



POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

ANALIZA STRATEGII STEROWANIA
W SŁONECZNYCH SYSTEMACH GRZEWczyCH
W ASPEKCIE ICH EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ

mgr inż. Paweł Piotr Znaczko

ROZPRAWA DOKTORSKA

Promotor: dr hab. inż. Norbert Chamier-Gliszczyński, Profesor Politechniki Koszalińskiej

Promotor pomocniczy: dr inż. Kazimierz Kamiński

Koszalin, 2024

Streszczenie

Niniejsza praca ma charakter interdyscyplinarny. Dotyczy zagadnień z pogranicza dziedzin takich jak energetyka, informatyka techniczna, eksploatacja maszyn oraz automatyka. W dobie nieustannie rosnącej świadomości ekologicznej społeczeństwa oraz jednocześnie wyraźnej potrzebie dążenia do maksymalizacji efektywności wykorzystywania odnawialnych źródeł energii, słoneczne systemy grzewcze szybko zyskują na popularności. Efektywność słonecznych systemów grzewczych zależy od wielu parametrów, których wpływ na działanie takiego systemu jako całości jest bardzo trudny do przeanalizowania i opisania. W związku z takim stanem rzeczy, w dysertacji podjęto ważny temat doboru strategii sterowania w słonecznych systemach grzewczych do warunków pracy. Przegląd źródeł literaturowych pozwolił wykazać, iż wybór strategii sterowania jest kluczowy dla efektywności pracy takich systemów oraz jednocześnie bardzo utrudniony ze względu na dużą liczbę czynników wpływających w zróżnicowanym stopniu na słoneczny system grzewczy. Ponadto rzadko pojawiają się zmiany, ulepszenia czy propozycje nowych rozwiązań w zakresie sterowania instalacjami słonecznymi. Stwierdzono również, że oczekiwane są metody dotyczące modyfikacji strategii sterowania w słonecznych systemach grzewczych, których zastosowanie wpłynie na polepszenie efektywności energetycznej bez istotnej zmiany pierwotnych parametrów i kosztów produkcji takich systemów.

W ramach pracy doktorskiej przeprowadzona została analiza statystyczna danych pomiarowych, której celem było zbadanie wpływu określonych warunków eksploatacyjnych - takich jak ciśnienie atmosferyczne, temperatura otoczenia, prędkość wiatru, wilgotność i natężenie promieniowania słonecznego - na funkcjonowanie słonecznego systemu grzewczego. Za zmienną zależną w omawianych rozważaniach przyjęto temperaturę wody uzyskiwaną w zasobniku. Poza wskazaniem istotnych statystycznie zależności celem dysertacji było również dostarczenie informacji na temat charakteru tych zależności oraz ogólnej dynamiki działania słonecznego systemu grzewczego. Przeprowadzona analiza statystyczna wskazała, że w dalszej części prac badawczych skupić należy się na parametrach o największej zmienności, takich jak natężenie promieniowania słonecznego, które mogą wymagać szczególnego uwzględnienia w modelowaniu i kontroli procesu sterowania w słonecznych systemach grzewczych. Stabilność ciśnienia atmosferycznego i temperatury otoczenia wskazywała na możliwość ich łatwiejszego włączenia do modeli prognostycznych. Z kolei większa zmienność prędkości wiatru i wilgotności wymagała zastosowania zaawansowanych metod predykcyjnych w celu minimalizacji niepewności w przewidywaniach.

Kolejnym ważnym elementem pracy było stworzenie matematycznego modelu procesu transportu energii w słonecznych systemach grzewczych. Określono parametry pracy oraz przedstawiono założenia i uproszczenia modelu fizycznego. Sformułowane zostały niezbędne równania matematyczne opisujące bilanse mas dla głównych komponentów słonecznego systemu grzewczego: kolektora, przewodów, wymiennika ciepła, zasobnika oraz pompy. Na ich bazie w programie Simscape służącym do kompleksowego modelowania układów hydraulicznych i cieplnych zbudowany został komputerowy model procesu transportu energii w słonecznym systemie grzewczym, który wykorzystywany był w dalszej części badań jako narzędzie pomocnicze. Następnie skoncentrowano się na procesie walidacji stworzonego komputerowego modelu symulacyjnego słonecznego systemu grzewczego. Opisane zostało zlokalizowane na Politechnice Koszalińskiej stanowisko badawcze kolektorów słonecznych. Było ono wykorzystane do przeprowadzenia badań eksperymentalnych. Przeprowadzone zostały badania symulacyjne oraz badania polowe w różnych warunkach i scenariuszach. Wyniki badań zostały ze sobą porównane. Pozwoliło to na identyfikację i korektę drobnych rozbieżności na linii model - rzeczywistość. Po pozytywnym procesie walidacji modelu symulacyjnego przystąpiono do analizowania strategii sterowania w słonecznych systemach grzewczych.

W oparciu o zebrane wyniki badań eksperymentalnych oraz wyniki symulacji komputerowych pozyskano istotne informacje na temat efektywności różnych strategii sterowania w słonecznych systemach grzewczych. Analizę porównawczą metod sterowania przeprowadzono z wykorzystaniem czterostanowego klasyfikatora warunków pogodowych działającego w oparciu o autorską metodykę podziału dni na cztery charakterystyczne grupy, różniące się poziomem i zmiennością promieniowania słonecznego w ciągu dnia pomiarowego. Przetestowane zostały dwie najpowszechniej wykorzystywane metody sterowania proporcjonalnego i sterowania ON-OFF oraz trzecia zaproponowana modyfikacja pod nazwą IPC. Okazało się, że metoda sterowania dwustanowego jest najbardziej efektywna przy warunkach wysokiego i stabilnego nasłonecznienia, lecz całkowicie zawodzi w przypadku dużej dynamiki warunków pogodowych. Klasyczne sterowniki proporcjonalne pozwalają na znacznie efektywniejsze gromadzenie energii cieplnej w warunkach zmiennego nasłonecznienia. Stwierdzono jednak, że może ona dopuszczać do występowania niepożądanego zjawiska wyprowadzania wcześniej zgromadzonej energii z systemu grzewczego tzw. dryf termiczny. W związku z tą obserwacją zaproponowana została autorska modyfikacja sterowania proporcjonalnego, której celem było zapobiegnięcie występowaniu tego negatywnego scenariusza. Wyniki badań potwierdziły skuteczność zaproponowanego rozwiązania (metoda IPC), które dzięki ujęciu temperatur wejściowych i wyjściowych z węzownicy w algorytmie sterowania, pozwoliło na znacznie efektywniejsze

pozyskiwanie energii w warunkach intensywnego i zmiennego promieniowania. Wnioski wyciągnięte na etapie badań porównawczych zostały przetestowane i pozytywnie zweryfikowane za pomocą symulacyjnego modelu słonecznego systemu grzewczego. Działania te pozwoliły na sformułowanie hipotezy badawczej w następującym brzmieniu: *Adaptacyjne sterowanie natężeniem przepływu czynnika roboczego w słonecznym systemie grzewczym wyposażonym w czterostanowy klasyfikator warunków atmosferycznych umożliwi, dla analizowanego zbioru dni w okresie letnim, wzrost efektywności energetycznej systemu o 10% - 20%.*

Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych i symulacyjnych pozwoliły ponadto na zaprojektowanie i zaprogramowanie nowego słonecznego sterownika adaptacyjnego, który pozwalał na automatyczne wybieranie spośród trzech określonych metody sterowania do aktualnych warunków pogodowych. Ostatnim etapem przedsięwzięcia były badania porównawcze nowego rozwiązania z komercyjnym klasycznym regulatorem. Uzyskano wzrost efektywności o 12,7% na korzyść zaprojektowanego sterownika co pozwoliło stwierdzić, że wykorzystanie sterowania adaptacyjnego przynosi znaczące korzyści w aspekcie poprawy efektywności gromadzenia energii w słonecznych systemach grzewczych oraz potwierdzić hipotezę badawczą. Jest to bardzo ważny wniosek z punktu widzenia technicznego, ekonomicznego oraz ekologicznego. Dodatkowo zebrane w trakcie realizacji dysertacji wyniki wieloletnich badań mogą posłużyć dalszym analizom i być niezwykle cenne dla projektowania i optymalizacji działania słonecznych systemów grzewczych. Pozwalają one na zrozumienie jak system będzie się zachowywał w różnych scenariuszach pogodowych oraz które metody sterowania będą najbardziej efektywne w danych warunkach eksploatacyjnych. Wyniki te mogą służyć ponadto do dalszego ulepszania samych algorytmów sterowania, poprawiając ogólną efektywność słonecznych systemów grzewczych.

Słowa kluczowe: słoneczny system grzewczy, metody sterowania, sterownik adaptacyjny, warunki pogodowe, efektywność energetyczna, symulacja komputerowa

Analysis of control strategies in solar heating systems in terms of their energy efficiency

Abstract

This work is interdisciplinary, encompassing areas such as renewable energy, computer modeling, machinery operation, and control theory. In an era of increasing environmental awareness and the clear need to maximize the efficiency of renewable energy sources, solar heating systems are rapidly gaining popularity. The efficiency of solar heating systems depends on numerous parameters, whose impact on the overall system performance is challenging to analyze and describe. Consequently, this dissertation addresses the crucial topic of selecting control strategies for solar heating systems according to operational conditions. A review of the literature revealed that the choice of control strategy is vital for the efficiency of such systems and is complicated by the numerous factors affecting the solar heating system to varying degrees. Additionally, innovations or proposals for new solutions in the control of solar installations are rare. It was also found that methods for modifying control strategies in solar heating systems are needed, which can improve energy efficiency without significantly altering the original parameters and production costs of these systems.

In the doctoral research, a statistical analysis of measurement data was conducted to examine the influence of specific operational conditions such as atmospheric pressure, ambient temperature, wind speed, humidity and solar radiation intensity on the performance of a solar heating system. The dependent variable in these considerations was the temperature of the water in the storage tank. Besides identifying statistically significant relationships, the dissertation aimed to provide information on the nature of these relationships and the overall dynamics of the solar heating system. The statistical analysis indicated that further research should focus on parameters with the highest variability, such as solar radiation intensity, which may require special consideration in modeling and control processes in solar heating systems. The stability of atmospheric pressure and ambient temperature suggested their easier inclusion in predictive models. In contrast, the higher variability of wind speed and humidity necessitated advanced predictive methods to minimize uncertainty in forecasts.

Another significant aspect of the work was creating a mathematical model of the energy transport process in solar heating systems. Operating parameters were determined, and the assumptions and simplifications of the physical model were presented. Essential mathematical equations describing the mass balances for the main components of the solar heating system -

collector, pipes, heat exchanger, storage tank, and pump were formulated. Based on these equations, a computer model of the energy transport process in a solar heating system was built in Simscape, a program for comprehensive modeling of hydraulic and thermal systems, which was used in further research as an auxiliary tool. The focus then shifted to validating the created computer simulation model of the solar heating system. The experimental setup of solar collectors, located at the Koszalin University of Technology, where experimental studies were conducted, was described. Simulation and field studies were conducted under various conditions and scenarios. The results were compared, allowing for the identification and correction of minor discrepancies between the model and reality. After the successful validation of the simulation model, the analysis of control strategies in solar heating systems was undertaken.

Based on the collected experimental and simulation data, significant information regarding the efficiency of different control strategies in solar heating systems was obtained. A comparative analysis of control methods was conducted using a four-state weather condition classifier based on a proprietary methodology for dividing days into four characteristic groups, differing in the level and variability of solar radiation throughout the measurement day. Two commonly used control methods, proportional control and ON-OFF control, as well as a proposed modification called IPC, were tested. It was found that the ON-OFF method is most effective under conditions of high and stable sunlight but fails completely under highly dynamic weather conditions. Classic proportional control allows for much more efficient thermal energy accumulation under variable sunlight conditions. However, it may permit the undesired phenomenon of previously accumulated energy being released from the heating system, known as thermal drift. To address this observation, a proprietary modification of proportional control was proposed to prevent this negative scenario. The research results confirmed the effectiveness of the proposed solution (IPC method), which, by incorporating the inlet and outlet temperatures of the coil into the control algorithm, allowed for much more efficient energy acquisition under intense and variable radiation conditions. The conclusions drawn during the comparative research were tested and positively verified using the simulation model of the solar heating system. These actions led to the formulation of the research hypothesis: Adaptive control of the flow rate of the working fluid in a solar heating system, equipped with a four-state atmospheric condition classifier, will increase the energy efficiency of the system by 10% - 20% for the analyzed set of days during the summer period.

The obtained experimental and simulation research results also enabled the design and programming of a new adaptive solar controller, which automatically selected among the three specified control methods for the current weather conditions. The final stage of the project

involved comparative studies of the new solution with a commercial classic controller. An efficiency increase of 12.7% in favor of the designed controller was achieved, confirming that the use of adaptive control brings significant benefits in terms of improving energy storage efficiency in solar heating systems and validating the research hypothesis. This is a crucial conclusion from a technical, economic, and ecological perspective. Additionally, the long-term research results collected during the dissertation can serve further analyses and be invaluable for designing and optimizing the operation of solar heating systems. They allow for understanding how the system will behave under different weather scenarios and which control methods will be most effective under specific operational conditions. These results can also be used to further improve the control algorithms themselves, enhancing the overall efficiency of solar heating systems.

Keywords: Weather conditions, control methods, adaptive controller, solar thermal system, energy efficiency, computer simulation

Podziękowania

Pragnę złożyć serdeczne podziękowania moim promotorom:

Panu prof. PK dr. hab. inż. **Norbertowi Chamier–Gliszczyńskiemu**

oraz Panu dr. inż. **Kazimierzowi Kamińskiemu**

za nieocenioną pomoc, wsparcie merytoryczne i duchowe udzielone mi w trakcie prac badawczych oraz całych moich studiów doktoranckich.

Bez cierpliwości i wyrozumiałości, którymi zostałem przez Panów obdarowany, ta praca nigdy by nie powstała.

Chciałbym także złożyć szczerze wyrazy wdzięczności

wszystkim moim **Kolegom** z Katedry Mechatroniki i Automatyki,

którzy pomagali mi podnieść umiejętności prezentacji i mocno dopingowali na każdym etapie realizacji tej rozprawy.

Wyjątkowe podziękowania za ocean cierpliwości składam również

całej mojej najbliższej **Rodzinie**, wspaniałym **Przyjaciółom**

oraz ukochanej **Dziewczynie**, dla których nie miałem tyle czasu na ile zasługują.

W szczególności zaś dziękuję moim **Rodzicom Krystynie i Józefowi**

za wszystko co dla mnie zrobili.

Pracę tę dedykuję najukochańszemu pingwinowi jakiego znam

DŻEJDŻEJOWI

SPIS TREŚCI

WYKAZ SYMBOLI I AKRONIMÓW	11
WPROWADZENIE	16
1. DOTYCHCZASOWY STAN WIEDZY	19
1.1. Energia odnawialna	19
1.2. Charakterystyka promieniowania słonecznego.....	25
1.3. Wykorzystanie energii promieniowania słonecznego.....	35
1.4. Systemy fototermiczne	37
1.4.1. Parametry pracy i warunki eksploatacyjne słonecznych systemów grzewczych.....	42
1.4.2. Sposoby oceny efektywności energetycznej słonecznych systemów grzewczych	47
1.4.3. Aspekt sterowania w słonecznych systemach grzewczych.....	49
1.5. Główne kierunki prac badawczych dotyczących słonecznych systemów grzewczych.....	54
1.6. Wnioski z analizy literatury	61
1.7. Podsumowanie	62
2. CEL, HIPOTEZA I ZAKRES PRACY.....	63
2.1. Uzasadnienie podjęcia problemu badawczego	63
2.2. Hipoteza badawcza	64
2.3. Zakres pracy	64
3. MODELOWANIE MATEMATYCZNE I SYMULACJA KOMPUTEROWA PROCESU TRANSPORTU ENERGII CIEPLNEJ W SŁONECZNYCH SYSTEMACH GRZEWczyCH	65
3.1. Model matematyczny.....	65
3.2. Równanie bilansowe kolektora słonecznego	70
3.3. Równania bilansowe przewodów hydraulicznych	74
3.4. Równanie bilansowe wymiennika ciepła.....	77
3.5. Równanie bilansowe zasobnika wodnego.....	79
3.6. Weryfikacja eksperymentalna modelu symulacyjnego.....	85
3.6.1. Stanowisko badawcze.....	86
3.6.2. Porównanie wyników symulacji komputerowej z wynikami badań eksperymentalnych	93
3.7. Podsumowanie	95
4. ANALIZA STATYSTYCZNA.....	97
4.1. Materiały i metody.....	97
4.1.1. Analiza korelacji.....	98
4.1.2. Procedura doboru zmiennych do modelu	98
4.1.3. Dobór funkcji wygładzających	99
4.1.4. Interpretacja wyników walidacji.....	101
4.2. Charakterystyka próby	103
4.3. Otrzymane wyniki	105
4.3.1. Dopasowanie danych w oparciu o model GAM	105
4.3.2. Dopasowanie modelu liniowego.....	114
4.4. Podsumowanie.....	115

5. ANALIZA METOD STEROWANIA WYKORZYSTYWANYCH W SŁONECZNYCH SYSTEMACH GRZEWCZYCH.....	116
5.1. Badania wstępne	116
5.1.1. Współczynnik konwersji całkowitej	116
5.1.2. Współczynnik efektywności transferu energii.....	118
5.1.3. Wyniki badań z wykorzystaniem zaproponowanej metodyki	121
5.1.4. Ocena skuteczności zaproponowanej metodyki	125
5.2. Omówienie analizowanych metod sterowania.....	127
5.3. Określenie wpływu sterowania adaptacyjnego na efektywność energetyczną słonecznego systemu grzewczego	145
6. ZAKOŃCZENIE.....	153
6.1. Podsumowanie prac badawczych	153
6.2. Wnioski końcowe	154
6.3. Kierunki dalszych badań.....	156
BIBLIOGRAFIA	158
SPIS RYSUNKÓW	171
SPIS TABEL	173

Wykaz symboli i akronimów

Symbole

$\dot{m}_A$	–	masowe natężenia przepływu czynnika roboczego na wlocie
$\dot{m}_B$	–	masowe natężenia przepływu czynnika roboczego na wylocie
ϵ_i	–	reprezentuje term błędu dla i -tej obserwacji
G_b	–	wielkość minimalna zmiennej
G_d	–	wielkość maksymalna zmiennej
q_A	–	całkowity strumień energii wpływającej do systemu
q_B	–	całkowity strumień energii wypływającej z systemu
q_{sol}	–	strumień cieplny dostarczany do systemu bezpośrednio z EPS
T_s	–	temperatura promieniowania nieba
ρ_s	–	gęstość wody
A_s	–	powierzchnia graniczna analizowanego zasobnika
A_Z	–	albedo powierzchni
A_c	–	powierzchnia apertury
A_p	–	pole powierzchni przewodu hydraulicznego
A_c	–	powierzchnia kolektora słonecznego
A_s	–	pole powierzchni zasobnika.
A_w	–	pole powierzchni wymiennika ciepła
E_a	–	promieniowanie zwrotne atmosfery
E_c	–	ilość energii użytkowej pobranej z kolektorów w okresie badania
E_{var}	–	współczynnik zmienności
E_z	–	długofalowe promieniowanie Ziemi
E_z	–	ilość energii cieplnej zgromadzonej w zasobniku w ciągu dnia
F_R	–	współczynnik odprowadzania ciepła z kolektora
G_{β_i}	–	globalne natężenie promieniowania podczas każdej próbki czasowej
G_Z	–	ciepło przekazywane przez przewodzenie w gruncie
H_Z	–	turbulencyjne ciepło odczuwalne
H_n	–	wysokość podnoszenia pompy
I_c	–	natężenie promieniowania słonecznego na płytę kolektora
L_Z	–	turbulencyjne ciepło utajone

P_e	–	efektywna moc pompy
P_n	–	moc pompy wyrażona
Q_u	–	energia użyteczna
S_p	–	pole powierzchni przekroju przewodu
S_w	–	pole powierzchni przekroju przewodu
T^*m	–	temperatura zredukowana
T_{ha}	–	temperatura otoczenia wymiennika
T_{hav}	–	uśredniona temperatura czynnika w wymienniku
T_{sa}	–	temperatura otoczenia zasobnika
T_{av}	–	średnia temperatura czynnika roboczego w kolektorze
$T_{avp\ 1,2}$	–	uśrednione temperatury czynnika roboczego w przewodach
T_{ca}	–	temperaturę otoczenia w jakiej pracuje kolektor słoneczny
T_{ci}	–	temperatura wejściowa czynnika roboczego
T_{co}	–	temperatura czynnika wchodzącego z kolektora
T_{pa}	–	temperatura otoczenia przewodów hydraulicznych
T_s	–	temperatura wody w zasobniku.
T_{sa}	–	temperatura otoczenia zasobnika wodnego
U_L	–	współczynnik strat ciepła poprzez powierzchnię kolektora
U_{Lp}	–	współczynnik strat ciepła poprzez powierzchnię przewodu
U_{LS}	–	współczynnik strat ciepła poprzez powierzchnię zasobnika
U_{Lw}	–	współczynnik strat ciepła poprzez powierzchnię wymiennika
V_s	–	objętość wody w zasobniku
V_f	–	objętość czynnika roboczego
$X_{\dot{Q}_u}$	–	współczynnik efektywności transferu energii
X_{Sol}	–	współczynnik konwersji całkowitej
c_s	–	ciepło właściwe wody
$\frac{d(\rho u)}{dt}$	–	zmiana energii wewnętrznej czynnika grzewczego w czasie
i_s	–	wysokość słońca nad horyzontem
k_t	–	łączna liczba próbek czasu (10 s) dokonanych w ciągu doby badawczej
k_{var}	–	suma próbek czasu, ze zmianami natężenia promieniowania
l_p	–	długość przewodu

l_w	–	długość wymiennika
q_{k_in}	–	strumień energii cieplnej na wejściu do kolektora
q_{k_los}	–	strumień strat cieplnych na kolektorze
q_{k_out}	–	strumień energii cieplnej na wyjściu z kolektora
q_{mag}	–	strumień magazynowania ciepła w zasobniku
q_{pz_p}	–	strumień transportu ciepła w przewodzie powrotnym
q_{pc_los}	–	strumień strat cieplnych na przewodzie zasilającym
q_{pc_p}	–	strumień transportu ciepła w przewodzie zasilającym
q_{pz_los}	–	strumień strat cieplnych na przewodzie powrotnym
q_{sol}	–	strumień EPS docierający do powierzchni kolektora
q_{w_in}	–	strumień energii cieplnej na wejściu do wymiennika
q_{w_out}	–	strumień energii cieplnej na wyjściu z wymiennika
q_{w_p}	–	strumień transportu ciepła wewnątrz wymiennika
q_{w-z}	–	strumień energii oddawanej do zasobnika na powierzchni wymiennika
q_{z_los}	–	strumień strat cieplnych na powierzchni zasobnika
s_j	–	funkcja wygładzająca dla j -tej zmiennej niezależnej
t_0	–	początkowy czas badania
t_f	–	końcowy czas badania
v_f	–	prędkość czynnika roboczego w przewodzie
x_{ij}	–	liczba zmiennych niezależnych
y_i	–	wartość zmiennej zależnej dla i -tej obserwacji
θ_z	–	kąt zenitalny
α_s	–	kąt wzniesienia Słońca
β_0	–	wyraz wolny
η_0	–	sprawność optyczna kolektora słonecznego
ρ_c	–	gęstość medium roboczego
ΔG_{cr}	–	wartość progowa zmian natężenia promieniowania
c_p	–	ciepło właściwe czynnika roboczego
edf	–	efektywne stopnie swobody
G	–	promieniowanie całkowite
g	–	przyspieszenie ziemskie

H_n	–	wysokość podnoszenia pompy
k_n	–	współczynniki dopasowania krzywej charakterystyki pompy
<i>Kurt.</i>	–	kurtoza zmiennej
M	–	średnia arytmetyczna
<i>Maks</i>	–	wielkość maksymalna zmiennej
<i>Mdn</i>	–	mediana zmiennej
<i>Min</i>	–	wielkość minimalna zmiennej
N	–	prędkość obrotowa pompy
P_e	–	efektywna mocą pompy
Q	–	natężenie przepływu czynnika
$Q1, Q3$	–	kwartyle
r	–	promień ziemski
R^2_{adj}	–	skorygowany współczynnik determinacji
<i>ref.df</i>	–	referencyjne stopnie swobody
<i>res. Df</i>	–	stopnie swobody reszt
<i>resid.dev</i>	–	dewiancja reszt
SD	–	odchylenie standardowe
<i>Sk.</i>	–	skośność
V_c	–	objętość kolektora słonecznego
$\eta_c(T^*m)$	–	efektywność cieplna kolektora sonecznego
ρ_c	–	gęstość medium roboczego
σ	–	stała Stefana Boltzmann
C	–	całkowita pojemność cieplna płynu roboczego w kolektorze
E	–	wartość oczekiwana temperatury czynnika w zbiorniku
F'	–	współczynnik efektywności absorbera
H	–	energia słoneczna dostępna na jednostkę powierzchni
N	–	prędkość obrotowa pompy wyrażana
Q	–	bilans promieniowania
dT_w	–	przyrost temperatury w wymienniku
dx_w	–	przyrost długości wymiennika
dT	–	przyrost temperatury w przewodzie
dx	–	przyrost długości przewodu

Akronimy

ARE	–	Agencja Rynku Energii
c.w.u.	–	Ciepła woda użytkowa
DHW	–	Ciepła woda użytkowa (ang. Domestic Hot Water)
DLSC	–	Spółeczność Drake Landing (ang. Drake Landing Solar Community)
ECEO	–	Europejskie Centrum Energii Odnawialnej
EKW	–	Elastyczna Krzywa Wygładzająca
EPS	–	Energia Promieniowania Słonecznego
EREC	–	Europejska Rada Energii Odnawialnej
EROI	–	Zwrot energii z inwestycji (ang. Energy Return on Investment)
ESB	–	Szacowana Skala Dwumianowa (ang. Estimated Scale Binomial)
FIR	–	Daleka podczerwień (ang. Far Infrared)
GAM	–	Uogólniony Model Addytywny (ang. Generalized Additive Model)
GCV	–	Uogólniona Walidacja Krzyżowa (ang. Generalized Cross Validation)
HVAC	–	Ogrzewanie, wentylacja i systemy chłodzenia (ang. Heating, Ventilation, Air Conditioning)
IPC	–	Pośrednie Sterowanie Proporcjonalne (ang. Indirect Proportional Control)
IPCC	–	Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu (ang. Intergovernmental Panel on Climate Change)
MIR	–	Średnia podczerwień (ang. Mid Infrared)
MPC	–	Sterowanie predykcyjne (ang. Model-based Predictive Control)
NIR	–	Bliska podczerwień (ang. Near Infrared)
OZE	–	Odnawialne Źródła Energii
PID	–	Regulator Proporcjonalno - Całkująco - Różniczkujący (ang. Proportional Integral Derivative Controller)
PVT	–	Fotowoltaiczny – Termiczny (ang. Photovoltaic Thermal)
PWM	–	Modulacja Szerokości Impulsu (ang. Pulse Width Modulation)
RSS	–	Suma Reszt Kwadratów (ang. Residual Sum of Squares)
SRCC	–	Korporacja ds. Oceny i Certyfikacji Energetyki Słonecznej (ang. Solar Rating & Certification Corporation)
STES	–	Sezonowe Magazynowanie Energii Ciepłej (ang. Seasonal Thermal Energy Storage)
SWH	–	Ogrzewanie wody za pomocą energii Słonecznej (ang. Solar Water Heating)

Wprowadzenie

Sektor energetyczny jest niezmiennie istotny dla funkcjonowania gospodarek oraz społeczeństw na całym świecie. Rosnące ceny węgla, gazu i ropy naftowej zarysowują bardzo pesymistyczny scenariusz na najbliższe dziesięciolecie. Koszty energii rzutują praktycznie na każdą dziedzinę życia i przemysłu w związku z czym spodziewać można się problemów w wielu wspomnianych sferach. Rok 2021 był okresem wyjątkowym pod względem zapotrzebowania na energię na całym świecie. W skali globalnej szacuje się, że zapotrzebowanie np. na energię elektryczną wzrosło nawet o 5% [72], [74]. Jest to największy odnotowany przyrost od ponad 10 lat. Złożyło się na niego kilka różnych czynników. Za jeden z najważniejszych uznać należy silne wzrosty gospodarcze, które miały miejsce po okresie pandemii COVID-19. Globalne ożywienie gospodarcze doprowadziło do zwiększenia zużycia energii elektrycznej, a co za tym idzie również do wzrostu jej produkcji. Nie bez znaczenia dla globalnego rynku energetycznego jest również trwająca wojna na Ukrainie. Skomplikowana sytuacja geopolityczna i napięte stosunki pomiędzy koalicją państw europejskich a prowadzącym działania zbrojne państwem rosyjskim skutkują sankcjami i ograniczeniami w imporcie dominujących do tej pory na rynku europejskim rosyjskiej ropy naftowej oraz gazu. Te zaś doprowadzają do destabilizacji polityki energetycznej oraz konieczności rewidowania wszystkich założeń i prognoz na najbliższe lata. Kolejnym czynnikiem, jaki należy wziąć pod uwagę, są zmiany klimatyczne jakie następują w przeciągu ostatnich dziesięcioleci na Ziemi. Chłodne zimy w połączeniu z coraz to cieplejszymi okresami letnimi skutkują wzrostem potrzeb związanych z dogrzewaniem i schładzaniem przestrzeni użytkowych. W bezpośredni sposób przekładają się one na popyt energetyczny [38].

Szybki wzrost zapotrzebowania na energię zaobserwować można zarówno w skali globalnej jak i lokalnej. W 2021 roku wyprodukowano w Polsce 173,6 TWh energii elektrycznej przy zużyciu sięgającym 174,4 TWh [72]. Wartości te są rekordowymi wolumenami odnotowanymi w skali kraju. Podkreślić należy fakt, że zarówno gospodarstwa domowe jak i sektor przemysłowy wykazują silną tendencję do kolejnych wzrostów zapotrzebowania na energię. Agencja Rynku Energii (ARE), prowadząca od 1997 roku badania statystyczne, analizy i symulacje dotyczące gospodarki energetycznej w Polsce, przewiduje wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną do poziomu 190 TWh w roku 2030 [51]. Informacje na temat struktury produkcji energii elektrycznej brutto (całkowite zapotrzebowanie na energię) w Polsce również nie napawają optymizmem. W roku 2021 aż 42% energii elektrycznej wyprodukowano z węgla kamiennego, a dla około 30% całkowitej energii źródłem był węgiel brunatny. Energia

elektryczna wyprodukowana w instalacjach odnawialnych źródeł energii (OZE) stanowiła niecałe 17% [183].

Ze względu na szybko rosnące potrzeby niezbędne będą kolejne zmiany w polityce energetycznej. Pomimo imponującego wzrostu udziału odnawialnych źródeł energii, sumaryczne zużycie paliw kopalnianych takich jak węgiel oraz gaz osiągnęło również rekordowe poziomy [179], [72]. Rezultatem tego jest pierwszy od kilku lat rokroczny wzrost emisji dwutlenku węgla. Wzrost ten niesie za sobą wiele negatywnych i nieodwracalnych dla środowiska naturalnego konsekwencji. Wszystkie skutki wzrostu emisji CO₂ składają się w łańcuch trudnych do przewidzenia oraz zatrzymania wydarzeń. Według raportu Międzyrządowego Zespołu do spraw Zmian Klimatu (IPCC) najpoważniejsze z nich to wzrost średniej temperatury powietrza na całym globie, topnienie lodowców oraz niekorzystne oddziaływanie na ekosystemy (w tym konkretne gatunki roślin i zwierząt) [179]. Ekstremalne zjawiska pogodowe doprowadzić mogą zaś do problemów rolniczych oraz hodowlanych, następstwem których mogą się okazać braki żywności i światowy kryzys. Zmiany klimatyczne uznawane są również za jedną z głównych przyczyn wzrostu zapotrzebowania energetycznego, co prowadzi do powstania niebezpiecznej sytuacji, gdzie skutek konkretnego wydarzenia jest jednocześnie przyczyną dla jego wystąpienia. W tym przypadku zmiany klimatyczne powodują wzrost globalnego popytu energetycznego, który w bezpośredni sposób przekłada się na zwiększanie efektu cieplarnianego oraz zwiększa tempo zmian klimatu [162].

Biorąc pod uwagę dotychczasowy sposób prowadzenia globalnej polityki energetycznej [75], [143], [163] oraz zasadnicze konkluzje najważniejszych raportów dotyczących zmian klimatycznych [72], [151] dojść można do wniosku, iż najlepszym i najpowszechniej uznawanym rozwiązaniem opisanego problemu jest znaczące i szybkie zwiększenie udziału OZE w produkcji mocy energetycznej na świecie. Stanowi to jednak bardzo poważne wyzwanie, zarówno społeczne jak i technologiczne. Podjęte starania doprowadzić mają do obniżenia wykorzystania paliw kopalnych takich jak węgiel gaz czy ropa i zwiększenia udziału energii nieodnawialnej. Docelowym skutkiem ma być redukcja emisji CO₂. Komisja Europejska jako główny organ wykonawczy Unii Europejskiej, zaleca szereg działań prowadzących do osiągnięcia tego celu. Najważniejsze z nich to: zwiększenie przez państwa członkowskie nakładów na inwestycje w OZE, uproszczenie przepisów prawnych mających bezpośrednie przełożenie na realizowanie inwestycji oraz opracowywanie projektów zachęcających do realizacji takich inicjatyw [42], [93], [127]. Prawne regulacje związane z OZE w Polsce zawarte zostały w Ustawie z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz. U. 2015 poz. 478). Inwestycje w wykorzystanie odnawialnych źródeł energii stały się więc obszarem strategicznym dla energetyki

nie tylko Polski, ale każdego kraju na świecie. W związku z tym nie może dziwić fakt, iż tematyka badawcza związana z rozwojem oraz projektowaniem nowych, efektywnych systemów energetycznych bazujących na OZE jest w ostatnich latach również bardzo mocno eksplorowana. Przyczyniają się do tego zarówno czynniki ekonomiczne jak i naciski polityczne. Najważniejszym celem takich działań jest zwiększanie bezpieczeństwa energetycznego państw poprzez opieranie gospodarki o krajowe zasoby odnawialne. Dodatkowo postęp technologiczny zachodzący w dziedzinach takich jak magazynowanie energii czy nowoczesne sieci przesyłowe pozwala na projektowanie rozwiązań zarówno ekologicznych jak i efektywnych energetycznie. Tendencja ta jest również wyraźnie zauważalna w Polsce, gdzie stopniowo i sukcesywnie zwiększa się wykorzystanie OZE [200]. Głównym źródłem energii odnawialnej jest w tym przypadku energia wiatru, która to szczególnie w północnej części kraju jest intensywnie wykorzystywana. Wynika to z korzystnych w tych regionach warunków pogodowych oraz inwestycji w rozwój farm wiatrowych na terenach przybrzeżnych oraz morskich. Znacznie mniejszy i ograniczony potencjał wykazuje energia wodna, która w dużej mierze ograniczana jest przez ukształtowanie terenu oraz niewielką liczbę rzek o odpowiedniej przepustowości. W efekcie obserwuje się jedynie sporadyczne przypadki kilku elektrowni wodnych w Polsce o znaczeniu głównie lokalnym. Stosunkowo słabo rozwinięte jest też wykorzystanie energii geotermalnej. Chociaż w tym przypadku istnieje pewien niezagospodarowany potencjał na wykorzystanie jej w celach grzewczych np. do basenów lub budynków. W okresie ostatnich kilku lat, na znaczeniu bardzo dynamicznie zyskuje również energia promieniowania słonecznego (EPS) - najważniejsze i podstawowe źródło energii na Ziemi [179], [80]. Czynniki takie jak spadające koszty upowszechnianej technologii, dostępność programów finansowych czy też ogromny potencjał zasobów helioenergetycznych sprawiają, że zarówno sektor prywatny jak i przemysłowy w Polsce bardzo chętnie wybierają to źródło energii. Dużą zaletą EPS jest to, że może być ona następnie przetwarzana na energię elektryczną lub energię cieplną. Zarówno urządzenia do konwersji fotowoltaicznej i fototermicznej, technologie ich wytwarzania jak i same metody wykorzystywania energii promieniowania słonecznego są stale unowocześniane oraz udoskonalane czego dotyczy również niniejsza dysertacja.

1. DOTYCHCZASOWY STAN WIEDZY

1.1. Energia odnawialna

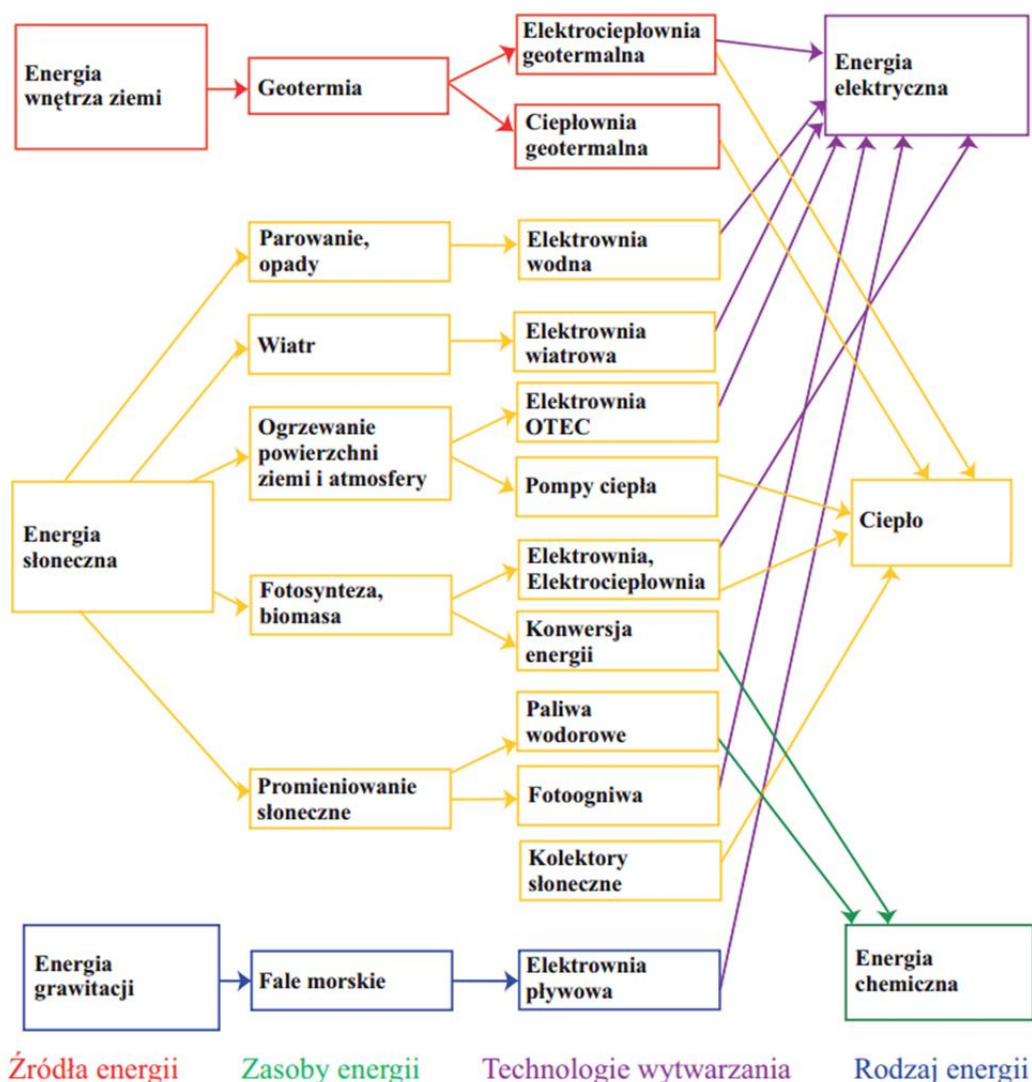
Odnawialne źródła energii to wszystkie zasoby ulegające w relatywnie krótkim czasie naturalnym procesom odnowienia [194]. W odróżnieniu do źródeł nieodnawialnych - głównie paliw kopalnych takich jak węgiel kamienny, węgiel brunatny, gaz ziemny czy ropa naftowa - w przypadku ich wykorzystywania nie pojawia się niebezpieczeństwo wystąpienia długotrwałego deficytu. Takowy ma miejsce podczas użytku źródeł konwencjonalnych, ponieważ ich wykorzystanie jest dużo szybsze niż możliwości uzupełniania zasobów.

Kolejne źródła literaturowe [145], [42], [44] wskazują na wiele negatywnych skutków prowadzenia przez państwa długofalowej polityki energii nieodnawialnej. Wśród najważniejszych znajdują się między innymi:

- uwalnianie każdego dnia do atmosfery dużych ilości dwutlenku węgla, co pogłębia globalny kryzys klimatyczny oraz podnosi zapotrzebowanie energetyczne,
- wysokie koszty ekonomiczne co aktualnie jest głównie wynikiem polityki klimatycznej UE, która pobiera od państw członkowskich wysokie opłaty za emisję CO₂. Dodatkowo fakt pomniejszania się zasobów nieodnawialnych w bezpośredni sposób sprawi, iż koszty wydobywania poszczególnych surowców będą coraz wyższe [72], [74],
- produkcja zanieczyszczeń, których skutki wpływają zarówno na życie ludzi jak i zwierząt. Wątpię wspomnieć chociażby o częstym w dzisiejszych czasach problemie smogu w dużych miastach, czy też zanieczyszczeniu gleb i wód gruntowych [127], [148].

Wszystkie wyżej wymienione punkty, stanowią jednocześnie jako ważne argumenty za podjęciem zdecydowanych kroków na rzecz wprowadzenia racjonalnej alternatywy w postaci źródeł odnawialnych. Żeby działania prowadzące do uniknięcia lub też złagodzenia przytoczonych wcześniej negatywnych skutków polityki energetycznej opartej na źródłach nieodnawialnych mogły być skuteczne, niezbędna jest międzynarodowa współpraca ponad podziałami narodowymi. Inicjatywa taka została przypieczętowana w grudniu 2015 roku w Paryżu. Uczestnicy szczytu COP - 21 podpisali wówczas bezprecedensową umowę (Paryskie Porozumienie), w ramach której wszystkie państwa świata zobligowały się podjąć działania na rzecz ratowania klimatu i zmian w polityce energetycznej [74], [150]. Jest to pierwsza globalna umowa klimatyczna w historii łącząca wszystkie państwa w wysiłku i wspólnych działaniach dążących do uniknięcia katastrofy klimatycznej i energetycznej. Wszyscy sygnatariusze tego porozumienia zobligowani są między innymi do regularnego raportowania redukcji dwutlenku węgla w swoich krajach oraz respektowania ustalonych celów redukcyjnych. W ramach osiągniętego

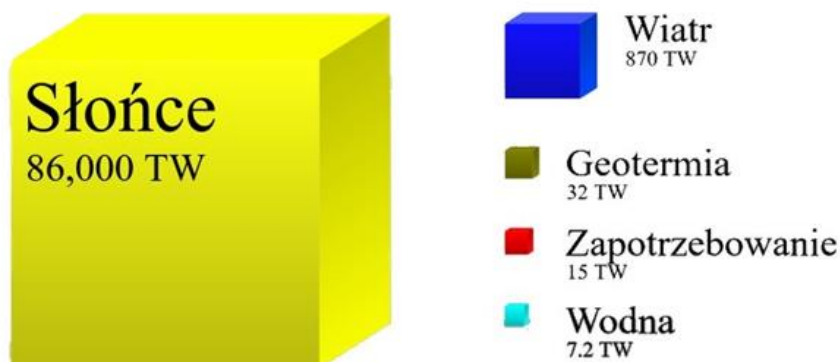
w Paryżu konsensusu, powołany został również międzynarodowy fundusz klimatyczny, którego celem jest wspieranie w walce ze zmianami klimatu państw rozwijających się. W przypadku OZE dokonać można następującego podziału (rys. 1.1):



Rys. 1.1. Podział energii otrzymywanej z OZE [57]

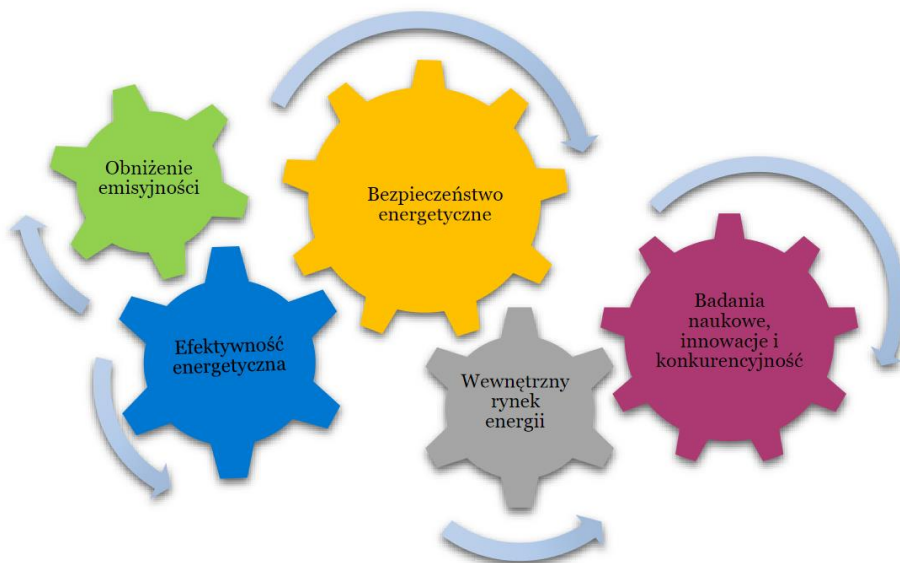
Zaprezentowany podział bardzo dobrze obrazuje różnorodność źródeł oraz form w jakich zasoby te mogą występować. Wyróżnia się trzy główne grupy źródłowe: energie wewnątrz ziemi, energię grawitacji oraz najobszerniejszą z nich - energię słoneczną [57]. Każdemu z wymienionych źródeł przyporządkowano właściwe technologie wytwarzania, w skład których wchodzi urządzenia, systemy oraz procesy fizyczne. Zauważyć można, iż pomimo dużego zróżnicowania w sposobie przetwarzania energii, efekt końcowy zawsze ogranicza się do jej trzech głównych rodzajów, tj. energii chemicznej, energii elektrycznej lub też energii elektrycznej.

