcej energii cieplnej z kolektorów pozyskano po przeprowadzeniu symulacji 9 (tab. 11), przy ich skierowaniu 10º w stronę kierunku zachodniego. Do podgrzewania wody zużyte zostało w sumie 3369,7 kWh energii cieplnej, przy 63,3% (2132,2 kWh) udziale energii cieplnej pozyskanej przez kolektory. Najmniej energii cieplnej, pozyskanej przez instalację słoneczną, uzyskano po przeprowadzeniu symulacji 19 (tab. 11), kiedy kolektory były obrócone o 90º w stronę kierunku wschodniego. Kolektory dostarczyły tylko 1583,76 kWh energii cieplnej do podgrzewacza, co stanowiło 47,9% pokrycia zapotrzebowania na energię cieplną do podgrzewania ciepłej wody.

Jak widać z przeprowadzonych symulacji, odchylenie kolektorów (rys. 61) od kierunku południowego do 40º w stronę zachodnią spowoduje maksymalnie spadek efektywności pozyskiwania energii cieplnej o 1,7% w stosunku do możliwej do uzyskania. Natomiast przy odchyleniu od kierunku południowego kolektorów w stronę wschodnią do 20º spadek maksymalny wyniesie 1,5% od maksymalnej możliwej efektywności pozyskania energii cieplnej.

Z przeprowadzonych przy takiej samej wartości azymutu, lecz przeciwnych skierowaniach symulacji wynika, że skierowanie ich na zachód jest korzystniejsze. Dla azymutu 90º skierowania kolektorów w stronę zachodnią uzyskano 4,8% więcej energii cieplnej z instalacji słonecznej niż dla azymutu 90º skierowania kolektorów w stronę wschodnią. Związane to

jest z tym, iż podczas godzin popołudniowych temperatura powietrza otoczenia jest wyższa niż dla godzin przedpołudniowych. Przy wyższych temperaturach powietrza otoczenia wzrasta sprawność kolektorów, czyli zmniejszają się straty energii cieplnej oddanej do otoczenia.



Rys. 61. Odchylenie pokrycia zapotrzebowania na energię cieplną przez instalację słoneczną od wartości optymalnej – azymut kolektorów 10º

W tabeli 12 przedstawiono kolejne wyniki przeprowadzonych symulacji pracy instalacji słonecznej. Podczas przeprowadzania symulacji wszystkie parametry były niezmienne poza kątem nachylenia kolektorów względem powierzchni poziomej. Kąt nachylenia kolektorów względem poziomu przyjmowano od 0º do 90º z krokiem co 10º przy stałym azymucie względem południa wynoszącym 0º.

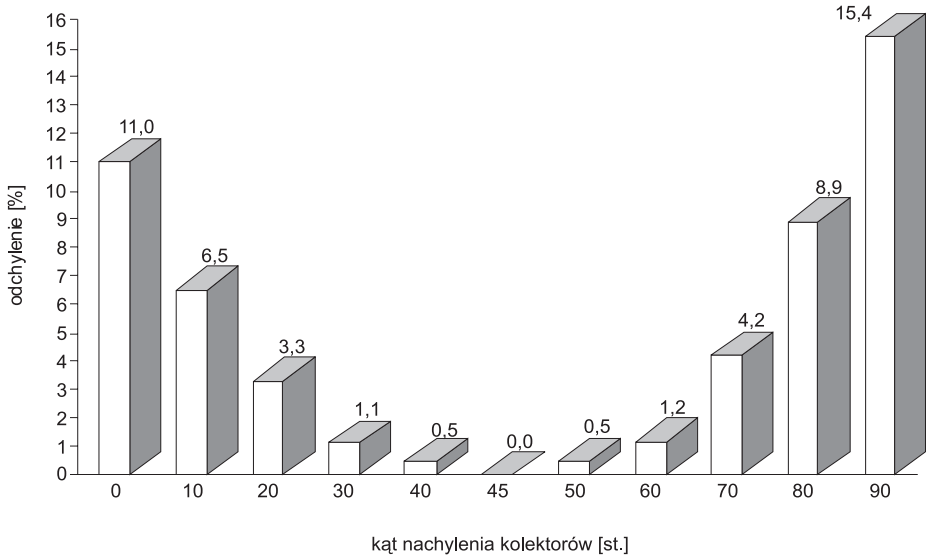
Jeżeli chodzi o ustawienie kolektorów względem płaszczyzny poziomej, ich położenie zależy od okresu, w jakim planuje się je wykorzystywać. W przypadku czerpania energii Słońca w okresie całorocznym optymalny kąt ustawienia kolektorów względem poziomu wynosi 45º. Kąt ten wynika z kompromisu pomiędzy maksymalną wysokością padania promieni słonecznych (62,4º) a minimalną (15,5º) względem poziomu. Powyższe przypuszczenia potwierdza przeprowadzona symulacja 6 (tab. 12), kiedy przyjęto kąt nachylenia kolektorów względem płaszczyzny poziomej 45º. Przy takim ustawieniu kolektorów pozyskano najwięcej energii cieplnej z układu kolektory – podgrzewacz. Ilość pozyskanej energii cieplnej z kolektorów słonecznych wyniosła 2127,9 kWh, przy 63,1% pokryciu zapotrzebowania na energię cieplną do podgrzewania wody. Najmniej energii cieplnej, pozyskanej przez instalacje słoneczną, uzyskano po przeprowadzeniu symulacji 11 (tab. 12), kiedy kolektory były ustawione pod kątem 90º w stosunku do powierzchni poziomej. Kolektory dostarczyły tylko 1555,6 kWh energii cieplnej do podgrzewacza i było to o 15,4% mniej pozyskanej energii w stosunku do optymalnego ustawienia.

Tabela 12

Symulacja pracy instalacji słonecznej dla różnych wartości kąta nachylenia kolektorów względem płaszczyzny poziomej

Nr sym. dla azym. 0º		Kąt nach.	Sty.	Luty	Mar.	Kwi.	Maj	Cze.	Lip.	Sie.	Wrz.	Paź.	Lis.	Gru.	Σrok
1	E_{KOL} [kWh]	0	9,79	41,5	123	202	257	260	296	259	180	82,6	17,5	3,62	1732,01
	E_{KOT} [kWh]		255	202	149	87,3	62,7	65,6	27,6	34,9	74,9	158	221	253	1591
	% E_{KOL}		3,69	17,1	45,2	69,8	80,4	79,8	91,5	88,1	70,6	34,4	7,33	1,41	52,1
2	E_{KOL} [kWh]	10	25	59,6	146	219	257	262	298	265	204	110	34,2	13,4	1893,2
	E_{KOT} [kWh]		241	185	130	74	62,1	64,3	27,2	30,5	56,8	131	205	244	1450,9
	% E_{KOL}		9,4	24,4	52,8	74,7	80,5	80,3	91,7	89,7	78,2	45,7	14,3	5,22	56,6
3	E_{KOL} [kWh]	20	39,1	76,1	161	229	258	260	301	265	215	133	50	23,7	2010,9
	E_{KOT} [kWh]		227	170	120	66,4	60	65,9	24,9	30,2	48,9	111	191	234	1349,3
	% E_{KOL}		14,7	31	57,4	77,5	81,1	79,8	92,4	89,8	81,5	54,5	20,8	9,21	59,8
4	E_{KOL} [kWh]	30	51,9	89,3	169	234	256	258	297	265	220	152	62,8	32,6	2087,6
	E_{KOT} [kWh]		215	158	114	63,7	61,6	66,9	28,7	31,3	45,2	95,7	177	225	1282,1
	% E_{KOL}		19,4	36,1	59,8	78,6	80,6	79,4	91,2	89,4	83	61,3	26,2	12,6	62
5	E_{KOL} [kWh]	40	61,8	99,5	167	232	247	253	292	263	220	163	72,4	39,7	2110,4
	E_{KOT} [kWh]		206	149	116	65,1	69,5	70,4	31,3	32,3	47,2	88,2	167	219	1261
	% E_{KOL}		23,1	40,1	59	78,1	78,1	78,2	90,3	89,1	82,3	64,9	30,2	15,4	62,6
6	E_{KOL} [kWh]	45	65,4	103	172	230	248	250	289	261	221	169	76,9	42,6	2127,9
	E_{KOT} [kWh]		203	145	112	66	69,4	72,9	32,3	34,1	46,3	84,9	162	216	1243,9
	% E_{KOL}		24,4	41,5	60,6	77,7	78,1	77,4	89,9	88,5	82,7	66,6	32,2	16,5	63,1
7	E_{KOL} [kWh]	50	68,8	106	163	227	245	246	284	257	216	171	78,9	45,1	2107,8
	E_{KOT} [kWh]		199	144	118	68,3	72,7	76,3	35,1	38,9	50,3	83,8	161	213	1260,4
	% E_{KOL}		25,6	42,3	57,9	76,9	77,1	76,3	89	86,8	81,1	67,1	32,9	17,5	62,6
8	E_{KOL} [kWh]	60	71,7	109	169	216	235	233	270	250	216	174	84,7	48	2076,4
	E_{KOT} [kWh]		198	141	113	74,5	80,8	83,5	45	44,6	49,7	81,7	155	210	1276,8
	% E_{KOL}		26,6	43,7	59,9	74,3	74,4	73,6	85,7	84,8	81,3	68,1	35,4	18,6	61,9
9	E_{KOL} [kWh]	70	75,2	108	163	197	215	207	245	237	208	171	85,4	50,1	1961,7
	E_{KOT} [kWh]		195	142	119	89,9	96,3	105	67,5	53,9	55,2	84,8	154	208	1370,6
	% E_{KOL}		27,9	43,2	57,9	68,7	69	66,4	78,4	81,4	79	66,9	35,6	19,4	58,9
10	E_{KOL} [kWh]	80	74,2	103	155	173	186	181	211	214	196	164	83,7	49,8	1790,7
	E_{KOT} [kWh]		196	146	126	112	119	125	95,5	72,3	64,5	89,7	156	209	1511
	% E_{KOL}		27,5	41,3	55,2	60,8	61,1	59,2	68,8	74,7	75,2	64,7	34,9	19,2	54,2
11	E_{KOL} [kWh]	90	69,1	94,8	140	144	151	148	173	180	178	151	80,2	46,5	1555,6
	E_{KOT} [kWh]		199	153	136	137	151	151	127	98,9	78,1	102	159	212	1704
	% E_{KOL}		25,7	38,2	50,7	51,4	49,9	49,4	57,6	64,6	69,5	59,7	33,5	18	47,7

Dla kątów nachylenia kolektorów słonecznych od 30º do 60º w stosunku do płaszczyzny poziomej z przeprowadzonych symulacji wynika, że spadek pozyskiwanej przez instalację słoneczną energii cieplnej wyniesie maksymalnie 1,2% w stosunku do maksymalnego możliwego uzysku tej energii (rys. 62).



Rys. 62. Odchylenie pokrycia zapotrzebowania na energię cieplną przez instalację słoneczną od wartości optymalnej – kąt nachylenia kolektorów 45º

5.4. Model matematyczny prognozowania maksymalnej ilości wody podgrzanej przez kolektory słoneczne

Analiza danych

Aby określić, ile wody można maksymalnie ogrzać energią słoneczną, należy określić, jak na ilość ogrzanej wody wpływają parametry pracy kolektorów.

Ilość ogrzanej wody zależy (może zależeć) od takich parametrów, jak:

- ilość energii pozyskanej na 1 m^2 powierzchni poziomej zmierzonej w Obserwatorium Wrocław-Swojec (promieniowanie całkowite);
- czas pracy kolektorów zmierzony na stanowisku badawczym;
- liczba godzin, przez które na niebie była widoczna tarcza słoneczna zmierzona w Obserwatorium Wrocław-Swojec (usłonecznienie);
- temperatura średnia dobowa zmierzona w Obserwatorium Wrocław-Swojec.

Mając zebrane dane opisujące te parametry, wyznaczono próbkową korelację pomiędzy ilością pobranej wody a każdym z wymienionych parametrów. Próbkowa korelacja określana jest poniższym wzorem i jest miarą podobieństwa dwóch zmiennych.

$$R = \frac{EXY - EXEY}{\sigma_X \sigma_Y} \tag{13}$$

gdzie:
X i Y – zmienne losowe, przykładowo pobór wody i średnia dobowa temperatura,
EX – wartość oczekiwana (wartość średnia) zmiennej losowej X,
EY – wartość oczekiwana (wartość średnia) zmiennej losowej Y.

$$EX = \frac{1}{n} \sum_{i=1..n} X_i \tag{14}$$

$$EY = \frac{1}{n} \sum_{i=1..n} Y_i \tag{15}$$

σ_X – odchylenie standardowe zmiennej losowej X,
σ_Y – odchylenie standardowe zmiennej losowej Y.

$$\sigma_X{}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1..n} (X_i - EX)^2 \tag{16}$$

$$\sigma_Y{}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1..n} (Y_i - EY)^2 \tag{17}$$

W tabelach 13 i 14 zostały obliczone korelacje pomiędzy różnymi parametrami. Do obliczenia korelacji R zostały przyjęte tylko te dni, podczas których kolektory słoneczne pokryły w 100% zapotrzebowanie na energię cieplną potrzebną do podgrzania wody (221 dni z 246 dni).

Tabela 13

Korelacja pomiędzy poborem wody a innymi zmiennymi w miesięcach: maj, czerwiec, lipiec, sierpień 2002 i 2003 r.

Zmienne	Korelacja R pomiędzy parametrem a ilością ogrzanej wody				
	Maj	Czer.	Lipiec	Sier.	Średnia
Ilość energii cieplnej dostarczonej przez kolektory zmierzona na stanowisku badawczym	0,3860	0,4056	0,5516	0,3791	0,4306
Ilość energii promieniowania całkowitego zmierzona w Obserwatorium Wrocław-Swojec	0,2779	0,0864	0,3199	0,0094	0,1734
Liczba godzin usłonecznienia zmierzona w Obserwatorium Wrocław-Swojec	0,2210	0,0827	0,3162	0,0684	0,1721
Średnia dobowa temperatura zmierzona w Obserwatorium Wrocław-Swojec	0,0596	0,1391	0,1968	0,0144	0,1025
Czas pracy kolektorów słonecznych zmierzony na stanowisku badawczym	0,3432	0,5115	0,4241	0,4112	0,4225

Na podstawie tabeli 13 można stwierdzić, że ilość podgrzanej wody najbardziej zależy od ilości energii cieplnej dostarczonej przez kolektory i czasu pracy kolektorów (wyznaczony w oparciu o przepływ czynnika grzewczego kolektory – zasobnik; przepływ chwilowy 250 $l \cdot h^{-1}$). Temperatura średnia dobowa jest parametrem zależnym od wielkości promieniowania całkowitego i przedstawia wartość średnią w ciągu całej doby (kolektory nie pracują

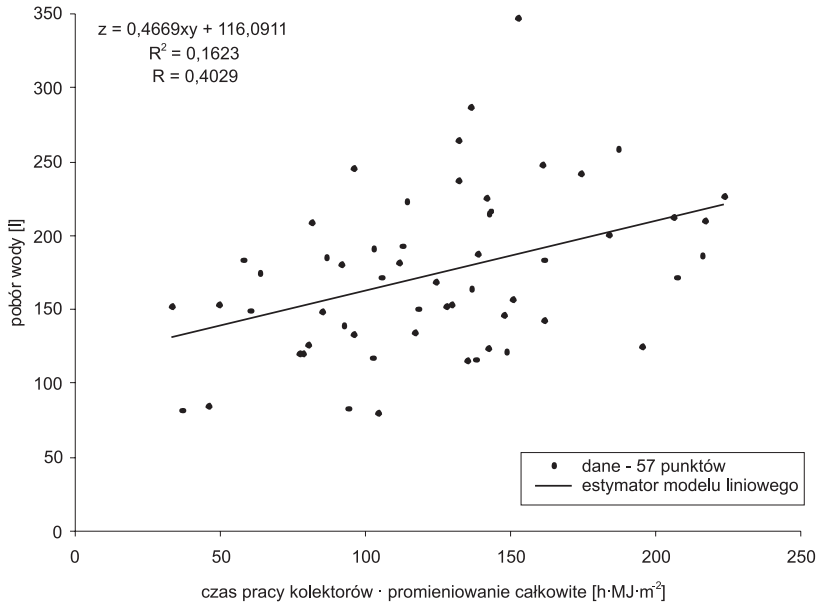
w nocy). Natomiast wartości usłonecznienia pokazują tylko ilościowo czas widocznej tarczy słonecznej w ciągu doby (ilość godzinowa docierającej energii bezpośredniej). Przy zainteresowaniu maksymalizacją ilości podgrzanej wody można to uzyskać przez wydłużenie czasu pracy kolektorów. Energię dostarczoną przez kolektory należy jednak wyznaczyć na podstawie innych zmiennych. W tabeli 14 przedstawiono korelacje tej energii z innymi zmiennymi. Otrzymane wyniki w tabeli 14 świadczą o tym, że dane o poborze wody najsilniej zależą od czasu długości pracy kolektorów oraz ilości energii cieplnej dostarczonej do kolektorów, która najsilniej zależy od energii promieniowania całkowitego wypromieniowanej na 1 m^2 powierzchni poziomej. Na podstawie tych obserwacji można zaproponować jeden z dwóch modeli:

Tabela 14

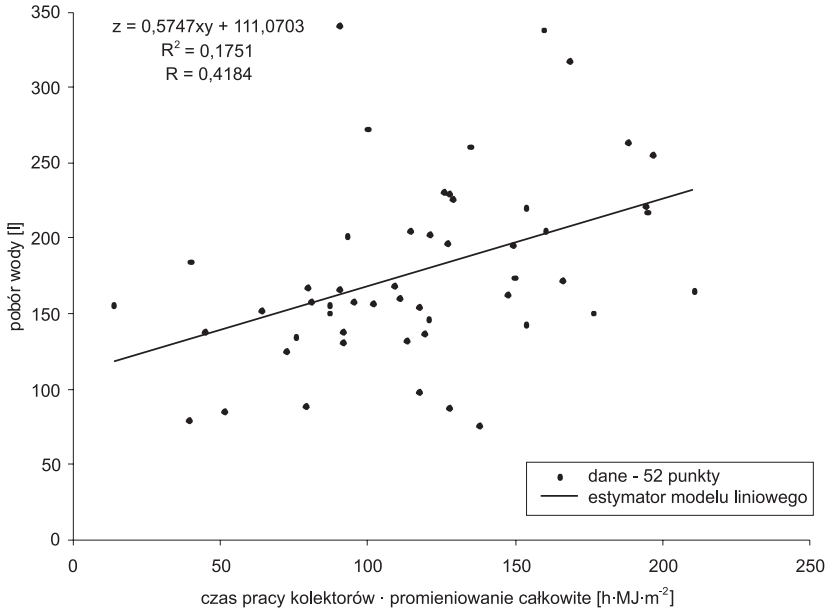
Korelacja pomiędzy ilością energii dostarczonej przez kolektory a różnymi zmiennymi w miesięcach: maj, czerwiec, lipiec, sierpień 2002 i 2003 r.