Eksperti szacują, iż ze wszystkich dostępnych źródeł energii odnawialnej to właśnie energia pochodząca ze Słońca wykazuje największy potencjał. Na rysunku 1.2 pokazano jednak, że w znacznej mierze przewyższa on aktualne zapotrzebowanie ludzkości [72], [91].



Rys. 1.2. Teoretyczny potencjał OZE w stosunku do światowego zapotrzebowania energetycznego w ciągu roku [57]

Najpoważniejszym problemem w jej użytkowaniu jest jednak rozproszenie, które przekłada się na relatywnie wysokie względem węgla czy gazu koszty użytkowe. Choć decentralizacja źródeł energii niesie za sobą również kilka pozytywnych efektów takich jak chociażby redukcja przerw w dostawach energii, zmniejszenie strat wynikających z przesyłu oraz spadek emisyjności CO₂, to niestety proces jej wprowadzenia jest skomplikowany i wiąże się ze zmianami gospodarki energetycznej na wielu płaszczyznach. Zgodnie z krajowym planem na rzecz energii i klimatu na lata 2021 - 2030 niezbędne jest zintegrowane podejście, które przy wdrażaniu zmian uwzględniać powinno pięć aspektów (rys. 1.3), filarów tzw. unii energetycznej.



Rys. 1.3. Filary unii energetycznej [18]

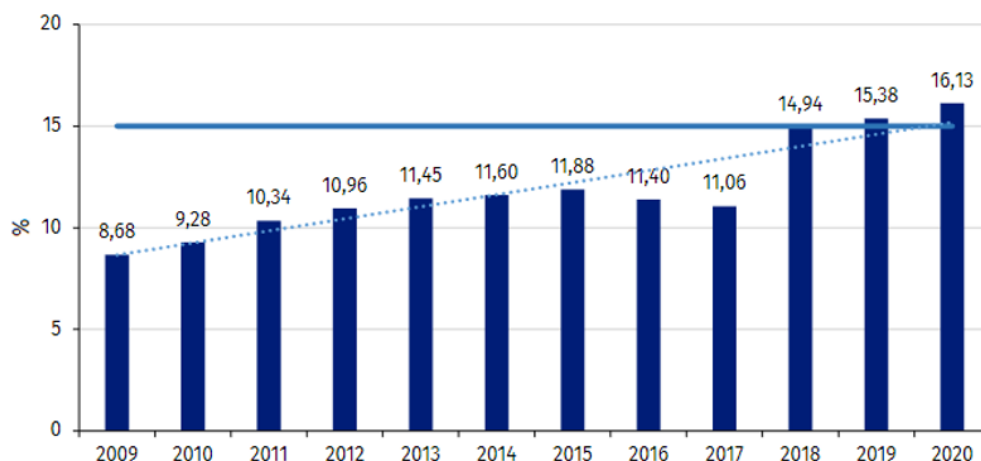
Podstawowym zagadnieniem jest bezpieczeństwo energetyczne krajów wspólnoty. Literatura wskazuje, iż pod tym hasłem rozumieć należy zmniejszanie zależności energetycznej UE od zewnętrznych dostawców oraz położenie większego nacisku na dywersyfikację dostaw energii [42], [61], [127], [142]. Za kolejny filar uznano wspieranie wewnętrznego rynku energii zacieśnienia współpracy pomiędzy krajami UE oraz wspólne tworzenie długoletniej polityki energetycznej państw. Ważnym i bardzo potrzebnym z punktu widzenia planety założeniem jest również dekarbonizacja gospodarki. Ograniczanie poziomu emisyjności wpisane jest w długofalową strategię walki ze zmianami klimatycznymi. Dwa ostatnie wymiary to polepszanie efektywności energetycznej istniejących już urządzeń i całych systemów energetycznych oraz prowadzenie jak największej liczby badań naukowych, które napędzać mają innowacyjność w tej dziedzinie [62], [148], [194].

Najczęściej przytaczanym w literaturze warunkiem wzrostu wykorzystania OZE są szybkie zmiany regulacji prawnych, norm i przepisów dotyczących światowej energetyki [42], [73], [74]. Nie chodzi tu jednak tylko o stawianie warunków i narzucanie limitów czy też kar za przekroczenie norm emisyjności. Działania takie powinny przede wszystkim obejmować wsparcie inicjatyw społecznych rozumiane jako dotowanie energetyki prosumenckiej, wspieranie rozwoju technologii oraz rynku urządzeń służących do efektywnego wykorzystywania OZE. W styczniu 2007 roku Europejska Rada Energii Odnawialnej (EREC) we współpracy z Greenpeace International wydała opracowanie pt. „Rewolucja energetyczna” - prognoza zrównoważonego rozwoju energii dla świata [61]. Informacje zawarte w tym dokumencie dowodzą, że możliwe jest przekształcenie struktury produkcji energii na świecie na taką, której bazą będą OZE, bez negatywnych zakłóceń stabilności wzrostów gospodarczych. Co więcej raport dowodzi również, że inwestowanie w takie źródła energii będzie dziesięciokrotnie tańsze niż przetwarzanie paliw kopalnych.

Zgodnie z opublikowanymi 16 grudnia 2021 roku danymi Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) w Polsce w 2020 roku nastąpił wzrost udziału energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto [140]. W skali roku wyniósł on 0,76 punktu procentowego i skutkował końcowym udziałem OZE na poziomie 16,13% (rys. 1.4).

Oznacza to, że Polsce udało się zrealizować cel wyznaczony przez dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. [45] dotyczący zapewnienia konkretnego poziomu udziału energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto. W przypadku Polski cel na rok 2020 wynosił 15%. Realizacja tego planu możliwa była zarówno dzięki zwiększeniu zużycia energii brutto ze wszystkich źródeł odnawialnych (1,22%) jak i niewielkiemu zmniejszeniu udziału nieodnawialnych źródeł energii. Dynamika zmian nie jest

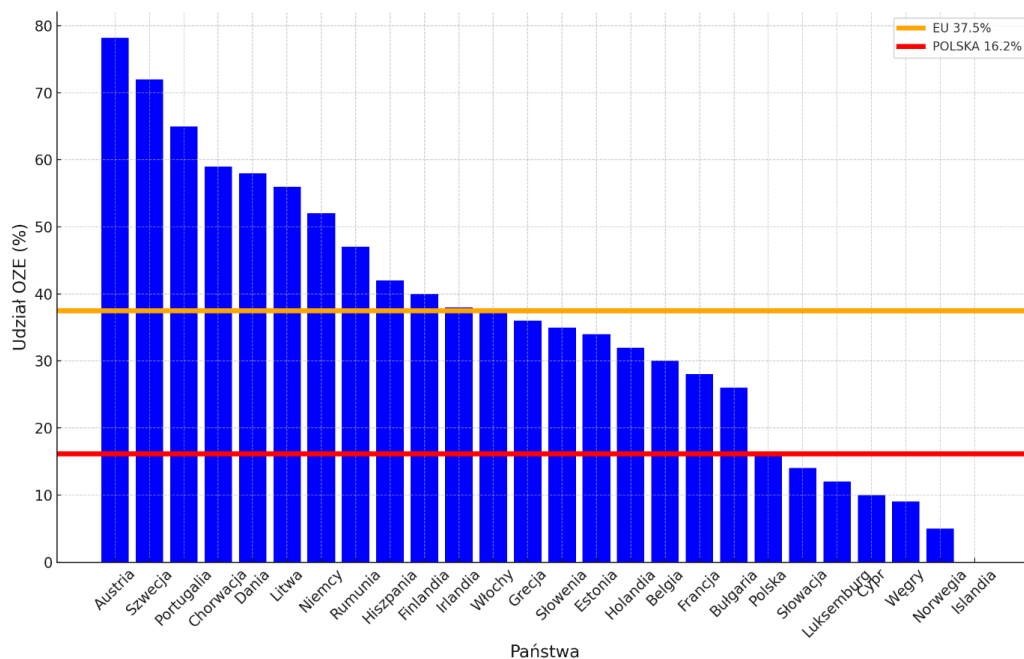
jednak zadowalająca. W 2021 roku w Polsce udział OZE wyniósł 16,9% [45], [46]. Oznacza to, że pomimo wciąż obowiązującego trendu wzrostowego, szybkość transformacji krajowej energetyki nie zwiększyła się w zasadzie wcale. W skali tego roku przyrost wyniósł 0,77%, czyli tylko 0,01% więcej niż w roku 2020. Sprawa komplikuje się jeszcze bardziej biorąc pod uwagę cele wyznaczone przez Komisję Europejską na kolejne lata. Zgodnie z negocjowanym jeszcze pakietem regulacji klimatycznych „Fit for 55” udział OZE w miksie energetycznym ma do 2030 roku dla Polski wzrosnąć do 31%. Cel całej wspólnoty wynosi aż 40% [42]. Uwzględniając aktualne poziomy odpowiednich wskaźników, dynamikę ich zmian oraz możliwości polityczne wiele raportów wskazuje na możliwe problemy z wypełnieniem takiego zobowiązania [146]. Rząd Polski w 2021 roku zadeklarował gotowość do osiągnięcia jedynie 23% udziału OZE co oznacza aż 8% różnicę [91].



Rys. 1.4. Procentowy udział energii OZE w końcowym zużyciu energii brutto [140]

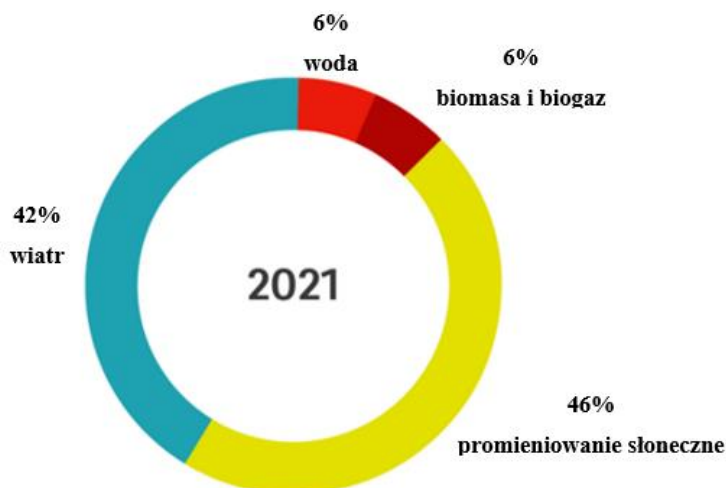
Według danych Eurostatu dotyczących wykorzystania OZE w 2020 roku, średnio w całej Unii Europejskiej 37% energii elektrycznej zostało pozyskanej ze źródeł odnawialnych [46]. Udział procentowy energii elektrycznej pozyskanej z OZE dla krajów unijnych zaprezentowano na rysunku 1.5.

Wynik ten uznany został za sukces, ponieważ oznaczał ponad 3% wzrostem względem poprzedniego roku kalendarzowego. Liderem w 2020 roku była Austria, w której to udało się aż 78,1% zapotrzebowania na energię elektryczną pokryć za pomocą OZE. Bardzo wysokie współczynniki zanotowano również w państwach skandynawskich takich jak Szwecja (75%) i Dania (65%). Ponad połowę zużywanej energii elektrycznej pochodzenia odnawialnego wykazały zaś Portugalia (58%), Chorwacja (53%) i Litwa (52%). Chociaż Polska osiągnęła założony dla niej 15-procentowy cel OZE, zajmuje odległe 22 miejsce w Europie i daleko jej do średniej całej wspólnoty. Niewiele jest państw będących pod tym względem gorszymi od Polski. W 2020 roku były to Czechy, Luksemburg, Cypr, Węgry i Malta [46].



Rys. 1.5. Udział energii elektrycznej z OZE w całkowitym zużyciu energii elektrycznej w poszczególnych krajach UE [46]

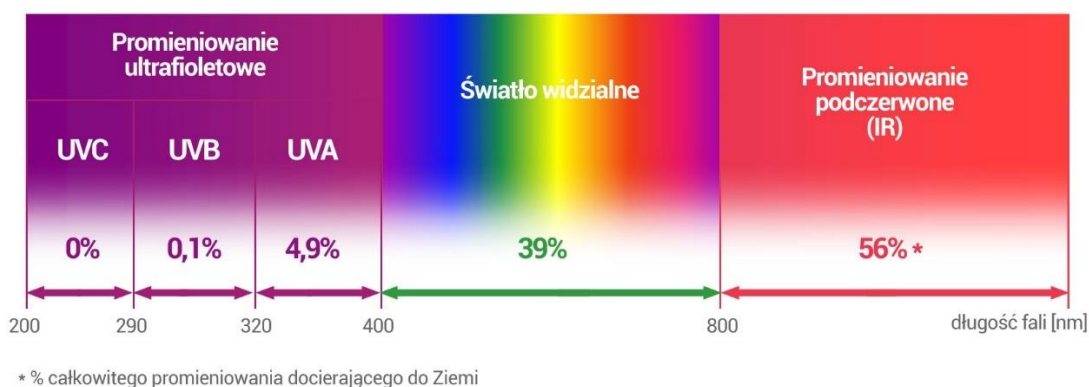
Analizując udział różnych form OZE w całkowitym zużyciu energii elektrycznej (rys.1.6) zauważyć można, iż najwięcej energii pochodziło ze źródeł wiatrowych (36%) oraz wodnych (33%). Mniejszy udział wykazała energia słoneczna (14%), biopaliwa (8%) oraz pozostałe źródła odnawialne (8%). Analizując aktualny krajowy udział mocy poszczególnych instalacji OZE (rys. 1.6) okazuje się, że za największą jej część odpowiada energia promieniowania słonecznego (46%), następnie energia wiatru (42%) a jedynie dopełnieniem pozostają instalacje, dla których źródłem energii jest woda, biomasa lub biogaz [46].



Rys. 1.6. Procentowy udział mocy instalacji OZE zainstalowanych w Polsce w roku 2021 [92]

1.2. Charakterystyka promieniowania słonecznego

Trzy centralne grupy widma fali elektromagnetycznej, tj. promieniowanie UV, światło widzialne oraz podczerwień, składają się na promieniowanie słoneczne (rys. 1.7). To właśnie analiza zakresu promieniowania słonecznego jest z punktu widzenia tej rozprawy najistotniejsza. Największą część promieniowania słonecznego stanowi tzw. promieniowanie podczerwone (IR) 56% [54].



Rys. 1.7. Widmo promieniowania słonecznego [152]

Stanowi ono rodzaj fali elektromagnetycznych o długości mieszczących się w umownym zakresie od 780 nm do 1 mm. Lokuje je to pomiędzy światłem widzialnym a falami radiowymi, konkretnie mikrofalami. Promieniowanie podczerwone zgodnie z literaturą emitowane jest w postaci promieniowania cieplnego przez wszystkie obiekty o temperaturze wyższej niż zero bezwzględne ($-273,15^{\circ}\text{C}$). Urządzeniami technicznymi służącymi do emisji promieniowania podczerwonego są lasery i lampy żarowe. Najczęściej spotykany w Polsce podział podczerwieni na pasma prezentuje się następująco [76], [152]:

- podczerwień bliska (ang. NIR) w zakresie od 0,8 - 2,5 μm ,
- podczerwień średnia (ang. MIR) w zakresie 2,5 - 25 μm ,
- podczerwień daleko (ang. FIR) w zakresie 25 - 1000 μm .

Terminologia ta nie została jednak znormalizowana w związku z czym, w różnych obszarach nauki spotkać się można z zupełnie innymi zakresami odpowiadającymi konkretnym typom [25], [37], [132].

Kolejną składową promieniowania słonecznego jest ultrafiolet (UV). Zwany często promieniowaniem nadfioletowym, jest rodzajem fali, który mieści się w zakresie długości od 10 do 400 nm. Największym źródłem promieniowania UV jest Słońce, ale wyemitować je można również za pomocą odpowiednich urządzeń takich jak lampy kwarcowe, lampy wodorowe lub lasery. Do najważniejszych zastosowań promieniowania UV należy przede wszystkim

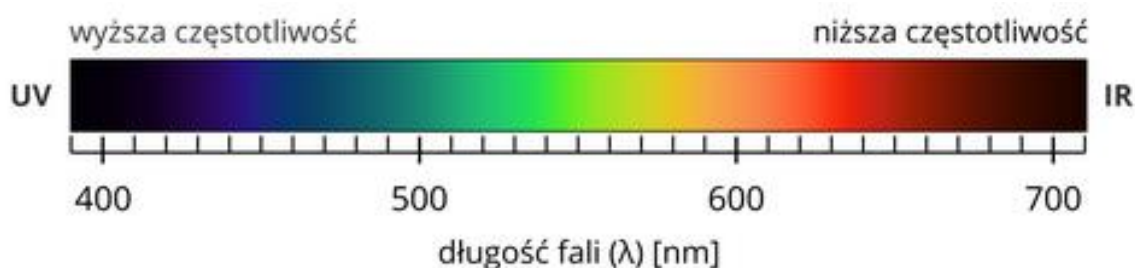
użyteczność medyczna, czyli sterylizacja sprzętu zabiegowego oraz technika fotolitografii pozwalająca na wykonywanie półprzewodnikowych układów scalonych [77], [64].

Promieniowanie nadfioletowe znajduje użycie również w kosmetyce, gdzie lampy emitujące taki typ promieniowania pozwalają na uzyskanie efektu sztucznego opalenia na solarium lub jako utwardzacze lakierów do paznokci. Uwzględniając skutki działania promieniowania UV na organizmy żywe wyróżnia się następujące typy:

- UV-C - o długości fali 100 - 280 nm,
- UV-B - o długości fali 280 - 315 nm,
- UV-A - o długości fali 315 - 380 nm.

Słońce emituje promieniowanie ultrafioletowe w każdym z tych zakresów, jednak atmosfera ziemska, w swojej warstwie ozonowej, całkowicie pochłania promieniowanie UV-C oraz znaczną część promieniowania UV-B. Efektem tego jest fakt, że aż 97% promieniowania UV docierającego do powierzchni Ziemi to typ UV-A [64].

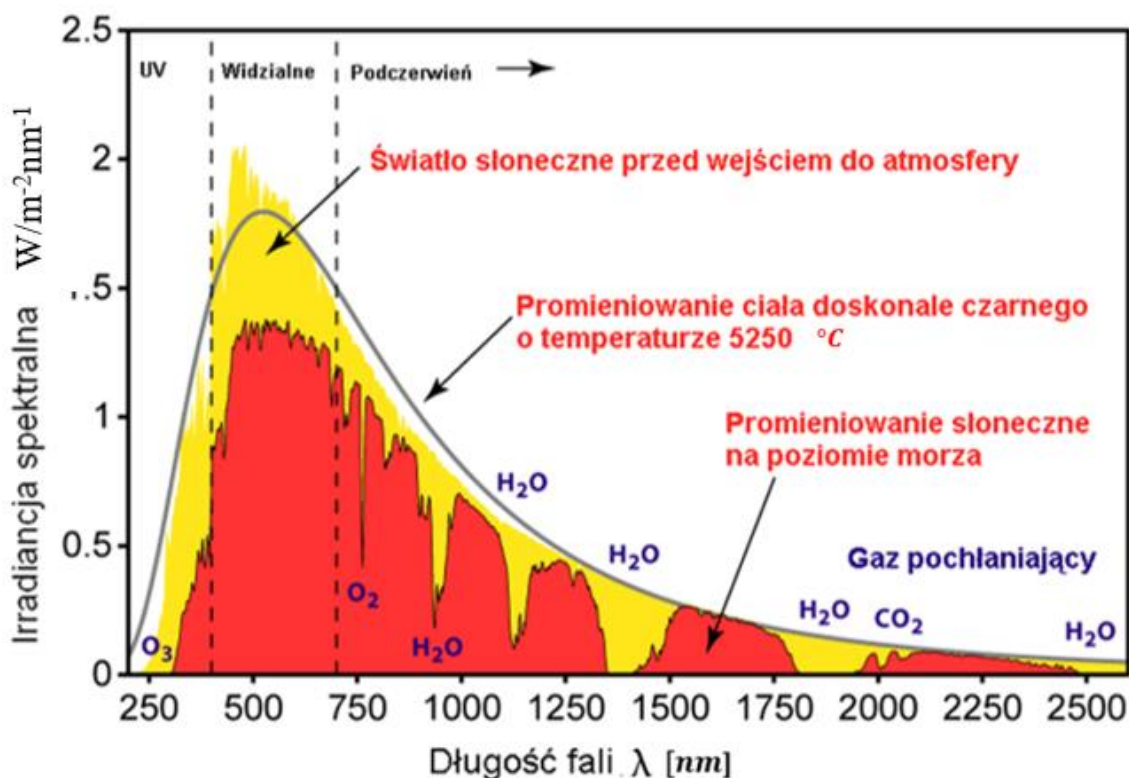
Następująca po ultrafiolecie grupa promieniowania jest bardzo wyjątkowa z punktu widzenia jej znaczenia dla człowieka. Sama nazwa promieniowanie widzialne (VIS), lub też światło widzialne - wskazuje na pewną kluczową cechę promieniowania w zakresie długości fal od około 389 nm do 750 nm [14], [53]. Polega ona na tym, iż ten rodzaj promieniowania wchodzi w interakcję z okiem w procesie widzenia. Ludzki narząd wzroku rejestruje fale o różnych długościach zaś mózg interpretuje je jako kolory. Rozszczepiając światło białe na składniki otrzymuje się widmo światła widzialnego, gdzie każda z barw odpowiada innej długości fali (rys. 1.8).



Rys. 1.8. Widmo światła widzialnego [191]

Umowne granice tej grupy zostały dostosowane do możliwości reakcji siatkówki oka u człowieka na konkretne długości fali. Warto dodać, że wartości te mogą być różne w zależności od budowy oka konkretnego gatunku. W związku z tym istnieją zwierzęta, które widzą w węższym spektrum niż człowiek niektóre zaś posiadają możliwość widzenia w szerszym spektrum.

Widmo promieniowania słonecznego opisuje rozkład promieniowania elektromagnetycznego, które emitowane jest przez Słońce w zależności od długości fali (rys. 1.9).



Rys. 1.9. Widmo promieniowania słonecznego [202]

Nie uwzględniając wpływu atmosfery ziemskiej, rozkład ten mógłby zostać opisany w pewnym przybliżeniu krzywą Plancka dla ciała doskonale czarnego. Zgodnie z rysunkiem 1.9 maksymalna energia promieniowania słonecznego przypada na długość fali około 500 nm. Promieniowanie przechodzące przez atmosferę ziemską ulega zauważalnemu osłabieniu wskutek procesów fizycznych takich jak absorpcja i rozpraszanie. Stopień intensywności tych procesów zależy od lokalnego stanu atmosfery oraz długości drogi przebytej przez promieniowanie w atmosferze. Miarą długości drogi przebytej przez promieniowanie słoneczne ze źródła przez atmosferę do poziomu morza jest masa optyczna atmosfery (AM - Air Mass). Odniesiona jest ona do długości hipotetycznej drogi wzdłuż drogi pionowej i wyrażona zależnością [121]:

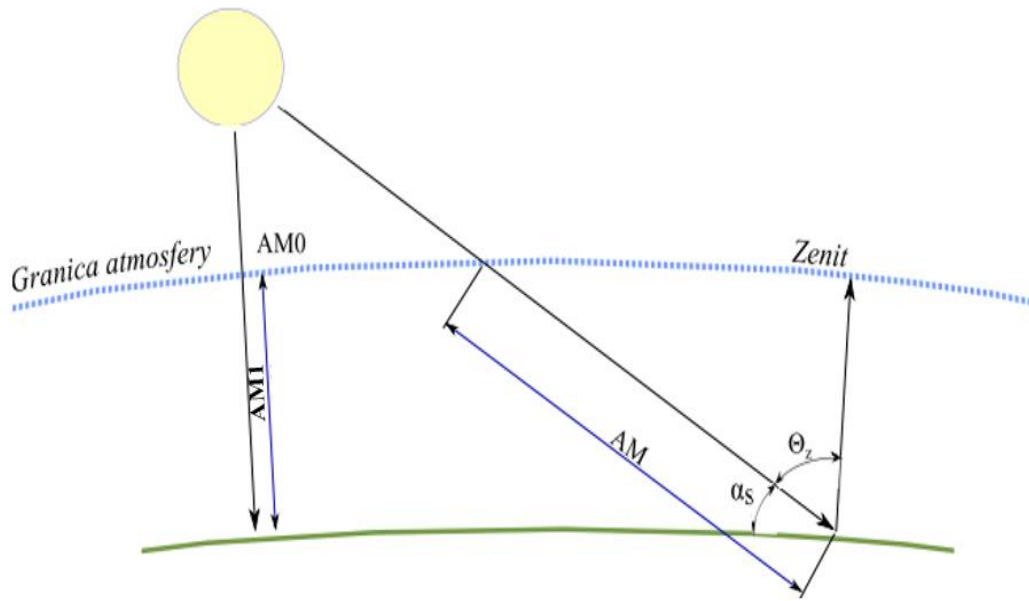
$$AM = \frac{1}{\sin(\alpha_s)} = \frac{1}{\cos(\theta_z)} \quad (1.1)$$

gdzie:

θ_z - kąt zenitalny - kątowa odległość Słońca od pionu,

α_s - kąt wzniesienia Słońca (określający pozorną wysokość Słońca) - jest on kątem dopełniającym kąta zenitalnego.

Sposób definiowania masy optycznej przedstawiono na rysunku 1.10.



Rys. 1.10. Rysunek pomocniczy do zdefiniowania pojęcia masy optycznej [121]

W celu wyznaczenia wartości natężenia promieniowania słonecznego lub wartości luminacji energetycznej (radiancji) docierającej do powierzchni planety niezbędne jest nie tylko uwzględnienie masy optycznej, ale również przeprowadzenie bilansu cieplnego Ziemi.

Stosunek ilości energii promieniowania słonecznego padającego na prostopadłą powierzchnię z odległości 1AU docierającego w jednostkowym czasie do jednostkowej powierzchni zdefiniowany został w nauce jako stała słoneczna (G_{sol}). Dla średniej odległości Ziemia - Słońce ($L = 1,496 \times 10^8$ km) przyjmuje ona wartość 1367 W/m^2 i wyznaczana jest z zależności [121]:

$$4\pi R^2 \sigma T_S^4 = 4\pi(L - r)^2 G_{sol} \quad (1.2)$$

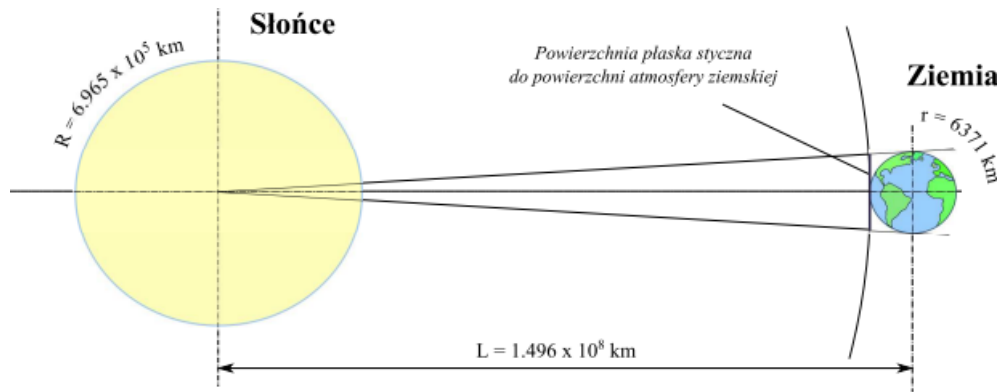
gdzie:

σ - jest stałą Stefana Boltzmanna,

T_S - jest temperaturą promieniowania nieba,

r - promień ziemski (6 371 km).

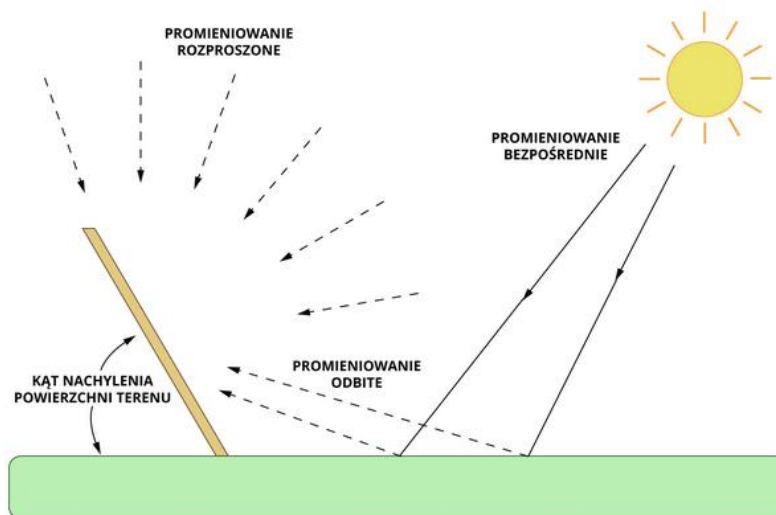
Wartość stałej słonecznej wyraża uśrednioną gęstość strumienia EPS na płaskiej powierzchni o promieniu równym promieniowi ziemskiemu (r), stycznej do kulistej powierzchni będącej współśrodkową ze Słońcem w odległości L . Sytuacja ta przedstawiona została na (rys. 1.11).



Rys. 1.11. Rysunek poglądowy do wyznaczania stałej słonecznej [115]

W celu obliczenia wartości średniej gęstości strumienia EPS na powierzchni ziemskiej atmosfery niezbędnym jest uwzględnienie kulistego kształtu Ziemi oraz faktu, iż powierzchnia planety jest czterokrotnie większa niż powierzchnia płaska o takim samym promieniu. Efektem tego średnia wartość gęstości strumienia EPS dla na powierzchni atmosfery ziemskiej stanowi jedną czwartą stałej słonecznej i przyjmuje wartość 342 W/m^2 . Tylko część tej energii dostępnej na poziomie atmosfery dociera do powierzchni mórz i lądów (rys. 1.12). Energia ta definiowana jest w literaturze jako promieniowanie całkowite (G) i może zostać podzielona na [191], 195]:

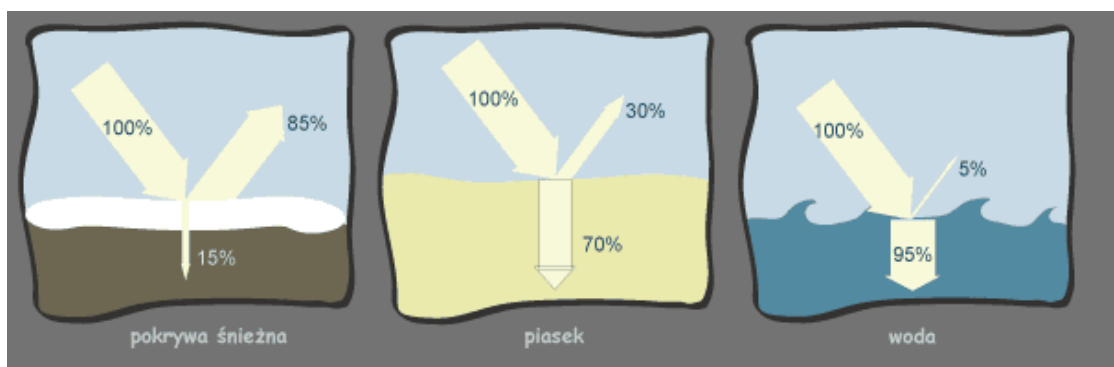
- promieniowanie bezpośrednie (G_b) - wtedy, gdy promieniowanie słoneczne przechodzi przez atmosferę ziemską do wskazanej powierzchni bez jakichkolwiek oddziaływań,
- promieniowanie rozproszone (G_d) - wtedy, gdy promieniowanie słoneczne zostaje podlega rozproszeniu w atmosferze przez pyły, cząsteczki gazów oraz krople i kryształy wody.



Rys. 1.12. Rodzaje promieniowania słonecznego [191]

Na powierzchni planety szczególne znaczenie posiada promieniowanie rozproszone. To ono w znacznej części odpowiada za dostarczanie światła i ogrzewanie podłoża w pochmurne dni, kiedy promieniowanie bezpośrednie nie ma szans na dotarcie do powierzchni. Dodatkowo

to właśnie rozproszenie promieniowania słonecznego odpowiada za błękitny kolor nieba. Część promieniowania słonecznego zostaje również odbita od powierzchni Ziemi z powrotem do atmosfery. Intensywność tego odbicia zależy jest od właściwości powierzchni, na którą pada fala elektromagnetyczna. Procentowa wartość promieniowania odbitego określana jest jako albedo i różni się ono w zależności od zdolności ciała do odbijania promieniowania. W rejonach okołobiegunowych współczynnik ten wynosić może nawet około 80-90%, gdzie dla powierzchni oceanów wartość ta wynosi zaledwie 5%. Uśredniona w czasie oraz powierzchni wartość albedo dla Ziemi wynosi 37% [181]. Różnice w ilości odbijanego od różnych rodzajów podłoża promieniowania przedstawione zostały na rysunku 1.13.



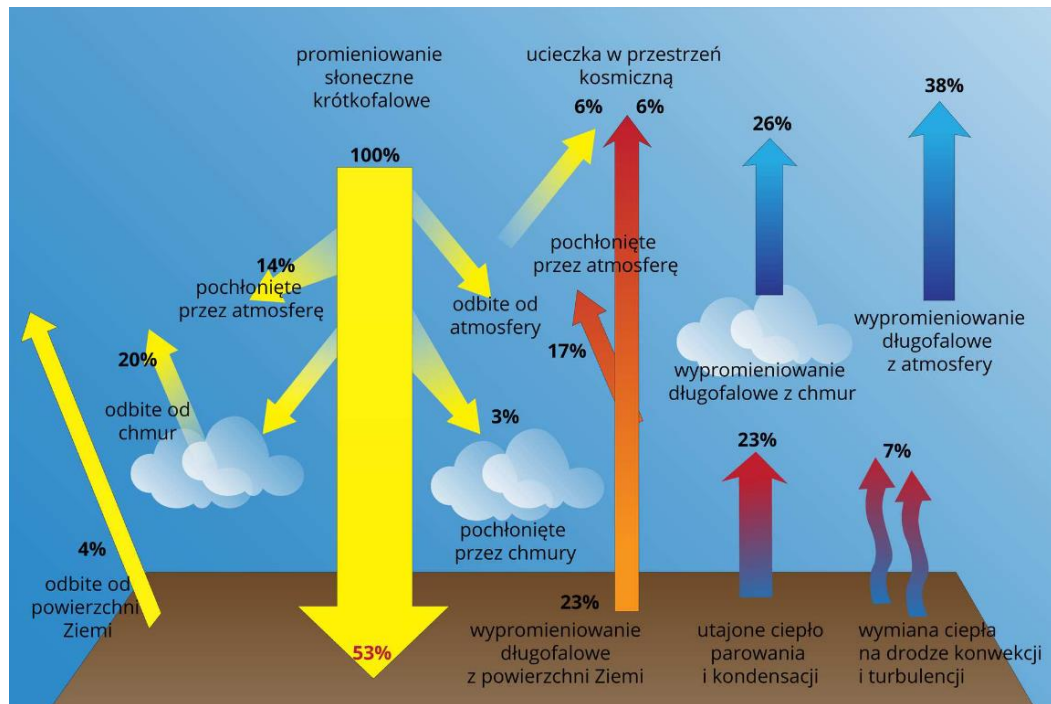
Rys. 1.13. Odbijanie promieniowania w zależności od rodzaju podłoża [112]

Jako najważniejsze z czynników decydujących o wielkości promieniowania całkowitego literatura wskazuje [188], [152]:

- formę ukształtowania terenu,
- czas oświetlenia powierzchni,
- wysokość nad poziomem morza,
- wysokość Słońca nad horyzontem,
- albedo powierzchni.

Energia promieniowania całkowitego nazywana jest nasłonecznieniem lub insolacją. Jest ona najważniejszym czynnikiem powodującym nagrzewanie się powierzchni Ziemi. Część energii promieniowania całkowitego zostaje wchłonięta w ziemię i zamieniona w ciepło. Ta sama wiązka promieniowania będzie przekazywać swoją energię na różniące się w zależności od szerokości geograficznej powierzchni. Pole tej powierzchni będzie np. większe w strefie podbiegunowej niż w strefie międzyzwrotnikowej. Przekłada się to na zauważalną różnicę w otrzymywanej energii cieplnej na jednostkę powierzchni. Stąd też obszary położone blisko równika ziemskiego cechują się dodatnim bilansem cieplnym oraz najwyższymi wartościami średniej rocznej temperatury na Ziemi. Sytuacja jest odwrotna dla obszarów dalej odsuniętych

od równika. W strefie podbiegunowej dopływ energii jest relatywnie niewielki, skutkiem czego jest ujemny bilans cieplny [64], [112], [121]. Bilans cieplny Ziemi wynika z bilansu promieniowania przedstawionego na rysunku 1.14.



Rys. 1.14. Bilans promieniowania na powierzchni Ziemi [191]

Głównymi składnikami tego bilansu są [191], [121]:

- pochodzące ze Słońca i dochodzące do poziomu atmosfery ziemskiej promieniowanie słoneczne krótkofalowe (342 W/m^2),
- promieniowania odbite od chmur (77 W/m^2) oraz powierzchni Ziemi (30 W/m^2),
- promieniowanie wchłaniane przez atmosferę ziemską (67 W/m^2),
- promieniowanie wchłaniane przez powierzchnię Ziemi (168 W/m^2),
- promieniowanie długofalowe powierzchni Ziemi (390 W/m^2),
- procesy wymiany ciepła na linii podłoże - atmosfera, w tym parowanie i kondensacja (78 W/m^2) oraz konwekcja (24 W/m^2).

Podczas przejścia przez atmosferę ziemską promieniowanie słoneczne krótkofalowe powoduje ogrzewanie się jej w minimalnym stopniu. Najważniejszym odbiorcą energii promieniowania słonecznego jest powierzchnia Ziemi. Warstwa lądowa przekazuje w ten sposób uzyskaną energię cieplną w dwóch kierunkach. Drogą przewodnictwa energia przekazywana jest w głąb gruntu, natomiast pod postacią promieniowania długofalowego, ruchów turbulencyjnych i konwekcyjnych dostarczana jest ponownie do atmosfery. Na powierzchni zachodzą dodatkowo zjawiska kondensacji i parowania, które również są źródłami strat [37], [80], [121].

Bilans energii pomiędzy Słońcem, powierzchnią Ziemi oraz jej atmosferą jest kluczowym czynnikiem kształtującym klimat na planecie. Wyrażany jest w postaci równania [86]:

$$Q = (1 - A_Z)(I \cdot \sin(h) + i_s) + (E_Z - E_a) \quad (1.3)$$

gdzie:

Q - bilans promieniowania,

A_Z - albedo powierzchni,

$[I \cdot \sin(h)]$ - natężenie promieniowania bezpośredniego,

i_s - wysokość słońca nad horyzontem,

E_Z - długofalowe promieniowanie Ziemi,

E_a - promieniowanie zwrotne atmosfery.

Bilans cieplny zależny jest bezpośrednio od bilansu promieniowania i uwzględnia [86]:

- sumaryczną ilość ciepła dostarczonego do układu z zewnątrz,
- sumaryczną ilość ciepła wydzielaną przez układ na zewnątrz,
- skutki procesów cieplnych zachodzących wewnątrz układu.

Ponadto bilans cieplny może zostać również wyrażony w postaci równania opisującego równowagę energii przekazywanej na powierzchni ziemi pomiędzy różnymi zasobnikami:

$$Q_Z + H_Z + L_Z + G_Z = 0 \quad (1.4)$$

gdzie:

H_Z - turbulencyjne ciepło odczuwalne,

L_Z - turbulencyjne ciepło utajone,

G_Z - ciepło przekazywane przez przewodzenie w gruncie.

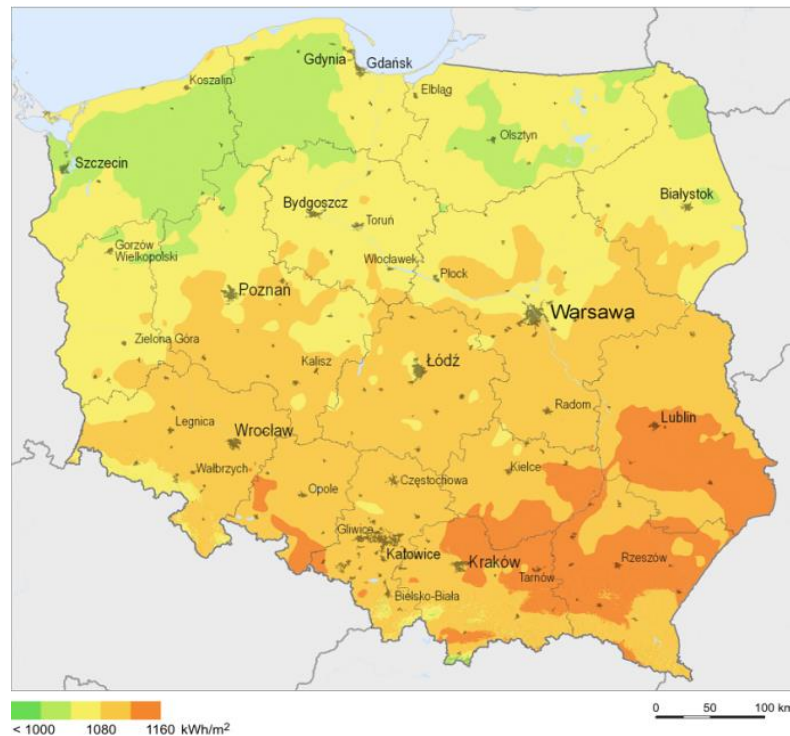
W zależności od ilości dostarczanej energii słonecznej związanej np. z porą dnia, współczynniki w równaniu 1.9 mogą przyjmować różne znaki. Dodatnia wartość bilansu cieplnego informuje o tym, że więcej energii jest do podłoża dostarczane niż tracone. Ujemna wartość tego bilansu wskazuje na straty energii, a więc scenariusz, gdy ilość energii traconej jest większa od ilości energii docierającej do podłoża. Stan, w którym średnia ilość energii docierającej do planety, przy jednoczesnym zbilansowaniu energii pobieranej i oddawanej, zdefiniowany został jako równowaga termiczna [49].

W celu praktycznego wykorzystania energii promieniowania słonecznego niezbędne jest oszacowanie potencjalnych oraz rzeczywistych zasobów energii słonecznej w określonym regionie. Zbiór wskaźników zawierających informację na temat dostępnych zasobów energii Słońca składa się na tzw. warunki helioenergetyczne. Każdy taki wskaźnik niesie w sobie ważną informację na temat zasobów helioenergetycznych danego miejsca na Ziemi, przy czym [123], [169]:

- całkowite napromieniowanie słoneczne określane również jako irradiancja lub natężenie promieniowania słonecznego na poziomą, płaską powierzchnię to wskaźnik, na który wpływ mają zarówno stała słoneczna, zachmurzenie, kąt nachylenia powierzchni do promieni słonecznych oraz wysokość Słońca nad horyzontem. W Polsce wartość w godzinach 9 - 15 wartość bezpośredniego promieniowania słonecznego mieści się zazwyczaj w zakresie $600 - 800 \text{ W/m}^2$,
- usłonecznienie jest średnią liczbą godzin z bezpośrednią operacją słoneczną w ciągu całego roku. W Polsce przedział wartości usłonecznienia wynosi 1390 - 1900 godzin, w zależności od regionu. Uśredniona wartość to 1600 godzin co przekłada się na około 66 dni [139].
- nasłonecznienie, inaczej zwane insolacją wyraża stosunek energii promieniowania słonecznego do czasu padania oraz powierzchni płaskiej, na którą ono pada. Można je określić również jako natężenie promieniowania słonecznego w czasie. W szerokościach geograficznych zbliżonych do Polski waha się on od 900 kWh/m^2 do 1200 kWh/m^2 w okresie roku. Według norm dla Polski przyjmuje się najczęściej na potrzeby badań uśrednioną wartość 1000 kWh/m^2 na rok $\pm 10\%$ [139].

Tak określone wskaźniki dostarczają kompleksowy zestaw informacji dotyczących warunków helioenergetycznych. Umożliwiają one jednocześnie ich ocenę oraz efektywne wykorzystywanie potencjału energii słonecznej w określonych regionach świata. Umiejętność opisu warunków pogodowych z wykorzystaniem wymienionych wskaźników jest kluczowa dla planowania, projektowania i wdrażania instalacji fototermicznych oraz fotowoltaicznych.

Polska położona jest w strefie klimatu umiarkowanego. Dzień, definiowany jako czas od wschodu do zachodu Słońca, obejmuje ponad 51% wszystkich godzin w roku. Czas operacji słonecznej wynosi około 8 godzin na dobę w miesiącach zimowych oraz około 16 godzin na dobę w miesiącach letnich. Mapa średniej wartości nasłonecznienia rejestrowanego w Polsce (rys. 1.15) pozwala zauważyć, iż największe natężenie promieniowania słonecznego występuje w centralnej i południowej części kraju [186], [198].



Rys. 1.15. Średnie wartości nasłonecznienia w Polsce w latach 2004–2010 [186]

Reasumując, promieniowanie słoneczne jako źródła energii posiada bardzo wiele istotnych zalet zarówno z punktu widzenia ekologii jak i ekonomii. EPS jest ogólnie dostępna i darmowa. Wykorzystywanie jej jako źródła energii nie prowadzi do degradacji środowiska, nie wpływa negatywnie na klimat i nie naraża ziemskich ekosystemów na wyginięcie. Ponadto zasoby helioenergetyczne nie mogą zostać wyczerpane, ponieważ ulegają odnowieniu. Energia ta, jak każda inna posiada również swoje ograniczenia. Do najważniejszych wymienić należy [37], [191], [121]:

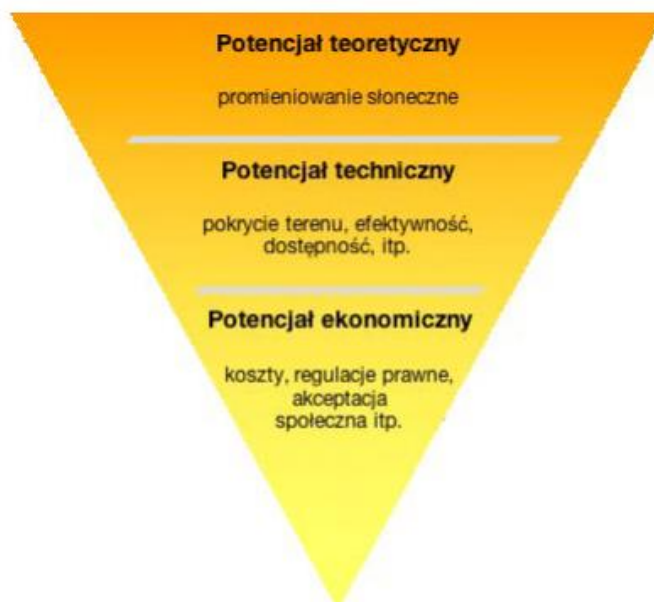
- zmienność warunków pogodowych na świecie,
- cykliczny charakter energii słonecznej,
- rozproszenie energii na dużym obszarze.

Najpoważniejszymi barierami rozwoju wykorzystywania energii promieniowania słonecznego, zgodnie z treścią przytoczonych raportów są [62], [72], [74], [151]:

- skomplikowane procedury administracyjno-prawne, które znacznie utrudniają podjęcie odpowiednich inicjatyw,
- znaczny koszt ekonomiczny podjęcia inwestycji związanych z wykorzystaniem EPS,
- ograniczenia technologiczne dotyczące techniki pozyskiwania i przetwarzania EPS.

1.3. Wykorzystanie energii promieniowania słonecznego

Wykorzystanie EPS jest jednym z najskuteczniejszych sposobów obniżenia tempa zużycia paliw kopalnych [32], [43], [80]. Efektywne wykorzystanie energii Słońca wymaga jednak uwzględnienia potencjału na EPS w trzech, najczęściej przytaczany w literaturze zasadniczych obszarach rys. 1.16.



Rys. 1.16. Składowe potencjału EPS [43]

Pierwszym z nich jest potencjał teoretyczny. Określany jest za pomocą wskaźników empirycznych takich jak np. nasłonecznienie i uśłonecznienie. W przypadku energii słonecznej potencjał teoretyczny zostaje oszacowany dla powierzchni całego kraju na bazie ilości promieniowania bezpośredniego oraz rozproszonego padających na tę powierzchnię. Potencjał ten został już szczegółowo omówiony. Drugim, istotnym z punktu widzenia wykorzystania EPS, jest potencjał ekonomiczny. Obejmuje on przede wszystkim kryteria gospodarcze takie jak akty prawne, dotacje, kredyty, programy dofinansowujące inicjatywy wykorzystania energii odnawialnej oraz usuwanie szeroko rozumianych barier rozwoju OZE. Nie ogranicza się on jednak tylko do aspektów ustawodawczych, ponieważ w jego obrębie mieszczą się również czynniki społeczne takie jak: akceptacja społeczna dla OZE oraz ogólna chęć podjęcia inicjatyw przez ludność. Obie wymienione domeny mocno się przenikają i tak np. uproszczenie prawa energetycznego wpływa korzystnie na ilość składanych wniosków o dofinansowania instalacji bazujących na energii promieniowania słonecznego [192], [193]. Ostatnia z wymienionych grup to potencjał techniczny. Określa on ilość energii promieniowania słonecznego, która jest możliwa w ciągu roku do pozyskania z założeniem wykorzystania najlepszych dostępnych technologii i technik obejmujących zarówno pozyskiwanie jak i przetwarzanie EPS. W swoich

założeniach uwzględnia on również ograniczenia przestrzenne i środowiskowe wpływające bezpośrednio np. na możliwość pokrycia terenu. Zgodnie z treścią ekspertyz Europejskiego Centrum Energii Odnawialnej (ECEO) potencjał techniczny promieniowania słonecznego w Polsce wynosi około 1340 PJ/rok. Wartość ta stanowi aż 53% potencjału całej energii odnawialnej w kraju oraz ponad 30% zapotrzebowania na energię [43], [180].

Kształt odwróconej piramidy ma symbolizować poziom istotności określonych potencjałów dla oszacowania możliwości wykorzystania OZE. Zgodnie z nim najważniejszym i pierwszym brany pod uwagę powinien być potencjał teoretyczny, bez którego bezcelowe jest określanie pozostałych dwóch. Następnie, jeśli okaże się, że ten wykazuje pozytywne wyniki, przeprowadza się ocenę potencjału technicznego, która to uwzględniając proces przetworzenia energii odnawialnej w jej końcowe nośniki, pozwala już bezpośrednio określić rzeczywiste uzyski energetyczne. W przypadku technologii OZE duży wpływ na możliwości wykorzystania mają również uwarunkowania ekonomiczne takie jak przyjęte założenia, normy emisji czy sposoby dofinansowań inicjatyw społecznych. Dlatego też na samym końcu, w celu uzupełnienia przeprowadza się ocenę potencjału ekonomicznego [43], [72], [45].

Analizując dane historyczne [71], [186] przez bardzo długi okres koszty otrzymywania energii elektrycznej z promieniowania słonecznego były kilkukrotnie wyższe niż ich odpowiedniki dla alternatywnych źródeł energii. W związku z tym energia Słońca stosowana była jedynie tam, gdzie użycie tradycyjnych źródeł energii stawało się niemożliwe lub utrudnione. Przykładami takich zastosowań były to między innymi:

- urządzenia takie jak zegarki elektroniczne i kalkulatory, które wymagały zachowania lekkich gabarytów oraz zapewnienia niewielkiej ilości energii,
- pojazdy, gdzie wykorzystanie innych źródeł energii okazywało się nieopłacalne ekonomicznie np. satelity kosmiczne,
- miejsca trudno dostępne bez możliwości poprowadzenia odpowiedniej instalacji energetycznej np. fotoradary [74], [143].

Sytuacja ta uległa zmianie w wyniku kilku czynników. Za jeden z najważniejszych uznać można postęp technologiczny w dziedzinie przetwarzaniem EPS, który przyczynił się do ponad 200-krotnego spadku cen energii słonecznej na przestrzeni lat 1977 - 2015. Nie bez znaczenia jest również zauważalny wzrost cen tradycyjnych źródeł energii będących dotąd najmocniej eksploatowanymi. Dodatkowo w ostatnich latach pojawiły się czynniki polityczno-społeczne takie jak programy dofinansowań, projekty europejskie oraz kampanie promujące OZE i budujące w społeczeństwie świadomość ekologiczną [80], [163]. Na rynku powstają również

nowatorskie rozwiązania hybrydowe, które łącząc energię słoneczną z tradycyjnymi źródłami energii (np. LPG) umożliwiają złagodzenie negatywnych skutków zmian pogody i pozbycie się problemu sezonowości systemów słonecznych. Wszystkie wymienione aspekty wpływają na to, że według wszystkich prognoz zarówno w skali indywidualnej jak i przemysłowej energia słoneczna będzie w przyszłości najtańszym źródłem energii [56], [62], [179].

Możliwości i ograniczenia wykorzystania energii słonecznej wypływają bezpośrednio z jej zalet i wad. W związku z nierównomiernym rozkładem EPS wykorzystanie całego jej potencjału okazuje się być bardzo utrudnione. Szczególnie skomplikowane jest to w okresie jesienno-zimowym. W celu efektywnego wykorzystywania EPS niezbędne jest opanowanie techniki jej przekształcania w inne, użyteczne formy energii [60], [184]. Zgodnie z wynikami przeglądu literatury obecnie najistotniejsze z punktu widzenia energetyki odnawialnej są dla ludzkości dwa sposoby uzyskiwania energii z promieniowania słonecznego [3], [7], [24]:

- konwersja fotowoltaiczna,
- konwersja fototermiczna.

Pod pojęciem konwersji w omawianym kontekście rozumieć należy zamianę jednej postaci energii na inną, z zachowaniem podstawowego prawa fizyki jakim jest zasada zachowania energii. W tym wypadku dochodzi do zamiany EPS w odpowiednio energię elektryczną oraz energię termiczną. Dodać należy, że istnieją również inne sposoby uzyskiwania energii z promieniowania słonecznego takie jak chociażby konwersja fotochemiczna polegająca na uwalnianiu energii wiązań chemicznych w paliwach stałych takich jak węgle i ropa naftowa. Ponadto istnieje również proces termolizy wody oraz specjalne kominy nazywane wieżami słonecznymi. Nie są one jednak jak dotąd wykorzystywane na szeroką skalę [7].

1.4. Systemy fototermiczne

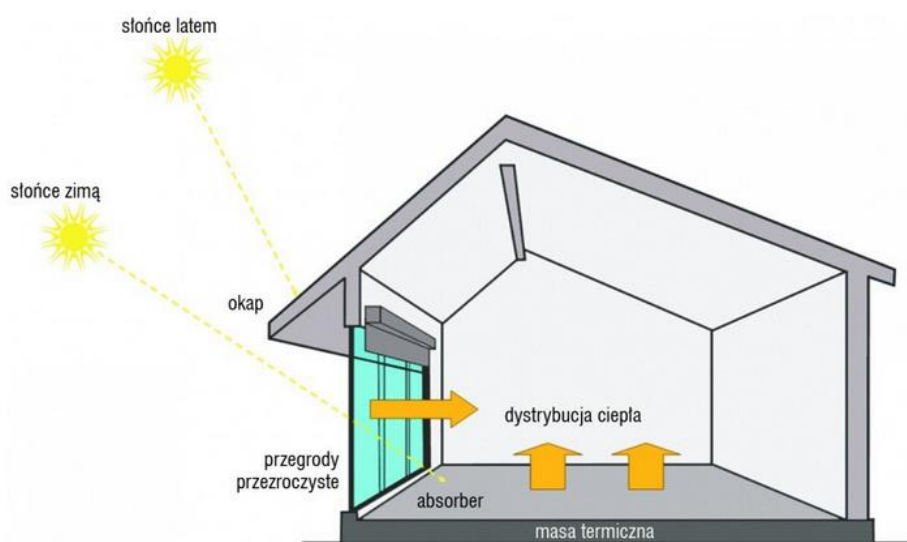
Proces bezpośredniej zamiany EPS na energię cieplną określany jest mianem konwersji fototermicznej, zaś bazujące na nim systemy grzewcze dzielą się na dwa typy [98]:

- fototermiczne systemy pasywne,
- fototermiczne systemy aktywne.

Podstawą takiego podziału jest konieczność użycia do dystrybucji pozyskanej energii dodatkowych źródeł energii. Różnią się one ze głównie względu na różne sposoby pozyskiwania, przechowywania oraz wykorzystywania zgromadzonej energii.

Korzystając z systemów pasywnych zaobserwować można akumulowanie pewnej części pozyskanej energii słonecznej, która to wykorzystywana jest najczęściej do ogrzewania

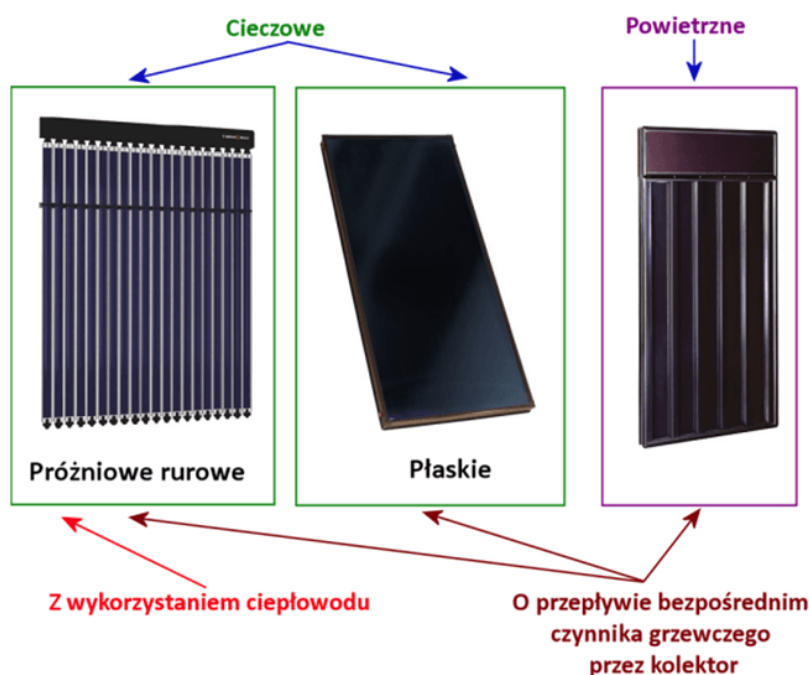
budynków mieszkalnych. Promieniowanie słoneczne przenikające przez przezroczyste przegrody absorbowane jest przez elementy budowlane takie jak ściany i podłogi, następnie w wyniku naturalnego transportu ciepła dochodzi do przekazanie zgromadzonej energii do chłodniejszego powietrza w pomieszczeniu. Dodatkowo w procesie tym nie są wykorzystywane żadne urządzenia mechaniczne i elektryczne, co wpływa na aspekt ekonomiczny takich rozwiązań [12], [36]. Ilość potencjalnych uzysków energetycznych wynikających z nasłonecznienia jest wprost proporcjonalna do powierzchni okien oraz ich standardu energetycznego. Istotny wpływ ma również orientacja budynku. Optymalne wykorzystanie EPS w przypadku zastosowania systemu pasywnego pozwala na ogrzewanie domu zimą, ale nie powoduje przegrzewania budynków w porach ciepłych. Domy zaprojektowane z myślą o wykorzystywaniu pasywnego ogrzewania wymagają znacznie mniejszych nakładów ekonomicznych oraz energetycznych w okresie eksploatacji [55], [134], [141]. Pasywny system słoneczny zaprezentowano na rysunku 1.17.



Rys. 1.17. Dystrybucja ciepła w pasywnym słonecznym systemie grzewczym [134]

Charakterystyczną cechą fototermicznych systemów aktywnych jest potrzeba wykorzystywania dodatkowych urządzeń i mechanicznych napędzanych dodatkową zewnętrzną energią [182]. Pod wpływem zewnętrznego wymuszenia w odpowiednich elementach systemu dochodzi do przemiany energii promieniowania słonecznego w energię użytkową. Najważniejsze zadania jakie stawia się takim systemom polegają na pozyskiwaniu EPS oraz magazynowaniu [34]. Funkcje te realizowane mogą być dzięki wykorzystaniu różnych rozwiązań technicznych takich jak: kolektory słoneczne, zbiorniki magazynujące lub urządzenia zbiorcze. Ważnym jest, iż systemy aktywne pozwalają na rozprowadzanie zmagazynowanej energii w kontrolowany sposób, najczęściej do ogrzewania domów lub podgrzewania ciepłej wody użytkowej (c.w.u.).

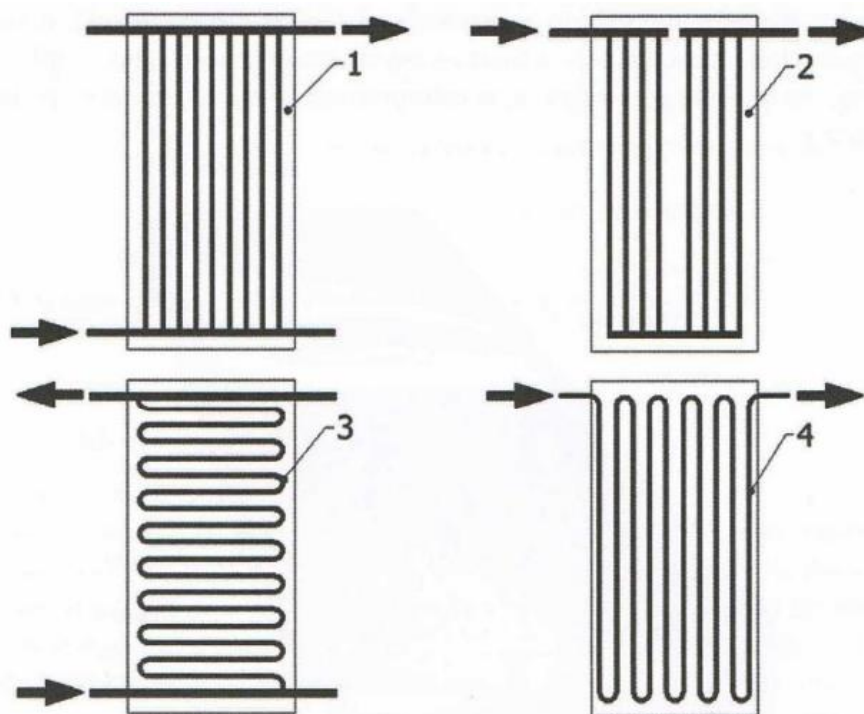
Podstawowymi elementami większości fototermicznych systemów aktywnych są kolektory słoneczne. Urządzenie te służą do konwersji EPS w energię cieplną czynnika grzewczego (nośnika), którym najczęściej jest specjalnie dobrana ciecz jak glikol czy woda lub odpowiedni gaz np. powietrze [81], [121], [187]. Ze względu na pełnioną w systemach konwersji energii funkcję, kolektory słoneczne zalicza się do wymienników ciepła. Ze względu na szczególny sposób działania tworzą one ich odrębną grupę. Istnieje kilka podziałów kolektorów słonecznych ze względu na ich parametry konstrukcyjne (kolektory skupiające i płaskie), rodzaje czynników roboczych (kolektory cieczowe i powietrzne) oraz docelowe przeznaczenie (kolektory nisko, średnio i wysoko temperaturowe). Uproszczony podział kolektorów słonecznych przedstawiony został na rysunku 1.18.



Rys. 1.18. Uproszczony podział kolektorów słonecznych [196]

Każdy rodzaj kolektora słonecznego posiada inne właściwości techniczne i zapewnia inne korzyści podczas użytkowania [185]. Kolektory powietrzne, w których dochodzi do podgrzania przepływającego przez kolektor powietrza są najkorzystniejsze pod kątem kosztów zakupu. Modele te są szeroko wykorzystywane w rolnictwie np. do suszenia zbóż, ale równie świetnie sprawdzają się w systemach wentylacji domowej. Ich istotną zaletą jest brak pojawiania się korozji na elementach urządzenia oraz prosta budowa. Niestety ze względu na fakt, iż w tym przypadku czynnikiem roboczym jest gaz, systemy oparte na kolektorach próżniowych charakteryzują się bardzo ograniczonymi możliwościami magazynowania energii [121], [138]. Modele takie stosowane są w sytuacjach, gdy temperatura czynnika roboczego nie przekracza 100°C. Najczęściej wykorzystywane w Polsce są jednak kolektory cieczowe zarówno płaskie

jak i rurowe. Przykłady różnych konfiguracji układu absorbera w płaskich kolektorach słonecznych pokazane zostały na rysunku 1.19.

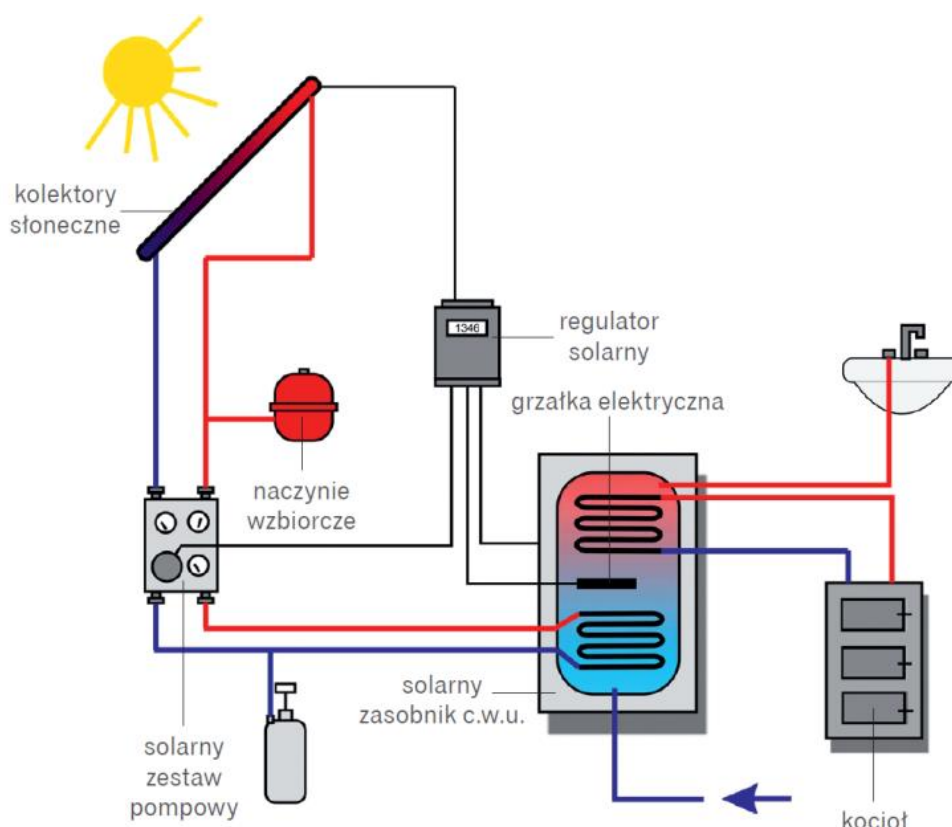


Rys. 1.19. Rodzaje konfiguracji układu rurowego absorbera w kolektorze płaskim, 1 - układ harfowy, 2 - układ podwójnej harfy, 3 - układ poziomy meandrowy, 4 - układ pionowy meandrowy [177]

Słoneczny system grzewczy c.w.u. to zaawansowany układ kilku komponentów, które współpracują ze sobą w celu gromadzenia, przechowywania i dystrybucji energii cieplnej. Główne elementy takich systemów to przede wszystkim [12], [13], [121]:

- kolektor słoneczny - umożliwiający efektywne gromadzenie energii promieniowania słonecznego,
- czynnik roboczy - gaz lub ciecz krążące w obwodzie hydraulicznym, których celem jest transport energii do zasobnika magazynującego. Funkcję tę najczęściej pełni glikol lub woda,
- zasobnik magazynujący - służący do przechowywania zgromadzonych uzysków ciepłych,
- wymiennik ciepła - urządzenie wykorzystywane do przekazywania ciepła z czynnika roboczego do wody lub powietrza,
- grupa pompowa - służy do tłoczenia czynnika roboczego w obiegu zamkniętym przez kolektor słoneczny do zasobnika,
- regulator słoneczny - którego celem w systemie jest nadzór nad pracą grupy pompowej oraz przetłaczaniem czynnika roboczego.

Schemat typowego słonecznego systemu grzewczego zaprezentowano na rysunku 1.20.



Rys. 1.20. Schemat przykładowego słonecznego systemu grzewczego w uproszczonym ujęciu [13]

Zasada pracy słonecznego systemu grzewczego ciepłej wody użytkowej polega na wykorzystaniu energii promieniowania słonecznego do podgrzewania czynnika roboczego krążącego w kolektorach słonecznych i przekazaniu zgromadzonej w ten sposób energii do wody w zasobnikach. Odbywa się to za pośrednictwem wymiennika ciepła (np. węzownicy). W celu realizacji takiego transferu niezwykle istotna jest rola pompy, która pozwala na wymuszenie obiegu cieczy roboczej w zamkniętym układzie hydraulicznym. Praca pompy uzależniona jest od różnicy pomiędzy temperaturą czynnika zmierzoną na kolektorze słonecznym a temperaturą wody uzyskaną w zasobnikach. Dodatkowym elementem takich systemów jest kocioł grzewczy, którego rolą jest zewnętrzne i dodatkowe podgrzewanie wody w zasobnikach w sytuacji, gdy jej temperatura jest niższa niż od pożądanej na wyjściu systemu. Odgrywa to kluczową rolę szczególnie w okresach mniejszego nasłonecznienia lub wyższego zapotrzebowania na ciepłą wodę. Dodatkowo słoneczny system grzewczy wyposażony może być również w inne urządzenia wspomagające jego właściwe funkcjonowanie np. zbiorniki buforowe. Pobierana przez użytkowników z systemu ciepła woda użytkowa uzupełniana jest przez zimną wodę z sieci wodociągowej.

1.4.1. Parametry pracy i warunki eksploatacyjne słonecznych systemów grzewczych

W związku z wyzwaniem jakie pojawiają się w kontekście zmian klimatycznych, słoneczne systemy grzewcze stają się coraz bardziej popularne. Czynniki takie jak łatwa dostępność, niskie koszty oraz minimalny wpływ na środowisko składają się na niezwykle wysoki potencjał energii promieniowania słonecznego. Efektywne wykorzystywanie tej energii odgrywa zaś kluczową rolę w zmniejszaniu wykorzystania paliw kopalnych i zwiększaniu udziału źródeł ekologicznych [120]. W tym kontekście niezwykle ważne staje się określenie parametrów pracy słonecznych systemów grzewczych, zrozumienie warunków w jakich mogą one pracować najefektywniej oraz określenie wyzwań związanych z ich eksploatacją [11].

Pomimo faktu, że terminy „parametry eksploatacyjne” oraz „warunki eksploatacyjne” są podobnymi do siebie określeniami, odnoszą się jednak do różnych obszarów eksploatacji. Parametry opisują wewnętrzne cechy techniczne i wydajnościowe systemu, które pozwalają określić w jaki sposób powinien działać system w określonych warunkach. Najczęściej są to wielkości mierzalne określane przez producenta na podstawie testów wewnętrznych czy norm projektowych. W odniesieniu do solarnych systemów grzewczych za parametry eksploatacyjne uznać należy [116]:

- sprawność kolektora słonecznego - parametr opisujący efektywność procesu przekształcania EPS na ciepło,
- moc cieplną - parametr opisujący ilość maksymalnej energii cieplnej możliwej do wyprodukowania przez system grzewczy,
- pojemność zbiornika magazynującego - zwykle wyrażana w litrach, im wyższa tym więcej ciepła może gromadzić system,
- ciśnienie pracy systemu hydraulicznego - określa maksymalny poziom ciśnienia, przy którym solarny system grzewczy może pracować w pełni funkcjonalnie. Zależy od konstrukcji urządzeń oraz rodzaju instalacji hydraulicznej,
- zakres temperatur pracy - minimalne i maksymalne wartości temperatur zapewniające poprawne i bezpieczne działanie systemu grzewczego. Musi być dostosowany do lokalizacji i warunków pogodowych.

Parametry te pozostają niezmiennie niezależnie od różnych warunków eksploatacyjnych systemu grzewczego. Warunki takie opisują już wpływ zewnętrznego środowiska i okoliczności pracy na funkcjonowanie systemu. Podlegają one zmienności i wywierają bezpośredni wpływ na wydajność i funkcjonowanie systemu.

Źródła literaturowe jako jeden z najważniejszych warunków pracy słonecznego systemu grzewczego wskazują nasłonecznienie. Zasadnicza rola poziomu nasłonecznienia wynika z faktu, że w największym stopniu determinuje ono ilość energii jaką system jest w stanie pozyskać w określonym czasie. Wysokie wartości nasłonecznienia oznaczają wyższy potencjał energetyczny danego dnia, który z kolei przekłada się bezpośrednio na wzrost efektywności całego systemu grzewczego. Samo nasłonecznienie zależne jest od kilku czynników takich jak szerokość geograficzna, pora roku czy też warunki atmosferyczne. Analizując wpływ lokalizacji zauważono, że miejsca o wyższym nasłonecznieniu np. obszary równikowe w naturalny sposób otrzymują więcej promieniowania słonecznego w jednostce czasu. Potencjał ten przekłada się bezpośrednio na efektywniejsze ogrzewanie wody oraz podnosi opłacalność takich instalacji we wspomnianych regionach [37], [163], [34]. Wybór właściwej lokalizacji dla słonecznego systemu grzewczego jest zatem jednym z najważniejszych czynników pod kątem optymalizacji jego wydajności. Dodatkowy i znaczący wpływ na ilość promieniowania będzie miała również zmienność pór roku. W zależności od sezonu, długość i kąt padania promieni słonecznych podlegają zmianie. To zaś afektuje wydajność całego systemu. Podczas pory zimowej, krótsze dni oraz niższa pozycja Słońca nad horyzontem sprawiają, że system grzewczy działa z niższą wydajnością niż w okresach letnich. Ponadto kolejnym czynnikiem, który warto odnotować są również wahania dobowe nasłonecznienia. Największy potencjał energetyczny osiągany jest zazwyczaj w okolicach południa, kiedy Słońce znajduje się w najwyższej pozycji. Spada on znacznie w okresach porannych oraz popołudniowych. Wahania te mogą być dodatkowo zakłócone poprzez zmiany pogodowe takie jak opady deszczu, zachmurzenie czy mgła. Wyraźnie zmniejszają one dostępność promieniowania słonecznego wpływając tym samym na efektywność systemu.

Zgodnie z powyższym, ujęcie nasłonecznienia jako podstawowego warunku pracy oraz zrozumienie jego wpływu na funkcjonowanie słonecznego systemu grzewczego jest bardzo ważne dla optymalizacji wydajności tego systemu. Właściwie dobrana lokalizacja, uwzględnienie wpływu pór roku oraz działania mające na celu adaptację pracy systemu do dziennych zmienności nasłonecznienia są niezbędne na drodze ku zwiększaniu efektywności i wydajności systemu grzewczego.

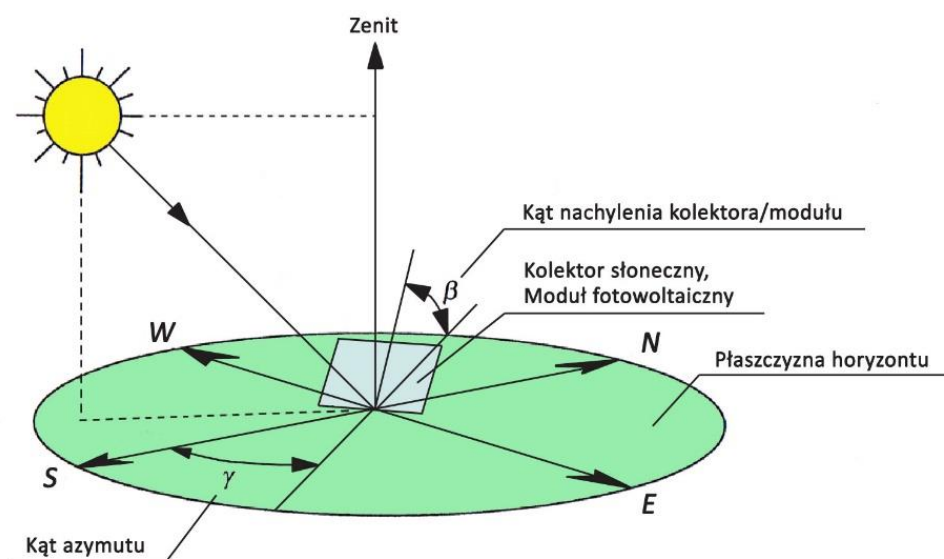
Kolejnym ważnym warunkiem eksploatacyjnym jest temperatura otoczenia w jakim pracować ma słoneczny system grzewczy. Zgodnie z aktualnym stanem wiedzy, wysoka temperatura otoczenia przyczynia się do zwiększenia efektywności energetycznej kolektorów słonecznych wchodzących w skład systemu grzewczego [84], [190]. Kolejnym pozytywnym wpływem wysokiej temperatury otoczenia jest zmniejszenie strat ciepła mierzonych w układzie

przesyłowym czynnika roboczego. Wszystko to pozwala stwierdzić, że wyższe temperatury mogą być korzystne dla eksploatacji słonecznego systemu grzewczego. W rzeczywistości sytuacja jest jednak dużo bardziej złożona. Materiały wykorzystywane do budowy kolektorów słonecznych są podatne na degradację, co przy założeniu wysokich temperatur oraz bardzo intensywnego promieniowania słonecznego może skutkować zmniejszaniem się ostatecznej efektywności systemu w dłuższym ujęciu czasowym. Równie negatywnym będzie przeciwny scenariusz, zakładający skrajnie niskie temperatury otoczenia.

W związku z takim stanem rzeczy stwierdzić należy, że w aspekcie temperatury otoczenia optymalizacja działania słonecznych systemów grzewczych wymaga przewidywania wpływu skrajnych temperatur na system w dłuższym okresie czasu. Zadanie zaprojektowania takiego systemu musi brać pod uwagę te warunki pracy, aby zapewnić efektywną pracę przez cały rok bez względu na temperaturę otoczenia. W przypadku występowania skrajnych temperatur bądź też dużych wahań tego parametru, niezbędna może się okazać rozbudowa systemu o dodatkowe systemy chłodzenia lub ogrzewania w celu utrzymania ustalonych warunków pracy. Dodatkowo temperatura otoczenia jest również istotna z punktu widzenia sprawności urządzeń wykorzystywanych do przeprowadzania procesów konwersji fototermicznej. Przykładowo sprawność kolektorów słonecznych cieczowych jest afektowana przez różnicę temperatur otoczenie-kolektor.

Ważną grupą warunków eksploatacyjnych słonecznego systemu grzewczego jest również ta obejmująca warunki związane z pozycją kolektorów słonecznych. Obejmuje ona przede wszystkim kąt nachylenia kolektorów, ich orientację oraz ewentualne zacienienie. Istotnie wpływają one na ilość energii, którą kolektory słoneczne są w stanie odebrać danego dnia. Istnieje bezpośredni związek pomiędzy szerokością geograficzną a odpowiednim kątem nachylenia kolektorów. Maksymalizacja absorpcji energii słonecznej w ciągu roku wymaga dostosowania nachylenia do uśrednionej pozycji słońca na niebie. Według źródeł literaturowych, w klimacie umiarkowanym kąt nachylenia kolektora do płaszczyzny horyzontu powinien być zbliżony do wartości szerokości geograficznej lokalizacji powiększonej o 15° zimą oraz pomniejszonej o 15° w porze letniej. Zabieg taki ma na celu dostosowanie nachylenia do wysokości słońca na nieboskłonie. W przypadku półkuli północnej najlepszym, wskazywanym przez źródła sposobem zorientowania kolektora jest skierowanie go w stronę południa. Zabieg ten pozwala na najlepsze wykorzystanie energii słonecznej w ciągu doby. Źle dobrana orientacja kolektorów skutkuje dużym ograniczeniem ilości absorbowanej energii słonecznej co musi przekładać się na obniżenie wydajności systemu grzewczego. Podobny, negatywny efekt będzie widoczny w przypadku zacienienia powierzchni kolektorów przez jakiegokolwiek przeszkody np. drzewa,

budynki. W celu zapobiegania takim scenariuszom należy dokładnie planować miejsce montażu kolektorów, uwzględniając przy tym również wszystkie zacienienia w skali dnia i roku. Na rysunku 1.21 pokazane zostały najważniejsze kąty w układzie kolektor - Słońce.



Rys. 1.21. Oznaczenie kątów w układzie kolektor - Słońce [34]

Wszystkie te warunki pracy - kąt nachylenia kolektorów, ich orientacja oraz unikanie zacienienia - odgrywają ważną rolę w procesie optymalizacji wydajności słonecznego systemu grzewczego. Właściwe wykorzystanie dostępnych w systemie urządzeń do pozyskiwania EPS pozwala na maksymalizację uzysków energetycznych, zwiększenie efektywności a jednocześnie opłacalności inwestycji pod względem ekonomicznym.

Następnym z warunków, które mają wpływ na funkcjonowanie słonecznego systemu grzewczego jest wiatr. Jego wpływ może wydawać się mało znaczący, jednak zgodnie z raportami [70], [100], [127] czynnik ten może zwiększać straty ciepła drogą konwekcyjną. Wiatr może chłodzić powierzchnię kolektorów co powinno obniżyć nominalną wydajność systemu grzewczego. Jako warunek eksploatacyjny wymaga uwzględnienia go na etapie projektowania systemu oraz zaplanowania środków ochronnych. Najprostszym z rozwiązań jest wybranie odpowiedniej lokalizacji. Umieszczenie kolektorów w miejscu osłoniętym przed wiatrem pozwala zmniejszyć jego wpływ na działanie systemu. Możliwym jest również zastosowanie specjalnie zaprojektowanych osłon wiatrowych montowanych zazwyczaj w bezpośrednim otoczeniu kolektorów słonecznych. Istotnym jest, aby nie zwiększyć przy tym zacienienia powierzchni apertury kolektora. Jak podają źródła negatywny wpływ wiatru może być również minimalizowany dzięki zwiększeniu stopnia izolacji przewodów oraz odpowiedniej regulacji kąta nachylenia kolektorów [70].

Efektywność słonecznego systemu grzewczego jest również skorelowana ze stopniem zaizolowania elementów systemu. Powiązanie to obejmuje izolację rur jak również zbiorników. Niewystarczający stopień zaizolowania rur może wpłynąć na znaczny wzrost strat ciepła podczas transportu wody lub innego nośnika ciepła z kolektorów słonecznych do zbiornika magazynującego oraz na drodze do punktów użytku. Problem ten będzie jeszcze bardziej widoczny w miejscach o niskiej temperaturze otoczenia. Podobnie zresztą rzecz ma się do izolacji zbiornika magazynującego ciepło w systemie. Niewystarczająca izolacja w tym przypadku pozwoli na wyprowadzanie z systemu uprzednio zgromadzonego ciepła co znacznie obniży efektywność słonecznego systemu grzewczego. Dodatkowo wyższe straty ciepłne, wynikające ze złego zaizolowania elementów systemu, doprowadzić mogą również do wzrostu nakładów energetycznych w celu utrzymania pożądanej temperatury a w wyniku tego do wzrostu kosztów funkcjonowania. Przekłada się to na wyraźne zmniejszenie korzyści ekonomicznych podczas wykorzystywania EPS.

Kwestia zanieczyszczeń w słonecznych systemach grzewczych odnosi się zazwyczaj do zabrudzeń występujących na powierzchni czynnej kolektorów słonecznych. Jest to warunek eksploatacyjny, który stanowi ważny aspekt potrafiący w negatywny sposób wpływać na efektywność systemu grzewczego. Dzieje się tak w przypadkach pokrycia powierzchni kolektorów słonecznych brudem, kurzem, liśćmi czy też śniegiem w wyniku czego maleje zdolność takiego urządzenia do absorpcji promieniowania słonecznego. Zanieczyszczenia oprócz oczywistego i bezpośredniego przełożenia na ilość światła słonecznego docierającego do absorbera wpływają również na wzrost kosztów eksploatacyjnych chociażby poprzez konieczność częstszej konserwacji urządzeń [95]. Rozwiązań omawianych problemów jest kilka. Regularne czyszczenie i oględziny powierzchni kolektorów słonecznych w znaczącym stopniu pozwalają na uniknięcie poważnych problemów. Ponadto wybranie na etapie projektowania odpowiedniej lokalizacji instalacji kolektora - miejsca, gdzie ryzyko zabrudzenia jest jak najmniejsze. Technika pozwala również dziś na wykorzystanie nowoczesnych, specjalistycznych powłok, które zmniejszają lub całkowicie uniemożliwiają przyleganie brudu do powierzchni kolektora słonecznego np. powłoki hydrofobowe ułatwiające odprowadzanie wody deszczowej. Podejmowanie działań profilaktycznych oraz doraźnych w celu minimalizacji wpływu zanieczyszczenia słonecznego systemu grzewczego na jego efektywność jest ważne, ponieważ pozwala na maksymalizację korzyści płynących z wykorzystywania takich systemów.

1.4.2. Sposoby oceny efektywności energetycznej słonecznych systemów grzewczych

Zdolność oceny efektywności energetycznej słonecznych systemów grzewczych jest podstawowym zagadnieniem pozwalającym opisać jak skutecznie system jest w stanie pozyskiwać i przekształcać EPS w użyteczną energię cieplną. Termin efektywność w aspekcie systemów energetycznych odnosi się przede wszystkim do jakości przetwarzania dostępnych zasobów energetycznych na ich użyteczną formę. Wzrost tej jakości jest zawsze związany z minimalizacją strat i poprawą parametrów pracy systemu. Efektywność wyrażana jest zazwyczaj w procentach i wyrażona może zostać za pomocą wzoru [120]:

$$\eta = \left(\frac{Q_u}{HA} \right) \cdot 100\% \quad (1.5)$$

gdzie:

η - efektywność systemu grzewczego,

Q_u - energia użyteczna (kWh),

H - energia słoneczna dostępna na jednostkę powierzchni (kWh/m²),

A - powierzchnia kolektorów (m²).

Czynniki, które w największym stopniu wpływają na efektywność słonecznego systemu grzewczego są między innymi straty cieplne w przewodach oraz poprzez powierzchnię kolektora, kąt nachylenia i orientacja baterii kolektorów słonecznych oraz warunki atmosferyczne w jakich pracuje system grzewczy [37], [188], [58].

Bliskim, lecz niepokrywającym się terminem w technice jest wydajność energetyczna. Określenia te dosyć często stosowane są zamiennie lub też w podobnych kontekstach nawet w czasopiśmie branżowych. Warto podkreślić, iż wydajność energetyczna słonecznego systemu grzewczego odnosi się jednak do samego uzysku energetycznego nie uwzględniając jakości procesu przekształcania energii jak dzieje się to miejsce w przypadku efektywności. Wydajność odnosi się do ilości energii cieplnej wyprodukowanej przez system w ustalonym czasie lub przy ustalonych warunkach pracy. Wzrost sprawności systemu grzewczego wpływa zatem na wzrost parametrów wydajnościowych. Taki stan rzeczy skutkuje tym, że w procesach projektowania, eksploatacji i oceny systemów energetycznych oba te parametry są ważne i warte uwzględnienia przez użytkownika.