Zmienne	Korelacja *R* pomiędzy parametrem a ilością energii cieplnej dostarczonej przez kolektory				
	Maj	Czer.	Lipiec	Sier.	Średnia
Ilość energii promieniowania całkowitego zmierzona w Obserwatorium Wrocław-Swojec	0,5839	0,4210	0,7604	0,6234	0,5972
Liczba godzin usłonecznienia zmierzona w Obserwatorium Wrocław-Swojec	0,4888	0,3344	0,6674	0,5967	0,5218
Średnia dobowa temperatura zmierzona w Obserwatorium Wrocław-Swojec	0,0117	0,3212	0,4486	0,1504	0,2330
Czas pracy kolektorów słonecznych zmierzony na stanowisku badawczym	0,7434	0,8700	0,7913	0,8225	0,8068

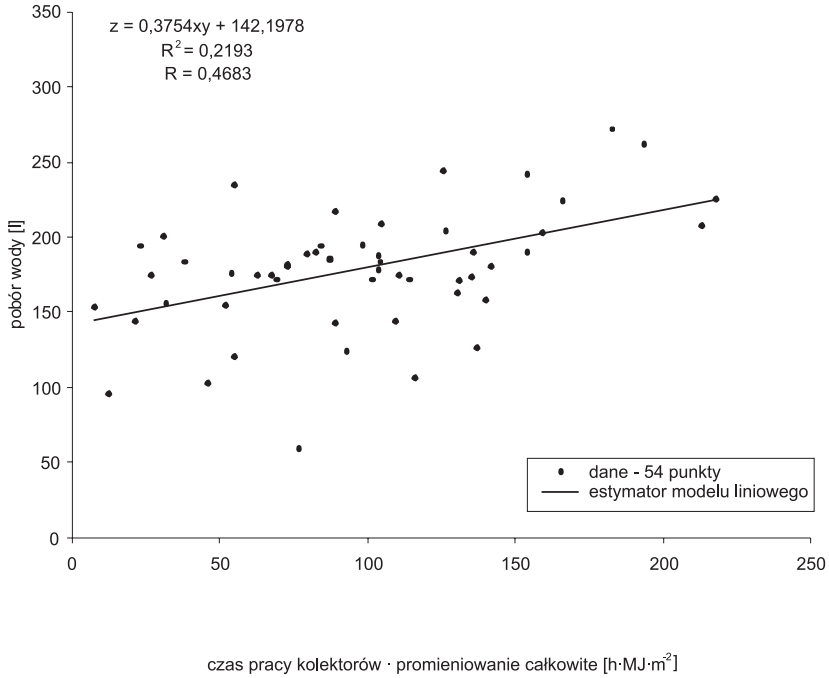
1) Model z dwiema zmiennymi – jawnie zależny od czasu pracy kolektorów



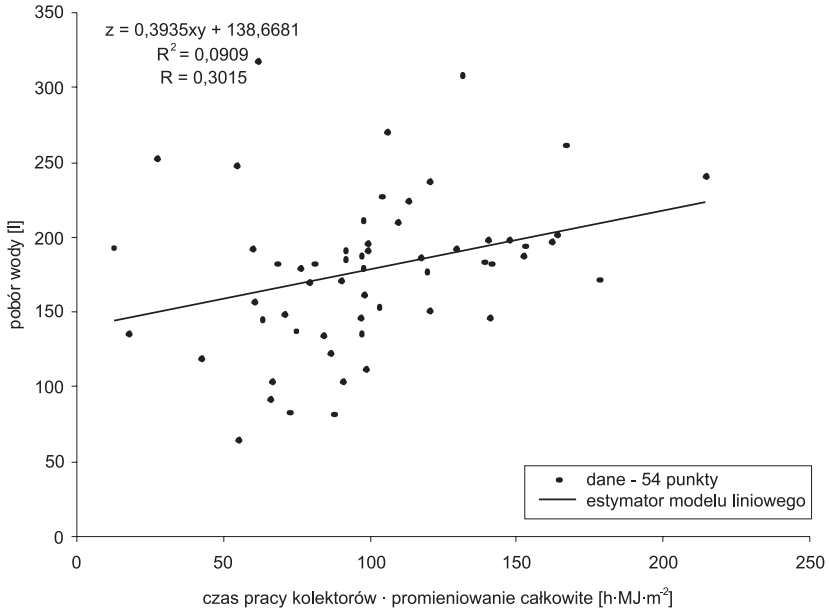
Rys. 63. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym i czasem pracy kolektorów. Postulowana była zależność liniowa od iloczynu. Wykres wykonany dla miesiąca maja 2002 i 2003 r.



Rys. 64. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym i czasem pracy kolektorów. Postulowana była zależność liniowa od iloczynu. Wykres wykonany dla miesiąca czerwca 2002 i 2003 r.



Rys. 65. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym i czasem pracy kolektorów. Postulowana była zależność liniowa od iloczynu. Wykres wykonany dla miesiąca lipca 2002 i 2003 r.



Rys. 66. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym i czasem pracy kolektorów. Postulowana była zależność liniowa od iloczynu. Wykres wykonany dla miesiąca sierpnia 2002 i 2003 r.

$$Z = a\,X\,Y + b \tag{2}$$

gdzie:
Z – pobór wody [l],
Y – czas pracy kolektorów [h],
X – ilość energii promieniowania całkowitego zmierzona w Obserwatorium Wrocław-Swojec [MJ·m^{-2}].

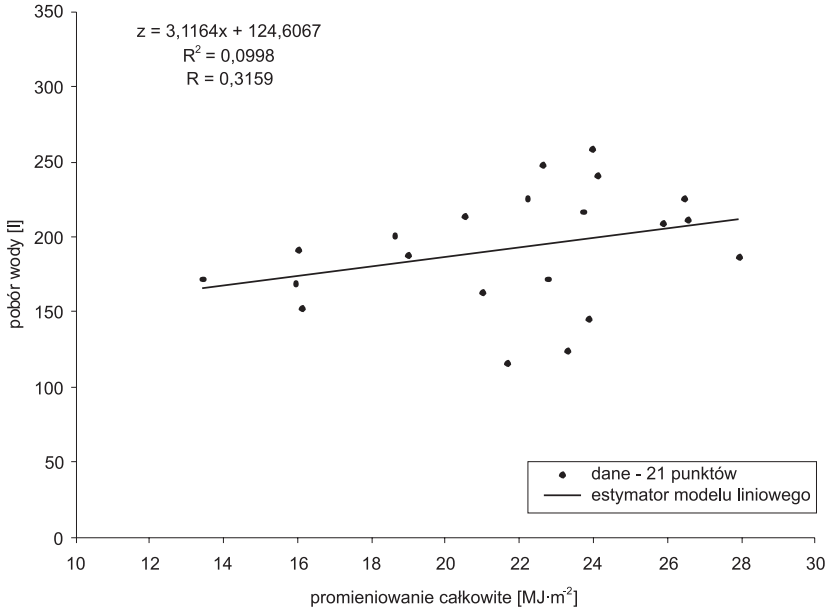
Wyestymowane współczynniki dla tego modelu to:

Tabela 15

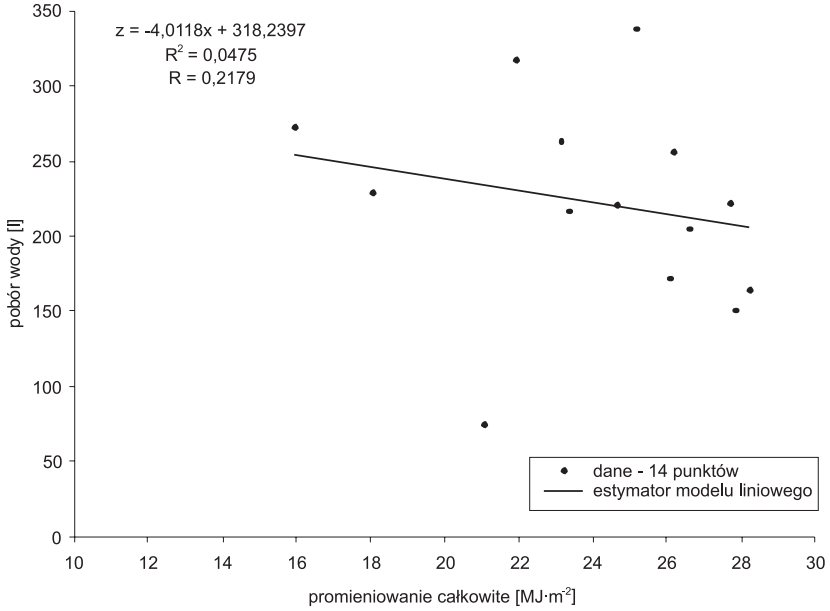
Współczynniki dla modelu z dwiema zmiennymi

Miesiąc	Współczynnik	
	a	*b*
Maj	0,4669	116,0911
Czerwiec	0,5747	111,0703
Lipiec	0,3754	142,1978
Sierpień	0,3935	138,6681

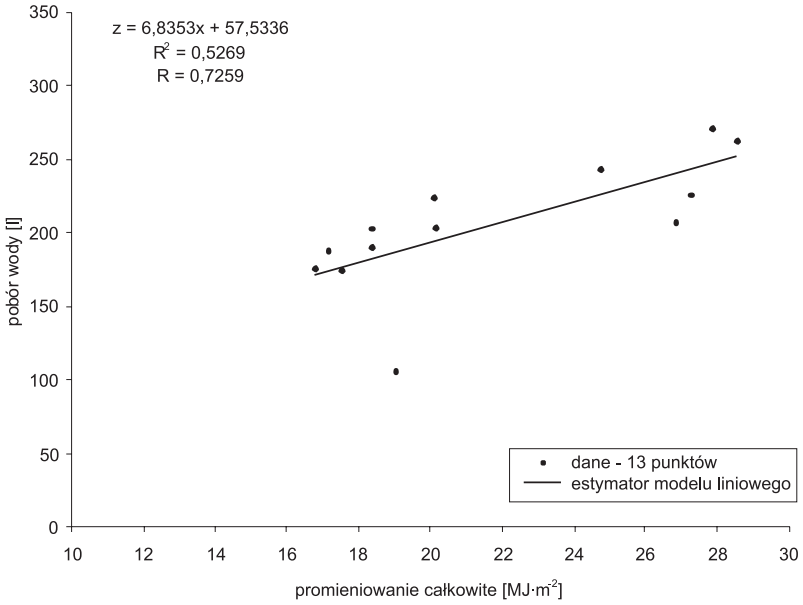
2) Model z jedną zmienną – niejawnie zależny od czasu pracy kolektorów



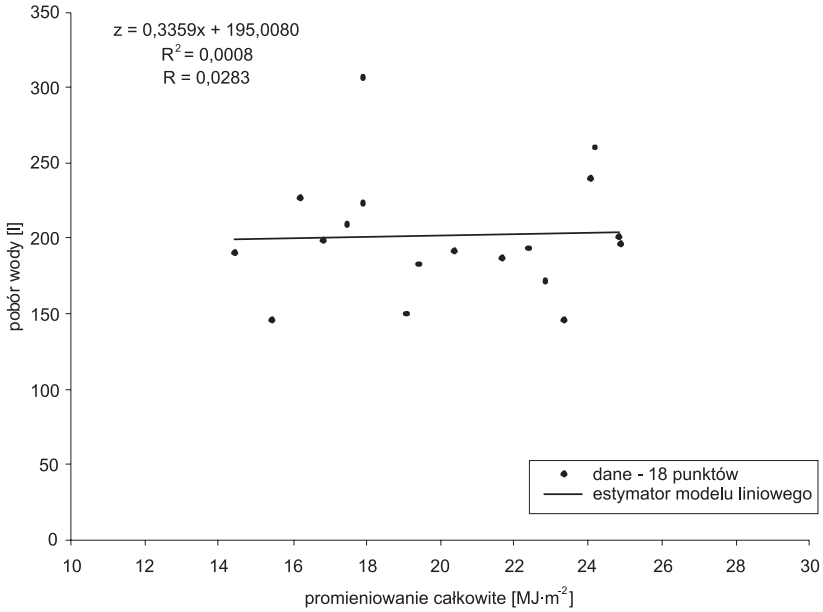
Rys. 67. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym a poborem wody. Postulowana była zależność liniowa. Na wykresie pozostały dni, podczas których kolektory pracowały ponad 6 godzin. Wykres wykonany dla miesiąca maja 2002 i 2003 r.



Rys. 68. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym a poborem wody. Postulowana była zależność liniowa. Na wykresie pozostały dni, podczas których kolektory pracowały ponad 6 godzin. Wykres wykonany dla miesiąca czerwca 2002 i 2003 r.



Rys. 69. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym a poborem wody. Postulowana była zależność liniowa. Na wykresie pozostały dni, podczas których kolektory pracowały ponad 6 godzin. Wykres wykonany dla miesiąca lipca 2002 i 2003 r.



Rys. 70. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym a poborem wody. Postulowana była zależność liniowa. Na wykresie pozostały dni, podczas których kolektory pracowały ponad 6 godzin. Wykres wykonany dla miesiąca sierpnia 2002 i 2003 r.

$$Z = a\,X + b \tag{1}$$

gdzie:
Z – pobór wody [l],
X – ilość energii promieniowania całkowitego zmierzona w Obserwatorium Wrocław-Swojec [MJ·m^{-2}].

Dla tego modelu do wyznaczenia współczynników przyjęto tylko te dni, podczas których kolektory słoneczne pracowały ponad 6 godzin.

Wyestymowane współczynniki dla tego modelu to:

Tabela 16

Współczynniki dla modelu z jedną zmienną

Miesiąc	Współczynnik	
	a	*b*
Maj	3,1164	124,6067
Czerwiec	-4,0118	318,2397
Lipiec	6,8353	57,5336
Sierpień	0,3359	195,0080

Dla obu modeli został wyznaczony szum:

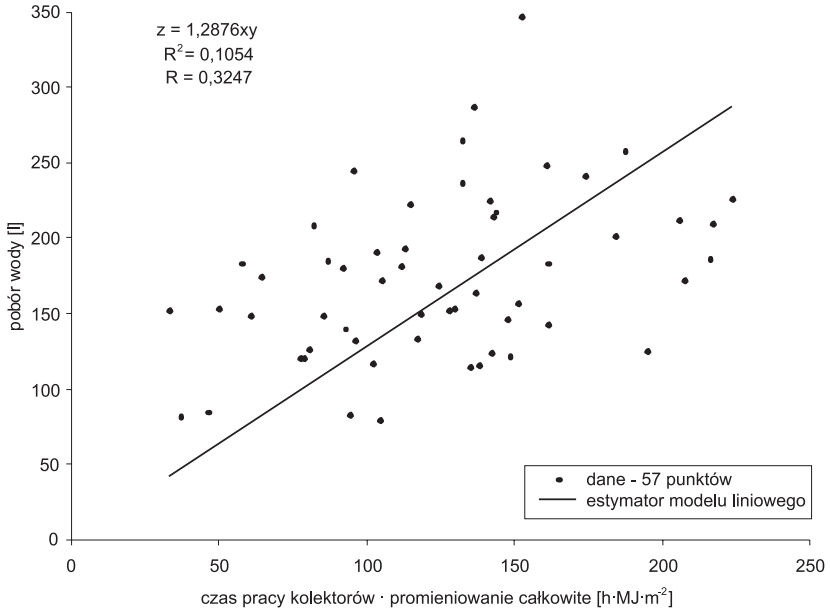
Tabela 17

Szum pozostały po dopasowaniu modelu

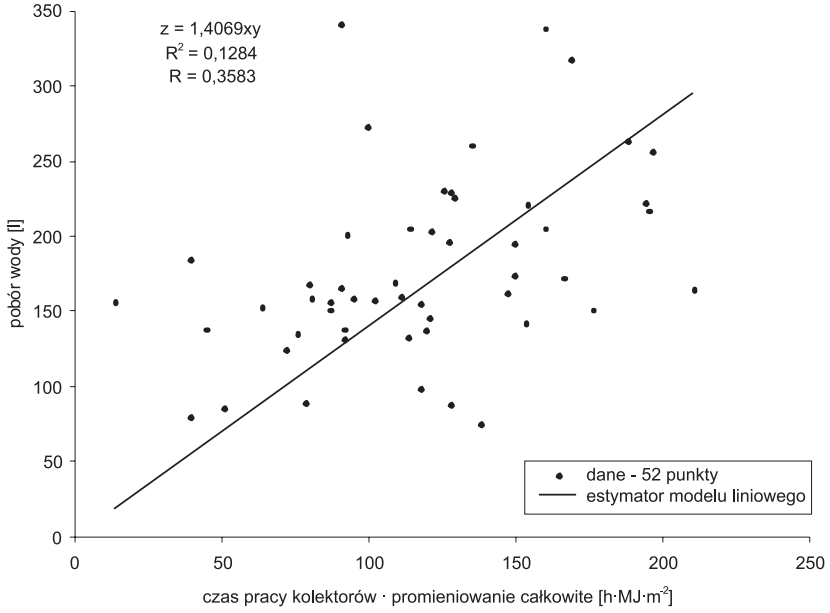
Miesiąc	Szum (S^2)	
	Model z jedną zmienną	Model z dwiema zmiennymi
Maj	409^2	370^2
Czerwiec	586^2	397^2
Lipiec	355^2	258^2
Sierpień	431^2	374^2