W literaturze przedmiotu wskazuje się kilka podstawowych sposobów na ocenę efektywności energetycznej słonecznego systemu grzewczego [120]:

- analiza wydajności cieplnej - metoda ta oparta jest o pomiar ilości ciepła wyprodukowanego przez system grzewczy w odniesieniu do ilości EPS padającej na powierzchnię

kolektora słonecznego. Stanowi ona podstawowy i najczęściej wykorzystywany wskaźnik oceny efektywności, który co do zasady wykorzystuje odpowiednie mierniki nasłonecznienia oraz czujniki temperatur rozmieszczone w instalacji,

- ocena sprawność kolektorów słonecznych - polega na pomiarze stosunku energii, którą kolektor słonecznych ma możliwość przetworzyć do całkowitej energii, która dociera do jego powierzchni. Często mierzona w warunkach laboratoryjnych dla konkretnych rodzajów, typów i modeli by następnie posłużyć do celów klasyfikacji takich urządzeń np. certyfikat Solar Keymark lub SRCC,
- analiza zwrotu energetycznego (EROI - Energy Return on Investment) - taki sposób oceny efektywności słonecznego systemu grzewczego polega na badaniu stosunku energii uzyskanej z systemu do całkowitej energii wykorzystanej do jego budowy, instalacji i eksploatacji. Pomiar energii uzyskanej ze wskazanego źródła jest zestawiany z ilością energii zużytej na jego pozyskanie, przetworzenie oraz przesłanie. Podstawowym konceptem tej metody jest założenie, że w celu wykorzystania każdego ze źródeł energii niezbędna jest pewna inwestycja energetyczna. Literatura wskazuje, że ze względu na możliwość oceny ogólnej efektywności energetycznej systemu w dłuższej perspektywie czasowej, ten typ analizy bardzo często wykorzystywany jest do podejmowania decyzji inwestycyjnych oraz politycznych,
- odniesienie do standardowych wartości - podejście porównawcze jest jedną z bardziej oczywistych metod oceny wydajności słonecznych systemów grzewczych. Nie wymaga ono znajomości zaawansowanego aparatu matematycznego i pozwala w prosty sposób dokonać oceny porównując konkretny system grzewczy ze zbliżonymi systemami, które działają w podobnych warunkach. Takie działanie bardzo dobrze nadaje się do identyfikacji potencjalnych możliwości rozbudowy lub ulepszenia systemu poddawanego ocenie,
- analiza oszczędności - ocena efektywności polegająca na obliczaniu kosztów ekonomicznych i potencjalnych oszczędności względem innych metod ogrzewania. Metoda ta uwzględnia czynniki takie jak początkowe koszty inwestycji, redukcję kosztów eksploatacyjnych oraz pośrednie korzyści takie jak dotacje i ulgi dla osób korzystających z OZE. Umożliwia ocenę efektywności słonecznego systemu grzewczego w bardzo przejrzysty i zrozumiały dla większości osób sposób,
- badanie kamerą termograficzną - ocena oparta na wykorzystaniu specjalnych zdjęć z kamery termograficznej w celach identyfikacji niewydajnych elementów systemu. Badania takie mogą wskazać miejsca, gdzie system traci bardzo dużo energii a ich występowanie

w bezpośredni sposób przekłada się na obniżenie efektywności energetycznej słonecznego systemu grzewczego. Bardzo pozytywnym i często wykorzystywanym aspektem takich badań jest ich funkcja diagnostyczna, która dzięki wyraźnemu wskazaniu źródła problemu pozwala już na wczesnych etapach zareagować i przeciwdziałać potencjalnym usterkom,

- symulacja komputerowa - wykorzystanie specjalistycznego oprogramowania komputerowego pozwala na przeprowadzenie zaawansowanej analizy oceny efektywności systemu grzewczego. Dodatkowo w odróżnieniu do wszystkich wcześniej wspomnianych metod, pozwala ona na zbadanie zachowania systemu w różnych warunkach eksploatacyjnych co umożliwia identyfikację optymalnych konfiguracji systemu. Jest zdecydowanie najbardziej zaawansowana technicznie i skomplikowana.

Każdy z przedstawionych sposobów oceny efektywności energetycznej słonecznego systemu grzewczego dostarcza wartościowych informacji o różnych aspektach jego funkcjonowania. Mogą być one następnie wykorzystane do działań optymalizacyjnych których celem jest poprawa efektywności systemu grzewczego, ale również ułatwienie procesu podejmowania decyzji dotyczących projektowania, instalacji i eksploatacji.

1.4.3. Aspekt sterowania w słonecznych systemach grzewczych

Sterowanie pracą słonecznych systemów grzewczych jest kluczowym zagadnieniem z punktu widzenia ich efektywnego i ekonomicznego działania. Najważniejszym celem sterowania w słonecznych systemach grzewczych jest optymalizacja wykorzystania dostępnej energii cieplnej do celów użytkowych. Energia ta zaś może być następnie wykorzystywana do ogrzewania ciepłej wody użytkowej lub budynków [8], [26], [106].

Termin „sterowanie” w słonecznych systemach grzewczych może być rozpatrywane w kilku kategoriach oraz odnosić się do różnych elementów systemu. Najważniejsze ujęcia tematyki sterowania w odniesieniu do słonecznych systemów grzewczych to [7], [37], [155], [153]:

1. Sterowanie obiegiem cieplnym:

- pompa obiegowa zostaje wysterowana zgodnie z przyjętym algorytmem pracy w celu zapewnienia odpowiedniego przepływu czynnika roboczego w instalacji hydraulicznej. Sterowanie umożliwia skuteczne odbieranie ciepła z baterii kolektorów słonecznych do zasobników,
- zawory drogowe zapewniają możliwość kontroli przepływu cieczy grzewczej w instalacji hydraulicznej w pożądany i dopasowany do warunków pogodowych sposób.

2. Sterowanie kolektorami słonecznymi:

- położenie kolektorów słonecznych powinno być dobrane w sposób zapewniający zbieranie jak największej ilości promieniowania słonecznego. Kolektor powinien być zawsze skierowany w kierunku źródła promieniowania, co realizowane jest często z wykorzystaniem automatycznych systemów nadążnych. Śledzą one ruch słońca po nieboskłonie i korygują pozycję oraz nachylenie baterii kolektorów,
- temperatura kolektorów może być regulowana w słonecznych systemach grzewczych w celu zapobiegnięcia przegrzewania się paneli słonecznych.

3. Sterowanie ogrzewaniem budynku:

- dystrybucja ciepła w domowych systemach grzewczych pozwala na dostosowywanie ilości energii dostarczanej do różnych pomieszczeń zgodnie z zapotrzebowaniem,
- regulacja temperatury realizowana z wykorzystaniem sensorów i termostatów umożliwia utrzymywanie pożądanej temperatury w określonych strefach budynku.

4. Sterowanie zasobnikiem:

- temperatura wody w zasobniku może być kontrolowana dzięki wykorzystaniu grzałek elektrycznych lub innych urządzeń grzejnych umieszczonych w zbiorniku w celu podtrzymania parametrów c.w.u.,
- zabezpieczenia termiczne w zasobniku są częścią systemu sterowania odpowiedzialną za zabezpieczenie zasobnika przed przegrzaniem oraz ewentualnym uszkodzeniem wynikającym z nadmiernego nagrzania.

Poza nadmienionymi postaciami zagadnienie sterowania może być również rozpatrywane w odniesieniu do kontroli systemów monitorowania i alarmowania, w które wyposażony powinien zostać każdy nowoczesny system grzewczy. Ponadto literatura wskazuje również na możliwość sterowania działaniem systemu grzewczego pod kątem minimalizacji zużycia energii elektrycznej [1], [7], [155].

Obecnie zaobserwować można dynamiczny rozwój tematyki związanej z technologią wykorzystania energii promieniowania słonecznego w systemach grzewczych. Niemniej jednak, komercyjnie koncentruje się on głównie na aspektach technicznych budowy samych kolektorów słonecznych oraz projektowaniu nowoczesnych systemów [190], [154], [201]. Ujęcie problemu sterowania w słonecznych systemach grzewczych ogranicza się najczęściej do badań nad kolektorami słonecznymi, a nie całymi systemami [87], [89], [96], [97]. Producenci takich instalacji często proponują w związku z tym nowe rodzaje absorberów, inne materiały izolacyjne, ulepszone oszklenie lub zupełnie nowe projekty kolektorów słonecznych. Wprowadza się

bardzo niewiele zmian, ulepszeń czy też nowych propozycji rozwiązań w dziedzinie sterowania pracą słonecznego systemu grzewczego. W niektórych badaniach naukowych wykorzystywane są różne metody sterowania, jednak nie są one przedmiotem rozważań autorów [5], [174]. Badania na temat sterowania w słonecznych systemach grzewczych mają głównie charakter przeglądowy i inspekcyjny [37], [109]. Najczęściej obiektem badań są tylko kolektory, a nie system jako integralna całość. Przeprowadzonych zostało wiele analiz i stworzono wiele modeli kolektorów słonecznych, które umożliwiły osiągnięcie bardzo wysokiego zaawansowania technologicznego w dziedzinie konstrukcji urządzeń. Jednak niewielu badaczy wykazuje zainteresowanie wykorzystaniem tych zaawansowanych narzędzi do optymalizacji sterowania pracą słonecznych systemów grzewczych [84], [31], [111].

Okazuje się, że dobrze zaprogramowany sterownik słoneczny w połączeniu z obiegową pompą markowego producenta działają na tyle efektywnie, że podejmowanych jest niewiele badań nad nowymi sposobami sterowania w słonecznych systemach grzewczych [69], [115], [148]. Analiza literatury wykazała, że strategia sterowania w słonecznych systemach grzewczych nie zależy w żaden sposób od poziomu zaawansowania technologicznego samego systemu [2], [7], [18], [23], [85].

Proces sterowania pracą solarnego systemu grzewczego realizowany jest przez urządzenie nazywane sterownikiem lub kontrolerem solarnym. Najważniejsze funkcje realizowane przez sterownik solarny przedstawiają się następująco [4], [68], [199]:

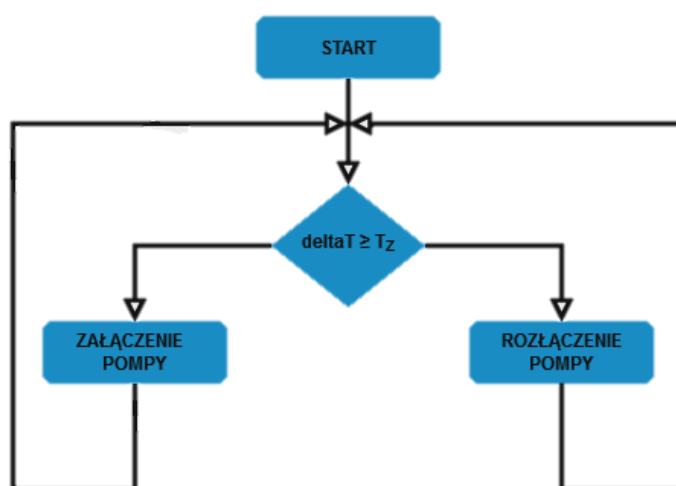
- sterowanie pracą pompy (lub pompy i zaworu),
- nadzór i obsługa instalacji solarnej,
- ochrona kolektora przed przegrzaniem i zamarznięciem,
- możliwość podłączenia dodatkowego urządzenia: pompy obiegowej, grzałki elektrycznej lub podania sygnału do kotła ogrzewania w celu jego rozpalenia.

W literaturze branżowej najczęściej wskazywane są trzy główne koncepcje sterowania w słonecznych systemach grzewczych: sterowanie czasowe, temperaturowe oraz różnicowe [115], [128], [137]. Najprostsze z nich polega na programowaniu parametrów pracy systemu na określone godziny, w których przewiduje się największą dostępność energii słonecznej w ciągu dnia. Jest to przydatne szczególnie gdy wskazać można powtarzalny wzorzec operacji słonecznej lub gdy system grzewczy ma pracować tylko w określonych porach. Nie istnieje w tym wypadku jednak sprzężenie zwrotne, które uzależniałoby działanie systemu od warunków jego pracy.

Na uwzględnienie tych warunków pozwala koncepcja oparta o pomiary temperatur. Polega na monitorowaniu temperatur w określonych punktach systemu (np. kolektory słoneczne, pomieszczenie, otoczenie, zbiorniki) a następnie na aktywacji lub dezaktywacji pompy obiegowej na podstawie tych pomiarów. Prostota, która jest naturalną zaletą takiego podejścia przekłada się jednak również

Metoda różnicowa pozwala z kolei na załączenie grupy pompowej do pracy tylko wtedy, gdy spełniony zostaje warunek logiczny zbudowany w oparciu o różnicę temperatur kolektor - zbiornik magazynowy. Działanie pompy ponownie uzależnione jest więc od warunków pracy systemu, ale tym razem w sposób zdecydowanie bardziej zaawansowany. Dodatkowo gwarantuje to minimalizację pracy pompy w sytuacjach, gdy transfer ciepła nie byłby korzystny z punktu widzenia efektywności energetycznej. Zasadnicza idea pracy takiego sterownika słonecznego może zostać przedstawiona na schemacie ideowym (rys.1.22).

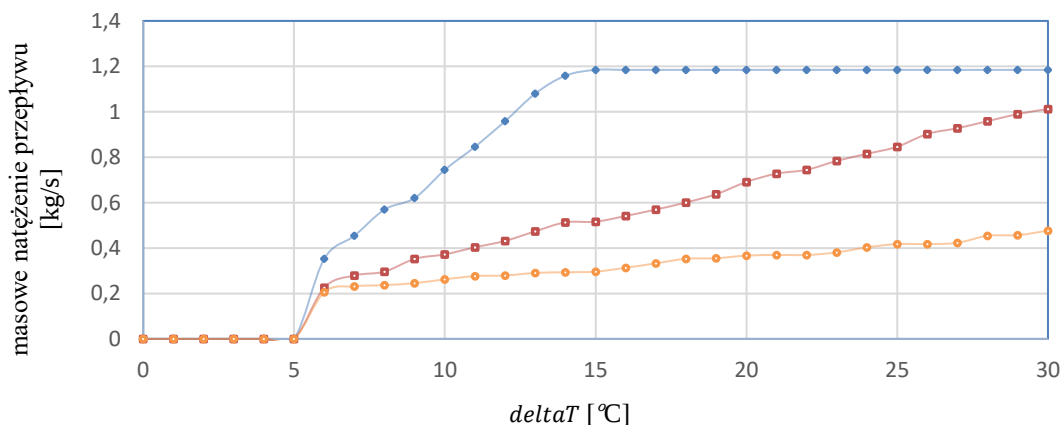
Zgodnie z powyższym schematem, jeśli różnica temperatur pomiędzy kolektorem a zasobnikiem - dalej określana jako ΔT - będzie wyższa lub równa określonej przez projektanta temperaturze załączenia (T_z), to obieg hydrauliczny zostaje uruchomiony w celu odbierania energii cieplnej z powierzchni kolektorów słonecznych i transportowania jej do systemu grzewczego. W przypadku niekorzystnych warunków ($\Delta T < T_z$) obieg czynnika powinien zostać zatrzymany ze względu na możliwe straty energii i wyprowadzanie ciepła z zasobnika. Najpopularniejszym rozwiązaniem komercyjnym stosowanym obecnie w słonecznych systemach grzewczych jest sterowanie proporcjonalne oparte na tej właśnie zasadzie działania [35], [197], [113].



Rys. 1.22. Schemat przedstawiający zasadę działania sterownika słonecznego (opracowanie własne)

Na podstawie zewnętrznych sygnałów o temperaturach czynnika roboczego na kolektorze i zasobniku, obliczana jest różnica ich wartości. Regulator dostosowuje odpowiednio masowe natężenie przepływu do wartość tego parametru, aby utrzymać stałą różnicę temperatur. Najczęściej stosowana procedura nakazuje zwiększanie prędkości, z jaką czynnik roboczy jest tłoczony do układu, proporcjonalnie do różnicy temperatur na kolektorze i w zbiorniku. Niektórzy konstruktorzy zalecają własne charakterystyki oparte na intuicji [6], [8], [39]. Nie są one jednak w związku z tym wynikiem przeprowadzonych badań czy też analiz. Przykładowe zależności wartości masowego natężenia przepływu czynnika roboczego od parametru ΔT dla klasycznego sterownika słonecznego zaprezentowane zostały na rysunku 1.23.

Rozwiązanie takie niesie ze sobą również kilka istotnych wad. Po pierwsze, niemożliwym jest stworzenie uniwersalnej, ogólnej charakterystyki pracy pompy dla wszystkich możliwych konfiguracji systemów grzewczych. Wynika to z faktu, iż ilość parametrów i zmiennych w takich systemach nie jest możliwa do jednoczesnego uwzględnienia. Złożoność oraz nieoczywisty sposób oddziaływania na siebie różnych elementów systemu grzewczego sprawiają, że sterowanie masowym natężeniem przepływu czynnika roboczego w funkcji zmienności jednego parametru może być niewystarczające. Poza tym, sam wybór punktów załączenia i rozłączenia pracy pompy nie może pomijać pełnej specyfikacji sterowanego systemu [82], [114], [118].

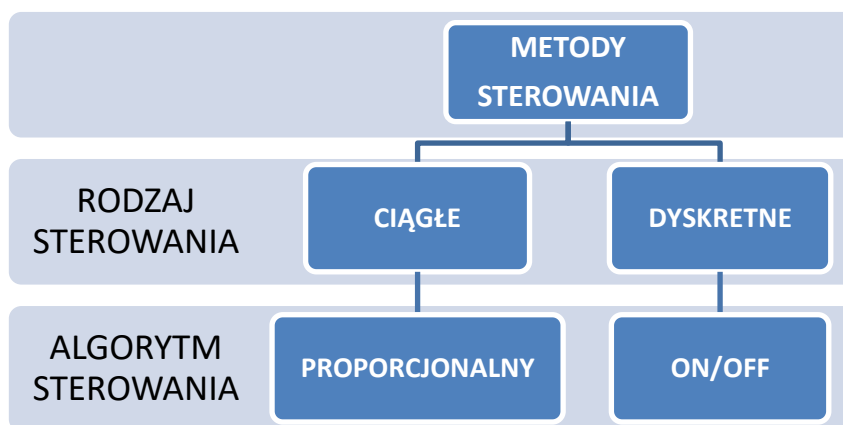


Rys. 1.23. Przykładowe charakterystyki pracy wybranego sterownika solarnego (opracowanie własne)

Drugą powszechnie stosowaną metodą jest tryb sterowania dwustanowego (ON-OFF). Jest to rodzaj sterowania dyskretnego, gdzie sterownik solarny steruje pracą grupy pompowej w sposób dwustanowy, co zaś przekłada się na dwie możliwe sytuacje: generowany jest maksymalny przepływ czynnika roboczego lub też nie jest on generowany wcale. Metoda ta wymaga określenia temperatury, przy której pompa zostaje uruchomiona. Po osiągnięciu tej wartości pompa wymusza obieg czynnika z kolektorów słonecznych do zbiornika ciepłej wody użytkowej z pełną mocą. Taki sposób regulacji powoduje stałe oscylacje i wahania temperatury

na wyjściu systemu grzewczego [68]. Jednym ze sposobów redukcji tych fluktuacji jest obniżenie punktu startu grupy pompowej, ale ma to efekt uboczny w postaci zwiększenia częstotliwości załączania pompy do pracy określanym w literaturze fachowej jako „short cycling” [66], [104]. Długotrwała praca w takim trybie skutkuje skróceniem czasu eksploatacji elementów sterujących i znacznie pogarsza niezawodność i żywotność całego systemu grzewczego [65], [175].

Obie z przedstawionych metod sterowania odnoszą się do koncepcji uzależnienia sposobu pracy pompy od wartości różnicy temperatur kolektor - zasobnik. W kontekście teorii sterowania w ramach każdej z metod zaproponowanych może zostać wiele różnych, bardziej szczegółowych algorytmów. Algorytmy takie wyrażone mogą zostać np. w postaci schematów blokowych lub też zaprezentowanych wcześniej charakterystyk. Podsumowanie informacji na temat najpowszechniejszych metod sterowania w słonecznych systemach grzewczych przedstawiono na rysunku 1.24.



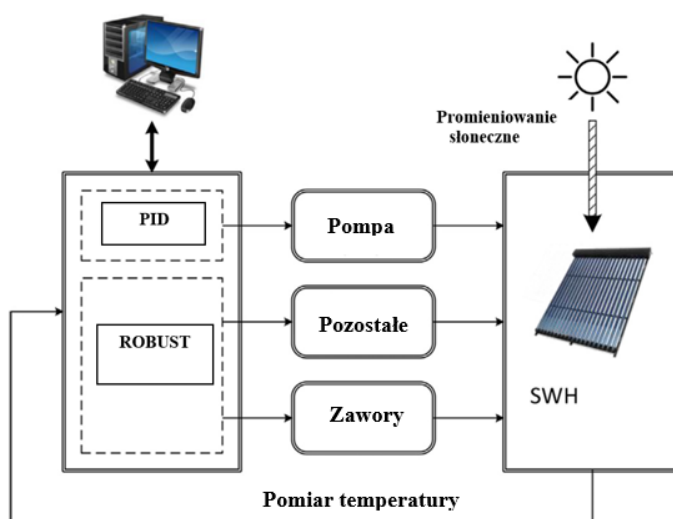
Rys. 1.24. Najpowszechniejsze metody sterowania pracą słonecznych systemów grzewczych (opracowanie własne)

1.5. Główne kierunki prac badawczych dotyczących słonecznych systemów grzewczych

W publikacji [101] przedstawiony został pilotażowy system ogrzewania słonecznego, który obejmował podziemny zbiornik wodny o pojemności 3000 m³. Badania te przeprowadzono w Chinach z wykorzystaniem odpowiednio skalibrowanego modelu słonecznego systemu grzewczego stworzonego w programie Trynsys. Według autorów sam model wykazywał dobrą zgodność między wynikami pomiarowymi a symulacyjnymi. Ocenie poddawano kluczowe wskaźniki wydajności takie jak wydajność zbierania energii słonecznej, stratyfikacja systemu oraz wydajność magazynowania energii oraz egzergii. Jak wykazały wyniki strategie sterowania znacząco wpływały na możliwości gromadzenia ciepła przez odbiornik słoneczny. W przypadku stratyfikacji zachodzącej w zbiorniku wodnym, odnotowano szczególnie duży jej

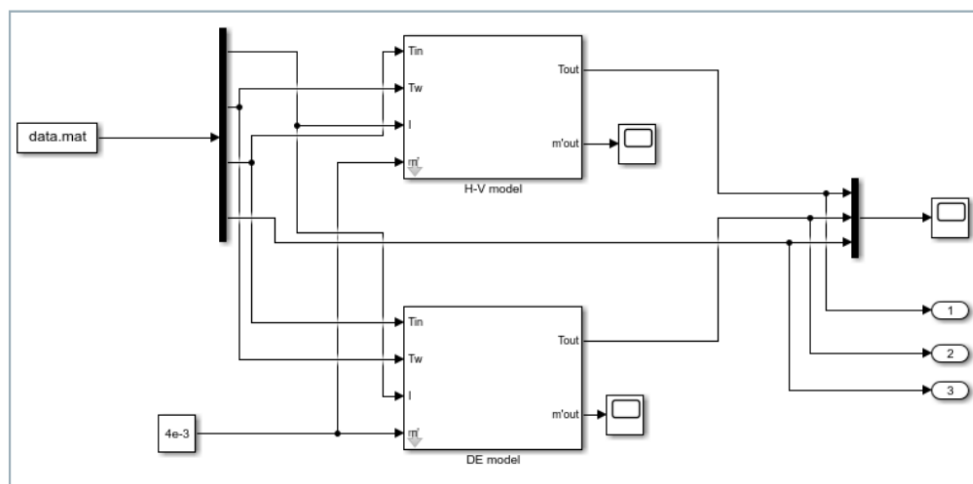
wpływ na wydajność gromadzenia energii pod koniec okresu pozagrzewczego. W ramach prac badawczych przetestowano trzy różne strategie sterowania oparte o kontrolę stałego przepływu, kontrolę stałej różnicy temperatur oraz regulację zmiennie-przepływową. Odnotowano, że sterowanie z wykorzystaniem zmiennego przepływu czynnika roboczego wykazało 10% wzrost wydajności zbierania energii słonecznej w odniesieniu do sterowania różnicą temperatur. Wynik ten podkreśla istotność wyboru odpowiedniej strategii sterowania w kontekście optymalizacji wydajności słonecznego systemu grzewczego.

Kolejnym przykładem prac badawczych prowadzonych w ostatnich latach jest [4]. Badacze wskazali na fakt, iż pomimo intensywnych badań prowadzonych słonecznymi systemami grzewczymi wiele takich prac skupia się na poprawie wyizolowanych składników systemu. Najczęściej wskazywano kolektory słoneczne i płyny robocze. Zauważono jednocześnie, że znacznie mniej badań poświęcono poprawie wydajności systemu grzewczego poprzez zmiany strategii sterowania. W artykule przedstawione zostało porównanie sterowania w czterech różnych konfiguracjach systemów ogrzewania wody mające na celu zbadanie ich wydajności w różnych warunkach promieniowania słonecznego. W celu kontrolowania pracy systemów wykorzystywane były dwa rodzaje sterowania - robust (pętla otwarta) oraz PID (pętla zamknięta). Wyniki pokazały, że systemy ze sterowaniem w pętli zamkniętej zużywały znacznie mniej energii niż systemy otwarte. Jest to potwierdzenie ich wyższej wydajności. Dodatkowo, stwierdzono, że optymalna konfiguracja systemu SWH w istotny sposób zależy od warunków promieniowania słonecznego w danym regionie. Schemat ideowy przeprowadzonych badań przedstawiono na rysunku 1.25.



Rys. 1.25. Schemat przebiegu prac badawczych [4]

W pracy [147] poruszono problematykę modelowania komputerowego słonecznych systemów grzewczych. Autorzy pracy poddali analizie dwa dostępne modele matematyczne kolektorów słonecznych: model H-V (Hottel-Whillier) oraz model DE (Differential Equation). Parametry obu modeli zostały zidentyfikowane w oparciu o pomiary laboratoryjne a następnie wykorzystane podczas prac symulacyjnych realizowanych przy użyciu oprogramowania Sim-Solar (rys.1.26). Okazało się, że największa różnica pomiędzy porównywanymi modelami wynosiła $2,52^{\circ}\text{C}$ na korzyść modelu DE, który uwzględniał większą ilość parametrów. Wyniki obu zostały jednak uznane za zadowalające, ponieważ mieściły się w dopuszczalnym, przyjętym przez badaczy zakresie błędu. Ponadto modele te były testowane również w systemie grzewczym wykorzystującym różne modele magazynów ciepła. W tym ujęciu różnica w dokładności była minimalna $-0,03^{\circ}\text{C}$. Wyniki badań pokazały, że modelowanie komputerowe jest bardzo użytecznym i niezwykle potężnym narzędziem w projektowaniu słonecznych systemów grzewczych. Na podstawie tych wyników stwierdzono również, że mimo wszystko to model H-V jest bardziej odpowiedni do tego typu zastosowań ze względu na swoją prostotę. Autorzy wskazali na potrzebę rozbudowy modeli o moduły uwzględniające aspekt sterowania, które to pozwolą na rozwój dziedziny. W literaturze odnaleźć można wiele podobnych publikacji w tej tematyce [47], [48].



Rys. 1.26. Blokowe modele symulacyjne porównywanych kolektorów słonecznych [147]

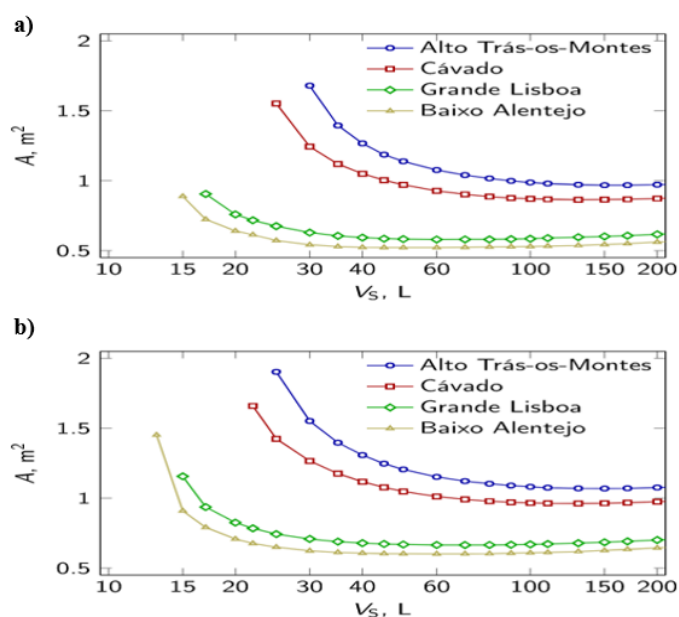
Sterowanie predykcyjne wzbudza w ostatnich latach duże zainteresowanie badaczy koncentrujących się na korzyściach zarówno ekonomicznych jak i ekologicznych. W artykule [133] zaproponowana została nowa strategia MPC (Model-based predictive control) predykcyjnego sterowania pracą słonecznego systemu grzewczego w Drake Landing Solar Community (DLSC) w Okotoks (Alberta, Kanada). Docelowo miała ona umożliwić minimalizację zużycia energii elektrycznej przez pompy, co jak wskazują autorzy jest także krytycznym czynnikiem

w odniesieniu do wpływu pracy takich systemów na środowisko. Prace miały charakter symulacyjny i przeprowadzono je na modelu skalibrowanym na podstawie rzeczywistych pomiarów parametrów instalacji. Koncentrowano się przede wszystkim na optymalizacji prędkości pompy obiegowej, której zadaniem było zarządzanie wymianą energii między krótkoterminowymi oraz długoterminowymi systemami magazynowania energii. Model MPC oparty został o prognozy pogody, które wpływały na działanie systemu z 10-minutowym wyprzedzeniem. Uzyskane wyniki symulacji wykazały, że rocznie zaproponowana strategia pozwoliłaby na 47% spadek całkowitego zużycia energii przez pompy w skali roku. Oszacowano, iż mogłoby się to przełożyć na oszczędności 38% pod względem kosztów oraz 32% pod względem emisji wytwarzanych gazów cieplarnianych w odniesieniu do klasycznych metod sterowania. Autorzy zauważają, że pomimo wielu prób wykorzystania komputerowych modeli słonecznych systemów grzewczych do projektowania i usprawniania takich systemów nie jest to wyczerpujące. Nadal istnieje kluczowa potrzeba wykorzystywania takich narzędzi do tworzenia i testowania bardziej zaawansowanych strategii sterowania w słonecznych systemach grzewczych.

W artykule [170] zaproponowany został nowatorski system sezonowego magazynowania energii słonecznej dla celów grzewczych. Jego działanie oparto o wykorzystanie dwóch magazynów ciepła - krótko oraz długoterminowego. Celem podjętych prac badawczych była poprawa efektywności wykorzystania dostępnej energii słonecznej przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia energii pierwotnej dla budynku jednorodzinne. Stworzony został dynamiczny model symulacyjny systemu gromadzenia i magazynowania ciepła w stanach nieustalonych, który wykorzystywany był do gromadzenia wyników. Autorzy zaproponowali strategię sterowania kooperacyjnego polegającą na odpowiednim połączeniu pracy małej pompy ciepła z pomocniczym źródłem ciepła wkomponowanym pomiędzy zasobniki a stronę odbioru. Przeprowadzono również optymalizację doboru parametrów modelu symulacyjnego. Wyniki badań wskazują, że sezonowy system magazynowania energii (STES) w połączeniu z pompą ciepła poprawia wydajność magazynowania. Średni wynik uzyskany dla takiej aplikacji był wyższy o 5,8% w aspekcie wydajności. Według autorów pracy pozwoliło to na zagwarantowanie 91,7% przewidywanego obciążenia grzewczego w badanym systemie oraz dodatkowo skutkowało redukcją emisji dwutlenku węgla w porównaniu do konwencjonalnego systemu zasilania. Wyniki te wskazują, na teoretyczną możliwość wykorzystania modeli symulacyjnych w celach poprawy efektywności pracy słonecznych systemów grzewczych. Podobne wyniki uzyskano w [108] oraz [110].

W 2023 roku w Portugalii podjęto prace badawcze w zakresie optymalizacji parametrów pracy słonecznych systemów grzewczych, których wyniki przedstawione zostały w [9].

Skoncentrowano się na wpływie kilku parametrów systemu takich jak: powierzchnia kolektora słonecznego, typ kolektora czy pojemność zasobnika wpływają na wydajność i efektywność systemu grzewczego. Działania optymalizacyjne koncentrowały się na osiągnięciu ustalonej rocznej frakcji słonecznej. Wyrażano za jej pomocą jak duża część zapotrzebowania na ogrzewanie wody mogła zostać zaspokojona z wykorzystaniem energii słonecznej. Wartościowym spostrzeżeniem autorów pracy jest to, że optymalna powierzchnia kolektorów słonecznych jest zazwyczaj większa w przypadku konstrukcji z podwójnymi szybami od tych z szybą pojedynczą. Zaproponowano jednak jednocześnie, że konstrukcje z pojedynczym przeszkleniem są zasadniczo lepszym pod względem uzyskiwanej wydajności wyborem w warunkach niższych frakcji słonecznych oraz cieplejszych warunków klimatycznych np. właśnie Portugalia. Dzieje się tak ze względu na lepszy stosunek kosztów do uzyskiwanych korzyści oraz przez specyficzne warunki klimatyczne, które sprzyjają mniej intensywnym metodom gromadzenia energii słonecznej. Wyniki tych badań ujawniły również nieliniową zależność między powierzchnią kolektora słonecznego w systemie a potrzebną objętością zasobnika magazynującego. Dla niewielkich wzrostów apertury kolektora odnotowano drastyczne zmniejszenie zapotrzebowania na objętość magazynowania. Wskazuje to na pewien kompromis i potrzebę wyważenia obu tych kluczowych zarówno dla funkcjonalności jak i kosztów ekonomicznych parametrów pracy słonecznego systemu grzewczego. Zmienność wymaganych powierzchni kolektorów słonecznych w funkcji objętości zasobnika dla wybranej frakcji słonecznej i wybranych miejscowości przedstawione zostały na rysunku 1.27.



Rys. 1.27. Zmiany wymaganej powierzchni kolektora słonecznego A w zależności od wybranych objętości V_s dla zadanej frakcji słonecznej $F=0,8$ a) kolektor z pojedynczym przeszkleniem b) kolektor z podwójnym przeszkleniem [5]

Analizując przedstawione przez badaczy dane stwierdzić można, że wraz ze wzrostem docelowego udziału energii słonecznej w mieszance energetycznej, wymagana apertura kolektora oraz pojemność zasobnika muszą znacząco wzrosnąć. Z zebranych danych wynika, że przy zwiększeniu frakcji słonecznej z poziomu 0,5 do poziomu 0,99 wymagany jest 17-krotny wzrost powierzchni kolektora oraz aż 56-krotny wzrost pojemności zasobnika cieplnego. Badanie to dostarcza bardzo wiele cennych informacji, które to mogą być niezwykle istotne na etapie procesu projektowania słonecznych systemów grzewczych. Wyniki są jednak bardzo mocno skorelowane z regionem i charakterystycznym klimatem w jakim przeprowadzono badania. Warto zwrócić uwagę na określone interakcje pomiędzy wybranymi parametrami słonecznego systemu grzewczego, ponieważ ich dokładna analiza jest złożonym i trudnym zadaniem koniecznym w celu osiągnięcia pożądanych wydajności. Badania we wskazanej tematyce prowadzili również autorzy publikacji [63], [78],[79], [88].

Zupełnie innowacyjne podejście do wyzwań stojących przed słonecznymi systemami grzewczymi zaprezentowano w pracy [105]. W przytoczonym artykule zaproponowano uzupełniający, multienergetyczny system ogrzewania słonecznego sterowany z wykorzystywaniem regulatora rozmytego fuzzy logic. Wykorzystuje on kilka różnych źródeł energii co ma pozwolić na rozwiązanie problemu niewystarczającej mocy grzewczej w systemie kolektorów słonecznych i gruntowych pomp ciepła oraz powszechnego problemu wysokiego zużycia energii spowodowanego tradycyjnymi metodami sterowania. Autorzy przeanalizowali cykl pracy całego systemu grzewczego budynku szklarni w Pekinie i opracowali rozmyty model sterowania pracą tego systemu. Symulacje przeprowadzone zostały w środowiskach Trynsys oraz Matlab a ich wyniki odniesiono do wcześniejszych badań eksperymentalnych. Okazało się, sterowanie rozmyte pozwoliło na efektywne sterowanie przepływem czynnika roboczego, optymalizację wydajności systemu oraz jego ostatecznej efektywności energetycznej. Wykazana poprawa współczynnika wydajności wyniosła około 10% przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia energii o 199,88 kWh w okresie pięciu dni. Integracja dodatkowego źródła energii jakim było np. ogrzewanie gazowe, przyczyniło się do rozwiązania problemu krótkoterminowych spadków wydajności w systemie pompy ciepła ze źródłem gruntowym. Autorzy zauważają i opisują również trudności w możliwościach wykorzystania takiego podejścia w konwencjonalnych instalacjach ze względu na duży poziom zaawansowania technicznego i skomplikowania samego rozwiązania. Omówione studium przypadku pokazuje jak duży potencjał odnaleźć można w wykorzystaniu zaawansowanych metod i teorii sterowania w celu osiągnięcia wyższej wydajności, długoterminowej stabilności pracy oraz oszczędności ekonomicznych w dziedzinie

słonecznych systemów grzewczych. Do podobnych wniosków doszli autorzy publikacji [170], [171] oraz [172].

W artykule [145] autorzy podają, że wpływ strategii sterowania pracą słonecznego systemu grzewczego na jego efektywność energetyczną mieści się zazwyczaj w zakresie od 8 do 18%. Dlatego też wiele prac badawczych skupia się na optymalizacji zużycia energii przez pompy i obniżania kosztów funkcjonowania takich systemów. Badacze wskazują, że wciąż brakuje jednak spójnej analizy optymalizacji procesu dopasowania popytu i podaży uwzględniającej samych użytkowników takich systemów. W artykule opisano ilościowy sposób opisu strony popytowej oraz podażowej, który pozwala porównywać ze sobą oba te profile. Umożliwiło to określenie metod i procesów regulacji dopasowania strony podażowej do strony popytowej, które zostały przetestowane. Przeprowadzono kompleksowe studium przypadku wynikiem, którego były następujące wnioski:

- ilościowa metoda opisu stron podażowej i popytowej w systemach SHW pozwala na szybką ocenę dopasowania pomiędzy oboma profilami,
- zaproponowano pięć skutecznych metod regulacji profili popyt/podaż,
- opracowano i zweryfikowano symulacyjnie uproszczone metody szacowania, które pozwalały na szybką ocenę każdej z metod regulacji.

Ostatecznie poprzez zastosowanie wskazanych metod regulacji roczne wykorzystanie EPS dostosowane do określonych potrzeb wyniosło 78,8% co było wartością aż o 9,6% wyższą od standardowego systemu. Wskazano dzięki temu, iż uwzględnienie omawianych czynników pozwala na rzeczywiste polepszenie efektywności energetycznej słonecznych systemów grzewczych.

Bardzo powszechnym kierunkiem badań w ostatnich latach jest również łączenie zalet systemów SHW z innymi systemami energetycznymi np. PV [27], [158]. Takie podejście pozwala nie tylko na zwiększenie efektywności energetycznej systemu, ale przede wszystkim na poprawę jego niezawodności w różnych warunkach pracy. Badania techniczno-ekonomiczne takiego hybrydowego systemu grzewczego zaprezentowano w [33]. W publikacji przebadano dwa systemy łączący w sobie oba te elementy. Badania dwóch systemów ciepłej wody użytkowej przeprowadzono z wykorzystaniem paneli PVT. Wykazano, że wykorzystanie hybrydowej konstrukcji fotowoltaicznej ma bardzo duży potencjał do rozwoju. W wynikach prac badawczych odnotowano, że wykorzystanie takich systemów pozwoliło na zaspokojenie potrzeb na ciepłą wodę użytkową w okresie maj - październik, co oznacza znaczne wydłużenie tego czasu względem zwykłych rozwiązań.

1.6. Wnioski z analizy literatury

W ramach określenia dotychczasowego stanu wiedzy, przeanalizowano ponad 200 pozycji literaturowych. Były to przede wszystkim artykuły naukowe i podręczniki akademickie, ale również dokumenty takie jak raporty rządowe, poradniki dla instalatorów, instrukcje eksploatacyjne urządzeń oraz branżowe strony internetowe. Na etapie wyboru materiałów źródłowych, duży nacisk położono na aspekt aktualności rozpatrywanych informacji stąd też znacząca część cytowanych źródeł pochodzi z przełomu ostatnich kilku lat. Większość zasobów to materiały opublikowane w języku angielskim. Na podstawie zebranych informacji określone zostały najważniejsze wnioski z przeglądu literatury:

1. Zgodnie z ustaleniami, państwa członkowskie UE muszą dążyć do równowagi pomiędzy emisją gazów cieplarnianych a wspieraniem środowiska naturalnego.
2. Wybór odpowiedniej strategii sterowania w słonecznych systemach grzewczych ma istotny wpływ na funkcjonowanie takiego systemu.
3. Opisanie zależności pomiędzy sposobem sterowania w słonecznych systemach grzewczych a stopniem zaawansowania technicznego systemu stanowi duże wyzwanie.
4. Brakuje informacji, które pozwoliłyby na określenie zależności pomiędzy parametrami technicznymi i warunkami eksploatacyjnymi a strategią sterowania w słonecznych systemach grzewczych.
5. Wybór właściwej strategii sterowania w słonecznych systemach grzewczych jest złożonym i procesem ze względu na liczbę czynników wpływających w różnicowanym stopniu na słoneczny system grzewczy.
6. Producenci słonecznych systemów grzewczych najczęściej proponują nowe rozwiązania w zakresie absorberów i ich powłok selektywnych, materiałów izolacji kolektorów, ulepszonych szyb lub zupełnie nowe konstrukcje kolektorów słonecznych. Rzadko pojawiają się zmiany, ulepszenia czy propozycje nowych rozwiązań w zakresie sterowania instalacjami słonecznymi.
7. Zaproponowane zostały zaawansowane strategie sterowania dla wybranych systemów słonecznych przeznaczonych do produkcji ciepłej wody użytkowej.
8. Zaproponowano szereg użytecznych modeli numerycznych z zakresu słonecznych systemów grzewczych. Prace na ten temat wskazują jednak, iż wykorzystanie tak zaawansowanych narzędzi i metod do tworzenia wysokoefektywnych algorytmów sterowania, nadal pozostaje niekompletne.
9. Istnieje problem oceny warunków otoczenia oraz opracowania sposobu porównywania różnych strategii sterowania w słonecznych systemach grzewczych.

10. Oczekiwane są metody dotyczące modyfikacji strategii sterowania w słonecznych systemach grzewczych, których zastosowanie wpłynie na polepszenie efektywności energetycznej bez istotnej zmiany pierwotnych parametrów i kosztów produkcji takich systemów.

1.7. Podsumowanie

Celem rozdziału był przegląd dotychczasowego stanu wiedzy obejmującego zakres zagadnienia związane z tematyką OZE. Rozpoczyna go opis natury fali elektromagnetycznej jako nośnika energii, następnie przeprowadzona została analiza charakterystyki promieniowania słonecznego wraz z omówieniem najważniejszych pojęć z tego zakresu. Przedstawione zostały zagadnienia związane ze sposobami praktycznego wykorzystywania EPS w technice. Kolejna część skupia się na przybliżeniu budowy i rodzajów słonecznych systemów grzewczych ze szczególnym uwzględnieniem sposobów sterowania wykorzystywanych do kontrolowania pracy takich systemów. W podrozdziale 1.4 omówiono najważniejsze sposoby oceny efektywności energetycznej słonecznych systemów grzewczych oraz aspekt sterowania pracą słonecznego systemu grzewczego. Następnie przeanalizowane zostały aktualne publikacje naukowe z zakresu tematyki sterowania, projektowania i eksploatacji słonecznych systemów energetycznych. Na 200 pozycji literaturowych składały się artykuły naukowe i podręczniki akademickie, ale również dokumenty takie jak raporty rządowe, poradniki dla instalatorów, instrukcje eksploatacyjne urządzeń oraz branżowe strony internetowe. Rozdział zakończono wypunktowaniem najważniejszych wniosków płynących z analizy literatury przedmiotu, warunków geopolitycznych, raportów klimatycznych oraz prac badawczych prowadzonych w podejmowanej tematyce na przełomie ostatnich kilku lat.

2. CEL, HIPOTEZA I ZAKRES PRACY

2.1. Uzasadnienie podjęcia problemu badawczego

Prace badawcze dotyczące tematyki odnawialnych źródeł energii mieszczą się w obszarach aktualnie wiodących i najszybciej rozwijających się dziedzin nauki. Podejmowane tematy badań mają na celu nie tylko zaproponowanie kolejnych rozwiązań technicznych i technologicznych, ale również udoskonalanie obecnego dobrostanu. Jednym z takich zagadnień jest dobór odpowiedniej strategii sterowania w słonecznych systemach grzewczych. Zaproponowany temat pracy badawczej jest wynikiem połączenia trzech różnych dziedzin jakimi są teoria sterowania, modelowanie komputerowe oraz inżynieria energetyczna. Tak zarysowany obszar łączący w sobie kilka dynamicznie rozwijających się dziedzin nauki i techniki ma ogromnym potencjał naukowy oraz użytkowy. Badania związane z doбором strategii sterowania do warunków eksploatacyjnych słonecznego systemu grzewczego mogą mieć znaczący wpływ na zwiększenie wykorzystania odnawialnych źródeł energii i efektywności energetycznej, co jest niezwykle ważne w kontekście globalnych wyzwań związanych ze zmianami klimatycznymi i ograniczonymi zasobami naturalnymi. To multidyscyplinarne podejście stanowi interesujący i jednocześnie obiecujący kierunek w rozwoju nowoczesnych technologii.