Mniejszy szum dla każdego z rozpatrywanych miesięcy posiada model z dwiema zmiennymi, dlatego ten model zostanie wykorzystany w dalszej estymacji. Ponadto model z dwiema zmiennymi ma więcej danych wyjściowych opisujących model. Ponieważ istnieje wymóg, że gdy jedna ze zmiennych predykcyjnych $X = 0$ lub $Y = 0$, to wtedy zmienna przewidywana także musi $Z = 0$. Dlatego z modelu musi zostać usunięty czynnik stały (b) funkcji $Z = a\,X\,Y + b$. W związku z powyższym założeniem został zaproponowany następujący model:

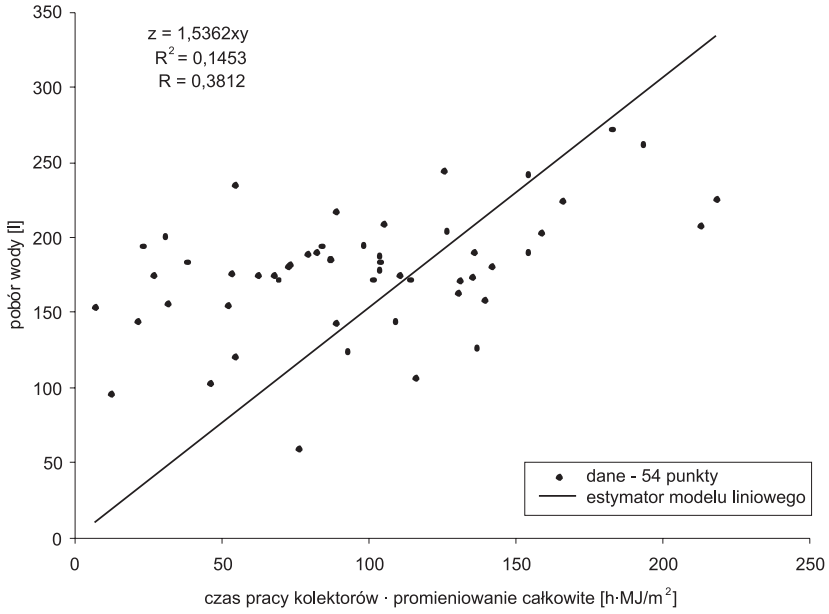
3) Model z dwiema zmiennymi ze średnią równą zero – jawnie zależny od czasu pracy kolektorów



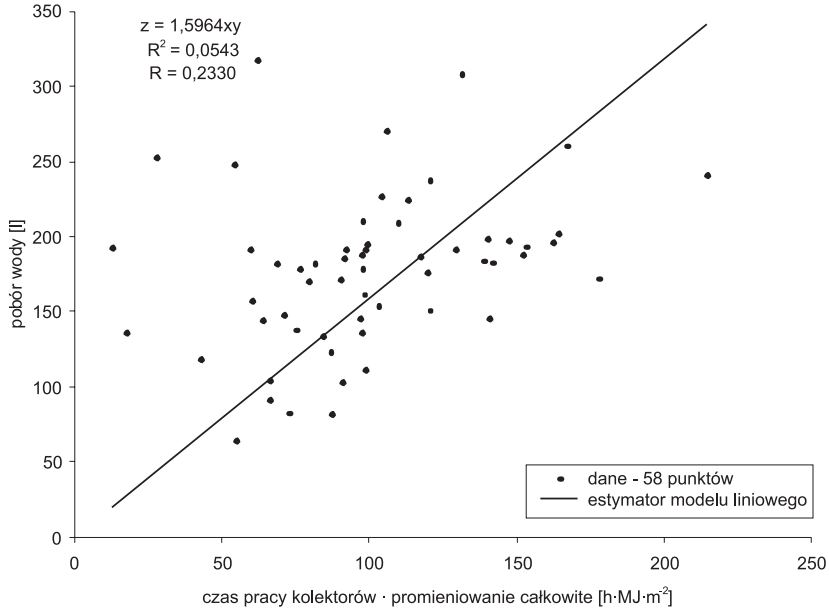
Rys. 71. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym i czasem pracy kolektorów. Postulowana była zależność liniowa od iloczynu ze średnią równą zero. Wykres wykonany dla miesiąca maja 2002 i 2003 r.



Rys. 72. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym i czasem pracy kolektorów. Postulowana była zależność liniowa od iloczynu ze średnią równą zero. Wykres wykonany dla miesiąca czerwca 2002 i 2003 r.



Rys. 73. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym i czasem pracy kolektorów. Postulowana była zależność liniowa od iloczynu ze średnią równą zero. Wykres wykonany dla miesiąca lipca 2002 i 2003 r.



Rys. 74. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym i czasem pracy kolektorów. Postulowana była zależność liniowa od iloczynu ze średnią równą zero. Wykres wykonany dla miesiąca sierpnia 2002 i 2003 r.

$$Z = a\,X\,Y \tag{3}$$

gdzie:
Z – pobór wody [l],
Y – czas pracy kolektorów [h],
X – ilość energii promieniowania całkowitego zmierzona w Obserwatorium Wrocław-Swojec [MJ·m^{-2}].

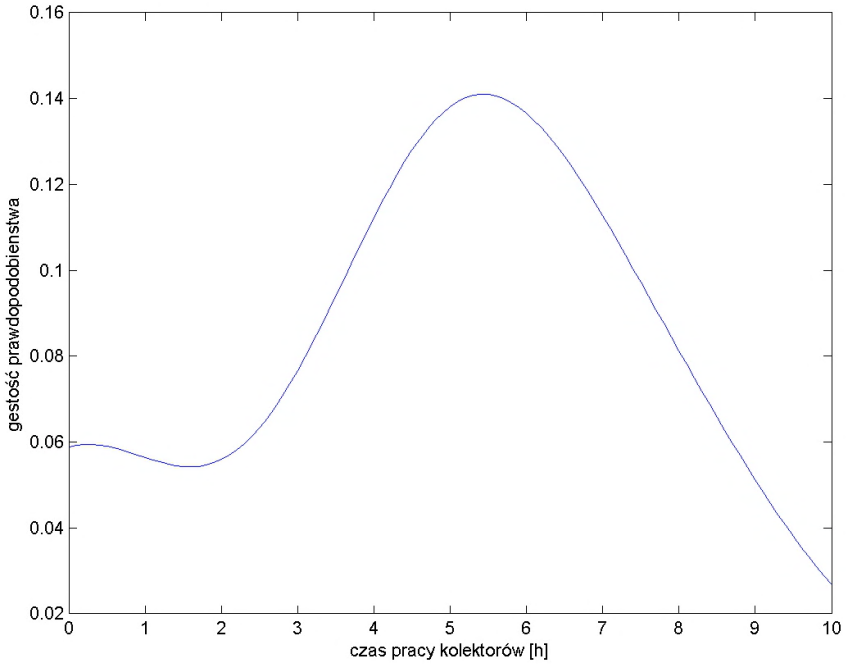
Wyestymowane współczynniki dla tego modelu to:

Tabela 18

Współczynniki dla modelu z dwiema zmiennymi ze średnią równą zero

Miesiąc	Współczynnik
	a
Maj	1,2876
Czerwiec	1,4069
Lipiec	1,5362
Sierpień	1,5964

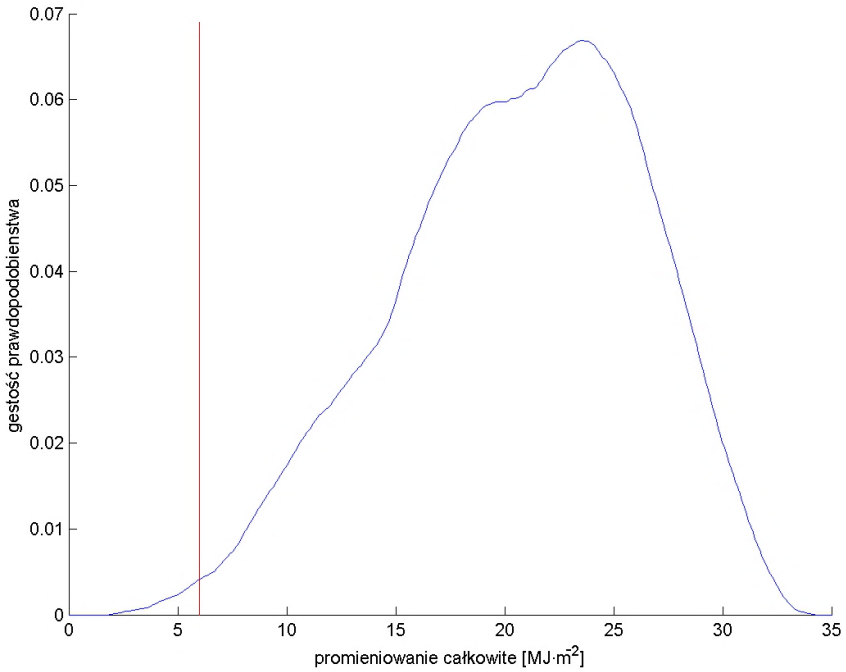
Prognozy maksymalnego poboru wody:



Rys. 75. Rozkład gęstości czasu pracy kolektorów. Wykres został przygotowany dla miesięcy: maj, czerwiec, lipiec, sierpień 2002 i 2003 r.

Z rysunku 75 wynika, że kolektory słoneczne najczęściej pracują 5–6 godzin, pomimo iż mogą pracować nawet przez prawie 10 godzin.

Czas pracy kolektorów w ciągu dnia nie był stałą wartością. Czas pracy instalacji słonecznej zależał od poziomu promieniowania całkowitego i szybkości zużywania nagrzanej już ciepłej wody. Gdy została zużyta nagrzana wcześniej ciepła woda i poziom promieniowania całkowitego był na poziomie umożliwiającym pobór energii cieplnej, następowało włączenie kolektorów słonecznych.



Rys. 76. Rozkład gęstości promieniowania całkowitego. Wykres został przygotowany dla miesięcy: maj, czerwiec, lipiec, sierpień 2002 i 2003 r. Pionową kreską zaznaczono graniczną wartość energii promieniowania całkowitego, dla której kolektory nie zostały uruchomione

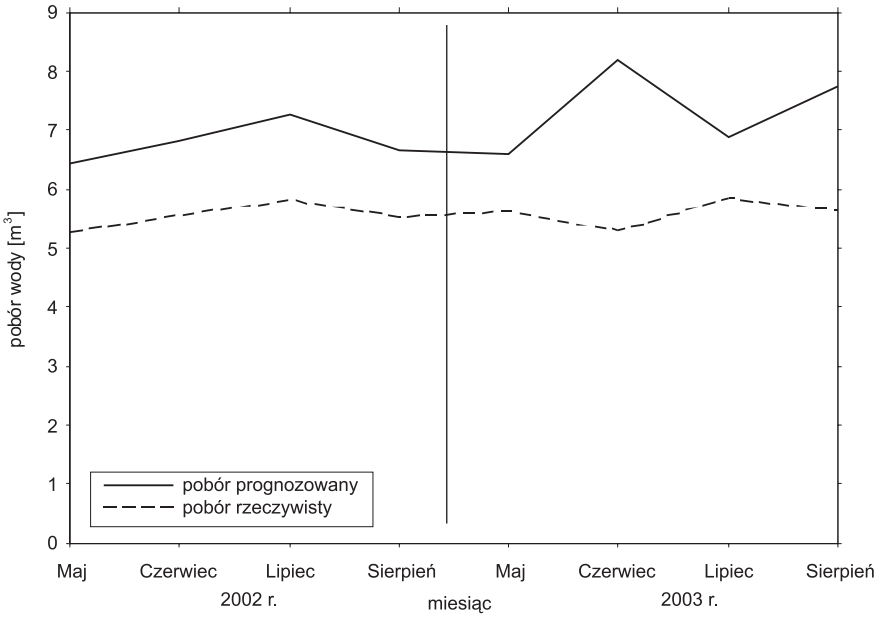
Do wyznaczenia prognoz maksymalnej ilości wody użytkowej, możliwej do podgrzania przez kolektory słoneczne, zakłada się, że kolektory pracują każdego dnia przez 8 godzin (czas efektywnej pracy kolektorów, zmierzony dla 23 maja 2003 r.). W ten sposób zwiększając czas pracy kolektorów (które w słoneczne dni wyłączają się, gdy już podgrzały wodę i nie następował jej rozbiór), otrzymamy maksymalną ilość wody, którą można by ogrzać. Wyniki prognoz maksymalnej ilości wody możliwej do podgrzania przez kolektory słoneczne zostały przedstawione w tabeli 19.

Tabela 19

Prognozy maksymalnej ilości wody możliwej do podgrzania

Miesiąc	Pobór rzeczywisty [l]	Pobór maksymalny [l]	Nadwyżka wody [l]
Maj 2002	5251	6435	1184
Czerwiec 2002	5529	6794	1265
Lipiec 2002	5786	7276	1490
Sierpień 2002	5520	6659	1139
Maj 2003	5599	6573	974
Czerwiec 2003	5267	8199	2932
Lipiec 2003	5818	6893	1075
Sierpień 2003	5620	7737	2117

Zestawienie prognoz w postaci graficznej:



Rys. 77. Rzeczywista i maksymalna ilość wody użytkowej podgrzanej za pomocą energii cieplnej pozyskanej tylko przez kolektory słoneczne

Średnia nadwyżka w każdym miesiącu wynosiła około 1,5 m^3, a maksymalny pobór ciepłej wody dla miesięcy letnich to około 8 m^3.

W maju 2002 i 2003 r. nadwyżki podgrzanej wody są niewielkie pomimo dość dużej ilości promieniowania całkowitego, które dotarło do kolektorów słonecznych. Tak niewielkie nadwyżki w tych miesięcach związane są z niższą temperaturą powietrza otoczenia i napływem do podgrzewacza z instalacji wody o niższej temperaturze niż dla okresu późniejszego (czerwiec, lipiec, sierpień). Woda musi zostać podgrzana od niższej temperatury niż w miesięcach od czerwca do sierpnia (tab. 2).

W czerwcu 2003 r. prognoza nadwyżki wyniosła prawie 3 m^3. Związane to było z bardzo dobrymi wyjątkowymi warunkami pogodowymi, jakie wystąpiły w tym miesiącu. W czerwcu 2003 r. wystąpiło aż 305,9 godzin usłonecznienia (średnio 10,2 h dziennie) przy ilości promieniowania całkowitego aż 728,54 $MJ \cdot m^{-2}$. Średnia dla wielolecia 1961–1995, dla czerwca wynosi 189,8 godzin usłonecznienia i 565,4 $MJ \cdot m^{-2}$ promieniowania całkowitego.

Prognozy dla sierpnia 2004

Posiadane dane zawierają informację o promieniowaniu całkowitym i pozyskanej ilości ciepłej wody użytkowej podgrzanej przez kolektory słoneczne w miesiącu sierpnia 2004 r. W tym miesiącu można sprawdzić, czy z użyciem wcześniej otrzymanych współczynników uda nam się przewidzieć ilość wody podgrzanej przez kolektory. Wykonano prognozy dla każdego z modeli.

Prognoza z użyciem modelu z dwiema zmiennymi – jawnie zależny od czasu pracy kolektorów:

Tabela 20

Prognozy i błąd predykcji dla modelu z dwiema zmiennymi

Wyszczególnienie	Miesiąc
	Sierpień 2004
Pozyskana ciepła woda przez kolektory słoneczne [l]	6694
Prognoza pozyskania ciepłej wody przez kolektory słoneczne [l]	5928
Błąd [%]	11,4

Prognoza z użyciem modelu z jedną zmienną – niejawnie zależny od czasu pracy kolektorów:

Tabela 21

Prognozy i błąd predykcji dla modelu z jedną zmienną

Wyszczególnienie	Miesiąc
	Sierpień 2004
Pozyskana ciepła woda przez kolektory słoneczne [l]	6694
Prognoza pozyskania ciepłej wody przez kolektory słoneczne [l]	6219
Błąd [%]	7,1

Prognoza z użyciem modelu z dwiema zmiennymi ze średnią równą zero – jawnie zależny od czasu pracy kolektorów:

Tabela 22

Prognozy i błąd predykcji dla modelu z dwiema zmiennymi ze średnią równą zero

Wyszczególnienie	Miesiąc
	Sierpień 2004
Pozyskana ciepła woda przez kolektory słoneczne [l]	6694
Prognoza pozyskania ciepłej wody przez kolektory słoneczne [l]	6609
Błąd [%]	1,3

Prognoza dla modelu z dwiema zmiennymi ze średnią równą zero okazała się prawie ponad ośmiokrotnie skuteczniejsza niż dla modelu z dwiema zmiennymi i ponad pięciokrotnie skuteczniejsza od modelu z jedną zmienną. Oznacza to, że również to kryterium wskazuje na wybór modelu z dwiema zmiennymi ze średnią równą zero.