Analiza literatury dotyczącej projektowania i eksploatacji systemów energii odnawialnej pozwoliła na lepsze zrozumienie stanu wiedzy i określenie problematyki zagadnień związanych z doбором strategii sterowania w słonecznych systemach grzewczych. Na jej podstawie określony został cel badawczy:

Celem rozprawy doktorskiej jest określenie zależności pomiędzy wybranymi warunkami eksploatacyjnymi a wyborem metod sterowania słonecznych systemów grzewczych w aspekcie ich efektywności energetycznej.

Oczekuje się, że realizacja tak określonego celu pozwoli na:

1. Zdefiniowanie wpływu wybranych warunków eksploatacyjnych na efektywność energetyczną słonecznych systemów grzewczych.
2. Opracowanie strategii sterowania umożliwiających efektywne pozyskiwanie energii promieniowania słonecznego w zróżnicowanych warunkach eksploatacyjnych słonecznego systemu grzewczego.
3. Sformułowanie wskazań i rekomendacji dla użytkowników oraz projektantów takich systemów, które przyczyniłyby się do ich efektywniejszej eksploatacji.

2.2. Hipoteza badawcza

W oparciu o wnioski płynące z analizy stanu wiedzy oraz wyniki badań wstępnych przeprowadzonych w eksplorowanej tematyce uznano, że istnieje możliwość zwiększenia efektywności pozyskiwania energii słonecznej przez system grzewczy wyposażony w kolektory słoneczne. Jest ona związana z dostosowywaniem strategii sterowania do aktualnych warunków eksploatacyjnych. Przypuszczenie to prowadzi do dalszych implikacji zarówno teoretycznych jak i praktycznych oraz pozwala na sformułowanie hipotezy tej rozprawy w następującym brzmieniu:

Adaptacyjne sterowanie natężeniem przepływu czynnika roboczego w słonecznym systemie grzewczym wyposażonym w czterostanowy klasyfikator warunków atmosferycznych umożliwi, dla analizowanego zbioru dni w okresie letnim, wzrost efektywności energetycznej systemu o 10% - 20%.

2.3. Zakres pracy

Po sformułowaniu hipotezy badawczej określone zostały najważniejsze obszary i tematy, które stały się przedmiotem dalszych badań naukowych. W związku z tym ustalono główne aspekty tematu podejmowane w dysertacji:

- analiza literatury, dotychczas stosowanych rozwiązań oraz aktualnie prowadzonych prac badawczych w tematyce sterowania w słonecznych systemach grzewczych,
- opracowanie metodyki badań porównawczych układów sterowania w słonecznych systemach grzewczych,
- opracowanie modelu procesu transportu energii cieplnej w słonecznych systemach grzewczych,
- analiza zależności strategii sterowania systemów energetycznych od warunków eksploatacyjnych,
- opracowanie wysokoefektywnego adaptacyjnego sterownika słonecznego przeznaczonego do pracy w systemach fototermicznej konwersji EPS.

3. MODELOWANIE MATEMATYCZNE I SYMULACJA KOMPUTEROWA PROCESU TRANSPORTU ENERGII CIEPLNEJ W SŁONECZNYCH SYSTEMACH GRZEW-CZYCH

3.1. Model matematyczny

Jednym z podstawowych aspektów nowoczesnego projektowania i optymalizacji działania już istniejących słonecznych systemów grzewczych jest zagadnienie modelowania komputerowego. Dzięki dynamicznemu rozwojowi technik numerycznych symulacja komputerowa stała się ważnym i użytecznym narzędziem badań naukowych [32]. Zbudowanie odpowiedniego modelu komputerowego jest zadaniem bardzo złożonym. Składa się z szeregu etapów, spośród których te najważniejsze najczęściej pozostają niezmiennie niezależnie od samej dziedziny czy też celu modelowania [28], [94].

Stworzenie poprawnie działającego modelu komputerowego jest procesem iteracyjnym. Wymaga uwzględnienia szeregu czynników zewnętrznych, badania wpływu ich zmian na skuteczność uzyskiwanych wyników oraz stałego udoskonalania parametrów modelu. Bardzo często niezbędnym w procesie modelowania komputerowego okazuje się ujęcie doświadczenia i wiedzy eksperckiej w zakresie poruszanych zagadnień. Tak złożony i wymagający proces przynosi jednak wiele korzyści oferowanych przez metody numeryczne. Przede wszystkim umożliwiają one rozwiązywanie nieliniowych problemów o znacznym stopniu skomplikowania [156], [157]. Warto zauważyć, że często problemy takie nie posiadają wcale lub też żadnych praktycznych rozwiązań analitycznych. Ponadto metody numeryczne wyróżniają się dużą dokładnością wyników uzyskiwaną na skutek zagęszczenia liczby iteracji podczas badań. Badania takie dają dodatkowo możliwość przeprowadzania eksperymentów numerycznych w ściśle określonym i kontrolowanym środowisku, co eliminuje konieczność budowy prototypów. Nie bez znaczenia pozostaje również uniwersalność tych metod, która wpływa na ich szerokie zastosowania w różnych dziedzinach nauk przyrodniczych, społecznych czy ekonomicznych [32], [130], [144], [149].

Warto w tym miejscu jednak wspomnieć również o kilku najistotniejszych problemach jakie napotkać można podczas wykorzystywania metod modelowania komputerowego. Jednym z głównych jest błąd numeryczny, który jest nieodzownym elementem każdej metody komputerowej. Kontrola nad nim wymaga starannej analizy i parametryzacji ustawień własnych modelu. Jeszcze do niedawna, olbrzymim problemem była również wymagana moc obliczeniowa urządzeń do prowadzenia symulacji komputerowych. Złożone i skomplikowane problemy wymagają dużych ilości pamięci operacyjnej oraz mocy procesora. Bezpośrednim następstwem

takiego stanu rzeczy jest również czasochłonność obliczeń. Istnieją grupy problemów badawczych, w których to krótki czas odpowiedzi jest kluczowym czynnikiem, co dyskredytuje rozwiązania iteracyjne. Jakość modelu komputerowego jest silnie skorelowana z jakością danych wejściowych i często to te dane rzutują na niezadowalające wyniki końcowe. Ostatnim ważnym dla niektórych konkretnych zastosowań aspektem jest brak przejrzystości sposobu rozwiązania problemu. Ścieżka rozwiązania i zachowania systemu jest istotnie trudniejsza do prześledzenia niż ma to miejsce w przypadku metod analitycznych [126], [130]. Najważniejszym procesem termofizycznym zachodzącym w słonecznym systemie grzewczym jest podgrzewanie płynu roboczego wewnątrz kolektorów przez promieniowanie słoneczne. Dochodzi w tym przypadku do absorpcji energii do systemu. Jednocześnie obserwowane jest przenikanie ciepła z płynu roboczego w kolektorach słonecznych do otoczenia wynikające ze strat na kolektorze.

Kolejnym ważnym procesem jest przenikanie ciepła pomiędzy płynem a otoczeniem w rurach transportowych łączących baterie kolektorów słonecznych z zasobnikiem wodnym. Następnie dochodzi do przenikania ciepła pomiędzy płynem roboczym a wodą w zasobniku, w tym przypadku rolę wymiennika pełni węzownica umieszczona wewnątrz zbiornika. Ostatnim możliwym procesem transportu energii cieplnej jest przenikanie pomiędzy ciepłą wodą w zasobniku a otoczeniem. W celu umożliwienia przeprowadzenia badań symulacyjnych słonecznego systemu grzewczego, niezbędnym było opisanie każdego z wymienionych procesów fizycznych zależnościami matematycznymi [10], [135], [136].

Przystępując do prac nad modelem fizycznym słonecznego systemu grzewczego koncentrowano się przede wszystkim na aspektach najważniejszych z punktu widzenia użyteczności takiego systemu. Jako kluczowe przyjęte zostały zagadnienia związane z dynamiką obiektu, procesy absorpcji i konwersji energii słonecznej oraz transfer i magazynowanie zgromadzonego ciepła. Bardzo istotne było jednocześnie zapewnienie sprawności i ciągłości domeny obliczeń oraz praktyczność tworzonego modelu. W celu stworzenia w pełni funkcjonalnego opisu zjawiska niezbędne było określenie parametrów pracy systemu oraz opracowanie wstępnych założeń modelowych:

1. Sprawność cieplna modelowanych kolektorów słonecznych określona została na podstawie krzywej wielomianowej drugiego stopnia zadeklarowanej przez producenta [83], [84].
2. Parametry termofizyczne powietrza otaczającego kolektory słoneczne posiadają zbliżone wartości w obrębie baterii kolektorów.

3. Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa procesu transportu energii cieplnej w słonecznych systemach grzewczych

3. Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej stwierdzono, że wpływ parametrów takich jak wilgotność, prędkość wiatru oraz ciśnienie atmosferyczne był pomijalny.
4. Wartości temperatury czynnika roboczego w systemie mieszczą się w zakresie od 5°C do 90°C.
5. Pompa cyrkulacyjna w układzie ma wysoką sprawność - znacząca większość energii elektrycznej pobieranej przez pompę zamieniana jest na przepływ czynnika roboczego.
6. W przewidzianym przez producenta okresie eksploatacyjnym wpływ zużycia elementów systemu na jego wydajność jest pomijalnie mały.
7. Modelowany układ hydrauliczny jest wyposażony w obieg mieszający zasobnika, który zapobiega stratyfikacji czynnika roboczego.
8. Parametry optyczne pokrycia szklanego kolektora na całej powierzchni są takie same.
9. Wysoka wartość modyfikatora kąta padania modelowanych kolektorów pozwala przyjąć założenie, że w dużym zakresie kątów operacji słonecznej kolektor posiada maksymalne parametry pracy.
10. Nie występuje żadna rezystancja termiczna pomiędzy poszczególnymi komponentami układu hydraulicznego.
11. Na całej długości przewodów hydraulicznych występuje szczelna i jednorodna warstwa izolacyjna.
12. Struktura zasobnika wodnego to w głównej mierze objętość czynnika. Stalowy płaszcz stanowi małą część pojemności cieplnej w porównaniu do pojemności cieplnej czynnika.
13. W modelowanym układzie hydraulicznym prędkości czynnika roboczego zawiera się w przedziale od 0 do 0,5 m/s a zmiany prędkości nie są gwałtowne.
14. Zakłada się, że powierzchnia kolektorów słonecznych utrzymywana jest w czystości.
15. W modelowanym układzie hydraulicznym występuje armatura w postaci zaworów jednokierunkowego.
16. Wszystkie połączenia w systemie wykonano w sposób, który zapewnia jego szczelność.

Bazując na opisanych założeniach sformułowane zostały następnie uproszczenia, które wykorzystano podczas procesu tworzenia komputerowego modelu słonecznego systemu grzewczego. Najważniejsze z nich to:

1. Właściwości i parametry termofizyczne czynnika roboczego nie obejmują stanów nasycenia, dwufazowych oraz krzepnięcia.

2. Gęstość oraz pojemność cieplna czynnika roboczego będą funkcjami jego temperatury czynnika roboczego.
3. Przyjęto liniowe współczynniki strat cieplnych zależne od temperatury.
4. Przyjęto uproszczenie, że w systemie nie występuje przepływ wsteczny czynnika roboczego
5. W systemie hydraulicznym nie występuje ubytek masy czynnika roboczego.
6. Wpływ wilgotności, prędkości wiatru oraz ciśnienia atmosferycznego na modelowanie procesów transportu energii cieplnej nie został on uwzględniony w modelu.
7. W zasobniku wodnym nie dochodzi do stratyfikacji, tj., model będzie zakładał jednorodną temperaturę czynnika roboczego w całej jego objętości.
8. Pominęto wpływ osadów i zabrudzeń na powierzchni kolektorów słonecznych.
9. Nie uwzględnia się zjawisk zużycia oraz starzenia systemu w trakcie prowadzenia analiz.
10. Nie występuje rezystancja termiczna pomiędzy węzłami modelu.
11. W modelu pompy cyrkulacyjnej nie uwzględnia się zjawiska rozpraszania energii wynikającego z jej pracy ani zjawiska dogrzewania czynnika w wyniku pracy pompy.
12. Model zasobnika wodnego nie uwzględnia pojemności cieplnej materiału z jakiego wykonany jest zbiornik magazynowy.
13. Przepływ czynnika w układzie hydraulicznym ma charakter laminarny.

Tak przyjęte założenia i uproszczenia modelu fizycznego pozwoliły na opracowanie poszczególnych równań bilansowych dla głównych komponentów słonecznego systemu grzewczego, tj. kolektorów słonecznych, przewodów hydraulicznych, wymiennika ciepła, zasobnika wodnego oraz pompy.

Pierwszym z wykorzystywanych równań było równanie bilansowe masy:

$$\dot{m}_A + \dot{m}_B = 0 \quad (3.1)$$

gdzie:

$\dot{m}_A$ oraz $\dot{m}_B$ - masowe natężenia przepływu czynnika roboczego na wlocie i wylocie modelowanego elementu.

Bilans masy ma kluczowe znaczenie przy projektowaniu oraz procesie optymalizacji słonecznych systemów grzewczych z kilku powodów. Przede wszystkim pozwala on na przeprowadzanie analiz wydajności takich systemów pod kątem np. strat cieplnych lub szybkości przepływu czynnika roboczego. W odniesieniu do efektywności energetycznej analizowanej w

3. Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa procesu transportu energii cieplnej w słonecznych systemach grzewczych

domenie termodynamiki niezbędne jest uwzględnienie drugiego równania bilansowego opisującego przepływ energii w systemie:

$$V_f \frac{d(\rho u)}{dt} = q_A + q_B + q_{sol} \quad (3.2)$$

gdzie:

V_f - objętość czynnika roboczego,

$\frac{d(\rho u)}{dt}$ - zmiana energii wewnętrznej czynnika grzewczego w czasie,

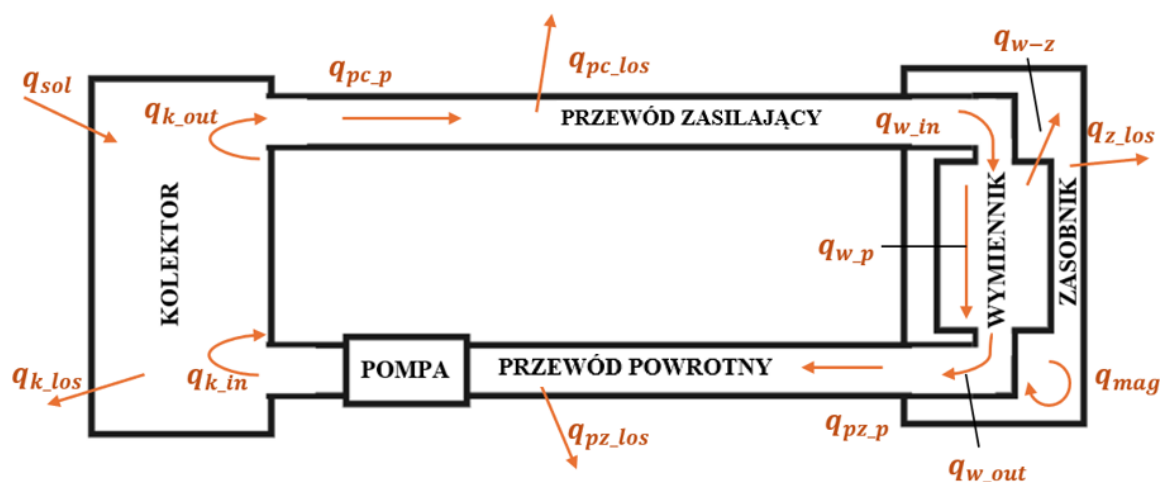
q_A i q_B - całkowite strumienie energii wpływających i wypływających do systemu,

q_{sol} - strumień ciepły dostarczany do systemu bezpośrednio z EPS.

Równanie 3.2 pozwala opisać zmiany energii wewnętrznej w czasie dla określonej objętości czynnika roboczego. Fundamentalna zasada termodynamiki stanowi, że energia w izolowanym układzie musi być stała. Jakikolwiek jej zmiany zawsze wynikają z wymiany energii z otoczeniem. Drugie równanie wykorzystywane jest typowo w kontekście mechaniki płynów oraz analiz przepływu. Może zostać użyte do opisu zasady zachowania energii w wybranym płynie. Pozwala na matematyczne ujęcie skutków przepływu masy na wydajność energetyczną słonecznego systemu grzewczego, która z kolei jest bezpośrednim wskaźnikiem zdolności takiego systemu do efektywnego przetwarzania dostępnej energii promieniowania słonecznego. Powyższe równania są ogólnymi przykładami i mogą być dostosowywane do konkretnych przypadków i systemów grzewczych. Dla bardziej skomplikowanych systemów, takich jak systemy HVAC z wieloma strefami i różnymi źródłami ciepła, równania mogą być bardziej złożone. W praktyce inżynierskiej stosuje się symulacje komputerowe, aby dokładnie modelować zachowanie systemu grzewczego i optymalizować jego działanie.

W słonecznym systemie grzewczym EPS docierająca do powierzchni kolektorów słonecznych (q_{sol}) przekształcana jest na ciepło, które przekazane zostaje do cieczy roboczej w obiegu hydraulicznym – najczęściej mieszanina glikolu propylenowego oraz wody z dodatkiem inhibitora korozji. W przypadku kolektora obserwowany jest strumień strat na powierzchni $q_{k_{los}}$. Uzyskiwany jest przy tym strumień energii cieplnej na wyjściu z kolektora słonecznego $q_{k_{out}}$. Następnie dochodzi do przetłaczania ogrzanej cieczy z kolektorów do wymiennika ($q_{p_{pc}}$) z wykorzystaniem przewodów hydraulicznych. Po drodze dochodzi do strat energii cieplnej związanych z przepływem czynnika roboczego przez przewody oraz inne elementy systemu przesyłowego ($q_{pc_{los}}$). Dostarczona ciecz przepływa przez wymiennik ciepła ($q_{w_{p}}$) oddając swoją energię ($q_{w_{-z}}$) do zasobnika poprzez powierzchnie węzowniczy. Na tym

etapie dochodzi do procesu magazynowania ciepła w wodzie, która wypełnia zasobnik (q_{mag}). Umożliwia to późniejsze rozbiory i użyteczne wykorzystanie zgromadzonej energii. Część energii tracona jest do otoczenia zasobnika (q_{z_los}). Ochłodzony czynnik roboczy za pomocą przewodów hydraulicznych wraca do kolektorów słonecznych przenosząc pozostałe ciepło (q_{pz_p}) oraz tracąc jego część w postaci strumienia strat (q_{pz_los}). Po powrocie zostaje ponownie przetłoczona przez kolektor słoneczny (q_{k_in}) zamykając obieg. Działanie całego systemu kontrolowane jest przez specjalny regulator solarny, którego zadaniem jest dostosowanie parametrów pompy hydraulicznej do optymalnej pracy systemu grzewczego. Uproszczony schemat słonecznego systemu grzewczego z naniesionymi strumieniami energii przedstawiony został na rysunku 3.1.

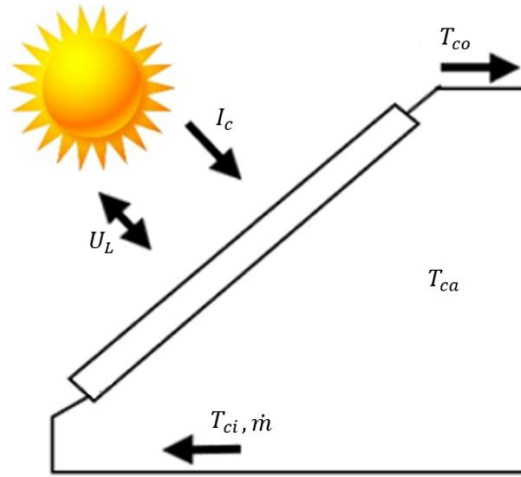


Rys. 3.1. Schemat przepływu strumieni energii w słonecznym systemie grzewczym

3.2. Równanie bilansowe kolektora słonecznego

Podstawowym elementem każdego słonecznego systemu grzewczego jest kolektor słoneczny. Jego główne zadanie niezależnie od typu czy budowy to absorpcja promieniowania słonecznego i przekształcanie go w energię cieplną [40], [41]. Energia ta może następnie zostać wykorzystana do ogrzewania wody użytkowej, wspomagania instalacji centralnego ogrzewania czy też ogrzewania instalacji dodatkowych takich jak baseny.

Do badań wybrano płaski kolektor słoneczny przedstawiony na rysunku 3.2, gdzie T_{ci} to temperatura wejściowa czynnika roboczego, T_{co} to temperatura czynnika wchodzącego z kolektora zaś T_{ca} oznacza temperaturę otoczenia w jakiej pracuje kolektor słoneczny. Podstawowymi parametrami pracy są również powierzchnia apertury (A_c), natężenie promieniowania słonecznego na płytę kolektora (I_c) oraz masowe natężenie przepływu $\dot{m}$ czynnika roboczego w instalacji kolektora słonecznego. Dodatkowo model uwzględnia również współczynnik strat ciepła poprzez powierzchnię kolektora (U_L).



Rys. 3.2. Schemat ideowy kolektora słonecznego

Podstawowe równanie bilansu energetycznego dla kolektora słonecznego może zostać wyrażone wzorem [15]:

$$q_{k,out} = q_{sol} - q_{k,los} + q_{k,in} \quad (3.3)$$

gdzie:

$q_{k,out}$ - strumień energii cieplnej na wyjściu z kolektora,

q_{sol} - strumień energii promieniowania słonecznego docierający do powierzchni kolektora,

$q_{k,in}$ - strumień energii cieplnej na wejściu kolektora,

$q_{k,los}$ - strumień strat ciepłych na kolektorze.

Równanie to umożliwia wyznaczenie mocy kolektora słonecznego na podstawie znanej temperatury średniej czynnika roboczego w kolektorze [176]. Niestety nie zawsze możliwym jest określenie temperatury na wejściu i wyjściu kolektora co ma miejsce również w omawianym przypadku. Problem ten jest bardzo istotny dla poprawnego funkcjonowania modelu komputerowego. Komplikuje on przede wszystkim sam początek symulacji pracy systemu, gdyż Temperatura na wejściu jest stosunkowo łatwa do zmierzenia, natomiast temperatura wyjściowa z kolektora jest efektem przetwarzania energii wewnątrz samego urządzenia, przez co dużo trudniej oszacować jej wartość. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem takiego problemu jest wykorzystanie modelu Hottela-Whilliera-Blissa [16], [37]. Zakłada, że współczynnik transmisyjno-absorpcyjny ($\tau\alpha$) oraz całkowity współczynnik przenikania ciepła (U_L) są stałe na całej płaszczyźnie kolektora. Założenie to jest uzasadnione dla większości dostępnych kolektorów płaskich. Umożliwia to wyliczenie temperatury wyjściowej kolektora słonecznego znając jedynie temperaturę wejścia oraz parametry geometryczne samego kolektora. Pozwala on

również na określenie sprawności cieplnej kolektora w zależności od temperatury zredukowanej (T^*m) dla stanu ustalonego. Zgodnie z założeniami tego modelu strumień energii użytkowej opisany może zostać wzorem:

$$q_{k_out} = F_R (q_k - q_{k_los}) \quad (3.4)$$

gdzie:

q_k - strumień energii promieniowania użytecznego.

Przy czym współczynnik odprowadzania ciepła z kolektora F_R obliczano według wzoru:

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p}{A_p U_L} \left(1 - \exp \frac{-A_p U_L F'}{\dot{m}c_p} \right) \quad (3.5)$$

gdzie:

c_p - ciepło właściwe czynnika roboczego,

$\dot{m}$ - masowe natężenie przepływu czynnika roboczego w instalacji kolektora słonecznego,

A_p - powierzchnia kolektora słonecznego,

U_L - współczynnik strat ciepła poprzez powierzchnię kolektora,

F' - współczynnik efektywności absorbera.

Strumień energii promieniowania użytecznego liczony według wzoru:

$$q_k = q_{sol}(\tau\alpha) \quad (3.6)$$

Na podstawie [120] i z wykorzystaniem cech geometrycznych obliczona została wartość współczynnika $\tau\alpha$ dla badanego kolektora wynosząca 0,72.

Strumień strat na powierzchni kolektora słonecznego obliczany był ze wzoru:

$$q_{k_los} = U_L (T_{ci} - T_{ca}) \quad (3.7)$$

Strumień energii promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni kolektora wyraża się równaniem:

$$q_{sol} = I_c \eta_c (T^*m). \quad (3.8)$$

gdzie:

$\eta_c(T^*m)$ - sprawność kolektora słonecznego w funkcji zredukowanej temperatury,

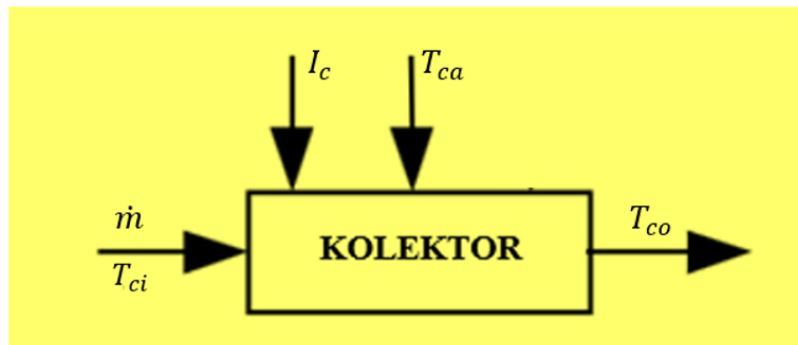
I_c - natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię płyty kolektora.

Zaproponowany sposób opisu stanu układu, po podstawieniu równań (3.6), (3.7) do równania (3.4), umożliwia sformułowanie równania bilansowego dla kolektora słonecznego w funkcji określonych zmiennych [30], [33], [19]:

3. Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa procesu transportu energii cieplnej w słonecznych systemach grzewczych

$$Q_{k_out} = A_c F_R (I_c \eta_c (T^* m) - U_L (T_{ci} - T_{ca})) \quad (3.9)$$

W ten sposób sformułowany model kolektora słonecznego przedstawiony może zostać w postaci uproszczonego schematu ideowego (rys. 3.3) gdzie T_{co} to zmienna wyjściowa, T_{ca} oraz I_c są sygnałami zakłócającymi, zaś masowe natężenie czynnika roboczego ($\dot{m}$) oraz T_{ci} to zmienne wejściowe do modelu. Parametry wejściowe do modelu to A_c , c_p , U_L , $\eta_0(T^* m)$. Typowe wartości dwóch ostatnich parametrów dla różnych typów kolektorów słonecznych zebrano w tabeli 1.



Rys. 3.3. Uproszczony schemat ideowy modelowanego kolektora słonecznego

Wartym podkreślenia jest fakt, że przedstawione podejście do modelowania słonecznego systemu grzewczego pozwala na obliczenie temperatury w określonych węzłach systemu. Przykładowo w temperatura czynnika roboczego opuszczającego kolektor słoneczny może być obliczona z uwzględnieniem wykorzystywanych strumieni zgodnie ze wzorem [17]:

$$T_{co} = T_{ci} + \frac{Q_{k_out}}{\dot{m} c_p} \quad (3.10)$$

Tabela 1. Zestawienie wartości parametrów różnych rodzajów kolektorów słonecznych

Typ kolektora	Zakres temperatur (°C)	η_0	U_L (W/(m ² K))
Nieszkłony	10 – 40	0,90	15 – 25
Pojedynczo oszkłony	10 – 60	0,80	7
Podwójnie oszkłony	10 – 80	0,65	5
Pojedynczo oszkłony, selektywny	10 – 80	0,80	5
Rury próżniowe	10 – 130	0,70	2

3.3. Równania bilansowe przewodów hydraulicznych

Istotnymi elementami słonecznego systemu grzewczego, umożliwiającymi przepływ czynnika roboczego z kolektorów słonecznych do wymiennika ciepła są przewody hydrauliczne. W omawianym systemie wyróżnić można dwa takie przewody: zasilający oraz powrotny.

Równania bilansu energii dla przewodów wyrażone mogą zostać w postaci:

$$q_{w_in} = q_{k_out} - q_{pc_p} - q_{pc_los} \quad (3.11)$$

$$q_{k_in} = q_{w_out} - q_{pz_p} - q_{pz_los} \quad (3.12)$$

gdzie:

q_{w_in} - strumień energii cieplnej na wejściu do wymiennika,

q_{k_in} - strumień energii cieplnej na wejściu do kolektora,

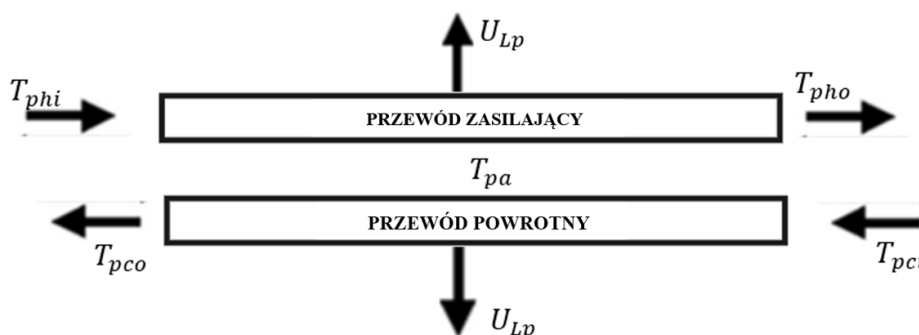
q_{pc_p} - strumień transportu ciepła w przewodzie zasilającym,

q_{pc_los} - strumień strat cieplnych na przewodzie zasilającym,

q_{pz_p} - strumień transportu ciepła w przewodzie powrotnym,

q_{pz_los} - strumień strat cieplnych na przewodzie powrotnym.

Podczas matematycznego modelowania przewodów hydraulicznych przyjęto założenie o jednakowej długości, powierzchni i objętości obu przewodów. Dodatkowo dokonano również uproszczenia polegającego na przyjęciu takiego samego współczynnika strat przez powierzchnię (U_{Lp}). Oba przewody umieszczone zostały w jednakowej temperaturze otoczenia T_{pa} . Do symulacji procesu transportu energii cieplnej wykorzystany został model przewodów przedstawiony na rysunku 3.4.



Rys. 3.4. Schemat ideowy modelowanych przewodów hydraulicznych

3. Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa procesu transportu energii cieplnej w słonecznych systemach grzewczych

Zgodnie z przyjętymi oznaczeniami strumienie transportu energii cieplnej w przewodach zasilającym i powrotnym mogą zostać opisane kolejno wzorami:

$$q_{pc_p} = S_p \cdot l_p \cdot v_f \cdot \rho_f \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3.13)$$

$$q_{pz_p} = S \cdot l_p \cdot v_f \cdot \rho_f \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3.14)$$

gdzie:

S_p - pole powierzchni przekroju przewodu,

l_p - długość przewodu,

v_f - prędkość czynnika roboczego przewodzie,

dT - przyrost temperatury w przewodzie,

dx - przyrost długości przewodu.

Zamierzeniem tworzonego modelu komputerowego było uniknięcie dyskretyzacji przestrzeni oraz wiążących się z tym nakładów obliczeniowych. W związku z powyższym bazując na literaturze [37], [131] różniczka przyrostu temperatury w funkcji zmiany długości przewodu zastąpiona została ilorazem różnicowym w postaci:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_{pho} - T_{phi}}{l} \quad (3.15)$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_{pco} - T_{pci}}{l} \quad (3.16)$$

Temperatury w określonych węzłach systemu obliczane były analogicznie do przykładu z równania 3.10. Z uwzględnieniem faktu, że temperatura wyjściowa jednego węzła systemu jest jednocześnie temperaturą wejściową kolejnego węzła.

Całkowite strumienie strat cieplnych zachodzących na powierzchni przewodów hydraulicznych wyrazić można za pomocą równań:

$$q_{pc_los} = U_{Lp}(T_{avp1} - T_{pa}) \quad (3.17)$$

$$q_{pz_los} = U_{Lp}(T_{avp2} - T_{pa}) \quad (3.18)$$

gdzie:

U_{Lp} - współczynnik strat ciepła poprzez powierzchnię przewodu,

T_{pa} - temperatura otoczenia przewodów hydraulicznych,

$T_{avp\ 1,2}$ - uśrednione temperatury czynnika roboczego w przewodach zgodnie z zależnościami:

$$T_{avp1} = \frac{T_{phi} + T_{pho}}{2} \quad (3.19)$$

$$T_{avp2} = \frac{T_{pci} + T_{pco}}{2} \quad (3.20)$$

Wykorzystując zaproponowany schemat opisu stanu układu i uwzględniając postać równań od 3.11 do 3.20 możliwym było sformułowanie równania bilansowego w odniesieniu do powierzchni przewodów hydraulicznych w funkcji określonych zmiennych:

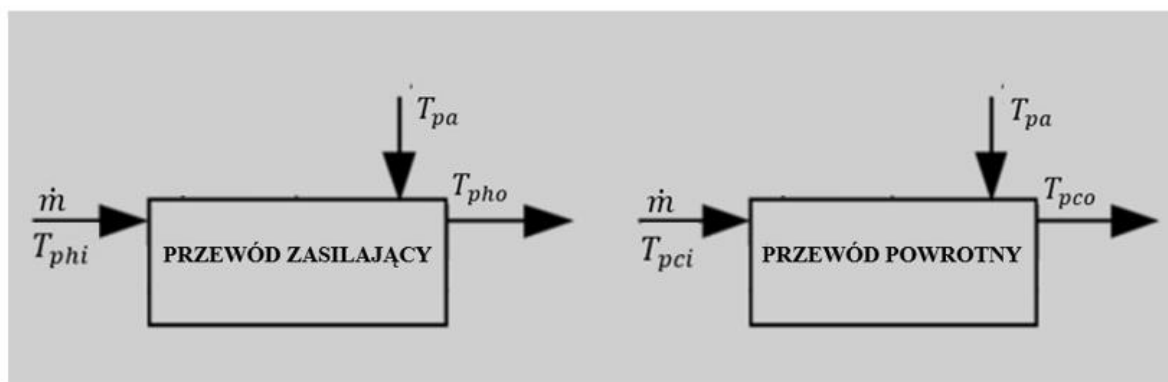
$$Q_{w_in} = Q_{k_out} - S_p \cdot l_p \cdot v_f \cdot \rho_f \cdot c_p \cdot \frac{T_{pho} - T_{phi}}{l} - U_{Lp} A_p (T_{avp1} - T_{pa}) \quad (3.21)$$

$$Q_{k_in} = Q_{w_out} - S_p \cdot l_p \cdot v_f \cdot \rho_f \cdot c_p \cdot \frac{T_{pco} - T_{pci}}{l} - U_{Lp} A_p (T_{avp2} - T_{pa}) \quad (3.22)$$

gdzie:

A_p - pole powierzchni przewodu hydraulicznego,

Sformułowanie matematycznego opisu przewodów transportowych pozwala na ideowe zaprezentowanie ich uproszczonego schematu (rys. 3.5), na którym temperatury T_{pho} , T_{pco} stanowią zmienne wyjściowe, T_{pa} jest sygnałem zakłócającym, T_{phi} , T_{pci} to zmienne wejściowe, zaś zmienna sterowania to $\dot{m}$. Podstawowymi parametrami pracy modelowanych obiektów były A_p , U_{Lp} , c_p .



Rys. 3.5. Uproszczony schemat ideowy modelowanych przewodów grzewczych

3.4. Równanie bilansowe wymiennika ciepła

Kolejnym z modelowanych elementów wchodzących w skład słonecznego systemu grzewczego był wymiennik ciepła. Umieszczony wewnątrz zasobnika magazynującego ma za zadanie transferowanie energii cieplnej zebranej przez kolektory słoneczne do wody użytkowej przechowywanej w samym zasobniku. Model matematyczny musi w związku z tym uwzględniać interakcję jaka zachodzi pomiędzy medium roboczym z wymiennika ciepła a wodą użytkową z zasobnika. Wymienniki mogą składać się z rur lub płyt zapewniających jak największą powierzchnię kontaktu w celu efektywnego przekazywania energii cieplnej, a ich schemat modelowy upraszczany jest często do konstrukcji węzownicy. Uproszczony schemat rurowego wymiennika ciepła zaprezentowano na rysunku 3.6.

Na podstawie przyjętych założeń oraz wynikających z nich uproszczeń określony został bilans energii dla wymiennika ciepła:

$$q_{w_out} = q_{w_in} - q_{w-z} - q_{w_p} \quad (3.23)$$

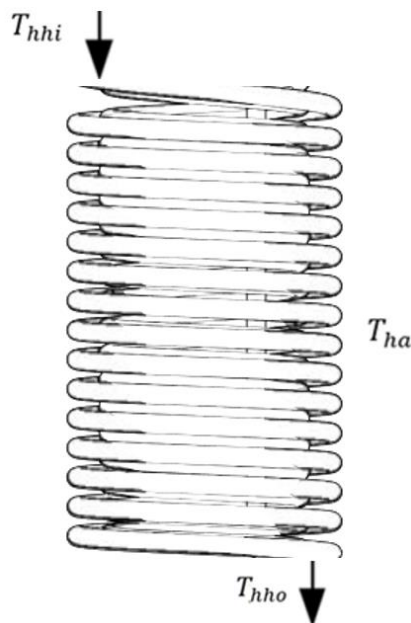
gdzie:

q_{w_out} - strumień energii cieplnej na wyjściu z wymiennika,

q_{w_in} - strumień energii cieplnej na wejściu wymiennika,

q_{w-z} - strumień energii cieplnej oddawanej do zasobnika poprzez powierzchnię wymiennika,

q_{w_p} - strumień transportu ciepła wewnątrz wymiennika.



Rys. 3.6. Schemat modelowanego wymiennika ciepła

Strumień przewodzenia ciepła wewnątrz wymiennika wyrażony może zostać w postaci równania opisującego zmianę temperatury w zależności od przyrostu długości wymiennika:

$$q_{w-p} = S_w \cdot l_w \cdot v_f \cdot \rho_f \cdot c_p \cdot \frac{dT_w}{dx_w} \quad (3.24)$$

gdzie:

S_w - pole powierzchni przekroju wymiennika,

l_w - długość wymiennika,

dT_w - przyrost temperatury w wymienniku,

dx_w - przyrost długości wymiennika.

Podobnie jak w przypadku analogicznego równania dotyczącego przewodów, różniczka przyrostu temperatury w funkcji zmiany długości przewodu zastąpiona została ilorazem różnicowym w postaci:

$$\frac{\Delta T_w}{\Delta x_w} = \frac{T_{hho} - T_{hhi}}{l_w} \quad (3.25)$$

Dla wymiennika ciepła całkowity strumień energii cieplnej generowany z jego powierzchni nie jest interpretowany jako strumień strat, ponieważ jego istnienie nie wpływa na zmniejszenie energii wewnętrznej całego systemu. Opisany może on zostać w następujący sposób:

$$q_{w-z} = U_{Lw}(T_{hav} - T_{ha}) \quad (3.26)$$

gdzie:

U_{Lw} - współczynnik strat ciepła poprzez powierzchnię wymiennika,

T_{ha} - temperatura otoczenia wymiennika będąca jednocześnie temperaturą wody w zasobniku.

T_{hav} - uśredniona temperatura czynnika w wymienniku zgodnie z równaniem:

$$T_{hav} = \frac{T_{hhi} + T_{hho}}{2} \quad (3.27)$$

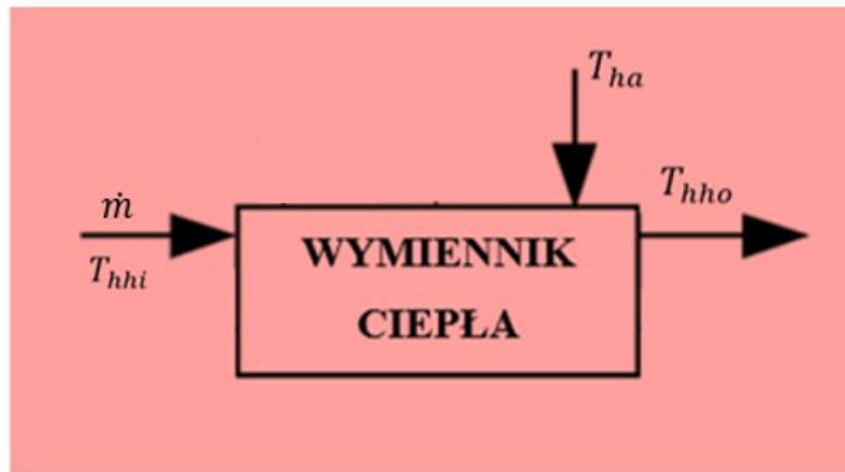
W celu przedstawienia w pełni funkcjonalnego modelu matematycznego, niezbędne było również przyjęcie założenia o całkowitym zmieszaniu płynu wewnątrz wymiennika. Taki stan rzeczy pozwolił na sformułowanie równania bilansu energii uwzględniającego powierzchnię wymiennika cieplnego:

$$Q_{w_out} = Q_{w_in} - U_{Lw}A_w(T_{hav} - T_{ha}) - S_w \cdot l_w \cdot v_f \cdot \rho_f \cdot c_p \cdot \frac{T_{hho} - T_{hhi}}{l_w} \quad (3.28)$$

gdzie:

A_w - pole powierzchni wymiennika ciepła.

Zgodnie z przyjętym założeniem model wymiennika ciepłego przedstawiony zostać może w postaci uproszczonego schematu ideowego (rys. 3.7), gdzie T_{hho} to zmienna wyjściowa układu, T_{ha} to sygnał zakłócający, T_{hhi} to zmienna wyjściowa, zaś zmienna sterowana w systemie to $\dot{m}$. Parametry niezbędne do dokładnego opisanie obiektu to: c_p , U_{Lw} , A_w . Przy czym podawana w m² powierzchnia wymiany ciepła wymiennika to A_w , zaś współczynnik przenikania ciepła dla wymiennika to U_{Lw} .



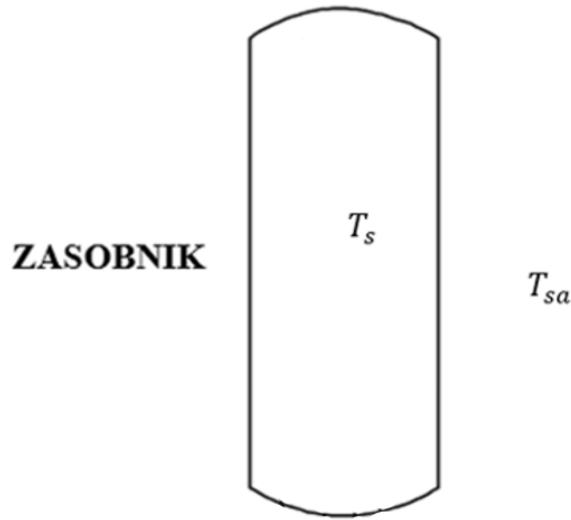
Rys. 3.7. Uproszczony schemat ideowy modelowanego wymiennika ciepła

3.5. Równanie bilansowe zasobnika wodnego

Ostatnim elementem systemu był zasobnik wodny magazynujący energię cieplną. Musiał on współpracować w modelu z wymiennikiem ciepła a do stworzenia jego matematycznej reprezentacji wykorzystany został schemat z rys. 3.8.

Na rysunku 3.8 w uproszczony sposób pokazano parametry pracy zasobnika wodnego. Wewnątrz zbiornika znajduje się pewna objętość wody (V_s) o określonej temperaturze wody T_s . Wszystko to dzieje się w temperaturze otoczenia zasobnika T_{sa} . Dodatkowe parametry to powierzchnia graniczna analizowanego zasobnika (A_s) współczynnik strat ciepła dla zbiornika (U_{Ls}) oraz przywołane już wcześniej $\dot{m}$ czyli masowe natężenie przepływu. Zasobnik jest elementem szczególnym i wyjątkowym w kontekście całego modelu. W jego bilansie znajduje się istotny dla całego procesu gromadzenia energii strumień magazynowania. Założenia modelowe sprawiły, że dotychczas nie występował on w pozostałych elementach systemu grzewczego.

Strumień ten będzie związany z członem czasowym, który umożliwi badanie za pomocą modelu symulacyjnego stanów nieustalonych.



Rys. 3.8. Schemat zasobnika magazynującego

Na podstawie przyjętych oznaczeń sformułowane zostało równanie bilansu energii dla zasobnika wodnego:

$$q_{mag} = q_{w-z} - q_{z_{los}} \quad (3.29)$$

gdzie:

q_{mag} - strumień magazynowania ciepła w zasobniku,

q_{w-z} - strumień energii cieplnej oddawanej do zasobnika poprzez powierzchnię wymiennika,

$q_{z_{los}}$ - strumień strat ciepłych na powierzchni zasobnika.