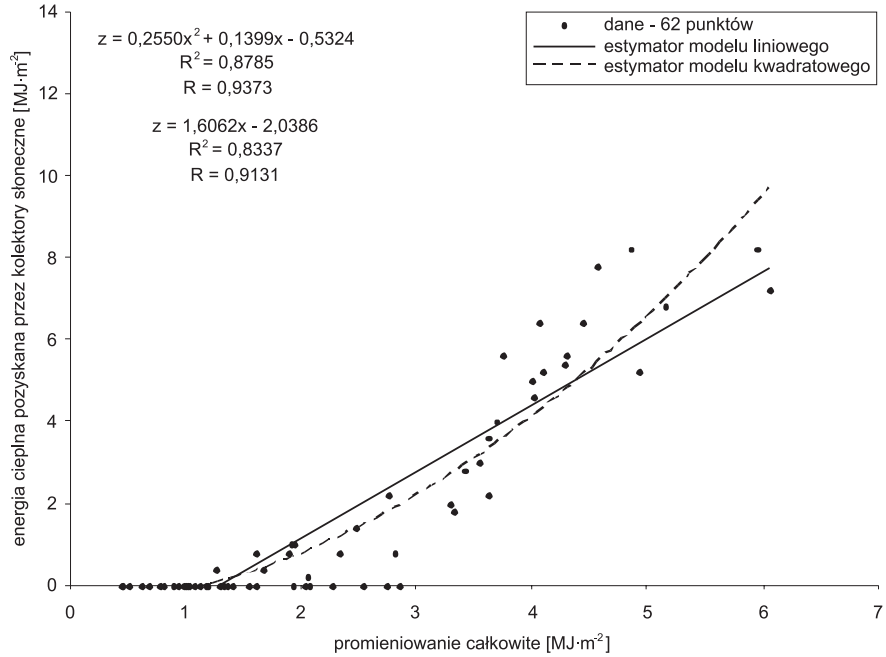
5.5. Model matematyczny prognozowania pozyskania energii cieplnej przez kolektory słoneczne

Po przeprowadzeniu korelacji pomiędzy energią cieplną pozyskaną przez kolektory a różnymi zmiennymi meteorologicznymi w poszczególnych miesiącach (tab. 23) stwierdzono na podstawie otrzymanych wyników, że ilość energii cieplnej pozyskanej przez kolektory słoneczne zależy najsilniej od energii promieniowania całkowitego. Przy rozstrzyganiu, jak wygląda zależność pomiędzy energią promieniowania całkowitego zmierzoną w Obserwatorium Wrocław-Swojec a ilością energii cieplnej pozyskanej przez 1 m^2 powierzchni kolektorów słonecznych w każdym miesiącu, określono tę współzależność w trakcie danego miesiąca.

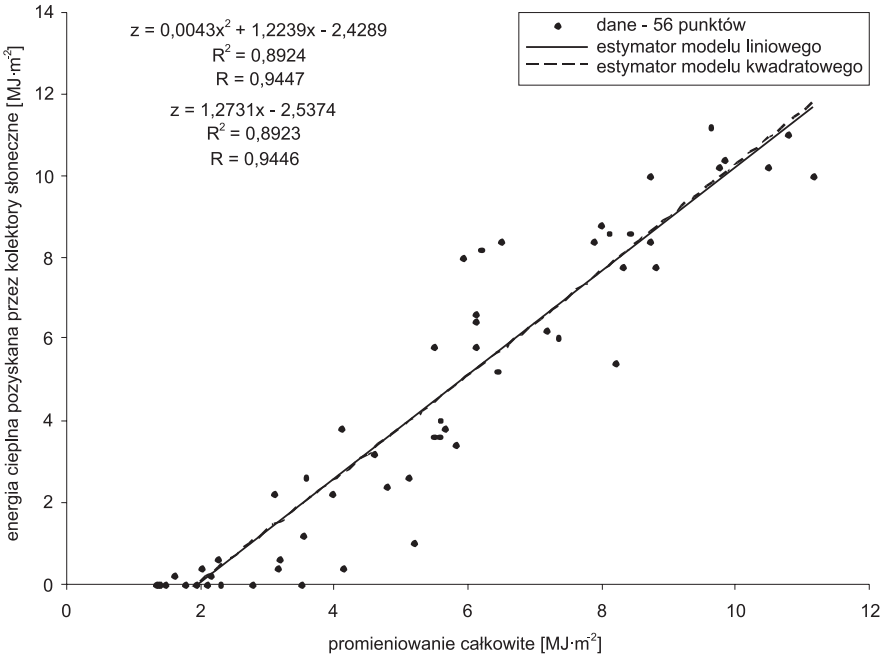
Tabela 23

Korelacja pomiędzy ilością energii dostarczonej przez kolektory a różnymi zmiennymi meteorologicznymi w miesięcach od stycznia do grudnia 2002 i 2003 r.

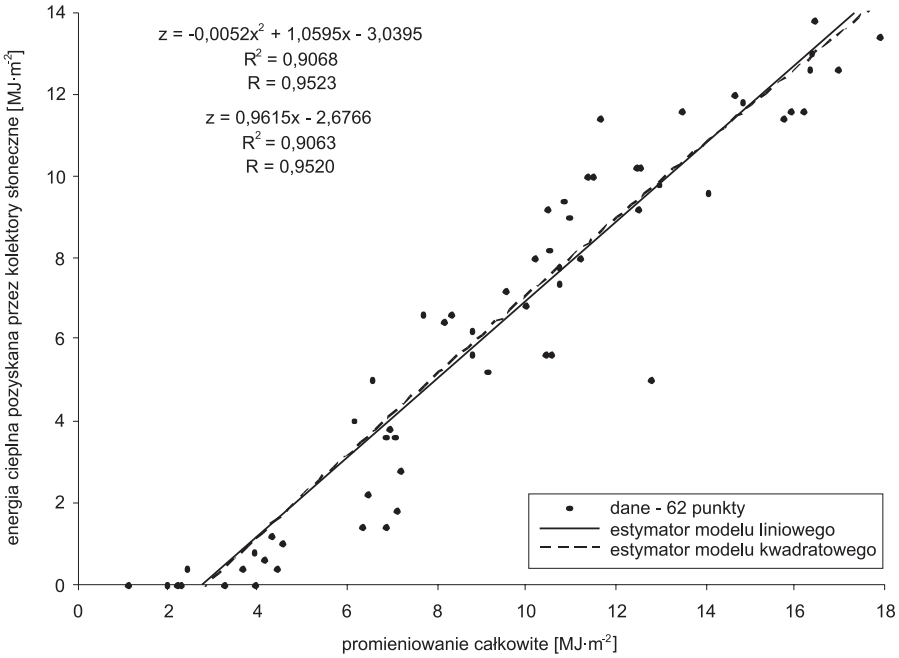
Miesiąc	Korelacja *R* pomiędzy parametrem a ilością energii cieplnej dostarczonej przez kolektory		
	Promieniowanie całkowite zmierzone w Obserwatorium	Usłonecznienie zmierzone w Obserwatorium	Średnia dobowa temperatura zmierzona w Obserwatorium
Styczeń	0,9131	0,9429	0,1905
Luty	0,9446	0,9603	0,1634
Marzec	0,9520	0,9384	0,1652
Kwiecień	0,9191	0,8548	0,2822
Maj	0,7141	0,6089	0,1682
Czerwiec	0,5782	0,4567	0,4354
Lipiec	0,7866	0,6953	0,4474
Sierpień	0,7033	0,6596	0,3008
Wrzesień	0,8769	0,8351	0,3747
Październik	0,9032	0,8767	0,1216
Listopad	0,8879	0,8573	0,0160
Grudzień	0,9228	0,7367	0,1644
Średnia	0,8418	0,7852	0,2358



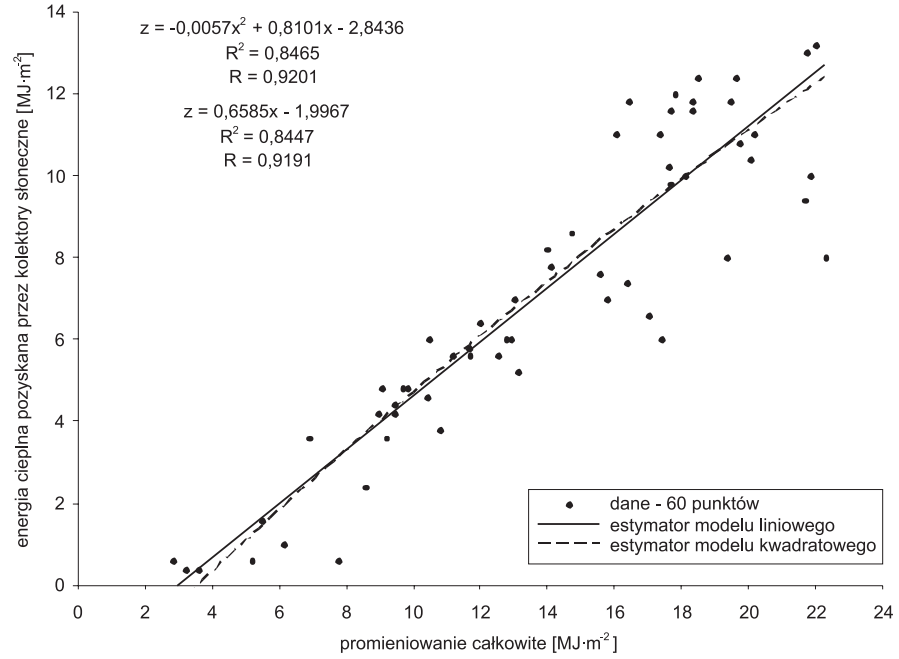
Rys. 78. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym a energią cieplną pozyskaną przez kolektory w styczniu 2002 i 2003 r.



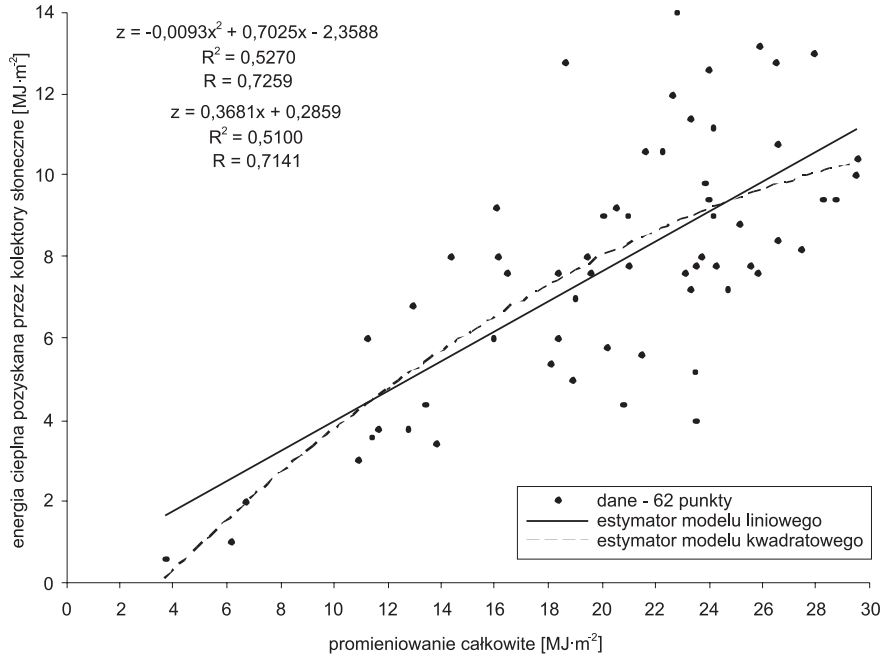
Rys. 79. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym a energią cieplną pozyskaną przez kolektory w lutym 2002 i 2003 r.



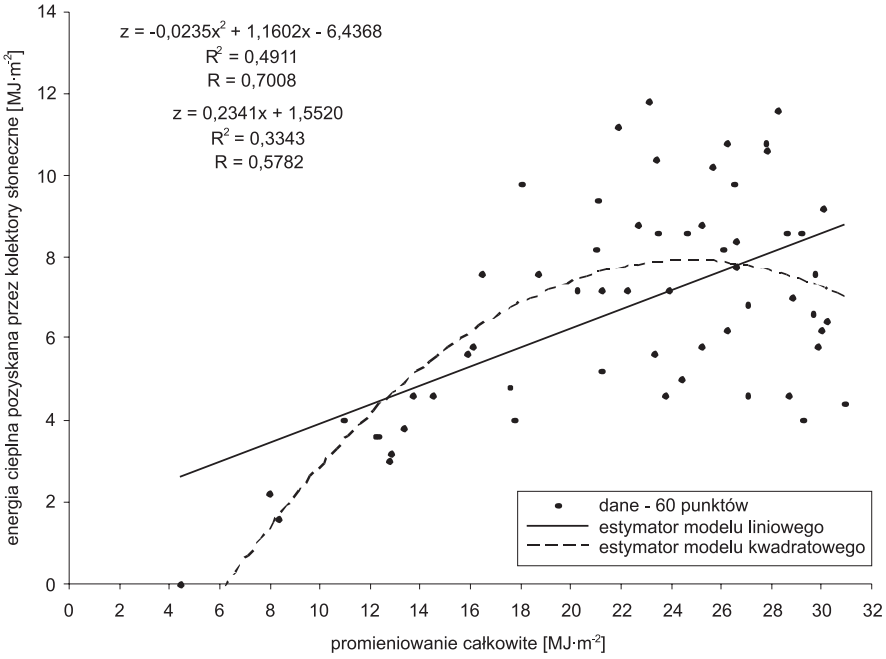
Rys. 80. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym a energią cieplną pozyskaną przez kolektory w marcu 2002 i 2003 r.



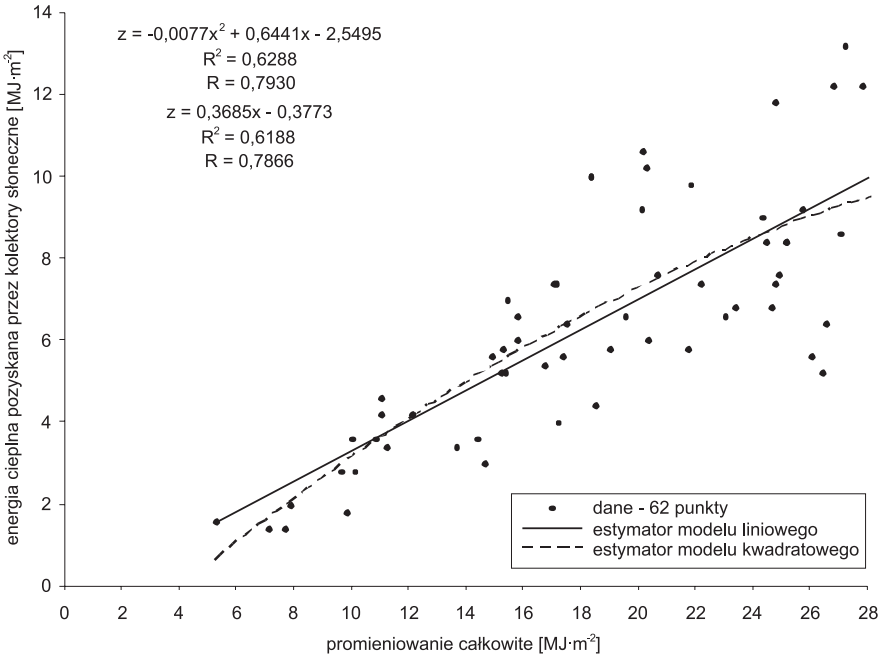
Rys. 81. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym a energią cieplną pozyskaną przez kolektory w kwietniu 2002 i 2003 r.



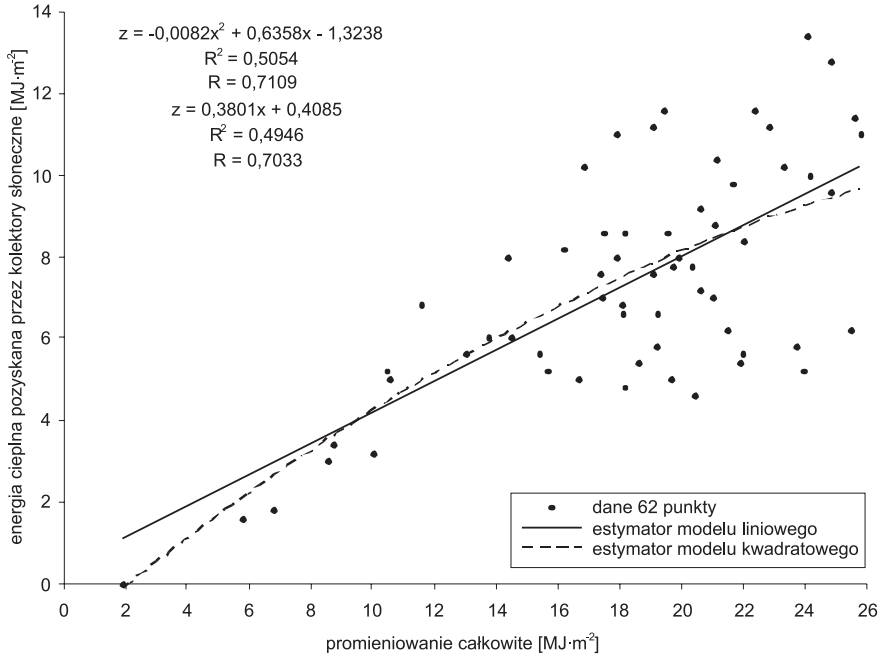
Rys. 82. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym a energią cieplną pozyskaną przez kolektory w maju 2002 i 2003 r.