Strumień magazynowania ciepła wewnątrz zasobnika opisany jest przez zależność:

$$q_{mag} = \rho_s c_s V_s \cdot \frac{dT_s}{dt} \quad (3.30)$$

gdzie:

T_s - temperatura wody w zasobniku,

ρ_s - gęstość wody,

c_s - ciepło właściwe wody,

V_s - objętość zasobnika.

Całkowite strumień strat ciepłych zachodzących poprzez powierzchnię wymiennika został już wcześniej zdefiniowany w równaniu (3.26). Dodać należy jedynie, że w tej części

3. Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa procesu transportu energii cieplnej w słonecznych systemach grzewczych

układu będzie on dostarczał energii cieplnej do wody w zasobniku co oznacza, że w bilansie wystąpi ze znakiem dodatnim [21].

W przypadku określenia strumienia strat zachodzących na powierzchni zasobnika wodnego można posłużyć się równaniem:

$$q_{los_z} = U_{LS}(T_s - T_{sa}) \quad (3.31)$$

gdzie:

U_{LS} - współczynnik strat ciepła poprzez powierzchnię zasobnika,

T_{sa} - temperatura otoczenia zasobnika wodnego,

T_s - temperatura wody w zasobniku.

Po podstawieniu równań (3.26) i (3.31) do równania (3.29) oraz uwzględnieniu pól powierzchni odpowiednich elementów, otrzymano wyrażenie opisujące bilans strumieni energii dla zasobnika wodnego wyrażone w postaci:

$$Q_{mag} = U_{Lw}A_w(T_{hav} - T_{ha}) - U_{LS}A_s(T_s - T_{sa}) \quad (3.32)$$

gdzie:

A_s - pole powierzchni zasobnika.

Sformułowanie takiego równania dla zasobnika wodnego pozwala na przedstawienie jego uproszczonego schematu ideowego (rys. 3.9), na którym sygnał T_{sa} pełni rolę zakłócenia oddziałującego na obiekt. Temperatura T_{hho} , zaś temperatura T_s to wyjściowa zmienna stanu. Pozostałe parametry opisujące zasobnik wodny to A_s , c_s , ρ_s , V_s .



Rys. 3.9. Uproszczony schemat ideowy modelowanego zasobnika wodnego

Model pompy cyrkulacyjnej

W celu realizacji badań wpływu strategii sterowania na efektywność energetyczną słonecznego systemu grzewczego, niezbędne było również zamodelowanie sygnałów sterujących pompą i jej wpływu na działanie całego systemu. Algorytmy wybranych metod sterowania symulowane były jako funkcje matematyczne. Ich charakterystyki ustalone zostały na podstawie kart katalogowych i badań nad dostępnymi w laboratorium sterownikami. Sygnał z tak stworzonego kontrolera docierał do pompy wodnej, która w takich systemach jest używana do wymuszania cyrkulacji czynnika roboczego w obwodzie hydraulicznym. Działanie takiego urządzenia uzależnione jest od metody sterowania i sygnałów z regulatora słonecznego. Był więc to kluczowy element pozwalający połączyć ze sobą model słonecznego systemu grzewczego z modulem, w którym zawarte zostały algorytmy sterowania wybranych metod. Schemat poglądowy przedstawiono na rysunku 3.10.

Zasadniczo pompy cyrkulacyjne w słonecznych systemach grzewczych dzielą się na urządzenia pracujące ze stałą ustaloną prędkością oraz takie, w których prędkość jest regulowana w trakcie działania w zależności od sygnałów sterujących. Dla użyteczności tworzonego modelu zdecydowano się na rozwiązanie umożliwiające dostosowywanie parametrów pracy grupy pompowej do określonych dalej czynników. Zgodnie z kartą katalogową pompy UPM3 firmy Grundfos funkcja charakterystyki pracy urządzenia wyrażona jest wzorem:

$$h = k_1 q^3 + k_2 q^2 + k_3 q + k \quad (3.33)$$

Wzajemne zależności pomiędzy mocą, parametrami przepływowymi oraz prędkością pracy pompy cyrkulacyjnej wyglądają następująco:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N}{N'} \right)^3 \quad (3.34)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N}{N'} \right)^2 \quad (3.35)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N}{N'} \quad (3.36)$$

gdzie:

k_n - współczynniki dopasowania krzywej charakterystyki pompy,

P_n - moc pompy wyrażona w kW,

N - prędkość obrotowa pompy wyrażana w RPM,

H_n - wysokość podnoszenia pompy w m,

$Q_{1,2}$ - natężenie przepływu czynnika w kg/h.

W celu obliczania efektywnej mocy pompy obiegowej wykorzystywano równanie:

$$P_e = \frac{\rho_c g Q H_1}{3,6 \times 10^6} \quad (3.37)$$

gdzie:

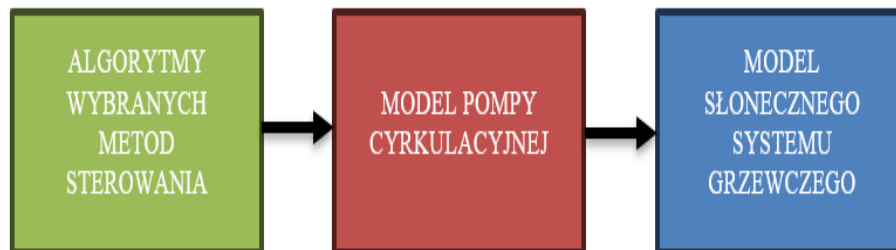
P_e - efektywna moc pompy w kW,

ρ_c - gęstość medium roboczego w kg/m³,

g - przyspieszenie ziemskie w m/s².

Ze względu na wcześniej przyjęte uproszczenia w modelu pompy pominięte zostało równanie rozpraszania energii.

Symulacyjny model pompy cyrkulacyjnej był niezbędnym elementem całego systemu grzewczego. Działanie tej części modelu umożliwiło szczegółową analizę wpływu różnych metod sterowania na efektywność pozyskiwania energii przez słoneczny system grzewczy. Dostosowywanie parametrów pracy pompy realizowane było w oparciu o charakterystyki przebadanych wcześniej komercyjnych regulatorów słonecznych.

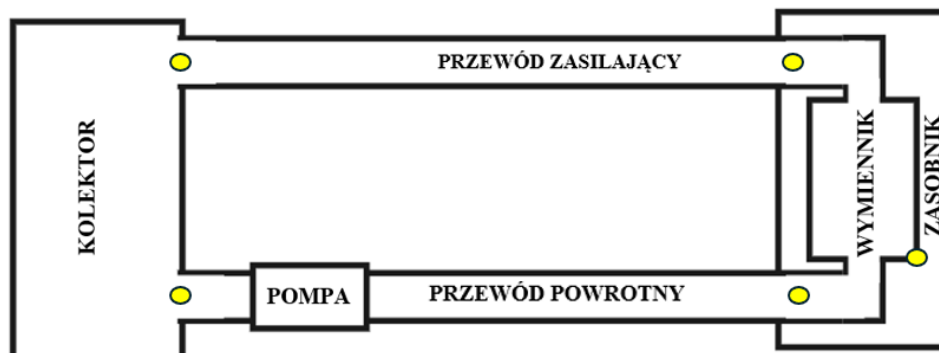


Rys. 3.10. Poglądowy schemat modelu symulacyjnego

Na bazie przedstawionych równań w programie Matlab w wersji R2023b w systemie Windows 10 pro 64 bit z wykorzystaniem narzędzia Simulink oraz modułu Simscape zbudowany został blokowy model symulacyjny słonecznego systemu grzewczego (rys. 3.11).

Wybrane środowisko pozwoliło na przeprowadzanie badań symulacyjnych złożonych systemów hydraulicznych przy wykorzystaniu bibliotek komponentów. Każdy komponent reprezentuje elementy takie jak rury, wymienniki, pompy czy zawory. Z wielu połączonych ze sobą komponentów tworzona jest sieć, w której za pomocą narzędzia Simscape Fluids może być symulowany przepływ płynu zgodnie z połączeniami. Domena płynu opisana może być jednocześnie wieloma wymienionymi wcześniej parametrami oraz zależnościami funkcyjnymi co

pozwała na obliczanie sformułowanych równań bilansowych w całym słonecznym systemie grzewczym.



Rys. 3.11. Struktura modelu systemu grzewczego w programie Simscape z oznaczonymi węzłami

Ostatnim z etapów budowania modelu było ustalenie jego parametrów pracy. Istotą takich działań jest identyfikacja oraz określenie kluczowych i krytycznych dla funkcjonowania symulacji wartości wielkości fizycznych. Zgodnie z literaturą [37], [90], [197] najistotniejszymi parametrami w modelowaniu słonecznego systemu grzewczego były:

- charakterystyki pracy wykorzystywanych kolektorów słonecznych,
- intensywność promieniowania,
- właściwości fizykochemiczne czynnika roboczego,
- straty ciepłne w systemie,
- warunki atmosferyczne,
- pojemność cieplna zasobników.

W celu uruchomienia symulacyjnego modelu słonecznego systemu grzewczego niezbędne było wprowadzenie wszystkich danych opisujących parametry tego systemu. Określone zostały one na podstawie dokumentacji technicznej, kart katalogowych najważniejszych komponentów systemu, syntezy wyników badań empirycznych zawartych w literaturze [90], [20], [30], [3] oraz wyników wcześniejszych prac badawczych przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym [83], [22]. Każdy z parametrów wymagał niezależnej analizy oraz weryfikacji pod kątem spójności z literaturą. Implementacja otrzymanych wartości do modelu pozwoliła na przeprowadzenie badań symulacyjnych w oparciu o wiarygodne i eksperymentalnie wyznaczone dane. Najważniejsze parametry inicjalizacyjne modelu symulacyjnego zebrane zostały w tabeli 2.

3. Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa procesu transportu energii cieplnej w słonecznych systemach grzewczych

Tabela 2. Podstawowe parametry inicjalizacyjne do modelu komputerowego

Kolektory słoneczne		Izolacja	
Powierzchnia apertury kolektorów	4 m ²	Grubość	0,02 m
Sprawność optyczna	0,75	Gęstość masy	24 kg/m ³
Kąt nachylenia kolektorów	45°	Ciepło właściwe	919 J/(kgK)
Współczynnik strat ciepła	7 W/(m ² K)	Przewody hydrauliczne	
a₁ (liniowy)	2,9 W/(m ² K)	Powierzchnia rur	2 m ²
a₂ (kwadratowy)	0,018 W/(m ² K)	Współczynnik strat rur	0,3 W/(m ² K)
Ciepło właściwe czynnika	3380 J/(kgK)	Zasobnik	
Grubość		Wysokość	1,6 m
Pokrycie szklane		Średnica	0,5 m
Grubość	0,002 m	Pojemność	400 l
Gęstość masy	2700 kg/m ³	Parametry pogodowe	
Ciepło właściwe	840 J/(kgK)	Natężenie promieniowania słonecznego	pomiar W/m ²
Płyty		Ciśnienie atm.	pomiar hPa
Grubość	0,002 m	Temp. otoczenia	pomiar °C
Gęstość masy	8900 kg/m ³	Prędkość wiatru	pomiar m/s
Przewodność cieplna	300 W/(mK)	Wilgotność	pomiar %
Sterowanie			
delta załączenia pompy	6°C		
delta rozłączenia pompy	3°C		

3.6. Weryfikacja eksperymentalna modelu symulacyjnego

Niezbędnym krokiem w drodze do stworzenia w pełni funkcjonalnego i przede wszystkim użytecznego modelu symulacyjnego jest weryfikacja poprawności otrzymywanych wyników oraz jego niezawodności. Zaplanowane zostały odpowiednie prace eksperymentalne, których celem było dostarczenie wyników nadających się do porównania z tymi otrzymywanymi z badań numerycznych. W czasie prac polowych szczególną uwagę zwracano na poprawne rejestrowanie parametrów otoczenia w jakich pracował słoneczny system grzewczy. Było to niezwykle ważne ze względu na dalszy zamiar wykorzystania tychże pomiarów jako danych wejściowych do modelu komputerowego. Proces walidacji stworzonego modelu miał pozwolić na dostosowanie (kalibrację) parametrów modelu w sposób taki, aby umożliwiał on jak najwierniejsze odwzorowanie rzeczywistych pomiarów. Docelowo etap ten miał również odpowiedzieć na pytanie czy stworzony model komputerowy może posłużyć jako efektywne narzędzie do prac porównawczych metod sterowania w słonecznych systemach grzewczych.

3.6.1. Stanowisko badawcze

Badania eksperymentalne przeprowadzone zostały na stanowisku badawczym kolektorów słonecznych zlokalizowanym na Politechnice Koszalińskiej. Zostało ono zbudowane w celu pomiarów sprawności cieplnej kolektorów zgodnie z normą ISO 9806:2017 [75]. Prace badawcze prowadzone były w latach 2016 - 2022, a ich głównym celem było dostarczenie danych pomiarowych umożliwiających porównanie różnych metod sterowania w słonecznych systemach grzewczych.

Stanowisko badawcze, którego schemat budowy przedstawiono na rysunku 3.12 składa się z trzech współpracujących ze sobą obiegów hydraulicznych: obiegu głównego wykorzystywanego podczas dnia pomiarowego, obiegu pomocniczego wykorzystywanego do zewnętrznego dogrzewania czynnika roboczego oraz obiegu pomocniczego wykorzystywanego do celów chłodzenia czynnika roboczego.

W skład układu chłodzenia wchodzi przede wszystkim chłodziarka wodna (D) z kompresorem o pojemności zbiornika 80 l oraz mocy chłodniczej 4,1 kW. Przewidziano również możliwość przepompowywania czynnika roboczego przez wymiennik płytkowy wymiennik ciepła (F) poprzez wykorzystanie wbudowanej w chłodziarce pompy rotacyjnej. Dodatkowy obieg do celów dogrzewania czynnika roboczego wyposażony został w kocioł elektryczny (C) o mocy grzewczej 21 kW. Układ taki umożliwia podgrzanie temperatury cieczy roboczej do zamierzonej wartości startowej pożądanej przy rozpoczęciu procedury badań. Ruch czynnika w tym obiegu jest wynikiem pracy wewnętrznej pompy rotacyjnej kotła, która pozwala tłoczyć czynnik roboczy przez wymiennik płytkowy (E). Jest to obieg zamknięty z zabezpieczeniem w postaci zaworu bezpieczeństwa (Z8) 3 bar, dodatkowo wyposażony w naczynie wzbiorcze (NW501) o pojemności 2 dm³.

Obieg główny składa się z dwóch zasobników wodnych (A oraz B) o łącznej pojemności 400 l, we wnętrzu których dochodzi do stabilizowania temperatury czynnika roboczego. Współpracują one bezpośrednio z wymiennikami płytkowymi obiegów chłodzącego (F) oraz ogrzewającego (E). Proces stabilizacji parametrów czynnika roboczego w zasobnikach polega na przetłaczaniu czynnika przez pętle wymienników z wykorzystaniem pomp (P601) oraz (P801). Cyrkulacja czynnika roboczego przez kolektory jest zapewniana przez pompę rotacyjną (P101), która umożliwia tłoczenie cieczy roboczej do magistrali (M0), będącej głównym przewodem zasilającym tory pomiarowe kolektorów. W zależności od stopnia otwarcia odpowiednich zaworów regulacyjnych (ZR301) i (ZR401), ciecz robocza jest kierowana do torów pomiarowych kolektorów, wyposażonych w niezależne przepływomierze (Q301) i (Q401).

3. Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa procesu transportu energii cieplnej w słonecznych systemach grzewczych

Ewentualne nadmiary cieczy roboczej tłoczonej przez pompę (P101) odprowadzane zostają poprzez zawór obejściowy (ZR201) do zasobników, gdzie łączy się je z czynnikiem podawanym procesowi stabilizacji. W układzie głównym czynnika roboczego znajdują się specjalnie zaprojektowane wyprowadzenia, które zostały dostosowane do obsługi zewnętrznej obrotownicy wykorzystywanej do badań terenowych kolektorów słonecznych. Umożliwiają one podłączenie dwóch niezależnych kolektorów do torów pomiarowych w ramach systemu badawczego, z wydzielonymi przepływomierzami (Z404, Z407, Z705, Z707).

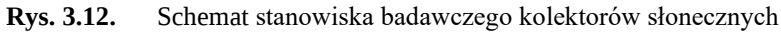
Konstrukcja obrotowej platformy dla baterii kolektorów złożona jest z ruchomej kolumny osadzonej na betonowej podstawie. Do tej kolumny przymocowana jest aluminiowa rama, która pozwala na zamocowanie na niej urządzeń odbiorczych. Mechanizm umocowania ramy na kolumnie pozwala na manualne dostosowanie kąta nachylenia w zakresie od 0 do 90 stopni w stosunku do poziomu. Kolektory słoneczne są łączone z systemem poprzez giętkie przewody wodne oraz przyłącza hydrauliczne z uszczelnieniami typu metal-metal.

W przyłączach zamocowano czujniki temperatury typu PT100 (Tin1, Tin2, Tout1, Tout2) oraz przetworniki ciśnienia typu DMP343 (PI). Czujniki temperatury w przyłączach zostały rozmieszczone tak, aby pomiar temperatury cieczy następował po jej wymieszaniu w specjalnych kolankach mieszających. Wygląd stanowiska badawczego wraz z opisem elementów wchodzących w jego skład zaprezentowany został na rysunku 3.13.

Do pomiarów natężenia promieniowania słonecznego, wykorzystany został czujnik promieniowania całkowitego LP PYRA - 02 (PR1) firmy DeltaOhm (rys. 3.14a). Jest to wysokiej klasy pyranometr termoparowy służący zarówno do pomiaru natężenia bezpośredniego jak i rozproszonego promieniowania docierającego do powierzchni czujnika. Urządzenie wykorzystywane jest zazwyczaj w zaawansowanych badaniach laboratoryjnych. Został on wykonany w sposób umożliwiający spełnienie wymogów stawianych instrumentom pomiarowym wg normy ISO 9060. Sam sensor zamontowany został w bezpośrednim sąsiedztwie baterii kolektorów słonecznych co umożliwiło jeszcze dokładniejsze rejestrowanie rzeczywistych wartości natężenia. Dodatkowo był on chroniony przed negatywnym wpływem innych czynników atmosferycznych takich jak deszcz czy wiatr. Jego stan techniczny w trakcie wieloletnich badań był regularnie sprawdzany i weryfikowany pod względem zbieżności pomiarów. Parametry techniczne czujnika LP PYRA - 02 zaprezentowano w tabeli 3.

Tabela 3. Specyfikacja techniczna pyranometru LP PYRA - 02

Nazwa przetwornika	Zakres pomiarowy W/m^2	Czułość pomiaru $\mu V / W/m^2$	Zakres spektralny nm	Stała czasowa s
LP-PYRA - 02	0 ÷ 2000	±10	305÷2800	<28





Rys. 3.13. Stanowisko badawcze: 1 - stanowisko komputerowe, 2 - elektromagnetyczne przepływomierze z zaworami regulacyjnymi, 3 - skrzynka zasilania elektrycznego stanowiska badawczego, 4 - hydrauliczna pompa obiegowa, 5 - kocioł grzewczy, 6 - układ akwizycji zebranych danych pomiarowych, 7 - dwa zasobniki wodne, 8 - chłodziarka, 9 - wymiennik ciepła obiegu chłodzącego, 10 - pompa obiegu chłodzącego, 11 - wymiennik obiegu grzewczego, 12 - naczynie wzbiornicze, 13 - pompa obiegu grzewczego [83]

Do pomiarów prędkości wiatru użyty został przemysłowy anemometr czasowy firmy Lambrecht (rys. 3.14b) o symbolu 14577 (AN1). Czujnik ten pozwala na pomiar prędkości wiatru w zakresie od 0,7 do 50 m/s. Zasada pomiaru oparta została o wykorzystanie zestawu czujników Hall 'a. Zamontowano go w sposób, który umożliwiał pomiar bezpośrednio na powierzchni apertury kolektorów słonecznych. Specyfikacja techniczna anemometru zawarta została w tabeli 4.

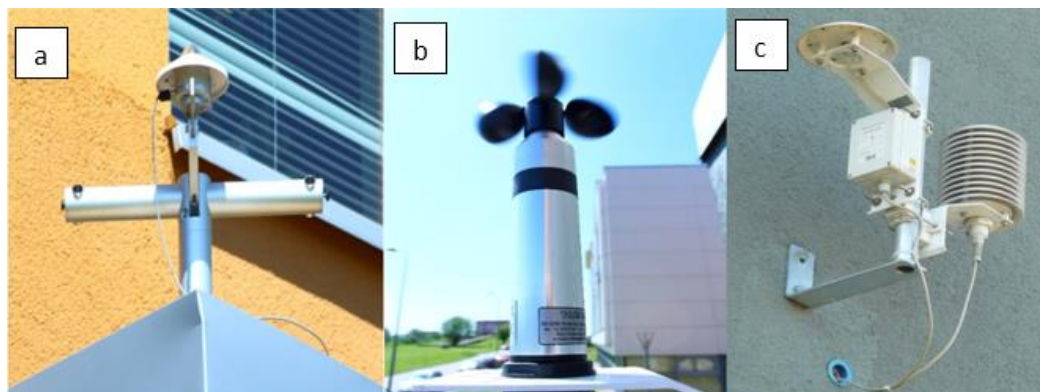
Tabela 4. Specyfikacja techniczna anemometru LAMBRECHT 14577

Nazwa Przetwornika	Zakres pomiarowy m/s	Dokładność pomiaru %	Rozdzielczość pomiaru m/s
LAMBRECHT 14577	0,7 ÷ 50	±0,2	305÷2800

Wilgotność względna otoczenia mierzona była przez przetwornik HD9008TR (rys. 3.14c) produkcji firmy Test-Therm. Jest to urządzenie przeznaczone do wyspecjalizowanych zastosowań meteorologicznych wyposażone w sterownik mikroprocesorowy. Do pomiaru wilgotności wykorzystywany jest kondensator z dielektrykiem wykonanym z polimeru charakteryzujący się właściwościami higroskopijnymi. Taka budowa sprawia, że sygnał wyjściowy czujnika zmienia się proporcjonalnie do zmian wilgotności powietrza.

Tabela 5. Specyfikacja techniczna przetwornika wilgotności HD9008TR

Nazwa przetwornika	Zakres pomiarowy %	Dokładność pomiarowa %	Rozdzielczość pomiarowa %
HD9008TR	5 ÷ 98	±0,1	0,1



Rys. 3.14. Wykorzystywane podczas prac badawczych urządzenia pomiarowe: a - pyranometr, b - anemometr, c - przetwornik wilgotności

3. Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa procesu transportu energii cieplnej w słonecznych systemach grzewczych

Do pomiaru temperatury czynnika roboczego wykorzystane zostały czteroprzewodowe czujniki RTD (tabela 6). Wykorzystanie takiej konfiguracji zapewniło możliwość dwukanałowego pomiaru sygnału, czego skutkiem była wysoka dokładność na poziomie $\pm 0,1^\circ\text{K}$.

Tabela 6. Specyfikacja techniczna czujników temperatury PT100 RTD

Nazwa przetwornik	Karta pomiarowa	Zakres pomiarowy K	Dokładność pomiarowa K	Rozdzielczość pomiarowa K
PT100 RTD	NI 9217	± 120	$\pm 0,1$	0,02

Przed przystąpieniem do prac badawczych każdy instrument pomiarowy został odpowiednio skalibrowany oraz przesterowany w warunkach polowych. Wszystkie wartości pomiarowe z przedstawionych przetworników rejestrowane były z wykorzystaniem kart pomiarowych cDAQ -9174 (MS) oraz oprogramowania LabView. System akwizycji danych składał się dodatkowo z zestawu komputerowego (CPU) służącego do uruchamiania przygotowanej specjalnie na potrzeby badań aplikacji pomiarowej (rys. 3.15). Przygotowana aplikacja pomiarowa pozwalała nie tylko na rejestrowanie danych z obiektu, ale również na ich wstępną analizę w trakcie trwania pomiarów. Pozwoliło to na przyspieszenie procesu obróbki danych pomiarowych.



Rys. 3.15. System akwizycji danych z uruchomioną aplikacją pomiarową

W układzie hydraulicznym zainstalowana została bateria kolektorów słonecznych (rys. 3.16) składająca się z dwóch płaskich kolektorów KSH-2.0 firmy Kospel S.A. Jest to konstrukcja o równoległej budowie kanałów grzewczych, gdzie absorberem jest płyta miedziana. Łączna powierzchnia brutto wynosiła $4,54\text{ m}^2$, zaś powierzchnia absorbera to 4 m^2 . Dokładna specyfikacja kolektora KSH-2.0 podana została w tabeli 7.

Tabela 7. Specyfikacja techniczna kolektora KSH-2.0

Typ kolektora słonecznego:	Płaski - cieczowy
Producent / znak firmowy	KOSPEL S.A. / KSH-2.0
Powierzchnia brutto / apertury / absorbera	2,27 / 1,98 / 2,00 m ²
Długość / szerokość / wysokość kolektora	2,12 / 1,1 / 0,09 m
Masa opróżnionego kolektora	36.5 kg
Konstrukcja absorbera	Układ kanałów równoległych (harfowy)
Metoda łączenia	Zgrzewanie ultradźwiękowe
Ilość kanałów roboczych (pionowych)	9 szt.
Materiał absorbera (kanały / płyta pochłaniająca)	Miedź / Miedź
Wymiary płyty pochłaniającej (wysokość / szerokość / grubość)	985 / 2030 / 0,2 mm
Objętość cieczy	1,13 dm ³
Maksymalne ciśnienie pracy	600 kPa



Rys. 3.16. Bateria kolektorów słonecznych zamontowana na platformie zewnętrznej

Obieg czynnika roboczego w układzie hydraulicznym wymuszany był z wykorzystaniem pompy obiegowej UPM3 firmy Grundfos. Urządzenie to zasilane jest napięciem 230V AC, wyposażone zostało w elektronicznie komutowany wirnik oraz wejście sterowania PWM. Zapewniło to kompatybilność pompy z typowymi regulatorami solarnymi oraz termostatami przemysłowymi.

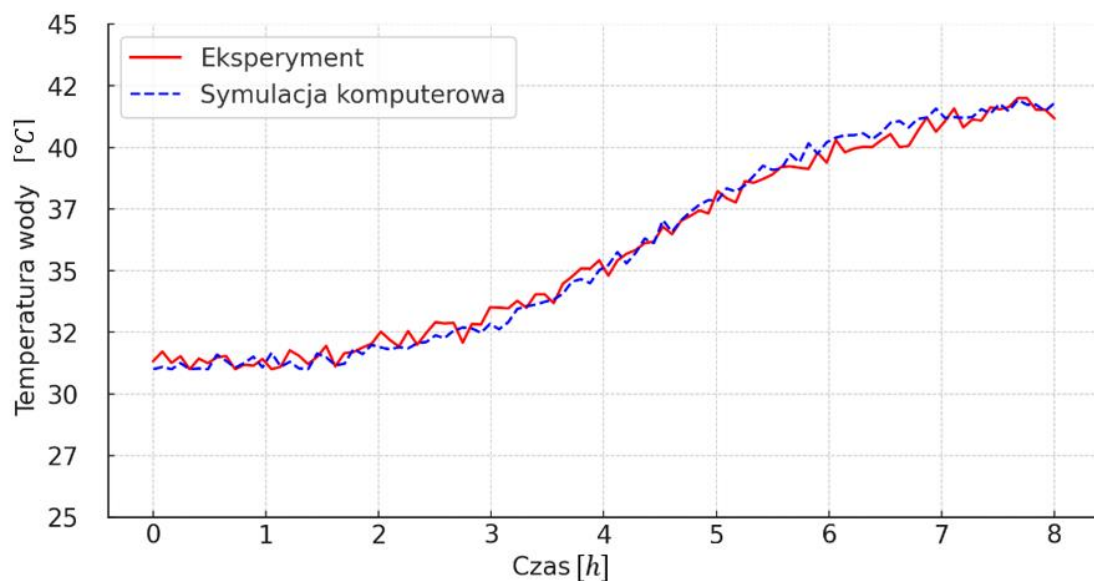
Podczas realizacji badań eksperymentalnych z wykorzystaniem różnych metod sterowania nie stwierdzono żadnych poborów energii cieplnej z układu. Skuteczność badanych algorytmów oceniana była na podstawie temperatury końcowej czynnika roboczego w zasobniku. Po każdym dniu badawczym, zebrane dane pomiarowe podlegały wstępnej ocenie

i archiwizacji. Układ hydrauliczny był zaś schładzany przy pomocy obiegu z chłodziarką. W tym czasie podmieniano również sterowniki solarne. Na czas całego okresu prac badawczych orientacja układu baterii kolektorów słonecznych ustalona została na azymut południowy, zaś kąt nachylenia w odniesieniu do płaszczyzny horyzontu wynosił $\beta = 40^\circ$. Wartości te były kontrolowane przed każdym uruchomieniem pomiarów.

3.6.2. Porównanie wyników symulacji komputerowej z wynikami badań eksperymentalnych

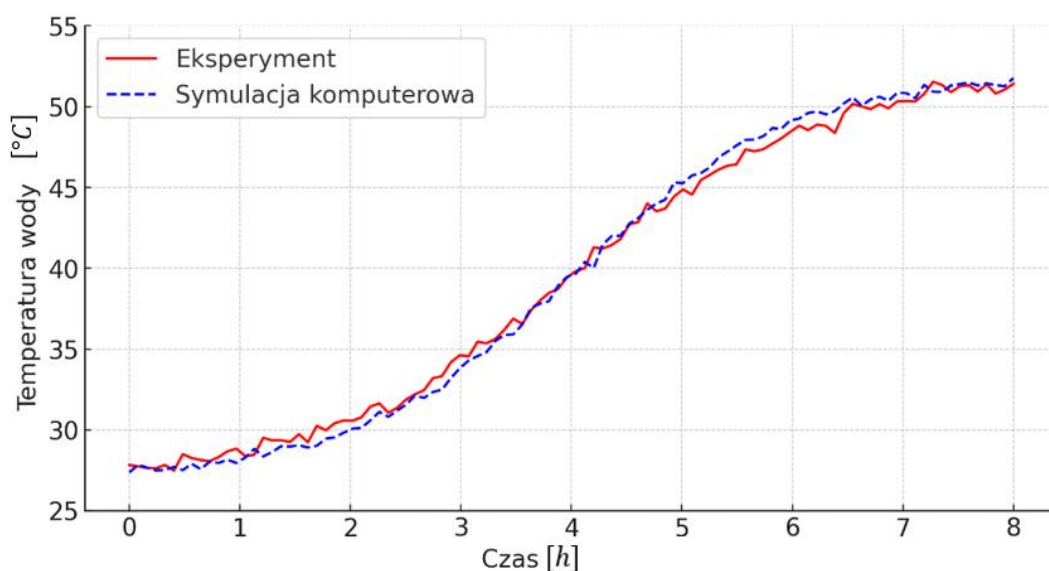
W celu oceny wiarygodności stworzonego modelu komputerowego, niezbędne było poddanie go procesowi walidacji. Polegał on na porównaniu wyników uzyskanych eksperymentalnie w warunkach polowych z tymi otrzymanymi na drodze symulacji komputerowej. Celem takiego porównania była nie tylko ocena użyteczności narzędzia jakim jest model słonecznego systemu grzewczego, ale również poprawienie jakości modelu na drodze iteracyjnego dostosowywania odpowiednich parametrów.

W poprzednich podrozdziałach zaprezentowane zostały najważniejsze założenia i właściwości modelu komputerowego oraz przedstawione zostało stanowisko badawcze wraz z procedurami badań eksperymentalnych. Pozwala to na lepsze zrozumienie obu technik i ich wzajemnych relacji. Zebrane dane porównywane były ze sobą pod kątem dokładności, powtarzalności wyników oraz możliwych przyczyn ewentualnych odchyłeń. Przeprowadzono testy porównawcze dla 30 różnych dni i warunków pracy słonecznego układu grzewczego. Wyniki porównania dla dwóch przykładowych dni przedstawiono na rysunku 3.17 oraz rysunku 3.18.



Rys. 3.17. Porównanie wyników eksperymentu z wynikami symulacji dla dnia 22.05.2022

Zaprezentowane wyniki przedstawiają zestawienie zmian temperatury w zasobniku zmierzanej eksperymentalnie w czasie wybranych dni pomiarowych ze zmianami temperatury otrzymanymi dla modelowanego matematycznie słonecznego systemu grzewczego. Dane wykorzystane do przeprowadzenia symulacji, tj. natężenie promieniowania słonecznego, tryb pracy sterownika oraz inne parametry wejściowe były rzeczywistymi pomiarami tych wartości z omawianych dni badawczych. Takie podejście pozwalało na miarodajną walidację stworzonego modelu. Zauważyć należy dużą zbieżność wyników eksperymentalnych z tymi otrzymanymi na drodze symulacji komputerowej. Zarówno eksperyment jak i symulacja wskazują podobne trendy badanego procesu. Temperatura wody w zasobniku w obu przypadkach wzrasta w nieliniowy sposób i osiąga podobne wartości końcowe. Przebiegi te nie są jednak całkowicie identyczne.



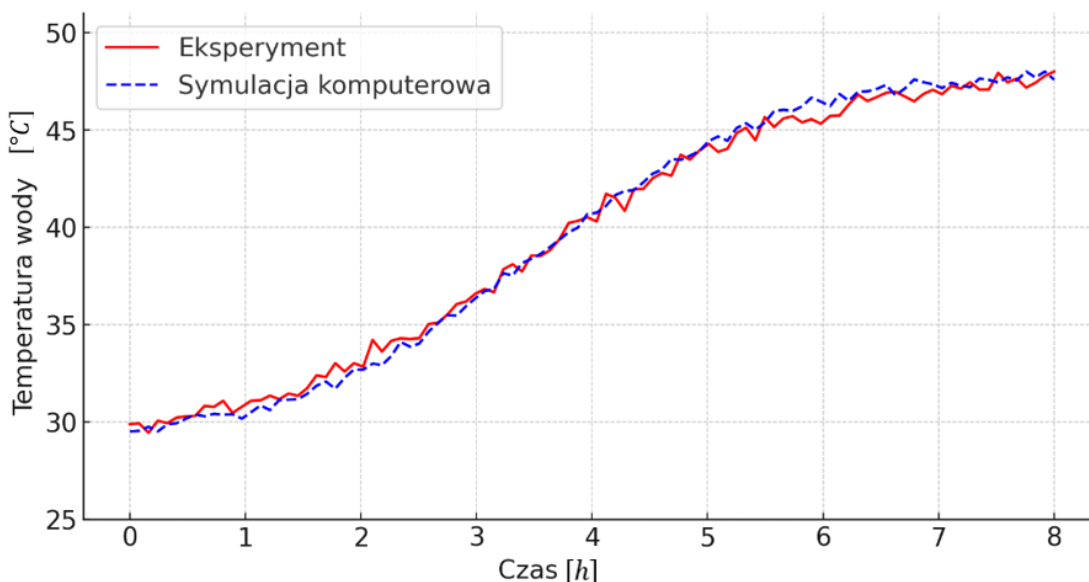
Rys. 3.18. Porównanie wyników eksperymentu z wynikami symulacji dla dnia 8.06.2022

Jako potencjalne przyczyny obserwowanych rozbieżności wymienić można chociażby typowe dla procesu tworzenia modelu matematycznego przyjmowanie pewnych uzasadnionych uproszczeń badanych zjawisk. Pomijanie pewnych mniej istotnych aspektów oraz przyjmowanie przybliżonych wartości, które są nieodzownym elementem tworzenia komputerowych modeli symulacyjnych. Ponadto nie bez znaczenia pozostają również potencjalne przekłamanie wyników eksperymentalnych wynikające z ewentualnych błędów pomiarowych bądź też klasy zastosowanych sensorów. Ostatnim z czynników mającym bezpośrednie przełożenie na rozbieżności pomiędzy modelem a eksperymentem jest brak możliwości opisanie i uwzględnienia wszystkich rzeczywistych zakłóceń mających wpływ na obiekt. Obserwowane dla eksperymentu i większe niż w przypadku symulacji komputerowej wahania temperatury mogą

3. Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa procesu transportu energii cieplnej w słonecznych systemach grzewczych

oznaczać, że na poziomie budowy modelu matematycznego nie uwzględniono wszystkich czynników wpływających na ostateczne rezultaty.

Na rysunku 3.19 zaprezentowano zestawienie uśrednionych wartości wyników eksperymentalnych oraz wyników symulacji dla wszystkich 30 analizowanych dni.



Rys. 3.19. Porównanie uśrednionych wyników eksperymentu i symulacji komputerowej

Wyniki symulacji okazały się zadowalająco zbliżone z wynikami eksperymentalnymi. Uzyskane rezultaty są w pełni zadowalające i świadczą o wysokiej jakości i dużej wartości użytkowej stworzonego modelu komputerowego. Wykorzystanie wskazanych w literaturze parametrów oraz wprowadzane w czasie testowania modelu poprawki pozwoliły uzyskać bardzo dokładne odwzorowanie rzeczywistego procesu nagrzewania wody w zasobniku. Warto podkreślić, że połączenie dwóch podejść jakimi są badania eksperymentalne i symulacje komputerowe, przyczynia się do lepszego i pełniejszego zrozumienia badanego obiektu. Taki stan rzeczy pozwolił na przejście do kolejnego etapu prac badawczych.

3.7. Podsumowanie

W rozdziale trzecim przedstawione zostały zagadnienia związane z modelowaniem komputerowym. Proces ten ma na celu stworzenie matematycznej reprezentacji rzeczywistego obiektu bądź systemu. Omówione zostały etapy tworzenia takiego modelu oraz opisano zasadnicze trudności jakie można napotkać na etapie formułowania poprawnego modelu matematycznego. Następnie uzasadniona została celowość budowy komputerowego odpowiednika słonecznego systemu grzewczego w kontekście prac symulacyjnych nad różnymi metodami sterowania. Określono parametry pracy oraz przedstawiono założenia i uproszczenia modelu

fizycznego. Sformułowane zostały niezbędne równania matematyczne opisujące bilanse strumieni energii cieplnej dla głównych komponentów słonecznego systemu grzewczego: kolektora, wymiennika ciepła, zasobnika oraz przewodów hydraulicznych. Na ich bazie w programie Simscape służącym do kompleksowego modelowania układów hydraulicznych i cieplnych zbudowany został komputerowy model słonecznego systemu grzewczego, który wykorzystywany był w dalszej części badań jako narzędzie pomocnicze.

W dalszej części rozdziału skoncentrowano się na procesie walidacji stworzonego komputerowego modelu symulacyjnego słonecznego systemu grzewczego. Dokładnie opisane zostało stanowisko badawcze kolektorów słonecznych, na którym przeprowadzono badania eksperymentalne. Zlokalizowane było ono na terenie Politechniki Koszalińskiej. Zaprezentowany i omówiony został schemat budowy stanowiska laboratoryjnego oraz przedstawiono najważniejsze urządzenia pomiarowe wraz z ich parametrami pracy. Podczas prac badawczych szczególną uwagę zwrócono na kalibrację przyrządów pomiarowych oraz kontrolę czynników zakłócających. Następnie przeprowadzone zostały badania symulacyjne oraz badania polowe w różnych warunkach i scenariuszach. Wyniki tych badań poddano porównaniu ze sobą. Pozwoliło to na identyfikację i korektę drobnych rozbieżności na linii model - rzeczywistość. Następnie analizowano przebiegi czasowe zmian temperatury wody w zasobniku słonecznego systemu grzewczego. Istotnym wnioskiem z rozdziału jest fakt, że wyniki symulacji komputerowych wykazały zadowalającą zbieżność z wynikami badań eksperymentalnych. Oznacza to, że opracowany model matematyczny jest w stanie dokładnie odwzorować zachowanie systemu w warunkach laboratoryjnych i może posłużyć jako narzędzie do badań porównawczych metod sterowania w słonecznych systemach grzewczych.

4. ANALIZA STATYSTYCZNA

4.1. Materiały i metody

Podstawowym zamierzeniem przeprowadzonej analizy było dokładne zbadanie wpływu zestawu wybranych zmiennych niezależnych takich jak natężenie promieniowania słonecznego, ciśnienie atmosferyczne, temperatura otoczenia, prędkość wiatru oraz wilgotność na temperaturę czynnika w zbiorniku, stanowiącą zmienną zależną w badaniu. Oprócz głównego celu, analiza miała również na celu pomocnicze zadania, które obejmowały:

- określenie rodzaju związku: zbadanie natury powiązań pomiędzy zmiennymi niezależnymi a zmienną zależną, aby zrozumieć, czy były one liniowe, nieliniowe, czy też wykazywały inne specyficzne charakterystyki,
- identyfikacja znaczących predyktorów: wskazanie, które z badanych zmiennych miały największy wpływ na temperaturę w zbiorniku, co miało kluczowe znaczenie dla zrozumienia mechanizmów rządzących procesem oraz dla dalszego modelowania i optymalizacji procesów.

Opracowana analiza miała za zadanie nie tylko wskazać statystycznie istotne zależności, ale również dostarczyć głębszego zrozumienia dynamiki badanego systemu, co może być nieocenione w praktycznym zastosowaniu wyników badania do usprawnienia procesu regulacji temperatury w zbiorniku.

W analizie statystycznej zaadoptowano konwencjonalny próg istotności na poziomie $\alpha = 0,05$, co oznacza, że wyniki z wartością mniejszą niż 0,05 uznane zostały za statystycznie istotne. Charakterystyka rozkładów poszczególnych zmiennych została szczegółowo przedstawiona przy użyciu kluczowych statystyk opisowych, które dostarczają wyczerpujących informacji o zachowaniu danych. Średnia arytmetyczna (M) i odchylenie standardowe (SD) dostarczają informacji o centralnym punkcie danych i ich zmienności. Mediana (Mdn) jest miarą centralnego położenia rozkładu, mniej podatną na wartości skrajne niż średnia. Kwartyłe pierwszy ($Q1$) i trzeci ($Q3$) reprezentowały odpowiednio 25% i 75% wszystkich wartości, oferując wgląd w rozkład danych w obrębie kwartyli. Wartości minimalne (Min) i maksymalne ($Maks$) wyznaczały zakres, w którym zmienne przyjmowały swoje wartości, odzwierciedlając ich ekstremalne obserwacje. Dodatkowo, skośność ($Sk.$) jest miarą asymetrii rozkładu danych wokół średniej, gdzie wartość zerowa wskazywała na symetryczny rozkład. Z kolei kurtoza ($Kurt.$) opisywała stopień „ostrości” szczytu rozkładu - czy jest on bardziej płaski czy szpiczasty w porównaniu z rozkładem normalnym [50], [102].

4.1.1. Analiza korelacji

Szczegółowa analiza związków między zestawem zmiennych przedstawiona zostanie w oparciu o macierz korelacji. Korelacje między parami zmiennych oszacowano przy użyciu rangowego współczynnika korelacji Spearmana, który jest miarą związku monotonicznego i nie wymaga założenia normalności rozkładów. Na głównej przekątnej macierzy przedstawiono histogramy, które pokazują rozkłady poszczególnych zmiennych. Każdy histogram został uzupełniony o krzywą dopasowania, reprezentującą estymowaną gęstość rozkładu danej zmiennej. To połączenie pozwala na natychmiastową ocenę kształtu, skośności i kurtozy rozkładów poszczególnych analizowanych zmiennych. W dolnej części macierzy, poniżej głównej przekątnej, umieszczono wykresy rozrzutu dla każdej pary zmiennych. Każdy wykres rozrzutu jest wyposażony w linię dopasowania, która wizualizuje trend w relacji pomiędzy zmiennymi. Te wykresy pozwalają na bezpośrednią ocenę charakteru zależności - czy są one liniowe czy nieliniowe, oraz czy występują ewentualne wartości odstające [102],[118], [125].

Taka kompleksowa wizualizacja macierzy korelacji umożliwia nie tylko szybką ocenę wzajemnych związków między zmiennymi, ale także dostarcza bogatej informacji o charakterystyce rozkładów tych zmiennych.

W późniejszej analizie zastosowano dodatkowo uogólniony model addytywny (GAM), który jest elastyczną generalizacją tradycyjnych modeli liniowych. GAM pozwalał na modelowanie zależności nieliniowych między zmiennymi zależnymi a niezależnymi za pomocą funkcji wygładzających. Ogólna forma modelu GAM prezentuje się następująco [102], [103]:

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^k s_j(x_{ij}) + \epsilon_i \quad (4.1)$$

gdzie:

y_i - wartość zmiennej zależnej dla i -tej obserwacji,

β_0 - wyraz wolny (stała),

s_j - funkcja wygładzająca dla j -tej zmiennej niezależnej,

x_{ij} , k - liczba zmiennych niezależnych,

ϵ_i - reprezentuje term błędu dla i -tej obserwacji.