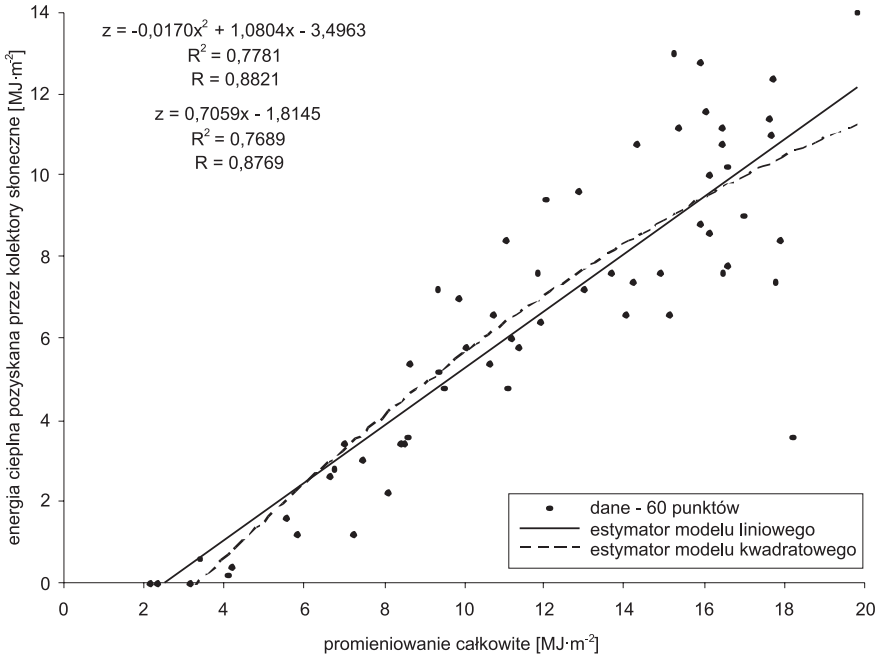
Rys. 83. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym a energią cieplną pozyskaną przez kolektory w czerwcu 2002 i 2003 r.



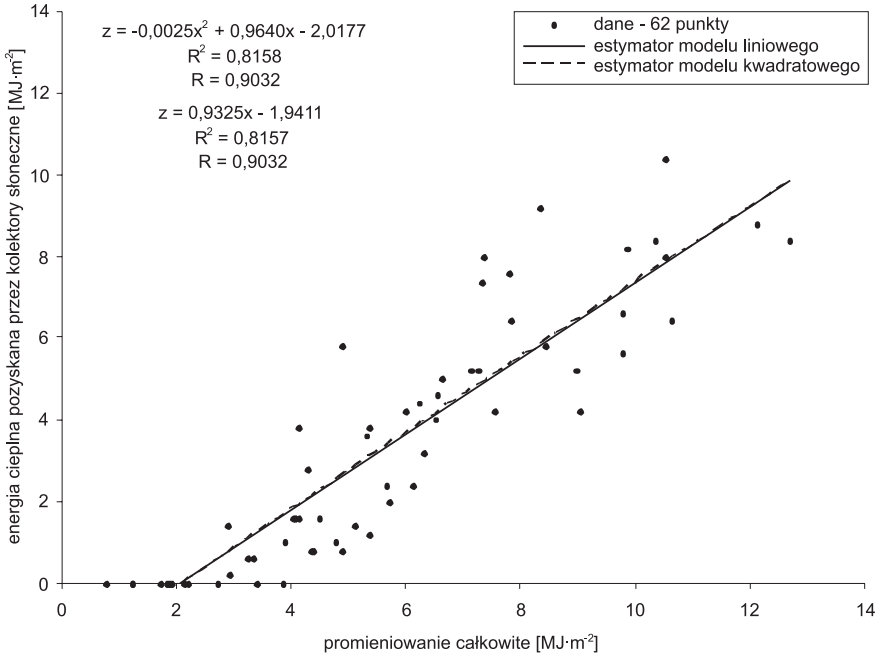
Rys. 84. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym a energią cieplną pozyskaną przez kolektory w lipcu 2002 i 2003 r.



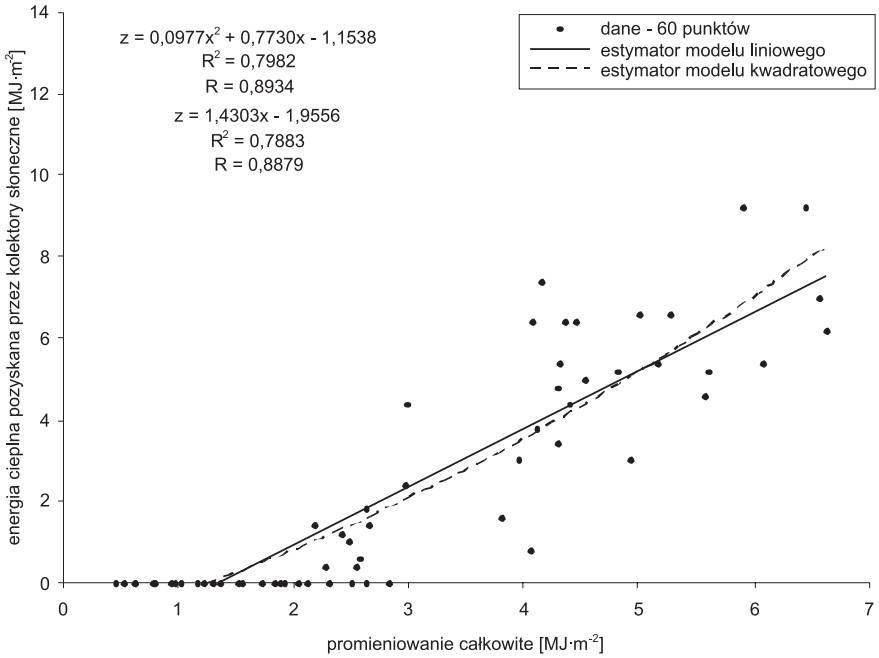
Rys. 85. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym a energią cieplną pozyskaną przez kolektory w sierpniu 2002 i 2003 r.



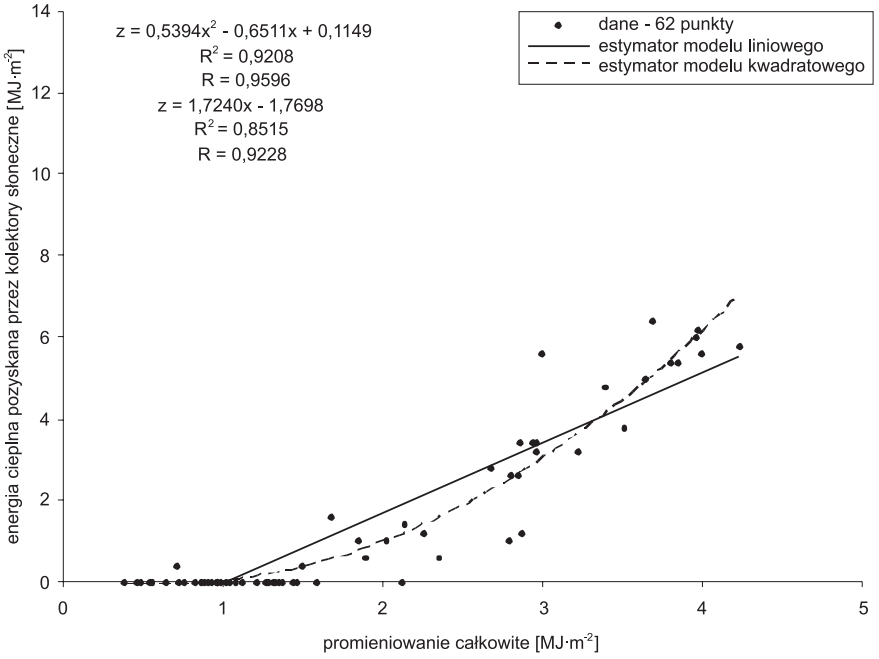
Rys. 86. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym a energią cieplną pozyskaną przez kolektory we wrześniu 2002 i 2003 r.



Rys. 87. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym a energią cieplną pozyskaną przez kolektory w październiku 2002 i 2003 r.



Rys. 88. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym a energią cieplną pozyskaną przez kolektory w listopadzie 2002 i 2003 r.



Rys. 89. Zależność pomiędzy promieniowaniem całkowitym a energią cieplną pozyskaną przez kolektory w grudniu 2002 i 2003 r.

Zależność pomiędzy energią promieniowania całkowitego a energią cieplną pozyskaną przez kolektory można opisać dwoma modelami. Jeden model zakłada zależność liniową a drugi zależność kwadratową.

1) Model liniowy

$$Z = a\,X + b \tag{1}$$

gdzie:
Z – energia cieplna pozyskana przez kolektory słoneczne [MJ·m^{-2}],
X – ilość energii promieniowania całkowitego zmierzona w Obserwatorium Wrocław–Swojec [MJ·m^{-2}].

2) Model kwadratowy

$$Z = a\,X\,\hat{}\,2 + b\,X + c \tag{4}$$

gdzie:
Z – energia cieplna pozyskana przez kolektory słoneczne [MJ·m^{-2}],
X – ilość energii promieniowania całkowitego zmierzona w Obserwatorium Wrocław-Swojec [MJ·m^{-2}].

Dla każdego z modeli zostały wyestymowane współczynniki *a*, *b* i *c* dla każdego miesiąca, a następnie uśredniono wartości odpowiednio dla tych samych miesięcy 2002 i 2003 r.

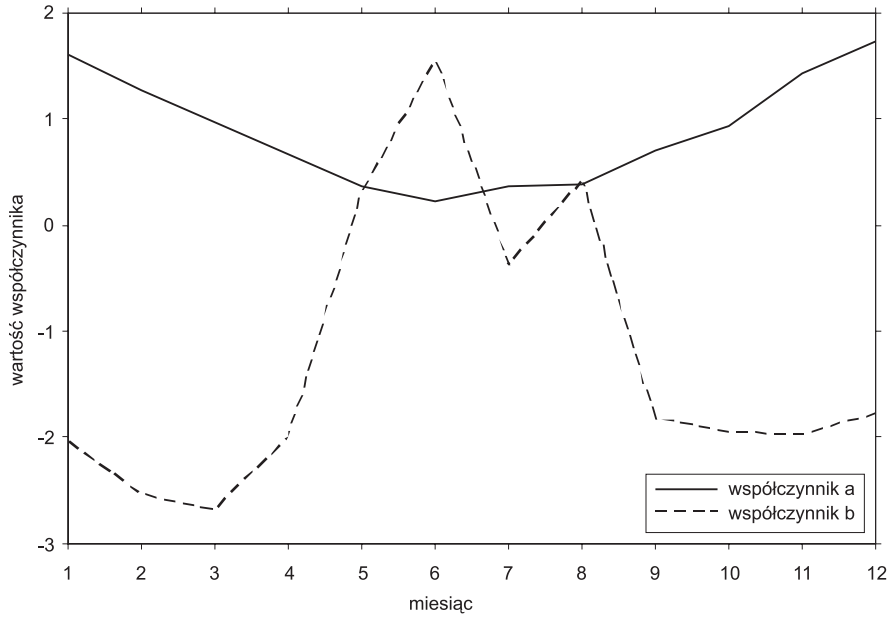
I tak dla modelu liniowego otrzymano:

Tabela 24

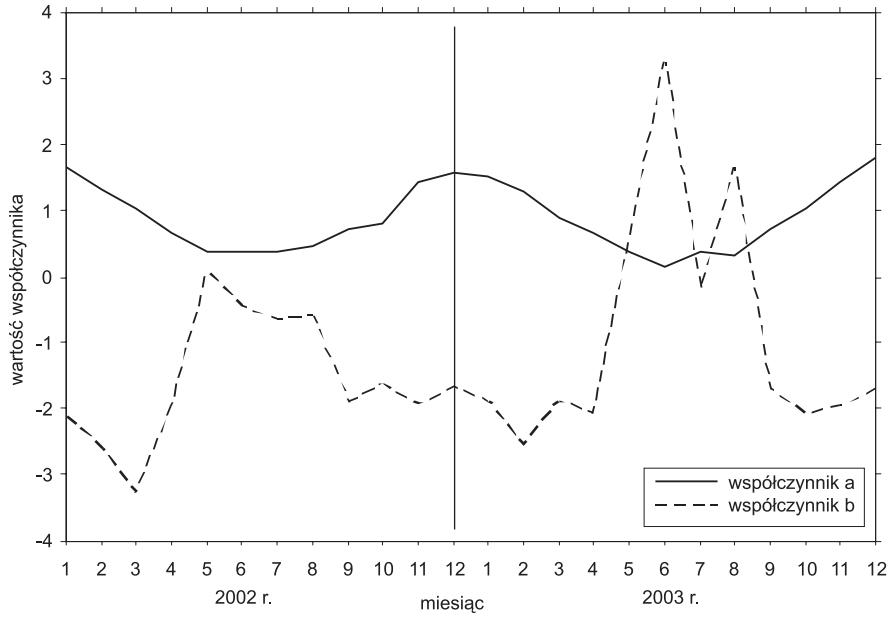
Współczynniki zależności liniowej pomiędzy energią promieniowania całkowitego a energią cieplną pozyskaną przez kolektory słoneczne (1m^2)

Miesiąc	Współczynnik	
	a	*b*
Styczeń	1,6062	-2,0386
Luty	1,2731	-2,5374
Marzec	0,9615	-2,6766
Kwiecień	0,6585	-1,9967
Maj	0,3681	0,2859
Czerwiec	0,2341	1,5520
Lipiec	0,3685	-0,3773
Sierpień	0,3801	0,4085
Wrzesień	0,7059	-1,8145
Październik	0,9325	-1,9411
Listopad	1,4303	-1,9556
Grudzień	1,7240	-1,7698

Ujemne wartości współczynników powodują, że dla pewnych dobowych wartości energii promieniowania całkowitego można otrzymać ujemną wartość energii cieplnej pozyskanej przez kolektory. Tak będzie dla bardzo małych wartości zmierzonej energii promieniowania całkowitego, dla których w rzeczywistości kolektory nawet nie włączyłyby się. W dalszych obliczeniach takie wartości ujemne zostaną zastąpione zerami.



Rys. 90. Zależność współczynników *a* i *b* dla modelu liniowego od miesiąca w roku



Rys. 91. Zależność współczynników *a* i *b* dla modelu liniowego od kolejnych miesięcy 2002 i 2003 r.

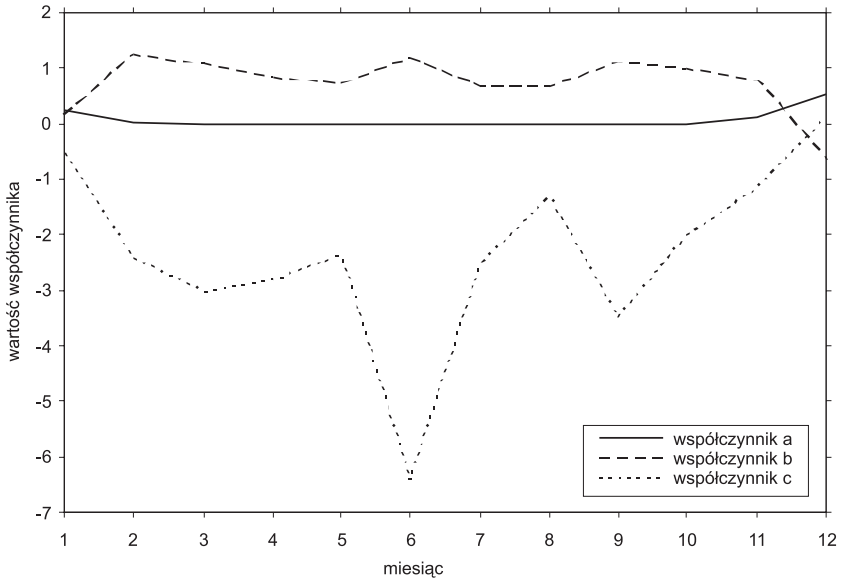
Z powyższego wykresu wyraźnie widać okresowość otrzymanych wyników.

Dla modelu kwadratowego otrzymano następujące współczynniki:

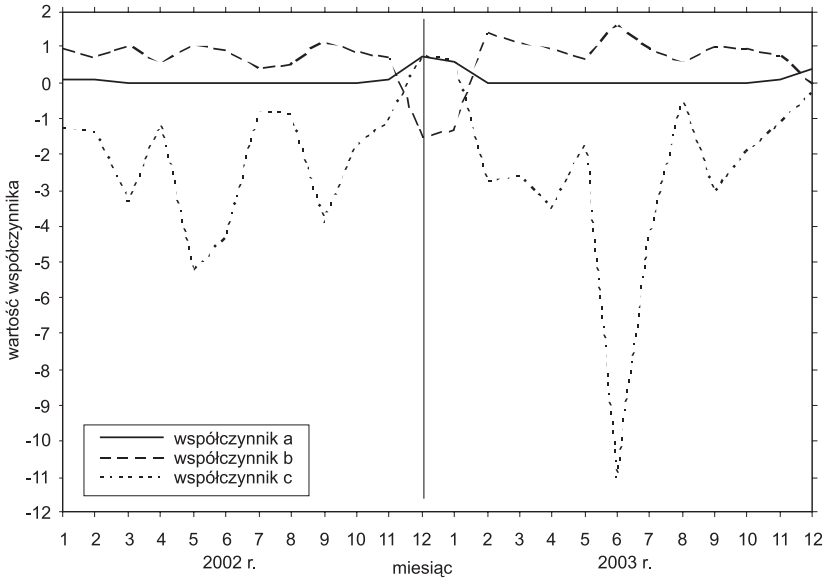
Tabela 25

Współczynniki zależności kwadratowej pomiędzy energią promieniowania całkowitego a energią cieplną pozyskaną przez kolektory słoneczne (1 m^2)

Miesiąc	Współczynnik		
	a	*b*	*c*
Styczeń	0,2550	0,1399	-0,5324
Luty	0,0043	1,2239	-2,4289
Marzec	-0,0052	1,0595	-3,0395
Kwiecień	-0,0057	0,8101	-2,8436
Maj	-0,0093	0,7025	-2,3588
Czerwiec	-0,0235	1,1602	-6,4368
Lipiec	-0,0077	0,6441	-2,5495
Sierpień	-0,0082	0,6358	-1,3238
Wrzesień	-0,0170	1,0804	-3,4963
Październik	-0,0025	0,9640	-2,0177
Listopad	0,0977	0,7730	-1,1538
Grudzień	0,5394	-0,6511	0,1149



Rys. 92. Zależność współczynników *a*, *b* i *c* dla modelu kwadratowego od miesiąca w roku



Rys. 93. Zależność współczynników *a*, *b* i *c* dla modelu kwadratowego od kolejnych miesięcy 2002 i 2003 r.

W tym przypadku także ujemne wartości współczynników powodują, że dla pewnych dobowych wartości energii promieniowania całkowitego można otrzymać ujemną wartość energii cieplnej pozyskanej przez kolektory. Tak będzie dla bardzo małych wartości zmierzonej energii promieniowania całkowitego, dla których w rzeczywistości kolektory nawet nie włączyłyby się. W dalszych obliczeniach takie wartości ujemne zostaną zastąpione zerami.

Wybór modelu:

Obydwa modele zostaną porównane ze względu na dwa kryteria. Pierwszym jest niewyjaśniony szum. Tabela na kolejnej stronie przedstawia, jaki ten szum jest dla obu modeli.

Tabela 26

Szum pozostały po dopasowaniu danych do modelu

Miesiąc	Szum (S^2)	
	Model liniowy	Model kwadratowy
Styczeń	$8{,}328^2$	$7{,}119^2$
Luty	$9{,}174^2$	$9{,}170^2$
Marzec	$10{,}645^2$	$10{,}614^2$
Kwiecień	$11{,}675^2$	$11{,}606^2$
Maj	$16{,}719^2$	$16{,}428^2$
Czerwiec	$16{,}744^2$	$14{,}640^2$
Lipiec	$14{,}096^2$	$13{,}910^2$
Sierpień	$15{,}545^2$	$15{,}378^2$
Wrzesień	$13{,}899^2$	$13{,}621^2$
Październik	$10{,}166^2$	$10{,}164^2$
Listopad	$9{,}998^2$	$9{,}760^2$
Grudzień	$6{,}390^2$	$4{,}667^2$
Razem (S)	143,377	137,079

Model kwadratowy ma niższy szum, przez co lepiej opisuje dane. Właściwą decyzją w takim razie wydaje się wybranie tego modelu. Porównajmy jeszcze oba modele ze względu na inną cechę, mianowicie prognozy.

Prognozy dla roku 2001:

Posiadane dane zawierają informację o promieniowaniu całkowitym i pozyskanej ilości energii cieplnej przez kolektory słoneczne dla dwóch miesięcy: listopada i grudnia 2001 r. Dla tych miesięcy możemy sprawdzić, czy z użyciem wcześniej otrzymanych współczynników uda nam się przewidzieć wartości energii pozyskanej przez kolektory. Wykonano prognozy dla każdego z modeli.

Prognoza z użyciem modelu liniowego:

Tabela 27

Prognozy i błąd predykcji dla modelu liniowego

Wyszczególnienie	Miesiąc	
	Listopad 2001	Grudzień 2001
Pozyskana energia cieplna przez kolektory słoneczne [MJ]	299,00	109,00
Prognoza pozyskania energii cieplnej przez kolektory słoneczne [MJ]	345,69	195,40
Błąd [%]	15,6	79,3

Prognoza z użyciem modelu kwadratowego:

Tabela 28

Prognozy i błąd predykcji dla modelu kwadratowego

Wyszczególnienie	Miesiąc	
	Listopad 2001	Grudzień 2001
Pozyskana energia cieplna przez kolektory słoneczne [MJ]	299,00	109,00
Prognoza pozyskania energii cieplnej przez kolektory słoneczne [MJ]	335,25	137,06
Błąd [%]	12,1	25,7

Prognoza dla modelu kwadratowego okazała się prawie ponad trzykrotnie skuteczniejsza dla grudnia i nieznacznie skuteczniejsza dla listopada. Oznacza to, że również to kryterium wskazuje na wybór modelu kwadratowego.

5.6. Analiza ekonomiczna opłacalności zastosowania instalacji słonecznych

Istnieje wiele czynników, które mają wpływ na opłacalność ekonomiczną zastosowania instalacji kolektorów słonecznych do podgrzewania wody użytkowej.

Pierwszym czynnikiem, który oddziałuje na opłacalność przedsięwzięcia jest właściwy wybór obiektu budowlanego. Dokładnie chodzi o to, jaki nośnik energii konwencjonalnej będzie zastąpiony energią pozyskaną przez kolektory. Nośniki energii konwencjonalnej, wy-

korzystywane do podgrzewania wody, różnią się m.in.: ceną, dostępnością, wartością opałową, obciążeniem dla środowiska naturalnego oraz różną technologią ich spalania. Najlepsze efekty, jeżeli chodzi o opłacalność inwestycji, osiąga się w obiektach, gdzie zastępujemy najdroższe nośniki energii konwencjonalnej energią pozyskaną z instalacji słonecznej. W tabeli 29 porównano różne nośniki energii konwencjonalnej pod względem ich wartości opałowej, sprawności wykorzystania, ceny i faktycznych kosztów jej wytworzenia.

Tabela 29

Koszt wytworzenia 1 GJ energii cieplnej dla odbiorcy indywidualnego na dzień 1 października 2009 r.

Nośnik energii	Jednostka obliczeniowa	Cena jednostki energii	W_U – Wartość opałowa	η – Sprawność urządzenia	K_N – koszt 1 GJ energii cieplnej
		[zł]	[MJ·jednostkę$^{-1}$]	[%]	[zł·GJ^{-1}]
Węgiel kamienny **kocioł na węgiel**	1000 kg	725,00 (1)	25000	78	**35,38**
Gaz ziemny wysokometanowy **kocioł gazowy**	1000 m^3	2014,71(2)	39500	94	**54,07**
Olej opałowy **kocioł olejowy**	1000 kg	2940,00 (3)	42700	94	**72,98**
Gaz płynny (propan) **kocioł gazowy**	1000 kg	4959,00 (4)	46350	94	**113,41**
Energia elektryczna (stała taryfa G-11) **grzałka elektryczna**	1000 kWh	466,89 (5)	3600	98	**132,29**

[1] Cena według składu opału we Wrocławiu. W cenę wliczony jest transport 15 zł·T^{-1}.
[2] Cena według taryfy W – 2 zakładu gazowniczego.
[3] Cena według firmy sprzedającej olej opałowy. 2,45 zł·l^{-1} 1 kg = 1,2 l.
[4] Cena według firmy sprzedającej gaz płynny do celów grzewczych. 2,61 zł·l^{-1} 1 kg = 1,9 l.
[5] Cena według taryfy Energiapro Gigawat Wrocław S.A.

Jak widać z powyższej tabeli, do najdroższych nośników energii można zaliczyć gaz płynny (propan) oraz energię elektryczną, gdzie koszt wykorzystania 1 GJ energii wynosi odpowiednio 113,41 zł i 132,29 zł. Średnie koszty wykorzystania 1 GJ energii wyniosą odpowiednio, przy użyciu gazu ziemnego (54,07 zł) i oleju opałowego (72,98 zł). Natomiast do tanich nośników energii można zaliczyć węgiel kamienny (35,38 zł·GJ^{-1}).

Kolejnym czynnikiem wpływającym na opłacalność inwestycji jest wielkość zasobów energii słonecznej występujących w miejscu zainstalowania kolektorów słonecznych. Analiza warunków meteorologicznych dla obszaru Wrocławia i okolic w ciągu dwóch ostatnich lat w porównaniu z wynikami meteorologicznymi z wielolecia 1961–1995 opisana została w rozdziale 5.2.

Zorientowanie powierzchni kolektorów względem padających promieni słonecznych jest także czynnikiem oddziałującym na efektywność pozyskiwania energii cieplnej przez kolektory. Analiza wpływu kąta nachylenia połaci i położenia budynku na efektywność pozyskiwania energii cieplnej przez kolektory słoneczne została przedstawiona w rozdziale 5.3.

Po przeprowadzeniu dwuletnich badań na stanowisku badawczym (ustawienie kolektorów było optymalne dla najefektywniejszego pozyskiwania energii słonecznej w okresie całorocznym) otrzymano wyniki pozyskania energii cieplnej z instalacji słonecznej, która to energia została wykorzystana do podgrzania wody użytkowej. W roku 2002 ilość energii cieplnej wykorzystanej do podgrzania ciepłej wody wyniosła E_1 = 8,846 GJ, natomiast w roku 2003 – E_2 = 10,061 GJ. Do dalszej analizy ekonomicznej przyjęto, że w ciągu okresu rocznego można zaoszczędzić, wykorzystując instalację słoneczną $E_{ŚR}$ = 9,454 GJ energii cieplnej, która posłużyła do podgrzania wody użytkowej.

$$E_{ŚR} = \frac{E_1 + E_2}{2}, \text{ [GJ]} \tag{18}$$

Przedstawione w pracy wyniki pozyskania energii cieplnej przez instalację słoneczną pokazują jej faktyczną ilość dostarczoną do podgrzewacza z pominięciem strat cieplnych występujących na kolektorach i instalacji transportującej czynnik, który przenosi tę energię.

Cena zakupu instalacji słonecznej jest jednym z głównych czynników decydujących o opłacalności zastosowania układów słonecznych. Im niższa jej cena, tym szybszy może być czas zwrotu poniesionych kosztów zakupu instalacji słonecznej, choć nie w każdym przypadku (za niższą ceną przeważnie kryje się niższa sprawność i trwałość instalacji). Obecnie na rynku polskim sprzedaje swoje produkty wiele firm polskich i zagranicznych. Instalacje słoneczne produkowane przez firmy różnią się jakością wykonania, poziomem technicznym, ceną i długością bezawaryjnej eksploatacji układów. Do prowadzonych badań wykorzystano instalację słoneczną zachodniej firmy. Jest to standardowa instalacja słoneczna z dwoma panelami kolektorów płaskich, wykonana z bardzo dobrych pod względem jakości materiałów. Cena kompletnego *zestawu 1*, na dzień 1 października 2009 r., wynosi C = 13.069 zł (z vat = 7%). Do dalszej analizy przyjęto, że w przypadku budynku bez zamontowanej instalacji słonecznej występuje także potrzeba zakupu podgrzewacza pojemnościowego, ale o mniejszej pojemności. Od ceny zestawu odejmujemy $C_{P\text{-}160}$ = 4.311 zł (cena podgrzewacza jednowężownicowego o pojemności 160 l tej samej firmy z vat 7%). Tak więc końcowa cena rozbudowy systemu podgrzewania ciepłej wody (bez kosztów montażu) w budynku o instalację kolektorów słonecznych wyniesie C_K = 8.758 zł.

$$C_K = C - C_{P\text{-}160}, \text{ [zł]} \tag{19}$$

Analizie ekonomicznej poddano także podobnej klasy zestaw instalacji słonecznej, tej samej firmy, ale składający się z dwóch kolektorów płaskich z innym rodzajem powłoki absorpcyjnej i zbiornikiem o mniejszej pojemności (250 l). *Zestaw 2* (powierzchnia kolektorów 4,6 m^2) charakteryzuje się niewielkim spadkiem efektywności pozyskiwania energii cieplnej względem *instalacji 1*. W okresie czterech ciepłych miesięcy maj – sierpień, występowały i tak znaczne nadwyżki energii, której kolektory (*instalacja 1*) już nie przejmowały, ponieważ cały zbiornik (300 l) został podgrzany (w 4 do 5 godzin). Cena kompletnego *zestawu 2*, na dzień 1 października 2009 r., wynosi C = 8.987 zł (z vat = 7%). Po odjęciu $C_{P\text{-}160}$ = 4.311 zł (cena podgrzewacza jednowężownicowego o pojemności 160 l tej samej firmy) cena końcowa rozbudowy systemu podgrzewania ciepłej wody (bez kosztów montażu) w budynku o instalację kolektorów słonecznych wyniesie C_K = 4.676 zł.

Oprócz poniesionych kosztów zakupu instalacji (C_K), po stronie wydatków na inwestycje dochodzą koszty związane z jej montażem. Montaż kompletnej instalacji zajmuje wyspe-

cjalizowanej firmie mniej więcej koło 12 godzin (dwóch pracowników). Koszt montażu instalacji z dodatkowymi materiałami (K_M) na stanowisku badawczym wyniósł K_M = 1000 zł.

Na końcowy koszt inwestycji (K_I) składają się cena końcowa (C_K) i koszty montażu (K_M). W przypadku *zestawu 1* koszt końcowy to K_I = 9.758 zł, natomiast koszt końcowy *zestawu 2* wyniósł K_I = 5.676 zł.

$$K_I = C_K + K_M \text{, [zł]} \tag{20}$$

Podczas pracy instalacji występują koszty związane z normalną eksploatacją systemu (K_E). Do kosztów eksploatacji (K_E) zaliczono koszty (K_C) na potrzeby wymiany cieczy transportującej energię cieplną w układzie kolektory – podgrzewacz i koszty (K_P) związane z poborem energii elektrycznej przez pompę obiegu solarnego. Dwadzieścia pięć litrów specjalnego niezamarzającego płynu kosztuje 550 zł. Ponieważ wymiana płynu odbywa się co sześć lat, roczny średni koszt wymiany płynu w instalacji wyniesie K_C = 91,7 zł·rok^{-1}. Pompa układu słonecznego na stanowisku badawczym pracowała średnio w ciągu dwóch lat 1415 h·rok^{-1}. Natomiast pobór energii elektrycznej przez pompę wynosił 0,065 kW·h^{-1}. Po przemnożeniu czasu pracy pompy (1415 h·rok^{-1}) przez moc pompy (0,065 kW·h^{-1}) i cenę jednej kWh energii elektrycznej (0,47 zł·kWh^{-1}) otrzymano roczny koszt pracy pompy (K_P). Koszty związane z poborem energii elektrycznej przez pompę obiegową wyniosły K_P = 43,2 zł·rok^{-1}, a średni roczny koszt eksploatacji instalacji kolektorów słonecznych K_{El} = 134,9 zł·rok^{-1}. Ponieważ kotły też potrzebują energii elektrycznej do napędu pompy obiegowej ładującej bufor, koszty K_P uwzględniono w dalszych obliczeniach tylko przy zastępowaniu energii elektrycznej wykorzystywanej do podgrzewania wody użytkowej.

Dla grzałki elektrycznej: $$K_{E1} = K_C + K_P \text{, [zł]} \tag{21}$$

lub

Dla kotłów na węgiel, gaz i olej: $$K_{E2} = K_C \text{, [zł]} \tag{22}$$

Końcowym wynikiem obliczenia czasu zwrotu (T_Z) poniesionych nakładów na inwestycję jest podstawienie otrzymanych wcześniej kosztów inwestycji (K_I), kosztów eksploatacji ($K_{E1/2}$) i zysku (Z) z oszczędności energii konwencjonalnej do następującego wzoru:

$$T_Z = \frac{K_I}{Z - K_{E1/2}} \text{, [lat]} \tag{23}$$

Otrzymany zysk (Z) będzie zaoszczędzeniem energii konwencjonalnej, którą w przypadku braku instalacji słonecznej należałoby zużyć do podgrzania wody użytkowej. Z przeprowadzonych badań wynika, że średnio w ciągu dwóch lat zaoszczędzono $E_{ŚR}$ = 9,454 GJ rocznie energii cieplnej. W zależności od zastępowanego nośnika energii konwencjonalnej przez energię słoneczną otrzymany zysk (Z) będzie się różnił. Zysk (Z) otrzymamy po przemnożeniu ilości zaoszczędzonej energii ($E_{ŚR}$) przez koszty nośnika energii (K_N).

$$Z = E_{ŚR} \cdot K_N \text{, [zł]} \tag{24}$$

Po wstawieniu do powyższego wzoru kosztów dla różnych nośników energii – K_N (tab. 29) otrzymano roczne oszczędności w zł (bez uwzględnienia kosztów eksploatacji) kosztów, jakie wiązałyby się z wykorzystaniem energii konwencjonalnej (tab. 30).

Tabela 30

Zysk otrzymany w wyniku zaoszczędzenia różnych nośników energii konwencjonalnej dla okresu rocznego

Wyszczególnienie	Nośnik energii konwencjonalnej				
	Węgiel kamienny	Gaz ziemny GZ 50	Olej opałowy	Gaz płynny (propan)	Energia elektryczna (stała taryfa)
Zysk (Z) w [zł]	**334,48**	**511,18**	**689,95**	**1072,18**	**1250,67**

Mając określone koszty inwestycji (K_I), zysk (Z) dla różnych nośników energii konwencjonalnej oraz koszty eksploatacji ($K_{E1/2}$), możemy przystąpić do obliczenia czasu zwrotu (T_Z) poniesionych kosztów inwestycyjnych (K_I). Wykorzystując wzór 23, przedstawiono czas zwrotu inwestycji (T_Z) w tabeli 31, przy zastąpieniu różnych nośników energii konwencjonalnej.

Tabela 31

Czas zwrotu inwestycji (T_Z) przy zastąpieniu różnych nośników energii konwencjonalnej w latach

Czas zwrotu inwestycji T_Z	Nośnik energii konwencjonalnej				
	Węgiel kamienny	Gaz ziemny GZ 50	Olej opałowy	Gaz płynny (propan)	Energia elektryczna (stała taryfa)
Dla *instalacji 1* w latach	**40,2**	**23,3**	**16,3**	**10,0**	**8,7**
Dla *instalacji 2* w latach	**23,4**	**13,5**	**9,5**	**5,8**	**5,1**

Żywotność instalacji słonecznych, które zostały wykonane z materiałów dobrej klasy, zakłada się mniej więcej na 25 lat. W niektórych krajach Unii Europejskiej tego typu inwestycje, które chronią środowisko naturalne, są dofinansowywane. W przypadku dofinansowania cena zakupu instalacji słonecznej dla potencjalnego inwestora jest niższa. Okres zwrotu poniesionych kosztów na inwestycję maleje proporcjonalnie do wielkości dofinansowania. Należy zaznaczyć, że ceny nośników energii konwencjonalnej (tab. 29) z każdym rokiem są drastycznie podnoszone, co oznacza, że koszt zwrotu inwestycji będzie się nam proporcjonalnie skracał (tab. 31).