4.1.2. Procedura doboru zmiennych do modelu

Proces selekcji zmiennych do modelu opierał się na sekwencyjnej analizie dewiancji. Pierwszym etapem była budowa modelu bazowego bez zmiennych objaśniających, który służył jako punkt odniesienia. Następnie, w każdym kolejnym etapie, do modelu wprowadzano pojedynczą zmienną objaśniającą i oceniano wpływ tej zmiennej na dopasowanie modelu,

porównując dewiancje reszt oraz stopnie swobody reszt z modelem poprzednim. Dla każdej zmiennej dodawanej do modelu, przeprowadzano test chi-kwadrat w celu oceny istotności statystycznej zmiany dewiancji. Jeżeli dodanie zmiennej skutkowało statystycznie istotnym obniżeniem dewiancji, interpretowano to jako uzasadnienie włączenia tej zmiennej do modelu. Kryterium istotności opierało się na p-wartościach testu chi-kwadrat, gdzie niskie wartości wskazują na istotne różnice statystyczne między modelami [107], [118], [119].

Taka metodyka pozwala na systematyczną i uzasadnioną ekspansję modelu, gdzie każda zmienna jest oceniana pod kątem jej wkładu w poprawę dopasowania modelu. Przyjęcie takiego podejścia zapewnia, że model końcowy zawiera jedynie zmienne, które mają statystycznie potwierdzony wpływ na zmienną zależną, co zwiększa interpretowalność i ogólną wartość modelu. Ponadto, procedura ta pomaga w uniknięciu nadmiernego dopasowania (overfitting), które może wystąpić, gdy model zawiera zbyt wiele nieistotnych zmiennych.

4.1.3. Dobór funkcji wygładzających

Funkcje wygładzające s_j są kluczowe dla modelu GAM, umożliwiając elastyczne dopasowanie do danych. W przeprowadzonym modelowaniu, zastosowano różne typy funkcji wygładzających w zależności od charakteru i przewidywanych relacji zmiennych niezależnych. Na przykład, użycie funkcji wygładzającej typu spline, takich jak cubic regression splines ($bs = „cr”$) dla większości zmiennych, Gaussian process ($bs = „gp”$) dla zmiennych, które mogą wykazywać bardziej złożone wzorce nieliniowe, zastosowano również domyślne funkcje splajnu - cienkowarstwowy niskiego rzędu ($bs = „tp”$) [117].

Proces doboru odpowiednich funkcji wygładzających dla poszczególnych zmiennych w modelu GAM został przeprowadzony eksploracyjnie. W celu umożliwienia oceny dopasowania modelu do danych, eksperymentowano z różnymi typami funkcji wygładzających dla każdej zmiennej objaśniającej. W tym celu, dla każdej potencjalnej funkcji, estymowano model i obliczano kluczowe parametry dopasowania, takie jak skorygowany współczynnik determinacji ($R2adj$) oraz poziom wyjaśnionej dewiancji. Skorygowany współczynnik determinacji, uwzględniał liczbę zmiennych w modelu oraz wielkość próby, dostarczając bardziej zrównoważoną miarę dopasowania dla modeli z różną liczbą predyktorów. Poziom wyjaśnionej dewiancji pozwalała z kolei ocenić, jaki procent zmienności zmiennej zależnej jest wyjaśniany przez model. Wyższe wartości obu metryk sugerowały lepsze dopasowanie modelu do danych [165], [167].

Podczas eksploracji, wybierano taką funkcję wygładzającą dla każdej zmiennej, która maksymalizowała wartości tych parametrów dopasowania. W ten sposób, podejmowano

decyzję o najlepszej formie funkcji wygładzającej na podstawie empirycznych dowodów na jej efektywność w modelowaniu związku między zmienną zależną a niezależną. W celu zinterpretowania dopasowanego modelu GAM, przeanalizowano różne statystyki i parametry, które opisywały jego jakość dopasowania w całości jak i w przypadku poszczególnych zmiennych.

Skorygowany współczynnik determinacji $R2adj$ jest statystyką opisującą, jaki procent zmienności zmiennej zależnej został wyjaśniony przez model, po uwzględnieniu liczby predyktorów w modelu. Im wyższa wartość $R2adj$, tym lepiej model był dopasowywany do danych.

Poziom wyjaśnionej wariancji to miara opisująca procent wariancji, który został wyjaśniony przez model. W przypadku modeli GAM, zazwyczaj stosuje się właśnie tej statystyki, ponieważ one lepiej niż $R2adj$ odzwierciedla dopasowanie w przypadku nieliniowych i niestandardowych rozkładów danych.

Uogólniony wynik weryfikacji krzyżowej (GCV) jest metodą oceny jakości dopasowania modelu, która stara się zrównoważyć dopasowanie modelu do danych z jego złożonością. Im niższa wartość GCV, tym lepiej, ponieważ sugeruje, że model ma dobrą zdolność do przewidywania nowych danych przy jednoczesnym unikaniu nadmiernego dopasowania. Szacowany parametr skali dla rodziny dwumianowej (ESB) jest estymatorem skali dla rodziny dwumianowej, który może być używany do oceny jakości dopasowania w przypadku, gdy używamy rodziny dwumianowej. Odpowiednik dla rodziny Gamma nie zostanie zazwyczaj określony jako ESB, lecz jako parametr skali dla tej rodziny.

Efektywne stopnie swobody (edf) dla każdego terminu wygładzającego w modelu dały informację o złożoności terminu wygładzającego; im wyższa wartość, tym bardziej skomplikowany był kształt krzywej dopasowania. Wartości edf zbliżone do 1,0 sugerowały o zbliżonej do liniowej krzywej wygładzania. Referencyjne stopnie swobody ($Ref. df$) były odniesieniem do stopni swobody, które mogłyby być użyte w tradycyjnym modelu parametrycznym. Wartość ta była używana do porównywania z edf w celu oceny, czy dany termin wygładzający był bardziej podobny do modelu parametrycznego czy niestandardowego. W przypadku gdy edf i $Ref. df$ były podobne, model może zachowywać się podobnie do modelu parametrycznego. Różnice między tymi wartościami mogą wskazywać, że modelowanie nieliniowych związków jest kluczowe dla danych [50], [107].

Statystyka F-testu dla każdego terminu wygładzającego, wskazywała siłę związku między terminem wygładzającym a zmienną zależną. Wyższe wartości F wskazywały na silniejszy związek. Wartość p dla testu statystycznego związanego z każdym terminem wygładzającym poniżej ustalonego poziomu istotności α sugerowała, że dany termin wygładzający miał statystycznie istotny wpływ na zmienną zależną.

Walidacja modelu została przeprowadzona z zastosowaniem metody walidacji krzyżowej (GCV), która służyła do wyboru optymalnej wartości parametru wygładzania. GCV miała na celu zminimalizowanie błędu predykcji poprzez zrównoważenie dopasowania modelu do danych treningowych z jego zdolnością do generalizacji na nowe dane. W kontekście GAM, wartość GCV była wykorzystywana do oceny, jak dobrze model będzie działać na danych, których nie widział w trakcie procesu trenowania. Podczas walidacji modelu zastosowano optymalizację typu "outer Newton", tj. metody numerycznej stosowanej do znajdowania minimum funkcji kosztu, w tym przypadku GCV. "Outer" wskazuje na iteracyjne podejście do optymalizacji parametrów wygładzania, które były dostosowywane w kolejnych krokach procesu. Optymalizator "Newton" odnosi się do wykorzystania drugiej pochodnej (Hessian) do szybszego zbiegania do minimum funkcji kosztu [102],[164],[167].

4.1.4. Interpretacja wyników walidacji

Podczas walidacji modelu GAM z zastosowaniem GCV i optymalizacji "outer Newton", zwrócono uwagę na następujące aspekty:

- sprawdzenie czy proces iteracyjny zbiegł do minimum funkcji kosztu. Konwergencja oznacza, że zmiany wartości parametrów wygładzania między iteracjami były dostatecznie małe i że dodatkowe iteracje nie przynoszą znaczącej poprawy modelu,
- zasięg gradientu wskazywał na zmiany wartości funkcji kosztu wzdłuż różnych kierunków w przestrzeni parametrów. W idealnej sytuacji wartość gradientu powinna dążyć do zera, co oznacza znalezienie minimum lokalnego,
- "score" to wektor gradientu funkcji kosztu, a "scale" to wartość funkcji kosztu. W kontekście GCV, niższe wartości wskazują na lepsze dopasowanie modelu,
- Hessian musi być dodatnio określony (wszystkie jego własne wartości muszą być dodatnie) aby zapewnić, że punkt, do którego zbiega optymalizacja, jest rzeczywiście minimum lokalnym funkcji kosztu,
- zakres wartości własnych macierzy Hessian dostarczał informacji o stabilności numerycznej procesu optymalizacji. Jeśli zakres jest szeroki, może to wskazywać na problemy związane z numeryczną kondycją problemu optymalizacyjnego,
- ranga modelu w kontekście GAM odnosiła się do pełnej rangi macierzy projektu, co oznaczało, że wszystkie wykorzystane wygładzające składniki były liniowo niezależne. Pełna ranga była pożądana, ponieważ wskazywała, że model wykorzystywał informacje z danych w maksymalnym stopniu.

Wskazane wartości wskazywały na jakość dopasowania modelu, jego stabilność numeryczną oraz zdolność do generalizacji [102], [159], [160]. W celu oceny adekwatności modelu GAM, przeprowadzono serię wizualnych testów diagnostycznych. Cztery kluczowe wykresy, które zastosowano w tym procesie, obejmowały:

- wykres kwantyl - kwantyl reszt modelu (QQ-plot), który wykazał, że kwantyle reszt nie odbiegają znacząco od oczekiwanych wartości dla rozkładu normalnego, co sugeruje prawidłowość zakładanego rozkładu reszt,
- wykres reszt względem liniowych wartości predyktora, na którym reszty były rozmieszczone w sposób nie wykazujący żadnych systematycznych wzorców, co wskazywało na homoskedastyczność i brak widocznych nieliniowości w modelu,
- histogram reszt modelu, który prezentował rozkład w przybliżeniu symetryczny i unimodalny, zgodny z założeniami normalności,
- wykres dopasowania względem obserwowanych wartości odpowiedzi, który ukazywał, że model osiągał zadowalające dopasowanie, z punktami zbliżonymi do linii idealnego dopasowania $y = x$.

Wskazane narzędzia diagnostyczne dostarczały istotnych informacji na temat spełnienia kluczowych założeń modelu GAM. Proces doboru optymalnego modelu do danych obejmował porównanie modelu liniowego z uogólnionym modelem addytywnym (GAM) przy wykorzystaniu analizy dewiancji. Kryteriami porównawczymi były stopnie swobody reszt (*Res.Df*) oraz suma kwadratów reszt (*RSS*). Niższe wartości tych parametrów sugerują lepsze dopasowanie modelu do danych empirycznych. W celu oceny istotności statystycznej różnic pomiędzy omówionymi modelami, wykorzystano test Fishera. Test ten pozwalał zbadać, czy zaobserwowane różnice w dopasowaniu modeli są statystycznie znaczące. W przypadku stwierdzenia, że różnice są istotne, model o niższych wartościach *Res.Df* i *RSS* był uznany za lepiej reprezentujący badane zjawisko [161], [129].

Wszystkie przedstawione analizy przeprowadzone zostały przy użyciu języka statystycznego R (wersja 4.3.1; R Core Team, 2023) w systemie Windows 10 pro 64 bit, z wykorzystaniem pakietów rio (wersja 1.0.1; Chan C i in., 2023), qgam (wersja 1.3.4; Fasiolo M i in., 2021), mgcViz (wersja 0.1.11; Fasiolo i in., 2020), sjPlot (wersja 2.8.15; Lüdecke D, 2023), performance (wersja 0.10.8; Lüdecke D et al., 2021), report (wersja 0.5.7; Makowski D et al., 2023), PerformanceAnalytics (wersja 2.0.4; Peterson BG, Carl P, 2020), bestNormalize (wersja 1.9.1.9000; Peterson RA, 2021), ggplot2 (wersja 3.4.4; Wickham H, 2016), readxl (wersja

1.4.3; Wickham H, Bryan J, 2023), dplyr (wersja 1.1.3; Wickham H et al., 2023), psych (wersja 2.3.9; William Revelle, 2023), mgcv (wersja 1.8.42; Wood SN, 2011).

4.2. Charakterystyka próby

Analizie poddano $N = 2000$ pomiarów parametrów atmosferycznych przeprowadzonych w dniach 02.06.2021 - 24.06.2021. Były to próbki z okresu letniego bez zarejestrowanych opadów atmosferycznych zebrane w trakcie badań polowych. Szczegółowe statystyki opisowe badanego zbioru w podziale na poszczególne zmienne przedstawiono w tabeli 8.

Tabela 8. Statystyki opisowe badanego zbioru, $N_{obs} = 2000$

Zmienna	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Mdn</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>Min</i>	<i>Maks.</i>	<i>Sk.</i>	<i>Kurt.</i>
Zmienne objaśniające									
Natężenie promieniowania, W/m ²	423,19	368,85	272,82	85,14	837,37	3,18	1118,32	0,47	-1,41
Ciśnienie atmosferyczne, hPa	998,11	0,69	998,33	997,49	998,75	996,96	999,12	-0,15	-1,61
Temperatura otoczenia, °C	19,31	2,03	19,55	17,17	21,00	16,04	22,54	-0,29	-1,25
Prędkość wiatru, m/s	1,27	0,69	1,22	0,91	1,63	0,01	5,17	0,58	2,37
Wilgotność, %	82,54	17,55	83,91	64,67	99,99	54,81	100,01	-0,17	-1,75
Zmienna wyjaśniana									
Temperatura czynnika na zbiorniku, °C	44,48	7,12	44,76	38,08	50,98	32,55	55,59	-0,09	-1,30

gdzie: N_{obs} - liczba obserwacji, *M* - średnia, *SD* - odchylenie standardowe, *Mdn* - mediana, *Q1* - kwartył pierwszy (25%), *Q3* - kwartył trzeci (75%), *Min* - wartość minimalna, *Maks.* - wartość maksymalna, *Sk.* - skośność, *Kurt.* - kurtoza.

Na podstawie danych przedstawionych w tabeli 8, dokonano poniższej analizy statystycznej i wyciągnięto wnioski dotyczące badanego zbioru danych.

Średnia wartość natężenia promieniowania wynosiła 423,19 W/m², z jednak dość wysokim odchyleniem standardowym ($SD = 368,85$ W/m²), co sugeruje znaczną zmienność w poziomie nasłonecznienia. Mediana (272,82 W/m²) znacząco niższa od średniej wskazywała na prawostronną asymetrię rozkładu (skośność = 0,47), co było wspierane przez ujemną wartość kurtozy (-1,41) sugerującą płaski rozkład danych.

Dane wskazywały na niewielkie zmiany ciśnienia atmosferycznego ($SD = 0,69$ hPa) wokół średniej wartości 998,11 hPa. Negatywna wartość skośności (-0,15) i kurtozy (-1,61) oznaczały lekką tendencję do niższych wartości niż średnia oraz rozkład bardziej płaski w porównaniu do rozkładu normalnego.

Średnia temperatura otoczenia wynosiła 19,31°C, z odchyleniem standardowym na poziomie 2,03°C, co wskazywało na umiarkowaną stabilność tego parametru. Lekko lewostronna

skośność (-0,29) oraz kurtoza (-1,25) wskazywały na słabo skoncentrowany rozkład wokół mediany (19,55°C) z niższymi skrajnymi wartościami.

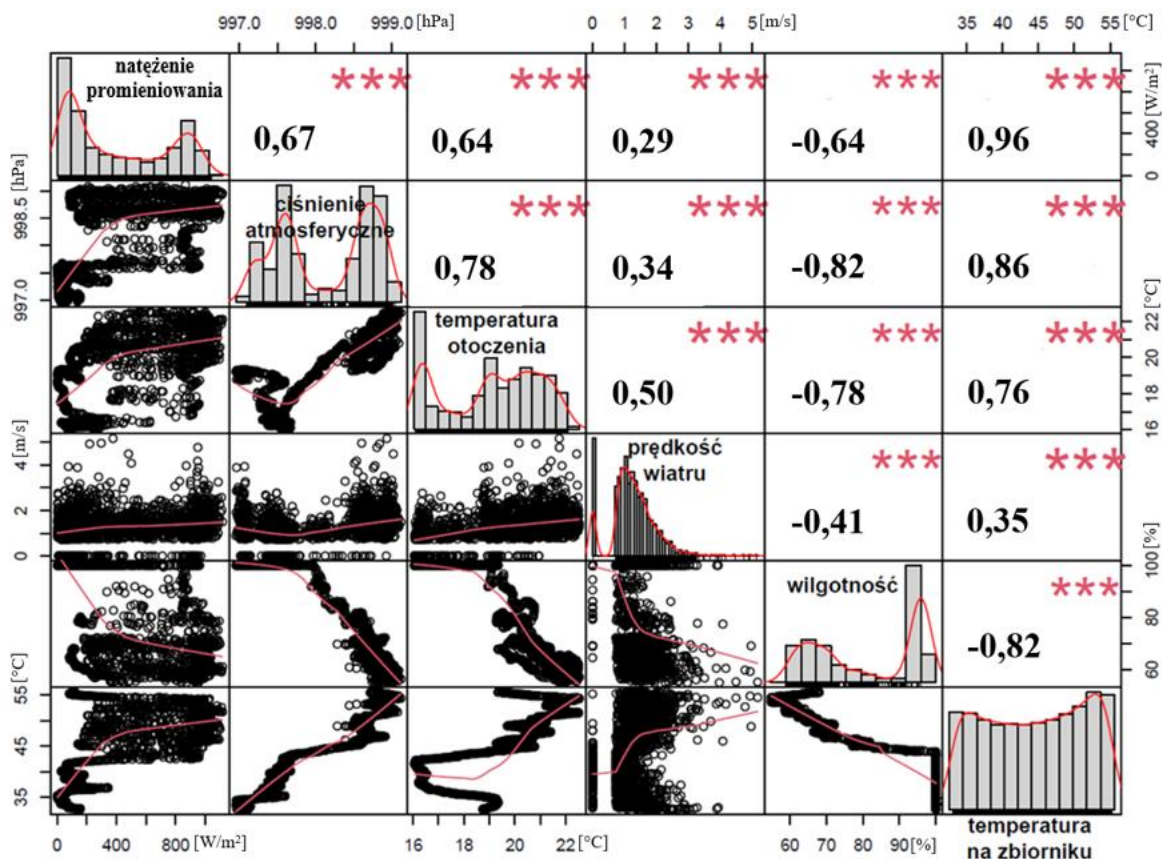
Prędkość wiatru charakteryzowała się stosunkowo niską średnią (1,27 m/s) i niskim SD (0,69 m/s), co świadczyło o dominacji słabych wiatrów w analizowanym zbiorze. Dodatnia wartość skośności (0,58) wskazywała na obecność wyższych wartości przekraczających średnią. Wyższa kurtoza (2,37) oznaczała większą koncentrację danych wokół średniej oraz obecność wartości ekstremalnych.

Średnia wilgotność powietrza wynosi 82,54%, z większym zakresem zmienności ($SD = 17,55\%$). Rozkład wykazywał lekko lewostronną skośność (-0,17) i jest bardziej płaski niż rozkład normalny (kurtoza na poziomie -1,75).

Temperatura czynnika w zbiorniku, będąca zmienną zależną, ma średnią równą 44,48%, z umiarkowanym odchyleniem standardowym (7,12%), co wskazuje na relatywnie jednorodną temperaturę medium w zbiorniku. Skośność i kurtoza są bliskie zeru, co sugerowało, że rozkład był symetryczny i nieco zbliżony do normalnego.

Wizualizacja rozkładów poszczególnych zmiennych oraz par zmiennych wraz z obliczeniem powiązania pomiędzy nimi przedstawiono w postaci macierzy korelacji na rysunku 4.1. Bazując na przeprowadzonej analizie danych i wizualizacji w macierzy korelacji, stwierdzono istotne statystycznie powiązania między wszystkimi badanymi parametrami. Wartości rangowego współczynnika korelacji Spearmana oscylowały w przedziale od 0,29 co wskazuje na słabsze korelacje aż do 0,96, co sugeruje korelację prawie idealną. Przeważająca część zidentyfikowanych związków była dodatnia, z wyjątkiem wilgotności, która wykazywała ujemną korelację ze wszystkimi pozostałymi parametrami atmosferycznymi. Okazało się, że największy współczynnik korelacji osiągnięto pomiędzy temperaturą na zbiorniku a natężeniem promieniowania słonecznego.

Analizując główną przekątną macierzy korelacji zauważono, że rozkłady większości zmiennych nie przypominają rozkładu gaussowskiego. Z wyjątkiem zmiennej reprezentującej prędkość wiatru, pozostałe charakteryzowały się bimodalnością oraz znaczącymi odchyleniami od normalności. Takie nieregularności w rozkładach danych wymagają zastosowania metod analizy, które nie zakładają normalności danych. Charakterystyka powiązań zmiennej wynikowej, jaką jest temperatura na zbiorniku, z innymi zmiennymi sugeruje nieliniowy charakter tych zależności. W związku z tym zdecydowano się na zastosowanie elastycznego modelowania przy użyciu GAM, które są w stanie uchwycić złożone nieliniowe związki między zmiennymi [129], [165], [29].



Rys. 4.1. Macierz korelacji opisująca powiązanie pomiędzy zmiennymi wraz z histogramami oraz wykresami rozrzutu badanych zmiennych (istotność w przypadku *** - $p < 0,001$, ** - $p < 0,010$).

4.3. Otrzymane wyniki

4.3.1. Dopasowanie danych w oparciu o model GAM

W ramach procesu budowy modelu GAM przeprowadzono szczegółową analizę dewiancji, mającą na celu ocenę wkładu dodawanych zmiennych niezależnych w wyjaśnianie zmienności zmiennej zależnej. W tabeli 9 zaprezentowano kolejne modele od najprostszego (Model 0) do najbardziej skomplikowanego (Model 5).

Model 0, będący modelem bazowym, zawierał jedynie stałą wartość i nie obejmował żadnych zmiennych niezależnych. W tej konfiguracji, dewiancja reszt (*Resid. dev*) wynosiła 177,55 przy 7531 stopniach swobody reszt (*Resid. df*), co stanowi punkt odniesienia dla porównania z bardziej złożonymi modelami.

Model 1, zawierający tylko zmienną 'natężenie promieniowania', znacząco poprawił dopasowanie w stosunku do modelu bazowego, co widać po redukcji dewiancji o 35,30 przy dodaniu 8,92 stopni swobody. Wartość $p < 0,001$ wskazywała na istotność statystyczną tego modelu.

Model 2, wprowadzający dodatkowo 'ciśnienie atmosferyczne' do modelu zawierającego już 'natężenie promieniowania', zaowocował dalszym znacznym spadkiem dewiancji reszt do wartości 19,75, co pokazuje, że ciśnienie atmosferyczne jest istotnym predyktorem w modelu.

Tabela 9. Wyniki procedury testowania modeli GAM o różnym składzie zmiennych

Model	Skład zmiennych niezależnych	Resid. df	Resid. dev	df	Dewiancja	$p (> Chi)$
Model 0	Brak zmiennych (stała wartość 1,0)	7531,0	177,55	-	-	-
Model 1	Natężenie promieniowania	7522,1	142,26	8,92	35,30	< 0,001
Model 2	Natężenie promieniowania+ ciśnienie atmosferyczne	7513,0	19,75	9,07	122,50	< 0,001
Model 3	Natężenie promieniowania+ ciśnienie atmosferyczne + temperatura otoczenia	7502,0	10,07	11,00	9,68	< 0,001
Model 4	Natężenie promieniowania+ ciśnienie atmosferyczne + temperatura otoczenia + prędkość wiatru	7496,9	10,03	5,06	0,05	< 0,001
Model 5	Natężenie promieniowania + ciśnienie atmosferyczne + temperatura otoczenia + prędkość wiatru + wilgotność	7487,8	7,85	9,12	9,12	< 0,001

gdzie: *Resid. df* -stopnie swobody reszt, *Resid. dev* - dewiancja reszt; *df* -stopnie swobody, $p (> Chi)$ -wartość p testu chi-kwadrat Pearsona.

Model 3 rozszerzony o 'temperaturę otoczenia' dalej poprawił dopasowanie, zmniejszając dewiancję o dodatkowe 9,68, co potwierdza znaczenie tej zmiennej w modelowaniu zjawiska.

Model 4, w którym dodano 'prędkość wiatru', pokazał minimalną zmianę w dewiancji reszt, co sugeruje, że ta zmienna wnosi niewielki dodatkowy wkład w wyjaśnienie zmienności zmiennej zależnej w obecności pozostałych zmiennych.

Model 5, wzbogacony o 'wilgotność', ponownie poprawił dopasowanie modelu, co wskazuje na jej wpływ i znaczenie w kontekście pozostałych zmiennych.

Podsumowując każdy z modeli wykazał istotność statystyczną na poziomie $p < 0,001$, co sugeruje, że dodane zmienne niezależne istotnie przyczyniają się do modelowania zmiennej zależnej. Wnioski z przeprowadzonej analizy dewiancji sugerują, że 'natężenie promieniowania', 'ciśnienie atmosferyczne', 'temperatura otoczenia' oraz 'wilgotność' mają istotny wkład w model, podczas gdy 'prędkość wiatru' wnosiła marginalny wkład. Ostateczny model GAM był dopasowany w oparciu o rozkład Gamma z logitową funkcją łączącą (co jest typowe dla modelowania czasu do zdarzenia, stężenia lub innych zmiennych, które są zawsze dodatnie i mają asymetryczne rozkłady). Opisany może zostać następującym wzorem [50]:

$$E = \beta_0 + s_1 + s_2 + s_3 + s_4 + s_5 \quad (4.2)$$

gdzie:

E - wartość oczekiwana temperatury czynnika w zbiorniku,

β_0 - wyraz wolny,

s_1 - funkcja wygładzająca dla zmiennej natężenie promieniowania,

s_2 - funkcja wygładzająca dla zmiennej ciśnienie atmosferyczne,

s_3 - funkcja wygładzająca dla zmiennej temperatura otoczenia,

s_4 - funkcja wygładzająca dla zmiennej prędkość wiatru,

s_5 - funkcja wygładzająca dla zmiennej wilgotność.

Specyfikacja wszystkich pięciu opisanych funkcji wygładzających ostatecznego modelu GAM przedstawiona została w tabeli 10.

Tabela 10. Specyfikacja funkcji wygładzających ostatecznego modelu GAM

Funkcja wygładzająca	Charakterystyka
s1	Elastyczna krzywa wygładzająca (EKW) stosując bazę "cr" (cubic regression splines) do modelowania nieliniowej zależności.
s2	EKW, używająca bazę "cr" z 50 podstawowymi funkcjami, pozwalając na dużą elastyczność modelowania.
s3	EKW używająca bazę "gp" (Gaussian process splines) z $k = 50$ podstawowymi funkcjami.
s4	EKW stosująca bazę "cr".
s5	EKW wykorzystująca bazowe "tp" (thin plate splines) z $k = 20$ podstawowymi funkcjami.

gdzie: parametr k kontroluje stopień swobody dla każdej funkcji wygładzającej, co z kolei wpływa na stopień wygładzenia krzywej - większa liczba bazowych funkcji k pozwala na bardziej elastyczne dopasowanie do danych.

Wartość wyrazu wolnego była wysoce znaczącą oraz wynosiła 3,78, co przy logitowej funkcji łączącej odpowiadało przekształceniu wykładniczemu oczekiwanej wartości odpowiedzi, gdy wszystkie predyktory były na swoich poziomach odniesienia (czyli były równe zero). Wszystkie funkcje wygładzające były znaczące, z wartościami p znacznie poniżej konwencjonalnego progu (0,05), co wskazywało, że każdy z nich znacząco przyczyniał się do modelu. Efektywne stopnie swobody dla każdego warunku różniły się, odzwierciedlając złożoność związku między predyktorem a odpowiedzią. Wysokie wartości edf dla zmiennych ciśnienie atmosferyczne i temperatura otoczenia wskazywały na złożone, nieliniowe relacje ze zmienną

zależną. Wyniki dopasowania współczynników ostatecznego modelu GAM przedstawiono w tabeli 11.

Tabela 11. Wyniki współczynników dopasowanego modelu GAM, $R^2_{adj} = 0,988$, wyjaśniona dewiacja = 98,8%, $GCV = 3,50 \times 10^{-4}$, $ESB = 3,33 \times 10^{-4}$, $N_{obs} = 2000$

Zmienne objaśniające	B	SE	t	p
(Stała)	3,79	< 0,01	9267,00	< 0,001
Przybliżone wartości gładkich terminów				
	<i>edf</i>	<i>Ref. df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
s (natężenie promieniowania)	8,36	8,74	12,79	< 0,001
s (ciśnienie atmosferyczne)	29,03	34,09	136,80	< 0,001
s (temperatura otoczenia)	38,18	42,41	43,56	< 0,001
s (prędkość wiatru)	7,77	8,45	2,93	0,002
s (wilgotność)	18,06	18,87	155,76	< 0,001

gdzie: R^2_{adj} - współczynnik determinacji skorygowany na liczbę zmiennych wyjaśniających, ESB - estymacja skali błędów; GCV - uogólniony wynik weryfikacji krzyżowej, ESB, B - współczynnik modelu regresji (niewystandaryzowany), SE - błąd standardowy, t - statystyka testu t, F - statystyka testu F, p - wartość p testu statystycznego, *edf* - oszacowane stopnie swobody, *ref.df* - referencyjne stopnie swobody; N_{obs} - liczba obserwacji w dopasowanym zbiorze.

Wartość skorygowanego współczynnika determinacji R^2_{adj} na poziomie 0,988 oraz wyjaśniona dewiacja na poziomie 98,8% wskazują na doskonałe dopasowanie do danych, sugerując, że model wyjaśnia prawie całą zmienność zmiennej zależnej. Bardzo niski wynik GCV wskazywał, że model osiągnął dobry balans między dopasowaniem a złożonością, co jest wspierane przez niski szacunek skali, który mierzy rozproszenie reszt.

Znaczące warunki funkcji wygładzających sugerowały, że zmienna wynikowa była silnie zależna od badanych czynników atmosferycznych w sposób nieliniowy. Złożoność związków uchwyconych przez GAM sugerowała, że proste modele liniowe byłyby niewystarczające do dokładnego modelowania tych efektów. Złożone funkcje wygładzające dla zmiennych ciśnienie atmosferyczne i temperatura otoczenia (obie z wysokimi *edf*) wskazywały, że temperatura zbiornika była wrażliwa na warunki atmosferyczne w sposób niejednoznaczny, możliwe, że ze względu na interakcje z innymi czynnikami lub efekty progowe.

Niższe *edf* dla parametrów prędkość wiatru oraz natężenie promieniowania sugerowała prostsze związki ze zmienną wynikową, podczas gdy *edf* dla parametru wilgotność wskazywała na bardziej złożoną relację, ale nie tak złożoną jak z ciśnieniem atmosferycznym czy temperaturą otoczenia.

Wysokie wartości skorygowanego R^2_{adj} i wyjaśnionej dewiacji, połączone ze znaczeniem wygładzonych warunków i niskim GCV, sugerowały, że model doskonale sobie radził z uchwyceniem prawdziwych zależności bez przetrenowania, co jest niezwykle dla danych

środowiskowych. Biorąc pod uwagę silne metryki wydajności, model ten prawdopodobnie miał bardzo dobre zdolności predykcyjne.

Oś X na rysunku 4.2 reprezentowała przestrzeń wartości poszczególnych zmiennych niezależnych. Oś Y na wykresach funkcji wygładzających reprezentowała zazwyczaj efekt danej zmiennej na odpowiedź modelu, który jest dostosowany do logitowej skali funkcji łączącej. Interpretacja wartości na osi Y jest związana z wpływem, jaki wygładzona zmienna niezależna miała na przewidywaną wartość zmiennej zależnej;

- wysokość krzywej w danym punkcie na osi X wskazywała na wielkość wpływu tej konkretnej wartości zmiennej niezależnej na przewidywaną odpowiedź. Wartości wyższe na osi Y oznaczały większy wpływ na zmienną zależną,
- kształt funkcji wygładzającej wskazuje na rodzaj związku, np. krzywa wklęsła lub wypukła, wskazywała to na nieliniową zależność,
- szybkość zmian w krzywej (jej stromość) wskazuje na siłę związku. Bardzo stroma krzywa wskazywała na to, że małe zmiany w wartości zmiennej niezależnej mogły mieć duży wpływ na zmienną zależną. Płaska krzywa wskazywała na słaby związek,
- na wykresie znajdowały się również przedziały ufności 95%, które określały, z jakim prawdopodobieństwem rzeczywisty efekt znajduje się w danym obszarze. Węższe pasy wskazywały na większą precyzję estymacji efektu zmiennej.

Na podstawie przedstawionych wyników analizy statystycznej wykonanej metodą GCV z wykorzystaniem optymalizacji za pomocą zewnętrznej metody Newtona, można wysunąć następujące wnioski na temat modelu statystycznego i estymowanych funkcji gładkich dla zmiennych badanych. Pełna konwergencja modelu została osiągnięta po 10 iteracjach. Wskaźniki gradientu mieściły się w zakresie od $1,19 \cdot 10^{-19}$ do $1,58 \cdot 10^{-10}$, co wskazywało na stabilność rozwiązania w pobliżu minimum funkcji kosztu [168],[166].

Parametr Score i scale odnosiły się do funkcji straty i skali błędów w modelu. Niskie wartości tych parametrów (score około $3,49 \cdot 10^{-4}$ i scale około $3,33 \cdot 10^{-4}$) wskazywały na dobrą jakość dopasowania modelu. Hessian był dodatnio określony, a zakres wartości własnych wskazywał na dobre warunki numeryczne dla optymalizacji. Wartości własne mieściły się w przedziale od $7,78 \cdot 10^{-8}$ do $8,50 \cdot 10^{-7}$, co potwierdzało stabilność modelu w przestrzeni rozwiązań. Ranga modelu równa 136 / 136 wskazywała, że był on pełny i nie wykazywał problemów z niedookreśleniem. Ocenę złożoności i znaczenia wartości wygładzających dla poszczególnych zmiennych objaśniających przedstawiono w tabeli 12.

Tabela 12. Ocena złożoności i znaczenia wartości wygładzających w modelu GAM

Zmienne objaśniające	k	edf	k -indeks	p
s (natężenie promieniowania)	9,00	8,36	0,99	0,320
s (ciśnienie atmosferyczne)	49,00	29,03	1,00	0,380
s (temperatura otoczenia)	49,00	38,18	0,99	0,200
s (prędkość wiatru)	9,00	7,77	0,98	0,120
s (wilgotność)	19,00	18,06	0,99	0,310

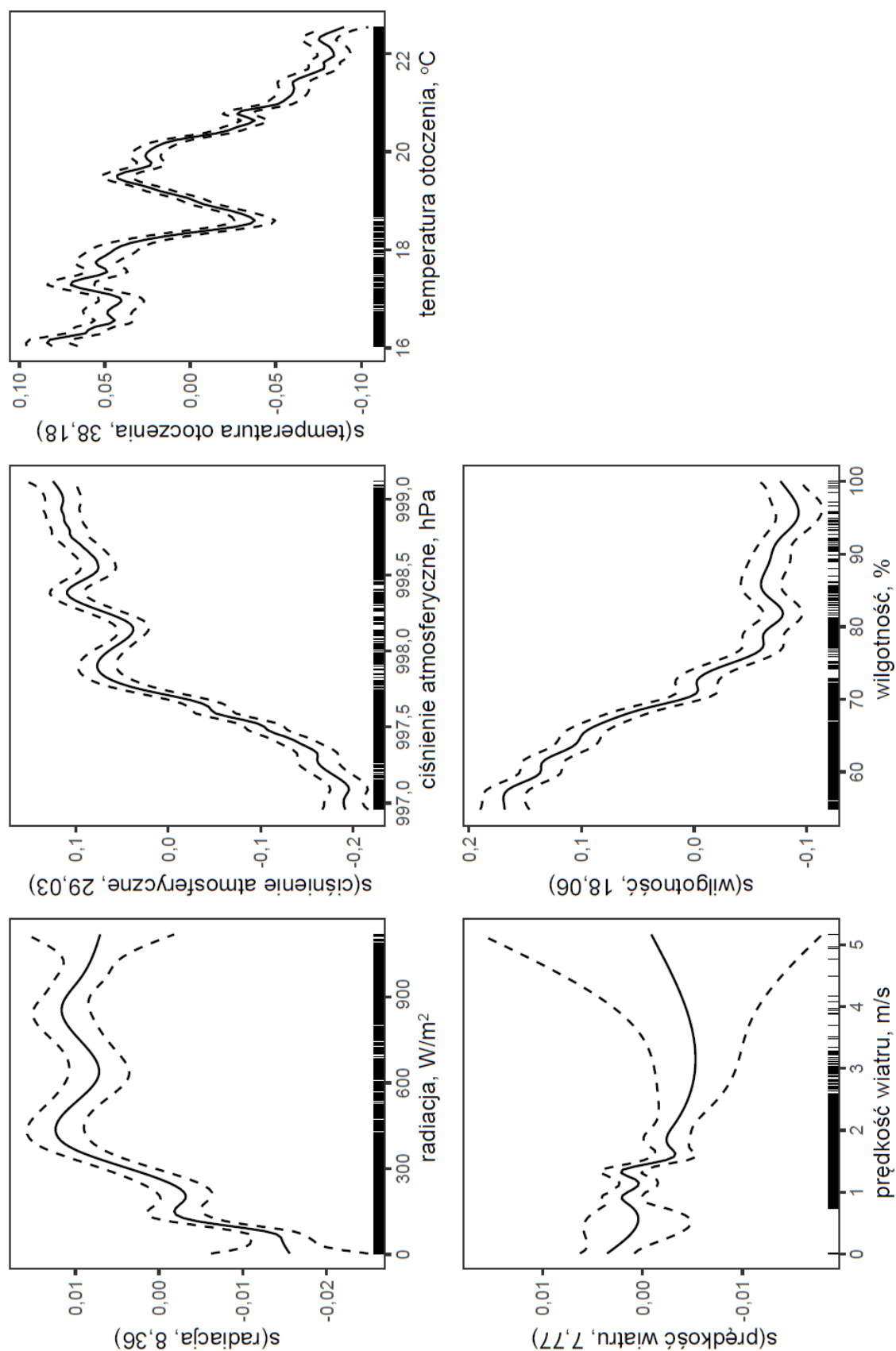
gdzie: k - wymiar bazowy; edf - oszacowane stopnie swobody; k -indeks - diagnostyka oceny adekwatności wymiaru bazowego; p - wartość p testu statystycznego.

Wymiar podstawowy k oraz edf opisywały złożoność modelu i stopień dopasowania do danych. Wartości edf zbliżone do k sugerowały dobrą elastyczność modelu w zakresie dopasowania do danych, bez nadmiernego dopasowania (overfittingu). K-index bliski 1,0 wskazywał na odpowiednią złożoność modelu. Wszystkie wartości p były powyżej 0,10, co nie wskazywało na istotne problemy.

Następnie dokonano analizy poszczególnych funkcji wygładzających:

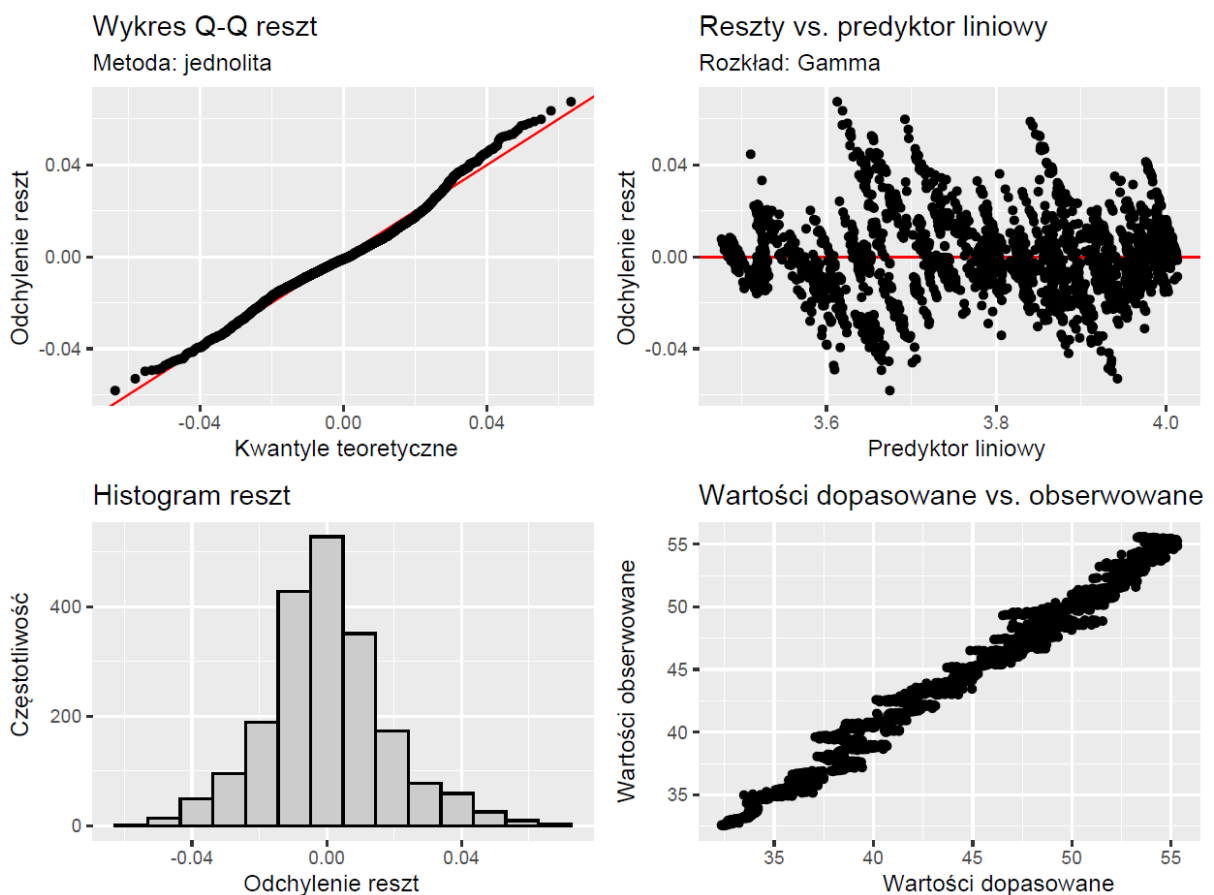
- dla funkcji wygładzającej natężenia promieniowania $edf = 8,36$ przy $k = 9,00$ wskazywał na to, że model był w stanie uchwycić większość złożoności wzorca danych bez nadmiernego dopasowania,
- funkcja wygładzająca dla parametru ciśnienia atmosferycznego wykazywała $edf = 29,03$ przy $k = 49,00$, co sugeruje, że zmienność ciśnienia atmosferycznego była stosunkowo dobrze uchwycona w modelu,
- w przypadku temperatury otoczenia z $edf = 38,18$ przy $k = 49,00$ funkcja wygładzająca również wskazywała na stosunkowo dobrą zdolność modelu do opisu zmienności temperatury,
- na koniec w przypadku wilgotności z $edf = 18,06$ przy $k = 19,00$ funkcja wygładzająca wskazywała na to, że model dobrze opisywał dane, ale bez nadmiernego dopasowania.

Podsumowując, wyniki walidacji modelu GAM wskazywały na to, że stosowane metody modelowania były odpowiednie do uchwycenia złożoności danych, bez wykazywania znaczących problemów z niedopasowaniem lub nadmiernym dopasowaniem [102], [103], [167], [29]. Wizualną diagnostykę modelu przedstawiono na rysunku 4.2.



Rys. 4.2. Zależności funkcjonalne w modelu GAM wizualizacja efektów wygładzonych dla zmiennych niezależnych

Wykres QQ-plot na rysunku 4.3 prezentował porównanie kwantyli reszt modelu z kwantylami rozkładu teoretycznego, przy założeniu normalności rozkładu reszt. Punkty na wykresie układały się blisko linii referencyjnej, co wskazywało na to, że kwantyle empiryczne były zgodne z kwantylami rozkładu normalnego. Brak był widocznych systematycznych odchyłeń od linii prostej, co sugerowało, że rozkład reszt nie wykazywał znaczących odbiegnięć od rozkładu normalnego. Skrajne wartości na końcach rozkładu również mocno nie odstawały, co dodatkowo potwierdzało brak ciężkich ogonów i wskazywało na adekwatność założenia o normalności rozkładu reszt. Analiza QQ-plotu wskazała na dobre dopasowanie modelu i spełnienie jednego z kluczowych założeń regresji [119], [161].



Rys. 4.3. Wizualna diagnostyka modelu GAM (wykres kwantyl-kwantyl reszt modelu, wykres reszt względem liniowych wartości predyktora, histogram reszt modelu, wykres dopasowania względem obserwowanych wartości odpowiedzi).