Analizując opłacalność ekonomiczną zastosowania instalacji słonecznych, można także określić, jaki będzie koszt jednostkowy energii (K_J). Koszt jednostkowy energii (K_J) możemy ustalić wykorzystując następujący wzór [Wiśniewski 1992]:

$$K_J = \frac{K_I \cdot a_1 + E_D \cdot K_N}{E_{SR}} \quad , [zł] \tag{25}$$

gdzie:

K_I – koszty inwestycji, czyli cena instalacji słonecznej (C_K) i koszty montażu tej instalacji (K_M) [zł];

a_1 – rata rozszerzonej reprodukcji, która składa się z:
– amortyzacji 4% (ponieważ okres żywotności instalacji zakładamy na 25 lat – 100% /25 = 4%);
– oprocentowania 0% przy założeniu, że inwestor zakupił instalację ze środków własnych (w przypadku gdy została zaciągnięta pożyczka na zakup instalacji, to wtedy przyjmujemy roczne oprocentowanie tej pożyczki);
– wymiany płynu w układzie kolektory – podgrzewacz (dla *instalacji 1* wskaźnik ten wynosi 0,65%, natomiast dla *instalacji 2* – 1,04%);
E_D – energia elektryczna dostarczona z zewnątrz do napędu pompy obiegu kolektory – podgrzewacz w okresie rocznym (91,98 kWh·rok^{-1});
K_N – cena energii elektrycznej na dzień 1 października 2009 r. – 0,47 zł·kWh^{-1};
$E_{ŚR}$ – roczna podaż energii z kolektorów słonecznych – 9,454 GJ = 2626,11 kWh.

Po wstawieniu do wzoru danych koszt jednostkowy (K_J) wytworzenia 1 kWh energii dla *instalacji 1* wyniesie **0,189 zł·kWh^{-1}**, natomiast dla *instalacji 2* – **0,125 zł·kWh^{-1}**.

Przy zastosowaniu instalacji słonecznej należy także podkreślić, że oszczędzamy naturalne zasoby paliw konwencjonalnych (tab. 32)

Tabela 32

Roczne oszczędności paliw konwencjonalnych przy zastosowaniu instalacji słonecznej

Wyszczególnienie	Nośnik energii konwencjonalnej			
	Węgiel kamienny	Gaz ziemny GZ 50	Gaz płynny (propan)	Olej opałowy
	[kg]	[m^3]	[l]	[l]
Oszczędność	461,35	253,70	410,80	281,63

W czasach wyczerpywania się konwencjonalnych źródeł energii jest to bardzo ważna kwestia. W tabeli 33 przedstawione zostały ogólnoświatowe zapasy paliw naturalnych oraz orientacyjny rok ich wyczerpania według [Ciechanowicz 1997, Kucowski i inni 1997].

Tabela 33

Zasoby paliw naturalnych

Paliwo naturalne	Zapasy			Rok wyczerpania	
	jednostka	znane	przypuszczalne	znane	przypuszczalne
Węgiel	[Pg]	600	16400	po 2060	po 2200
Ropa	[Pg]	82,4	192,6	2020	2050
Gaz	[Tm^3]	65	339	2012	po 2060
Uran	[Pg]	1,02	1,08	2060	2200

Oprócz aspektów ekonomicznych i ochrony naturalnych zasobów paliw konwencjonalnych, wykorzystując instalację słoneczną, przyczyniamy się do redukcji zanieczyszczeń uwalnianych do atmosfery, które to zanieczyszczenia powstają podczas spalania paliw naturalnych [Rubik 2000] (tab. 34).

Tabela 34

Redukcja rocznych emisji zanieczyszczeń uwalnianych do atmosfery

Związek emitowany	Nośnik energii konwencjonalnej		
	Węgiel kamienny	Olej opałowy	Gaz ziemny GZ 50
	kg	kg	kg
CO_2	1450,72	899,55	665,75
CO	21,73	0,12	0,04
SO_X	7,20	1,64	0
NO_X	5,54	0,97	0,33
Pyły	27,28	0	0
Razem	1512,47	902,28	666,12

Z tabeli 34 wynika, że przy wykorzystaniu bezpośrednio taniego nośnika energii (węgiel kamienny) przedostają się do atmosfery bardzo duże ilości tlenków węgla, siarki, azotu oraz pyłów. W samym Wrocławiu, według danych z „Programu energetycznego Wrocławia" (z 1997 r.), ponad 70% globalnego zużycia energii uzyskuje się przez spalanie w mieście węgla kamiennego, a około 20% z gazu. Wykorzystując do podgrzewania wody energię elektryczną, do wytworzenia której zużywany jest głównie węgiel kamienny, przyczyniamy się w znaczny sposób do emisji zanieczyszczeń uwalnianych do atmosfery przez elektrownie i elektrociepłownie.

Podsumowując, należy podkreślić, iż aktualnie optymalnym rozwiązaniem byłoby zaprojektowanie instalacji słonecznej, która służyłaby do podgrzewania wody użytkowej w budynku, w którym jest wykorzystywany do zapewnienia ciepłej wody drogi nośnik energii konwencjonalnej (energia elektryczna, gaz płynny – propan, olej opałowy i gaz ziemny). Oprócz opłacalności ekonomicznej instalacja przyczyniałaby się do ochrony naturalnych zasobów paliw kopalnych i ochrony środowiska.

6. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Kolektory słoneczne jako alternatywne źródło energii cieplnej mogą być efektywnie wykorzystywane w celu uzyskania ciepłej wody użytkowej dla celów bytowo-gospodarczych w budownictwie mieszkaniowym i rolniczym na obszarze Wrocławia i jego okolic. W okresie rocznym można średnio zaoszczędzić 9,454 GJ energii dla typowego domu jednorodzinnego.

2. Instalacje słoneczne w typowym domu jednorodzinnym wykorzystywane do podgrzewania ciepłej wody użytkowej w okresie (kwiecień – wrzesień) mogą pokryć aż ponad 94% zapotrzebowania a w ciągu całego roku ponad 72% zapotrzebowania na energię cieplną do podgrzewania wody użytkowej. W okresie od maja do sierpnia występują znaczne nadwyżki energii, którą kolektory słoneczne mogłyby przejąć i podgrzać większą ilość wody (średnio 1,5 m^3 więcej dla każdego z tych miesięcy).

3. W okresie od kwietnia do września (II i III kwartał roku) we Wrocławiu i okolicy występują bardzo korzystne warunki meteorologiczne do pozyskiwania przez kolektory słoneczne energii cieplnej. Dla I kwartału roku (styczeń, luty, marzec) występują średnie warunki meteorologiczne do pozyskiwania energii cieplnej przez instalację słoneczną. Natomiast dla IV kwartału roku (październik, listopad, grudzień) występują złe warunki meteorologiczne, które powodują drastyczny spadek efektywności pozyskiwania energii cieplnej przez instalację słoneczną.

4. Z przeprowadzonej symulacji wynika, że odchylenie położenia kolektorów słonecznych od kierunku południowego w zakresie od 40º do -20º spowoduje spadek pozyskiwanej energii cieplnej maksymalnie o 1,7%. Natomiast zmiana pochylenia kolektorów względem płaszczyzny poziomej w zakresie od 30º do 60º wpłynie na maksymalny spadek pozyskiwanej energii cieplnej o 1,2%. Optymalne ustawienie kolektorów dla całorocznego efektywnego pozyskiwania energii cieplnej wynosi – azymut 10º skierowania w kierunku zachodnim i kąt nachylenia względem powierzchni poziomej 45º.

5. Analizując ilość pozyskiwanej energii cieplnej przez kolektory słoneczne, zaproponowano dwa różne modele matematyczne w oparciu o znane wartości promieniowania całkowitego. Pierwszy do prognozowania ilości energii cieplnej pozyskanej przez kolektory słoneczne w poszczególnych miesiącach roku. Drugi model do prognozowania maksymalnej ilości wody podgrzanej przez kolektory słoneczne. Weryfikacja modeli potwierdziła ich prawidłowość. Ze stwierdzonej prawidłowości wynika, że modele opisujące przyjęte współzależności (dla modelu prognozowania pozyskania energii cieplnej przez kolektory słoneczne średni miesięczny współczynnik determinacji dla krzywych wyniósł $R^2 = 0,75$, przy średnim

miesięcznym współczynniku korelacji $R = 0{,}86$) mogą znaleźć praktyczne zastosowanie przy ocenie przydatności nowo projektowanych instalacji słonecznych.

6. Wykorzystując instalację słoneczną w typowym budynku mieszkalnym (jednorodzinnym), przy 100% pokryciu kosztów zakupu instalacji słonecznej, inwestycja jest opłacalna, gdy w budynku do podgrzewania wody użytkowej wykorzystywane są konwencjonalne nośniki energii takie jak: energia elektryczna, gaz ciekły (propan), olej opałowy i gaz ziemny. Oprócz ekonomicznych zysków mamy także zyski niepoliczalne w postaci ochrony środowiska (redukcja zanieczyszczeń uwalnianych do atmosfery) i oszczędności paliw kopalnych.

7. PIŚMIENNICTWO

Anderson B., Wells M.: 1994. The Homeowner`s Guide to Natural Heating and Cooling, Brick House Publishing Co., Amherst, New Hampshire.

Antonopoulos K.A., Vrachopoulos M.: 1996. On-site experimental estimation of thermal conductivities and heat capacities in multiplayer walls under arbitrary transient conditions using explicit and implicit finite difference schemes. Int. J. Energy Research, J. Wiley & Sons Ltd., 20, 1, 17–32.

Bac. S., Rojek M.: 1979. Meteorologia i klimatologia. PWN, Warszawa.

Bedi E.: 1996. Kierunki odnawialnych energii, Nowe wiadomości dla Europy Środkowo – Wschodniej, t. 12. ZG Polskiego Klubu Ekologicznego, Kraków.

Benjamin J.R., Cornell C.A.: 1977 Rachunek prawdopodobieństwa, Statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów. WNT, Warszawa.

Bogdaniecko J.: 1989. Odnawialne źródła energii. Biblioteka Problemów, t. 290. PWN, Warszawa.

Brinkworth B. J.: 1979. Energia słoneczna w służbie człowieka. PWN, Warszawa.

Bryś K.: 1997. Rola czynnika radiacyjnego w ewapotranspiracji. Praca doktorska, IKiOŚ AR, Wrocław.

Bryś K., Bryś T.: 2001. Wahania natężenia promieniowania słonecznego w 55-letniej serii wrocławskiej (1946–2000). Pr. i St. Geogr. WGSiR Uniwersytet Warszawski, Warszawa, 29, 161–171.

Bzowska D. : Wpływ losowych zmian pogody na procesy wymiany ciepła w budynkach. Praca doktorska, IPPT PAN, Warszawa 1996.

Bzowska D., Kossecka E.: 1992. Analiza probabilistyczna dobowych danych pogodowych dla Warszawy, Zeszyty Naukowe IPPT PAN 10.

Bzowska D., Kossecka E.: 1993. Analiza promieniowania słonecznego w Warszawie w aspekcie energetyki słonecznej. Zeszyty Naukowe IPPT PAN 4.

Carpenter J.L., Vallis E.A., Vranch A.T.: 1986. Performance of a UK Dairy Solar Water Heater. Journal of Agricultural Engineering Resources, 35, 131–139.

Carvalho M.J., Costa J.C.: 1992. Monitoring of ten water heating solar systems Proc. of the Biennial Congress of the ISES, Denver, USA, 2, 2.

Castro M.A., Carpio J., Peire J., Rodriguez J.A.: 1996 Renewable-Energy integration assessment through a dedicated computer program. Solar Energy, 57, 6, 471–484.

Chochowski A.: 1991 Analiza stanów termicznych płaskiego kolektora słonecznego. SGGW, Warszawa.

Chochowski A. i in.: 1996. Metoda sterowania pracą instalacji słonecznej. PB 0487/S4/94/07 SGGW, Warszawa.
Chochowski A., Czekalski D.: 1999. Słoneczne instalacje grzewcze. COIB, Warszawa.
Chochowski A., Wójcicka-Migasiuk D.: 1998. Equivalent network method in steady state analysis of hot water plants incorporating solar collectors in diaries. – abstract- 3rd Int. Conference "Physic of Agro and Food Products", Instytut Agrofizyki PAN, Lublin, 24.
Chwieduk D.: 1994. Słoneczne i gruntowe systemy grzewcze. Zagadnienia symulacji funkcjonowania i wydajności cieplnej. PAN, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, IPPT, Warszawa.
Chybowski B.: 1973. Instalacje ciepłej wody użytkowej. Arkady, Warszawa.
Ciechanowicz W.: 1997. Energia, środowisko i ekonomia. Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa.
Cieśliński J. Mikielewicz J.: 1996. Niekonwencjonalne źródła energii. Politechnika Gdańska, Gdańsk.
Coiante D., Barra L.: 1996. Renewable Energy Capability to Save Carbon Emissions. Solar Energy, 57, 6, 485–491.
Dąbrowski J.: 2007 „Analiza możliwości wykorzystania kolektorów słonecznych do podgrzewania wody użytkowej", Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, 5, artykuł recenzowany, 8–11.
Dąbrowski J.: 2004. „Energia, która nic nie kosztuje", Murator, 5, Przedstawienie wyników badań.
Dąbrowski J.: 2006. „Wykorzystanie energii Słońca – instalacja kolektorów słonecznych", Ekonatura nr 5,.
Dąbrowski J.: 2004. „Podgrzewanie wody użytkowej w budynku mieszkalnym przy wykorzystaniu instalacji kolektorów słonecznych", Dolnośląska fundacja ekorozwoju, CD-ROM.
Dąbrowski J., Hutnik E.: 2006. „Analiza wyników badań wykorzystania instalacji słonecznej w budynku mieszkalnym", Budownictwo i inżynieria środowiska – Zeszyt Naukowy Politechniki Rzeszowskiej, 40, 219–226.
Dąbrowski J., Hutnik E.: 2002 Efektywność stosowania cieczowych kolektorów słonecznych do podgrzewania ciepłej wody użytkowej w budownictwie jednorodzinnym. Zbiór referatów, Polanica Zdrój, 589–592.
Dąbrowski J., Hutnik E.: 2007. „Opłacalność ekonomiczna zastosowania instalacji kolektorów słonecznych do podgrzewania wody użytkowej", Energetyka, 9, artykuł recenzowany, 669–672.
Dąbrowski J., Hutnik E.: 2005. „Prognozowanie energii cieplnej możliwej do pozyskania przez kolektory słoneczne", Wrocław-Polanica Zdrój, 136–138. Zbiór referatów z VIII Międzynarodowej Konferencji Naukowej pt. Teoretyczne i aplikacyjne problemy inżynierii rolniczej, Polanica Zdrój 2005 r., 21–24 czerwca.
Dąbrowski J., Hutnik E.: 2008. „Wpływ warunków meteorologicznych na pozyskiwanie energii cieplnej przez instalację słoneczną", Zeszyt Naukowy Inżynierii Rolniczej, 4 (102), artykuł recenzowany, 225–232,
Dąbrowski J., Hutnik E.: 2007. „Wpływ warunków meteorologicznych na pozyskiwanie energii cieplnej przez kolektory słoneczne", Wrocław-Polanica Zdrój, 80–81. Zbiór referatów z IX Międzynarodowej Konferencji Naukowej pt. Teoretyczne i aplikacyjne problemy inżynierii rolniczej, Polanica Zdrój 2007 r. 19–22 czerwca.

Dąbrowski J., Hutnik E.: 2004. Wykorzystanie cieczowych kolektorów słonecznych do podgrzewania ciepłej wody użytkowej w budownictwie mieszkaniowym. Acta, 3 (1), 128–140, Warszawa.
Dąbrowski J., Hutnik E.: 2002. Zastosowanie cieczowych kolektorów słonecznych do podgrzewania ciepłej wody użytkowej w budownictwie jednorodzinnym. Zeszyty Naukowe Inżynierii Rolniczej, 5, 413–420, Warszawa.
Dąbrowski J., Hutnik E., Bryś K.: 2004 Efektywność typowej instalacji słonecznej w warunkach meteorologicznych okolic Wrocławia. Problemy Inżynierii Rolniczej nr 2 (44), 41–49, Warszawa.
Dąbrowski J., Hutnik E., Tatko R.: 2006. „Szacowanie ilości energii cieplnej możliwej do pozyskania przez kolektory słoneczne", Zeszyt Naukowy Inżynierii Rolniczej, 2 (77), artykuł recenzowany, 205–212.
Dąbrowski J., Tatko R.: 2007. „Wpływ zastosowania instalacji kolektorów słonecznych w budynku jednorodzinnym na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń uwalnianych do atmosfery", Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, 12, artykuł recenzowany, 25–28.
Dane GUS z Raportu Wskaźnikowego 2001.
Domański R.: 1990. Magazynowanie energii cieplnej. PWN, Warszawa.
Dreszer A.K., Michałek R., Roszkowski A.: 2003. Energia odnawialna – możliwości jej pozyskiwania i wykorzystania w rolnictwie. Wydawnictwo PTIR, Kraków.
Druck H., Hahne E.: 1996. Thermal Testing of Stores for SDHW Systems. Proc. EuroSun`96 DGS Sonenenergie Verlags-GmbH-München, 136–137.
Dubicka M., Błaś M.: 2002. Uwarunkowania geograficzne pozyskiwania energii słonecznej na Dolnym Śląsku. Materiały konferencyjne, Wrocław, 79–87.
Duffie J.A., Beckman J.A.: 1991. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley and Sons, New Yourk.
Fisch M.N., Guigas M., Dalenback J.O.: 1996. Large Scale Solar District Heating-Status and Future in Europe Proc. EuroSun`96 DGS Sonenenergie Verlags-GmbH-München, 157–170.
Folkerts D., Orshoven van D., Pavic D., Mack M.: 1996. A New Design Tool for Collectors with Transparent Insulation (TIM) Proc. EuroSun`96 DGS Sonenenergie Verlags-GmbH-München, 171–175.
Furbo S., Shah L.J.: 1996. Optimum Solar Collector Fluid Flow Rates Proc. EuroSun`96 DGS Sonenenergie Verlags-GmbH-München, 189–193.
Gaszyński L.: 1993. O nowych źródłach energii. WSziP, Warszawa.
Gogół W. (praca zespołowa): 1993. Konserwacja termiczna energii promieniowania słonecznego w warunkach krajowych. Ekspertyza, PAN, Warszawa.
Gołębiowski Cz., Wiśniewski G.: 1990. Kolektory słoneczne do podgrzewania wody i powietrza. IBMER, Warszawa.
Grzybowska A.: 1988 Zasoby energii słonecznej w Polsce. Charakterystyka dopływu promieniowania słonecznego na powierzchnie nachylone i ściany pionowe. IMiGW CPBR 10.15.
Harland E.: 1994. Eco-Renovation Chelsea Green Publishing Co., Vermont.
Hobler T.: 1979 Ruch ciepła i wymienniki. WNT, Warszawa.
Holec M., Tymański P.: 1974. Podstawy meteorologii i nawigacji meteorologicznej. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk.

Hollands K.G.T., Fraser K.F., Brunger A.P.: 1995. An empirical model for natural convection heat exchangers in SDHW systems. Solar Energy, 55, 75–84.
Howel J.R., Bannerot R.B., Vliet G.C.: 1982. Solar-thermal energy systems, McGraw-Hill Co., New York.
Howells P.B.: 1984. Simulation of system control strategies for solar thermal applications. PhD Thesis, University of Wales College of Cardiff.
Hutnik E.: 1988. Analiza rozwiązań termicznych kolektorów słonecznych stosowanych w rolnictwie. Materiały Instytutu Budownictwa Rolniczego we Wrocławiu, Wrocław.
Janowski T., Nalewaj K., Wójcicka-Migasiuk D., Złonkiewicz Z.: 1997. Laboratory of Heating Systems Employing Solar Energy 2nd Int. Conf. ELMECO`97, Conf. Proc., Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 269–272,.
Januszewski J.: 1986 Zasady projektowania urządzeń słonecznych do celów grzewczych. Wrocław PW.
Kaiser H.: 1995 Wykorzystanie energii słonecznej. Wydawnictwa AGH, Kraków.
Kemal Dagsoz A., Yuksel Huseyin M.: 1996. SDHW Systems with Closed Circuit Proc. EuroSun`96 DGS Sonenenergie Verlags-GmbH-Munchen, 111–114.
Khatib I.A.: 1989. Indoor short term performance testing of SDHW Systems and long term predictions PhD. Thesis, University of Wales College of Cardiff.
Kierlańczyk T., Kotte G.: 1996. Zasady doboru wielkości zasobników ciepła w miejskich systemach ciepłowniczych, COW nr 6.
Koczyk H., Antoniewicz B., Basińska M., Górka A.: 2000. Podstawy projektowania cieplnego i termomodernizacji budynków. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
Konecki W.: 1999 Statystyka dla inżynierów. PWN, Warszawa.
Kotarska K., Kotarski Z.: 1989. Ogrzewanie energią słoneczną. Wydawnictwo Czasopism i książek technicznych NOT-SIGMA, Warszawa.
Kucowski J., Laudyn D., Przekwas M.: 1997. Energetyka a ochrona Środowiska. Wyd. 4, Warszawa, WNT.
Kwiatkowski A.: 2000. Słońce darmowym źródłem energii. Ekotechnika, Wrocław 2, 26–27.
Lewandowski W.M.: 2001. Proekologiczne źródła energii odnawialnej. Wydawnictwa Naukowo–Techniczne, Warszawa.
Łomotowski J., Rojek M. (praca zespołowa): 2001. Wybrane zagadnienia z zakresu pomiarów i metod opracowania danych automatycznych stacji meteorologicznych. Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław.
Materiały Firmy Viessmann.
Materiały Ośrodka Oszczędzania Energii Dolnośląskiej Fundacji Ekorozwoju.
Miklaszewski A.: 2002. Podstawy rozwoju wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce. Materiały konferencyjne PKE, Wrocław, 9–15.
Milburn D.I., Hollands K.G.T.: 1995. The directional response error in integrating-sphere transmittance measurements at solar wavelengths. Solar Energy, 55, 2, 85–91.
Morgan T.R.: 1996. The Performance and Optimisation of Autonomous Renewable Energy Systems. PhD. Thesis, University of Wales College of Cardiff.
Nijegodorov N., Jain P.K., Devan KRS: 1996. A graphical method of measuring the performance characteristics of solar collectors. Renewable Energy, 7, 1, 23–31.
Norton B., Prapas D.E., Milonidis E., Probert S.D.: 1988 Response function for solar-energy collectors. Solar Energy, 40, 4, 371–383.
Nowicki J.: 1980. Promieniowanie słoneczne jako źródło energii. Arkady, Warszawa.

Omer Comakli i in.: 1993 Solar-assisted heat pump and energy storage for residential heating. Solar Energy, 51, 5, 357–366.
Ong K.S.: 1995 Thermal performance of solar air heaters: mathematical model and solution procedure. Solar Energy, 55, 95–109.
Owczarek S.: 1998. Kierunki projektowania kolektorów słonecznych. Informacja Instal 10(176), 20–25,.
Owczarek S.: 1997. Vector model for calculation of solar radiation intensity and sums incident on tilted surfaces. Identification for the three sky condition in Warsaw. Renewable Energy, 11, 1, 77–96, Elsevier Science Ltd..
Paassen van A.H.: 1981. Indoor climate and energy calculations. PhD thesis, Delft University of Technology, WTHD 137.
Pabis J.: 1987. Kolektory słoneczne – uzupełniające źródło energii. IBMER, Warszawa.
Pabis J.: 1991. Możliwości i warunki wykorzystania niekonwencjonalnych źródeł energii w produkcji ogrodniczej. Wyd. SGGW, Warszawa, Materiały konferencyjne, 24–32.
Pabis S.: 1985. Metodologia i metody nauk empirycznych. PWN, Warszawa.
Panek A. i in.: Stochastyczny model klimatu Polski – identyfikacja i symulacja; sprawozdanie za lata 1987–1990 z realizacji tematu 4.4/CPBP 02.21: Modelowanie i badanie komfortu cieplnego w pomieszczeniach; kierownik naukowy B. Okołowicz-Grabowska, Inst. Ogrzewnictwa i Wentylacji P.W.
Peroń S., Szlachta J. (red.): 1999. Niekonwencjonalne źródła energii. Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław.
Pluta Z.: 1987. Badanie ogrzewczych instalacji słonecznych i ich elementów w warunkach naturalnych i symulacyjnych. Sprawozdanie z tematu 4.3.2.4/2/1987 CPBP 02.18.
Pluta Z., Wnuk R.: 1997. Zbiorniki magazynujące ciepło w instalacjach pozyskujących energię promieniowania słonecznego COW nr 10.
PN-91/B02020, Ochrona cieplna budynków. Wymagania i obliczenia, PKNMiJ.
Podgrocki J.: 1976. Tablice słoneczne do użytku obserwatorów stacji aktynometrycznych. Wyd. Kom. i Łącz., Warszawa.
Raport opracowany przez EC BREC/IBMER, ESD Ltd.: 2001. Wykorzystanie programu SAFIRE do opracowania scenariuszy rozwoju energetyki odnawialnej w Polsce do roku 2020. Warszawa.
Recknagel-Sprenger: 1994. Ogrzewanie i klimatyzacja. Poradnik EWFE, Gdańsk.
Rubik M.: 2000. Trujące spaliny. Magazyn instalatora nr 1 (17), Warszawa.
Schmuck A.: 1959. Regiony pluwiotermiczne. Zarys rejonizacji przyrodniczo – rolniczej w województwie wrocławskim. WRiL, Wrocław.
Smolec W.: 2000. Fototermiczna konwersja energii słonecznej. PWN, Warszawa.
Staniszewski B.: 1979. Wymiana ciepła – podstawy teoretyczne, PWN, Warszawa.
Szargut J., Ziębik A.: 1998. Podstawy energetyki cieplnej. PWN, Warszawa.
Szpryngiel M.: 1996 Zintegrowane źródła niekonwencjonalnej energii w rolnictwie. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., KTR PAN Lublin, 425, 257–263.
Szymanowski A.: 1988. Czas energii. WKŁ, Warszawa.
Tymiński J.: 1997 Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w Polsce do 2003 roku. Aspekt Energetyczny i Ekologiczny IBMER Warszawa.
Visser H., Ree BGC van der: 1996. The DST method for SDHW systems-R&D for ISO and CEN standarts., Proc. EuroSun`96 DGS Sonenenergie Verlags-GmbH-München, 424–428.

Wasilewski W.: 1998. Uproszczona metoda wymiarowania węzłów równoległych c.o. i c.w.u. z ograniczeniami strumienia wody sieciowej. COW, 10, 11–18.
Wiśniewski G.: 1992. Kolektory Słoneczne. Centralny ośrodek informacji budownictwa, Warszawa.
Wiśniewski S., Wiśniewski T.S.: 1994. Wymiana ciepła. WNT, Warszawa.
Wittwer C., Horlitz O., Rommel M.: 1996. A Flexible Simulation Programme for Multitasking Operating Systems to Investigate Controllers in Thermal Solar Systems Proc. EuroSun`96 DGS Sonenenergie Verlags-GmbH-München, 435–440.
Wnuk R.: 1994. Słoneczne instalacje podgrzewu ciepłej wody użytkowej. IPPT PAN, Warszawa.
Wójcicka-Migasiuk D.: 2001. Zastosowanie metody potencjałów węzłowych do analizy i projektowania instalacji słonecznych ciepłej wody. Instytut Agrofizyki, Lublin.
Wołoszyn M.A.: 1991. Wykorzystanie energii słonecznej w budownictwie jednorodzinnym. Centralny ośrodek informacji budownictwa, Warszawa.
Założenia polityki energetycznej Polski do roku 2020. Ministerstwo Gospodarki, Warszawa 2000.
Żurawski J.: Czy warto stosować kolektory słoneczne? Millennium budowlane, Wrocław, zima 2000/2001, 19–21.

SOLAR COLLECTORS FOR DOMESTIC WATER HEATING – EFFICIENCY AND COST-EFFECTIVENESS OF INSTALLATION

S u m m a r y

The analysis of the possibilities of using sun collectors to warm up treated water. In this research I took up an issue of using solar installation in one of typical country residences. The research is done in the form of an experimental analysis in an adequately prepared workplace.

The workplace is situated in a detached house in Kamieniec Wrocławski. Two liquid-based, panel collectors were installed on the southern covering of the roof of the building. The research installation was made of the complete typical solar system, a gas pot, special instrumentation and measuring machine.

The main purpose of the research was to determine possibilities of using sun collectors to warm up treated water in residential buildings during the year in different, local weather conditions. The main purpose I resolved into a few particular purposes:

1. The analysis of possibilities of using solar installations in residential buildings for Wrocław and its region in the aspect of gaining heat energy.

2. The analysis of the influence of meteorological conditions on gaining heat energy by sun collectors.

3. The analysis of the influence of an angle of inclination of the covering and location of the building on the efficiency of gaining heat energy by sun collectors.

4. Creating a mathematical model to forecast the amount of heat energy which is possible to be gained by sun collectors in particular months.

5. Creating a mathematical model to determine the maximum amount of water which can be heated taking advantage of the energy coming from sun collectors.

6. The economical analysis of profitability of applying solar installations.

For this scientific description I used the results of measurements taken on the workplace during the years 2001-2004 as well as the results which I got from the simulations carried out for a couple of utilizable variants with the use of a special computer programme.

On the basis of the results:

- I determined efficiency and profitability of the use of solar installations as well as optimal conditions of their appliance, and I carried out a comparative analysis of the influence of insolation, full radiation and temperature on gaining heat energy by sun collectors.
- I described two mathematical models which concern possibilities of forecasting the gain of heat energy by sun collectors as well as forecasting the maximum amount of water heated by the collectors. The first model opens up a possibility to determine proportions of heat energy gained by sun collectors during particular months depending on daily doses of full radiation. The second model, however, concerns a possibility of gaining the maximum heat energy which is possible to be gained by sun collectors in summer season. On the basis of daily doses of full radiation it is possible to calculate the maximum, possible to be gained, amount of warm treated water.

Key words: sunny energy, sunny installation, efficiency of applying, cost-effectiveness

KOLEKTORY SŁONECZNE DO PODGRZEWANIA WODY UŻYTKOWEJ – EFEKTYWNOŚĆ I OPŁACALNOŚĆ INSTALACJI

S t r e s z c z e n i e

W pracy podjęto problematykę wykorzystywania instalacji słonecznej w jednym z typowych wiejskich domów mieszkalnych w formie analizy eksperymentalnej na odpowiednio przygotowanym stanowisku badawczym.

Stanowisko badawcze zlokalizowano we wsi Kamieniec Wrocławski w domu jednorodzinnym. Dwa kolektory cieczowe płytowe zainstalowano na południowej połaci dachu budynku. Instalacja badawcza zbudowana została z kompletnego typowego systemu solarnego, kotła gazowego i specjalnego oprzyrządowania oraz aparatury pomiarowej.

Głównym celem badań było określenie możliwości wykorzystania kolektorów słonecznych do podgrzewania wody użytkowej w budynkach mieszkalnych, w skali roku, przy występujących lokalnych warunkach pogodowych. Cel ten sprowadzono do kilku celów szczegółowych takich jak:

1. Analiza możliwości wykorzystania instalacji słonecznych w budynkach mieszkalnych dla Wrocławia i okolic, w aspekcie efektywności pozyskiwania energii cieplnej.

2. Analiza wpływu warunków meteorologicznych na pozyskiwanie energii cieplnej przez kolektory słoneczne.

3. Analiza wpływu kąta nachylenia połaci i położenia budynku na efektywność pozyskiwania energii cieplnej przez kolektory słoneczne.

4. Stworzenie modelu matematycznego do prognozowania ilości pozyskania energii cieplnej przez kolektory słoneczne dla poszczególnych miesięcy roku.

5. Stworzenie modelu matematycznego do określenia maksymalnej ilości wody, którą możemy podgrzać, wykorzystując tylko energię pochodzącą z kolektorów słonecznych.

6. Analiza ekonomiczna opłacalności zastosowania instalacji słonecznych.

W opracowaniu wykorzystano wyniki pomiarów uzyskanych na stanowisku badawczym w latach 2001–2004 oraz wyniki uzyskane z przeprowadzonych symulacji, dla kilku wariantów użytkowych, przy wykorzystaniu specjalnego programu komputerowego.

Na podstawie uzyskanych wyników:

- Określono efektywność i opłacalność wykorzystania oraz optymalne warunki zastosowania instalacji słonecznych oraz przeprowadzono analizę porównawczą wpływu: usłonecznienia, promieniowania całkowitego oraz temperatury na pozyskiwanie energii cieplnej przez kolektory słoneczne.
- Opracowano dwa modele matematyczne dotyczące możliwości prognozowania pozyskania energii cieplnej przez kolektory słoneczne i prognozowania maksymalnej ilości wody podgrzanej przez kolektory słoneczne. Pierwszy opracowany w pracy model matematyczny umożliwia określenie wielkości pozyskanej energii cieplnej przez kolektory słoneczne dla poszczególnych miesięcy w zależności od dawek dziennych promieniowania całkowitego. Natomiast drugi model matematyczny dotyczy możliwości pozyskania maksymalnej, możliwej do przechwycenia energii cieplnej przez kolektory słoneczne w okresie letnim. Na podstawie dziennych dawek promieniowania całkowitego można wyliczyć możliwą, maksymalną do uzyskania ilość ciepłej wody użytkowej.

Słowa kluczowe: energia słoneczna, instalacja słoneczna, efektywność stosowania, opłacalność

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I JEDNOSTEK 5
1. WPROWADZENIE 7
2. MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA ENERGII SŁONECZNEJ DO PODGRZEWANIA WODY UŻYTKOWEJ 9
2.1. Charakterystyka techniczna kolektorów słonecznych 9
2.2. Kierunki badań nad wykorzystaniem energii słonecznej 11
3. CEL BADAŃ 14
4. OBIEKT BADAWCZY 15
4.1. Metodyka i zakres badań 15
4.2. Lokalizacja i charakterystyka obiektu badawczego 20
4.3. Aparatura pomiarowa 31
5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ 37
5.1. Możliwość wykorzystania instalacji słonecznych w budownictwie mieszkaniowym 37
5.2. Warunki meteorologiczne 49
5.2.1. Usłonecznienie 50
5.2.2. Promieniowanie całkowite 52
5.2.3. Temperatura powietrza 55
5.2.4. Wpływ warunków meteorologicznych na pozyskiwanie energii cieplnej przez kolektory słoneczne 57
5.3. Wpływ kąta nachylenia połaci i położenia budynku na efektywność pozyskiwania energii cieplnej przez kolektory słoneczne 75
5.4. Model matematyczny prognozowania maksymalnej ilości wody podgrzanej przez kolektory słoneczne 83
5.5. Model matematyczny prognozowania pozyskania energii cieplnej przez kolektory słoneczne 97
5.6. Analiza ekonomiczna opłacalności zastosowania instalacji słonecznych 108
6. WNIOSKI 115
7. PIŚMIENNICTWO 117