Na wykresie reszt w funkcji liniowych wartości predyktora, obserwowano względnie symetryczne rozmieszczenie punktów wokół poziomej linii odpowiadającej wartości zero. Reszty były rozproszone w miarę równomiernie zarówno powyżej, jak i poniżej linii zero, nie wykazując żadnych widocznych systematycznych wzorców, takich jak kształty w formie lejka (które

wskazywałyby na niestabilność wariancji reszt - heteroskedastyczność) czy wyraźnych krzywych (wskazujących na niespełnienie założenia o liniowości związku).

Zauważono również brak długich ciągów punktów po jednej stronie linii zero, co mogłoby sugerować obciążenie modelu. Równomierny rozkład punktów w różnych zakresach wartości predyktora wskazywał na to, że model dobrze radził sobie z przewidywaniem wartości zarówno dla niskich, jak i wysokich wartości predyktora. Ponadto, brak skupisk punktów czy odstających obserwacji (outlierów) przemawiała za dobrą jakością dopasowania modelu. Rzadkie występowanie wartości odstających mogło również wskazywać na to, że model jest odporny na pojedyncze obserwacje, co było pożądaną właściwością w kontekście stabilności modelu predykcyjnego. Podsumowując, analiza wykresu reszt w funkcji przewidywanych wartości predyktora sugerowała, że model był odpowiednio dopasowany i nie wykazuje oczywistych naruszeń założeń regresji liniowej. Reszty modelu wydawały się być nieobciążone i miały stałą wariancję, co było wskazówką dobrej jakości dopasowania modelu [117], [168], [164].

Histogram reszt modelu prezentował wizualizację rozkładu błędów predykcji. Analizowany histogram wykazywał, że reszty były rozmieszczone wokół wartości zero i miały formę zbliżoną do symetrycznego kształtu dzwonu, który charakterystyczny był dla rozkładu normalnego. Większość reszt skupiała się blisko zera, z niewielką liczbą obserwacji oddalających się równomiernie w obu kierunkach od środka. Nie zaobserwowano wyraźnego skosu w prawo ani w lewo, co potwierdzało brak systematycznej asymetrii w błędach modelu. Brak długich ogonów w rozkładzie reszt wskazywał również na to, że nie występowały ekstremalnie duże wartości błędów, co mogłoby być objawem obecności wartości odstających wpływających na model w nieproporcjonalny sposób. Podsumowując, histogram reszt wskazuje na to, że model nie posiadał systematycznych błędów predykcji i był dobrze dopasowany do danych. Symetryczny rozkład reszt wokół zera był wskazówką, że model był nieobciążony i prawdopodobnie adekwatnie odzwierciedlał zależności występujące w danych.

Wykres dopasowania modelu pokazywał związek między wartościami obserwowanymi (obserwowanymi, na osi Y) a wartościami przewidywanymi przez model (na osi X). Punkty na wykresie rozłożone były w prawie symetrycznie względem linii idealnego dopasowania, co oznaczało, że dla każdej wartości przewidywanej istnieje zbliżona wartość rzeczywista. Stosunkowo równomierny rozkład punktów wzdłuż linii $y = x$ wskazywał na to, że model ma dobre właściwości predykcyjne zarówno dla niższych, jak i wyższych wartości zmiennej zależnej [117], [159], [167]. Ponadto, brak był skrajnych odstępstw od linii idealnego dopasowania, co oznaczało, że nie występowały duże błędy predykcji, a potencjalne wartości odstające nie miały dużego wpływu na model. Ogólna koncentracja punktów blisko linii $y = x$ świadczyła

o wysokiej jakości dopasowania modelu. Podsumowując, wykres dopasowania sugerował, że model GAM skutecznie wyjaśniał zależność między zmiennymi i był zdolny do dokładnego przewidywania wartości odpowiedzi na podstawie wartości predyktora. Symetryczne rozłożenie punktów wokół linii idealnego dopasowania było pozytywnym sygnałem, który potwierdzał adekwatność modelu dla danych.

4.3.2. Dopasowanie modelu liniowego

Jako alternatywę dla modelu GAM, zastosowano również model liniowy (LM) do dopasowania badanego zestawu danych. W obu przypadkach, zmienna wynikowa oraz zestaw zmiennych objaśniających pozostały niezmienione, co pozwalało na bezpośrednie porównanie obu metod modelowania. Kluczową różnicą w przypadku modelu liniowego był sposób modelowania związków między zmiennymi w LM zakładało się liniową zależność między zmiennymi objaśniającymi a zmienną wynikową. Ponadto, w modelu liniowym przyjęto założenie o gaussowskim (normalnym) rozkładzie reszt, co różniło się od bardziej elastycznego podejścia w modelu GAM, gdzie dopuszczalne są nieliniowe zależności i nie zakłada się normalności rozkładu zmiennej wynikowej [167], [29]. Zastosowanie modelu liniowego w takiej sytuacji służy jako punkt odniesienia dla bardziej złożonego modelu GAM, umożliwiając ocenę, czy bardziej zaawansowane modelowanie nieliniowe przynosi istotne korzyści w kontekście dopasowania i predyktywności modelu. Wyniki dopasowania modelu regresji liniowej przedstawiono w tabeli 13.

Analiza miar dopasowania dla modelu GAM oraz dla modelu LM dostarczyła wartościowych informacji, które umożliwiły wyciągnięcie konkretnych wniosków dotyczących adekwatności obu modeli do badanych danych. Przeprowadzona analiza reszt pozwoliła stwierdzić, które z modeli - czy prostszy model liniowy, czy bardziej elastyczny model GAM - lepiej pasował do struktury danych. Użycie uogólnionego modelu addytywnego pozwoliło na uwzględnienie nieliniowości występujących między temperaturą w zbiorniku a badanymi zmiennymi. Wygładzone funkcje zastosowane w modelu GAM wychwytywały złożone wzorce, które nie mogły być adekwatnie opisane za pomocą tradycyjnego modelowania liniowego. Takie podejście było szczególnie istotne w kontekście badanych zjawisk przyrodniczych, gdzie czynniki wpływające na zmienną odpowiedzi często działają w sposób nieliniowy i skomplikowany. Dzięki temu model GAM może przewidywać temperaturę w zbiorniku z większą precyzją.

Tabela 13. Współczynniki dopasowanego modelu regresji liniowej, $N_{obs} = 2000$, $R^2 = 0,946$, $R^2_{adj} = 0,946$

Zmienne objaśniające	Temperatura zbiornika		
	<i>B</i>	<i>CI</i> 95%	<i>p</i>
(Stała)	-6250,75	-6662,42 do -5839,07	<0,001
Natężenie promieniowania, W/m ²	0,00	0,00 do 0,00	<0,001
Ciśnienie atmosferyczne, hPa	6,35	5,94 do 6,76	<0,001
Temperatura otoczenia, °C	-1,07	-1,16 do -0,99	<0,001
Prędkość wiatru, m/s	-0,28	-0,41 do -0,16	<0,001
Wilgotność, %	-0,24	-0,26 do -0,22	<0,001

gdzie: R^2 -współczynnik determinacji, R^2_{adj} -współczynnik determinacji skorygowany, B -współczynnik regresji niewystandaryzowany; 95% *CI* -przedział ufności 95%, p -wartość p testu statystycznego (Walda).

4.4. Podsumowanie

W rozdziale czwartym przedstawiona została analiza statystyczna przeprowadzona w celu dokładnego zbadania wpływu określonych warunków eksploatacyjnych - takich jak ciśnienie atmosferyczne, temperatura otoczenia, prędkość wiatru, wilgotność i natężenie promieniowania słonecznego - na funkcjonowanie słonecznego systemu grzewczego. Za zmienną zależną w omawianych rozważaniach przyjęto temperaturę wody uzyskiwaną w zasobniku. Poza wskazaniem istotnych statystycznie zależności celem opracowanej analizy było również dostarczenie informacji na temat charakteru tych zależności oraz ogólnej dynamiki działania słonecznego systemu grzewczego. W analizie statystycznej zaadoptowano konwencjonalny próg istotności na poziomie $\alpha = 0,05$, co oznacza, że wyniki z p mniejszą niż 0,05 uznane zostały za statystycznie istotne. Charakterystyka rozkładów poszczególnych zmiennych została szczegółowo przedstawiona przy użyciu kluczowych statystyk opisowych, które dostarczają wyczerpujących informacji o zachowaniu danych. Szczegółowa analiza związków między zestawem zmiennych przedstawiona w oparciu macierz korelacji. Korelacje między parami zmiennych oszacowano przy użyciu rangowego współczynnika korelacji Spearmana. Dodatkowo opisano i porównano ze sobą dwa modele wskazując, że uogólniony model addytywny był bardziej odpowiedni do modelowania badanych zjawisk. Wybór modelu GAM pozwolił na lepsze i wierniejsze uchwycenie nieliniowości badanych zależności, a wnioski z przeprowadzonej analizy statystycznej były kluczowe na dalszych etapach prac. Przeprowadzona analiza statystyczna wskazała, że w dalszej części prac badawczych skupić należy się parametrach o największej zmienności, takich jak natężenie promieniowania słonecznego, które mogą wymagać szczególnego uwzględnienia w modelowaniu i kontroli procesu sterowania w słonecznych systemach grzewczych. Stabilność ciśnienia atmosferycznego i temperatury otoczenia wskazywała na możliwość ich łatwiejszego włączenia do modeli prognostycznych. Z kolei wyższa zmienność prędkości wiatru i wilgotności wymaga zastosowania zaawansowanych metod predykcyjnych w celu minimalizacji niepewności w przewidywaniach.

5. ANALIZA METOD STEROWANIA WYKORZYSTYWANYCH W SŁONECZNYCH SYSTEMACH GRZEWczyCH

5.1. Badania wstępne

W celu przeprowadzenia badań porównawczych metod sterowania w słonecznych systemach grzewczych niezbędne było opracowanie metodyki umożliwiającej dokonanie oceny różnych strategii sterowania w oparciu o uzyskane wyniki pomiarowe. Analiza statystyczna jednoznacznie wykazała, że wielkości uzysków cieplnych słonecznego systemu grzewczego są silnie skorelowane z warunkami atmosferycznymi dlatego też niemiarodajnym byłoby porównywanie ze sobą algorytmów sterowania w odniesieniu do różnych dni pomiarowych. Najistotniejszymi dla procesu sterowania parametrami pogodowymi okazały się promieniowanie słoneczne wraz z miarą jego zmienności w każdej z próbek. W związku z tym przeprowadzono serię testów polowych, a uzyskane wyniki posłużyły do opracowania metodyki, która pozwoliła następnie na dokonanie oceny wpływu wybranego algorytmu sterowania na uzyski ciepłne systemu grzewczego. W celu wyeliminowania wpływu różnic warunków pogodowych w poszczególnych dniach, zaproponowane zostały trzy współczynniki ułatwiające ocenę zebranych danych pomiarowych.

5.1.1. Współczynnik konwersji całkowitej

Pierwszy z zaproponowanych współczynników X_{Sol} zawiera w sobie informację o efektywności konwersji cieplnej zachodzącej w słonecznym systemie grzewczym. Wyrażony jest wzorem:

$$X_{Sol} = \frac{E_z}{E_{rad}} \quad (5.1)$$

gdzie:

E_z - ilość energii cieplnej zgromadzonej w zasobniku w ciągu dnia pomiarowego liczonej według wzoru:

$$E_z = (T_k - T_p) \cdot c_p \cdot M_z \quad (5.2)$$

gdzie:

T_k, T_p - odpowiednio początkowa i końcowa temperatura czynnika,

c_p - ciepło właściwe czynnika roboczego,

M_z - masa czynnika.

Wartość zmiennej E_{rad} opisującej ilość całkowitej energii słonecznej na powierzchni kolektora w określonym okresie badawczym, liczona jest zgodnie z równaniem:

$$E_{rad} = \int_{t_0}^{t_f} G_{\beta} A_c dt \quad (5.3)$$

gdzie:

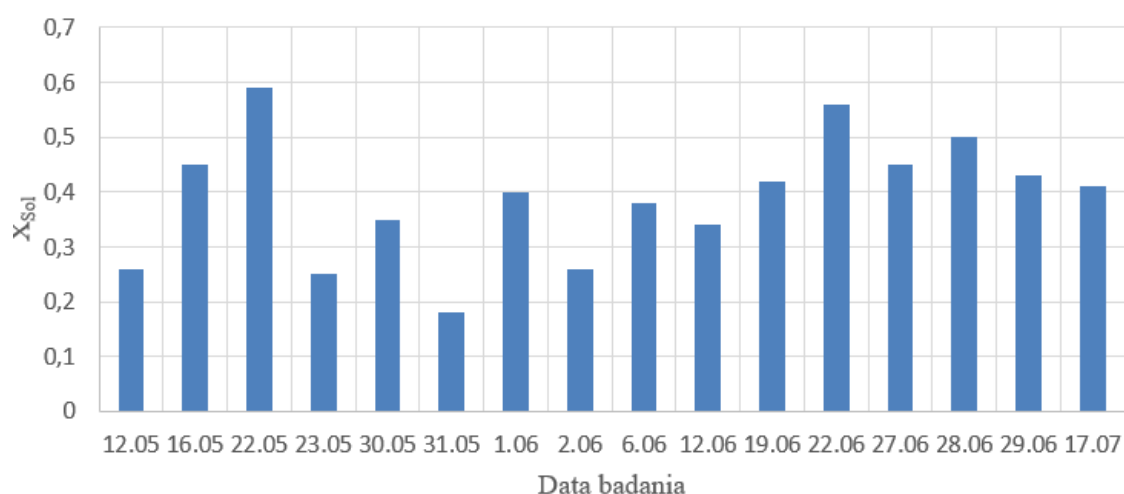
G_{β} - całkowite promieniowanie słoneczne docierające do powierzchni kolektorów,

A_c - powierzchnia apertury kolektorów,

t_0 oraz t_f - odpowiednio początkowy i końcowy czas badania.

Całka z gęstości strumienia promieniowania słonecznego przez powierzchnię apertury kolektorów w dziedzinie czasu pozwala na obliczenie energii promieniowania w dżulach. Wartości te przeliczane były następnie na kWh. Zdefiniowanie takiego współczynnika pozwala wyrazić liczbowo jak efektywnie słoneczny system grzewczy przetwarza energię docierającą bezpośrednio do powierzchni kolektorów słonecznych na energię ciepłą zgromadzoną w zasobniku wodnym. Wartości jakie może on przyjmować mieszczą się w zakresie $0 \leq X_{Sol} \leq 1$. Intuicyjnie im wyższa jest wartość współczynnika efektywności, tym mniejsze straty energetyczne występują w systemie. Najbardziej pożądana wartość współczynnika X_{Sol} wynosi zatem 1. Przypadek taki oznaczałby, iż w słonecznym systemie grzewczym doszło do bezstratnego przetworzenia energii słonecznej w energię ciepłą co w rzeczywistości jest to oczywiście nie możliwe do uzyskania.

Na rysunku 5.1 zaprezentowane zostały obliczone wartości współczynnika X_{Sol} dla grupy wybranych dni pomiarowych w okresie od maja do lipca 2017.



Rys. 5.1. Wartości współczynnika X_{Sol} dla wybranych dni pomiarowych

Jak można zauważyć wartości tego współczynnika podlegały dużym wahaniom - od wartości poniżej 0,2 odnotowanej 31 maja do wartości wynoszącej prawie 0,6 - 22 maja. Świadczy to wyraźnie o dużym zróżnicowaniu efektywności działania systemu grzewczego w różnych okresach czasu. Zaprezentowane dni pomiarowe łączy zastosowana domyślna dla sterownika solarnego proporcjonalna metoda sterowania. Okazuje się, że bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na wartość uzysków cieplnych jest jednak nie tylko potencjał radiacyjny, lecz również sprawność urządzeń wykorzystywanych do przeprowadzania procesu konwersji fototermicznej. W związku z tym zaproponowany został drugi współczynnik, który pozwoliłby na jakościowe uwzględnienie również tego parametru.

5.1.2. Współczynnik efektywności transferu energii

Kolejnym zaproponowanym do oceny efektywności cieplnej słonecznego systemu grzewczego wskaźnikiem był współczynnik efektywności transferu energii $X_{\dot{Q}_u}$. Podobnie jak w przypadku poprzedniego współczynnika X_{Sol} , w liczniku występuje wartość energii cieplnej zgromadzonej w zasobniku wodnym w ciągu dnia pomiarowego, ale zostaje ona odniesiona do wartości energii użytecznej pobranej z kolektorów słonecznych zgodnie z równaniem:

$$X_{\dot{Q}_u} = \frac{E_z}{E_c} \quad (5.4)$$

gdzie:

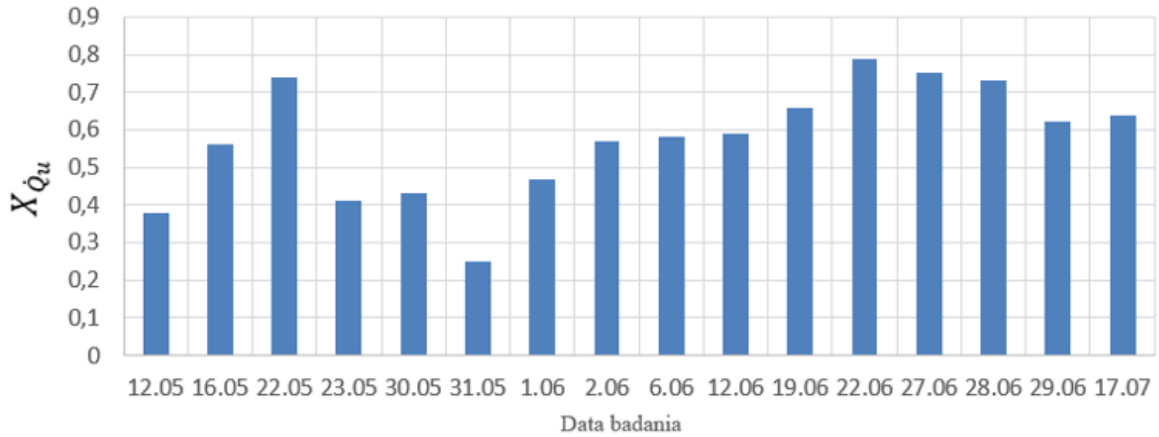
E_z - ilość energii cieplnej zgromadzonej w zasobniku w ciągu dnia pomiarowego,

E_c - ilość energii użytkowej pobranej z kolektorów słonecznych w okresie badania:

$$E_c = \int_{t_0}^{t_f} \dot{Q}_u dt \quad (5.5)$$

Na rysunku 5.2 zaprezentowano wartości jakie przyjmował współczynnik $X_{\dot{Q}_u}$ dla wybranych dni pomiarowych w okresie od maja do lipca.

Relacja pomiędzy dwoma zaprezentowanymi współczynnikami wymaga dodatkowego omówienia. Wartym podkreślenia jest fakt, iż nierówność w postaci $X_{\dot{Q}_u} > X_{Sol}$ będzie zawsze prawdziwa ze względu na straty cieplne oraz sprawność optyczną samych kolektorów słonecznych. Oba przedstawione współczynniki powinny być ze sobą bezpośrednio powiązane, ale jednocześnie przedstawiać różne własności słonecznego systemu grzewczego.



Rys. 5.2. Wartości współczynnika X_{Q_u} dla wybranych dni pomiarowych

Współczynniki X_{Sol} oraz X_{Q_u} mogą zostać wykorzystane do opisanie ilości promieniowania słonecznego docierającego danego dnia pomiarowego do powierzchni kolektorów oraz ilości mocy użytecznej pozyskiwanej tego dnia z kolektorów. Jak wskazała jednak analiza statystyczna, z punktu widzenia strategii sterowania w systemie słonecznym równie ważnym parametrem jest dodatkowo dynamika zmian gęstości strumienia energii słonecznej. W celu opisu tych wahań w trakcie dnia pomiarowego opracowany został trzeci współczynnik E_{var} :

$$E_{var} = \frac{k_{var}}{k_t} \quad (5.6)$$

gdzie:

k_t - łączna liczba próbek czasu (10 s) dokonanych w ciągu doby badawczej,

k_{var} - suma próbek czasu, podczas których pojawiają się zmiany natężenia energii słonecznej, zgodnie z warunkiem:

$$t_{var} = \begin{cases} t_{var} & \Rightarrow |G_{\beta_i} - G_{\beta_{i-1}}| < \Delta G_{cr} \\ t_{var} + 1 & \Rightarrow |G_{\beta_i} - G_{\beta_{i-1}}| \geq \Delta G_{cr} \end{cases} \quad (5.7)$$

gdzie:

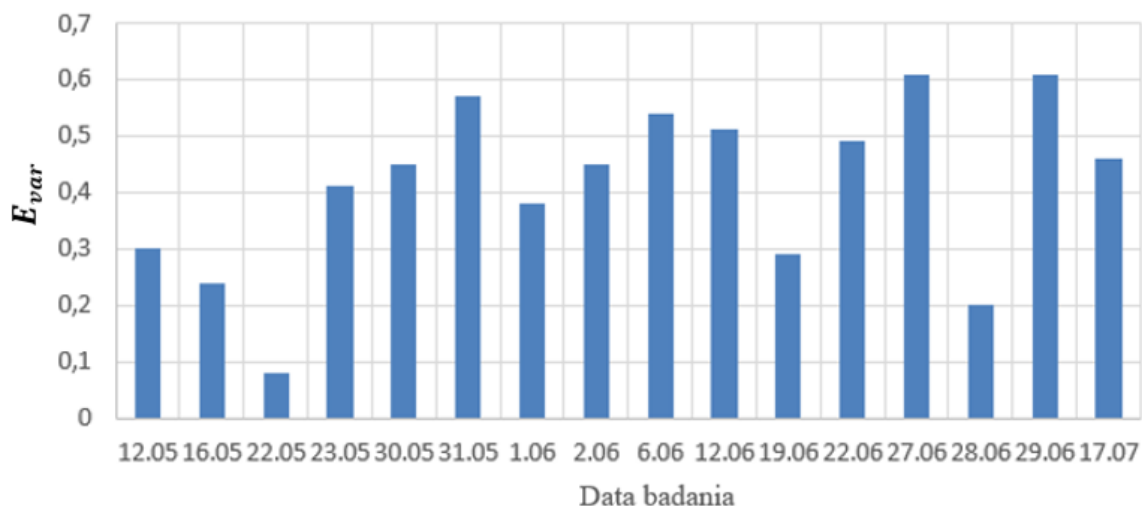
G_{β_i} - globalne natężenie promieniowania zarejestrowanym podczas każdej próbki czasowej,

ΔG_{cr} - wartość progowa zmian natężenia promieniowania, której wartość ustalona została na poziomie $\Delta G_{cr} = 5 \text{ W/m}^2$.

Wartość współczynnika zmienności E_{var} zawiera się w zakresie: $0 \leq E_{var} \leq 1$. Pozwala on określić zmienność docierającego do kolektorów słonecznych promieniowania poprzez porównywanie ze sobą kolejnych odczytów. Wysoka wartość tego współczynnika

wskazuje na bardzo dużą zmienność promieniowania słonecznego w ciągu doby, do której się odnosi. W sytuacji, gdy obliczona w ten sposób wartość współczynnika wynosiłaby 0, oznaczałoby to, że w ciągu dnia badawczego nie zarejestrowano w interwałach 10 s zmian natężenia promieniowania słonecznego wyższych niż wartość graniczna.

Na rysunku 5.3 zaprezentowano obliczone wartości współczynnika E_{var} dla wybranych dni pomiarowych w okresie od maja do lipca.



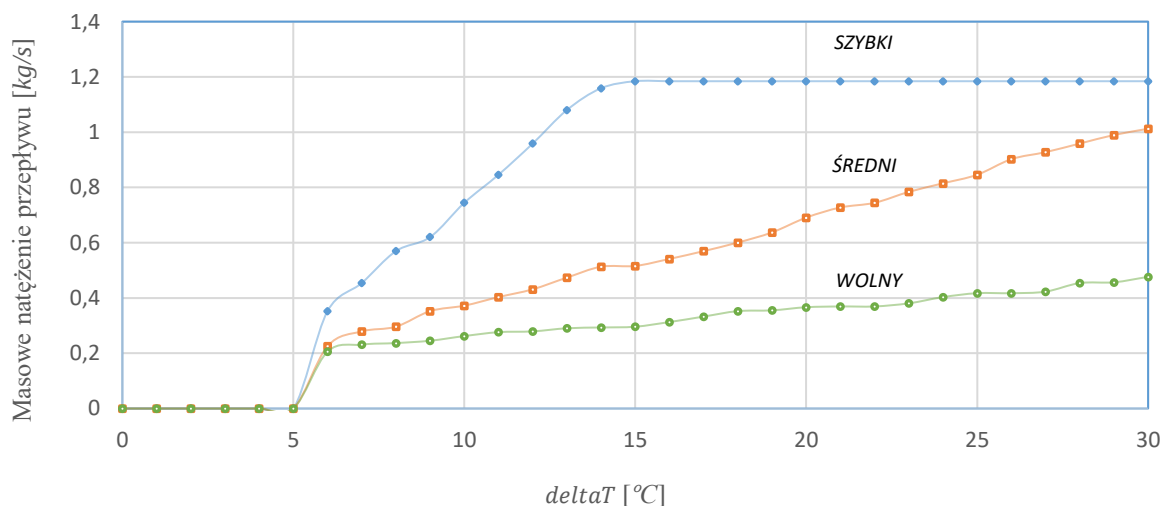
Rys. 5.3. Wartości współczynnika E_{var} dla wybranych dni pomiarowych

Zgodnie z przedstawionymi wynikami większość wybranych dni pomiarowych charakteryzuje się stosunkowo dużymi wahaniami natężenia promieniowania słonecznego. Tylko mała grupa spośród wszystkich zebranych próbek badawczych np. 22 maja oraz 28 czerwca posiadają współczynnik zmienności mniejszy niż 0,2. Sugeruje to trzy możliwe scenariusze: po pierwsze mogły to być bardzo słoneczne dni o małym zachmurzeniu w trakcie przebiegu pomiarów. Drugi możliwy scenariusz przewiduje duże i niezmiennie zachmurzenie, którego skutkiem jest odczyt małej zmienności natężenia promieniowania. Trzecia z możliwych opcji pozwala na zmiany warunków atmosferycznych zachodzące w bardzo stabilnym i powolnym tempie, które to nie zostałyby zarejestrowane przy zaproponowanej metodyce i ustalonych wartościach krytycznych.

Należy tutaj podkreślić, iż samodzielnie żaden z zaproponowanych wskaźników nie niesie w sobie pełnej informacji o warunkach i pracy słonecznego systemu grzewczego. Zestawienie jednak wszystkich zaproponowanych współczynników ze sobą pozwala uzyskać stosunkowo dokładny opis warunków w jakich prowadzone były prace badawcze konkretnego dnia. Zaprojektowane w ten sposób współczynniki wykorzystane zostały podczas oceny strategii sterowania w słonecznych systemach grzewczych.

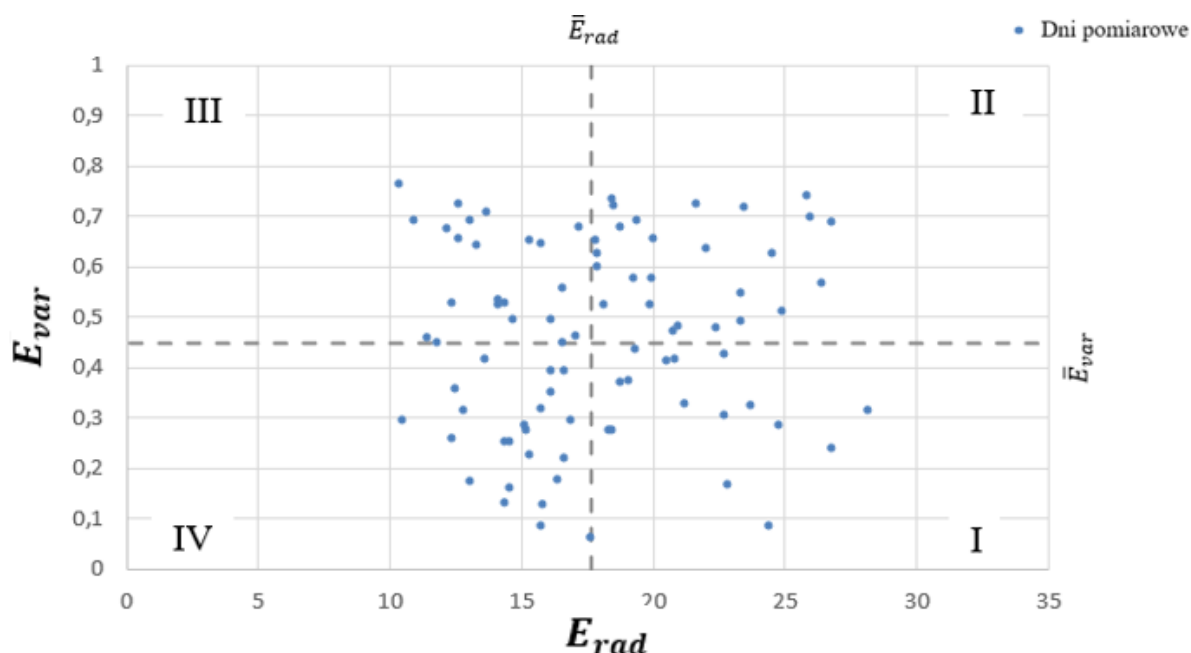
5.1.3. Wyniki badań z wykorzystaniem zaproponowanej metodyki

Kolejnym etapem prac badawczych było przeprowadzenie serii testów eksperymentalnych, które pozwoliłyby na ocenę przydatności zaproponowanej metodyki porównawczej. W tym celu przeprowadzone zostały badania efektywności energetycznej słonecznego systemu grzewczego dla różnych rodzajów sterowania. Podczas tych badań wykorzystywano metodę sterowania proporcjonalnego dla trzech różnych charakterystyk pracy. Sterownik ST-402 PWM firmy Tech zaprogramowano do pracy w trzech różnych trybach, tj. *SZYBKI*, *ŚREDNI* oraz *WOLNY*. Były to tryby jak najbardziej zbliżone do tych używanych w urządzeniach komercyjnych. Przyjęte zależności pomiędzy masowym natężeniem przepływu a parametrem ΔT oraz punkt załączenia pompy do pracy dla każdego z trybów pracy zaprezentowane zostały na rysunku 5.4.



Rys. 5.4. Charakterystyki pracy pompy dla zaproponowanych trybów

Przed każdym rozpoczęciem pomiarów parametry termiczne układu hydraulicznego były sprowadzane do tych samych wartości początkowych. Następnie wybierano jeden z trzech trybów pracy, dla którego rejestrowano wyniki pomiarowe z całego dnia. Tryby pracy sterownika wybierane były jeden po drugim ze zmianą każdego kolejnego dnia. W ten sposób zebrano 91 próbek dni pomiarowych z czego 85 zostało poddanych dalszej analizie. Po zakończeniu prac badawczych zebrane dane pomiarowe zostały podzielone na cztery grupy dni cechujących się podobnymi warunkami atmosferycznymi. Podział, przedstawiony na rysunku 5.5 oparty został o wskaźniki E_{rad} oraz E_{var} opisujące ilość dostępnej na powierzchni kolektorów energii słonecznej oraz zmienność promieniowania.

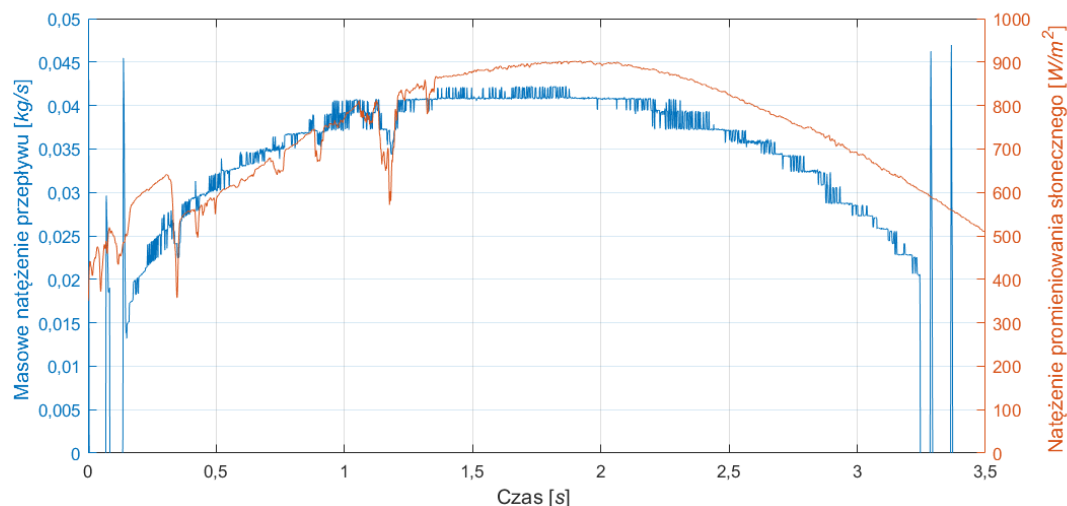


Rys. 5.5. Podział dni na grupy pogodowe

Zaproponowany podział oparty został o średnie wartości omawianych wskaźników. W wyniku takiego działania przestrzeń podzielona została na cztery grupy pogodowe, z których każda cechuje się odmiennymi własnościami. Warto zaznaczyć, że w każdej z omawianych grup znalazła się odpowiednia liczba dni (co najmniej 20), co pozwoliło na użyteczne wykorzystanie wyników oraz wyciąganie wiarygodnych wniosków. Działanie takie umożliwiło klasyfikację dni pomiarowych ze względu na najistotniejsze parametry pogodowe.

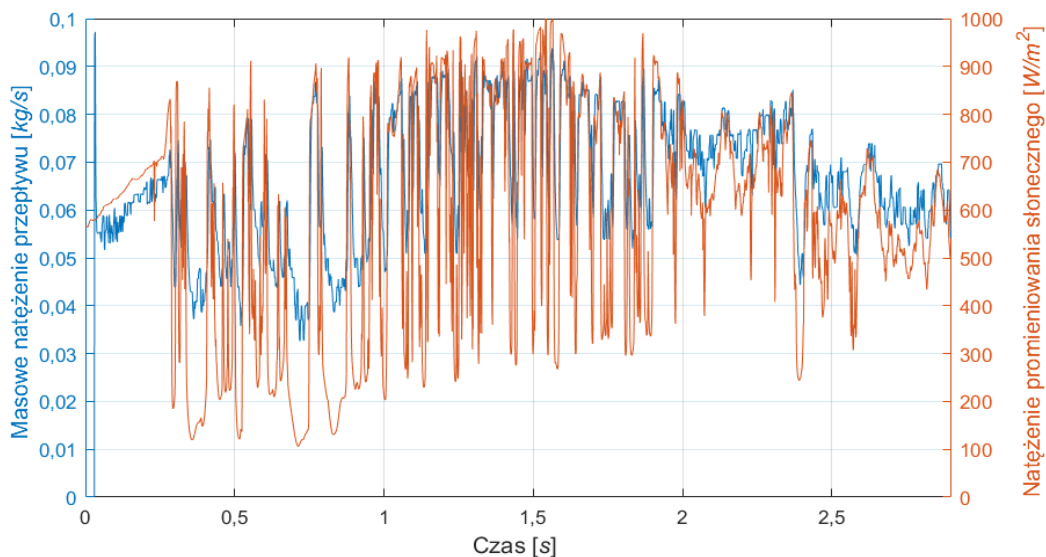
W pierwszej z utworzonych grup (I) dominują pogodne dni o ciągłej, nieprzerywanej operacji słonecznej. Najwyższe uzyskiwane wartości wskaźnika E_{rad} oraz wartościach natężenia promieniowania słonecznego sięgających 1000 W/m^2 wskazują, że są to próbki o najwyższym ze wszystkich zebranych potencjale na uzyski energetyczne. Przykładem dnia o takich parametrach jest 22 maja zaprezentowany na rysunku 5.6.

Na podstawie zebranych danych stwierdzono, że przewagę w tego typu dniach zyskują dynamiczniejsze charakterystyki pracy sterownika solarnego. Tryby SZYBKI oraz ŚREDNI zapewniały sprawny i płynny odbiór energii w panujących warunkach atmosferycznych. WOLNY tryb pracy wyraźnie odstawał od pozostałych i nie pozwalał na wykorzystanie pełni potencjału jaki oferowały tego typu dni. Ze względów ekonomicznych rozsądniejszym okazało się wykorzystywanie w takich warunkach trybu ŚREDNI ze względu na niższe zużycie energii elektrycznej przy zachowaniu zbliżonych uzysków w systemie grzewczym.



Rys. 5.6. Przebiegi czasowe promieniowania słonecznego oraz masowego natężenia przepływu w dniu 22.05.2018

W drugiej grupie warunków pogodowych (II) znalazły się dni o wysokich wartościach wskaźników promieniowania słonecznego oraz zmienności. Utworzony został w ten sposób zbiór dni testowych o dobrym potencjale grzewczym, podczas których panowały sprzyjające warunki promieniowania słonecznego zakłócanie jednak z dużą częstotliwością przez zachmurzenie. Przykładem takiego dnia pomiarowego jest 22 czerwca (rys 5.7).

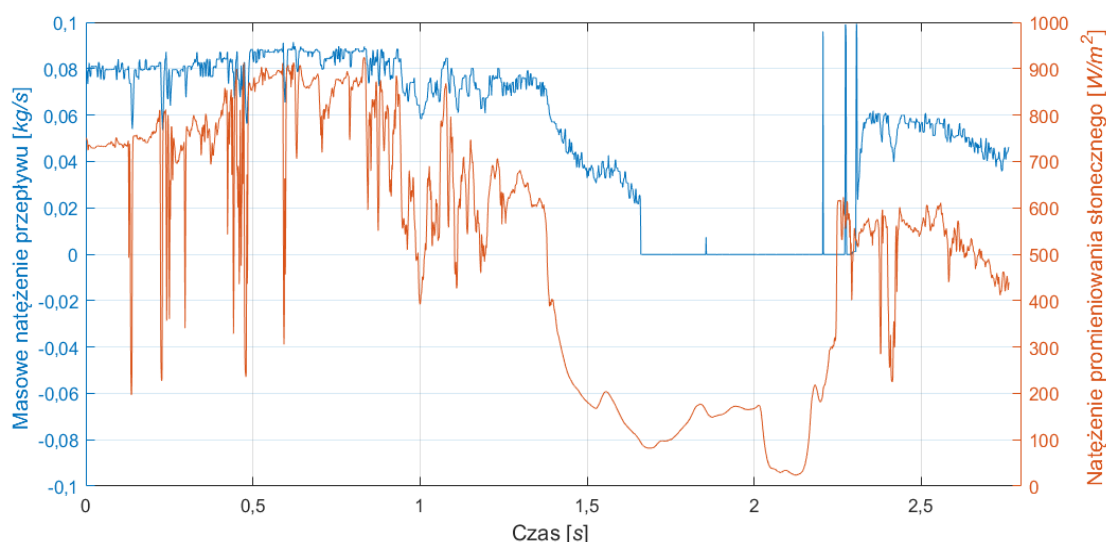


Rys. 5.7. Przebiegi czasowe promieniowania słonecznego oraz masowego natężenia przepływu w dniu 22.06.2018

Najwyższe wartości współczynników oceny X_{Sol} i $X_{\dot{Q}_u}$ odnotowano dla trybu pracy *SZYBKI*. Wyniki takie wynikały z wyższej efektywności transferu energii podczas częstych, ale krótkotrwałych impulsów energii słonecznej do zasobnika. Tryb ten pozwalał grupie pompowej na wygenerowanie wyższych prędkości przetłaczania czynnika roboczego niż w przypadku

dwóch pozostałych ustawień. Przełożyło się to bezpośrednio na skuteczniejsze odbieranie dostępnej energii przez system grzewczy.

Próbki z grupy trzeciej (III) to dni pomiarowe o niskich wartościach wskaźnika E_{rad} oraz wysokich wartościach wskaźnika E_{var} . Oznacza to, że są to dni charakteryzujące się niską intensywnością natężenia promieniowania słonecznego w połączeniu z dużymi wahaniami jego poziomu. Najczęściej były to dni z dużym zachmurzeniem oraz sporadycznymi przejaśnieniami słońca. Warto zauważyć, że uzyskane próbki pomiarowe z tej grupy cechują niższe od średnich wartości natężenia promieniowania słonecznego, co powinno mieć bezpośrednie przełożenie na uzyski energetyczne. Przykładowy wykres zmienności warunków słonecznych wraz z wartościami masowego natężenia przepływu czynnika w systemie hydraulicznym dla wybranego dnia z pierwszej grupy zaprezentowano na rysunku 5.8.

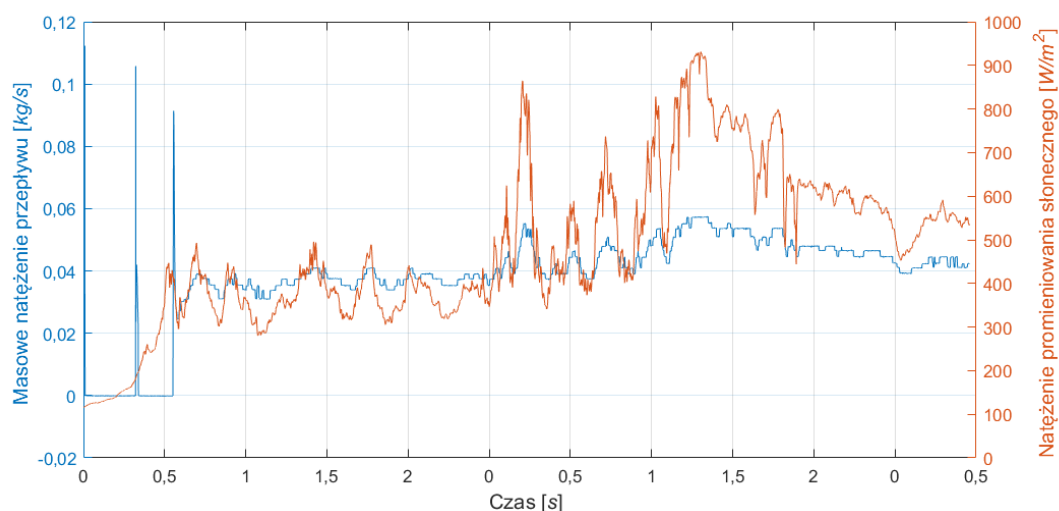


Rys. 5.8. Przebiegi czasowe promieniowania słonecznego oraz masowego natężenia przepływu w dniu 16.05.2018

Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazały, że najlepsze wyniki uzysków energetycznych w tego typu dniach otrzymywane były dla trybu pracy *WOLNY*. W odróżnieniu do pozostałych trybów, nie pozwalał on na dynamiczne a w tym wypadku nieopłacalne przetłaczanie czynnika roboczego. System grzewczy pracujący na trybach *ŚREDNI* oraz *SZYBKI* wykazywał tendencję do uwalniania energii uprzednio zgromadzonej w zasobniku wodnym. Warto podkreślić, że grupa (III) to potencjalnie najtrudniejszy z możliwych scenariuszy dla warunków pracy słonecznego systemu grzewczego. Dzieje się tak ze względu na niski potencjał energetyczny takich dni przy jednocześnie dużej częstotliwości występujących zakłóceń.

Dni z ostatniej, czwartej grupy pogodowej (IV) odznaczają się niższymi niż średnie wartościami wskaźników E_{rad} i E_{var} . W praktyce przekłada się to na pakiet dni o niskiej gęstości

promieniowania słonecznego przy zachowaniu jego dobrej stabilności, czego bardzo dobrym przykładem jest dzień 16 maja zaprezentowany na rysunku 5.9.



Rys. 5.9. Przebiegi czasowe promieniowania słonecznego oraz masowego natężenia przepływu w dniu 16.05.2018

W obrębie tej grupy, zauważono wyraźny wzrost wartości współczynników oceny X_{Sol} oraz $X_{\dot{Q}_u}$ dla niższych wartości masowego natężenia przepływu. Kiedy sterownik solarny pracował w trybie WOLNY, a czynnik roboczy był tłoczony poprzez pętle hydrauliczne kolektora słonecznego z mniejszymi prędkościami, możliwe było uniknięcie krytycznie niskich wartości parametru ΔT . Sytuacje, gdy różnica temperatur pomiędzy zasobnikiem a kolektorem zbliżała się do 0 (częstsze dla trybów ŚREDNI i SZYBKI) skutkowały rozłączaniem grupy pompy oraz niepotrzebnymi przerwami w pracy systemu grzewczego. Wznowienie pracy system następowało dopiero po chwili potrzebnej na powtórny wzrost różnicy temperatur kolektor-zasobnik.

Dodatkowe wyniki prac badawczych w zakresie opracowanej metodyki badań wraz z omówionymi efektami jej wykorzystania zaprezentowano w [178].

5.1.4. Ocena skuteczności zaproponowanej metodyki

Pełne zestawienie średnich wartości współczynników X_{Sol} oraz $X_{\dot{Q}_u}$ obliczonych dla wszystkich analizowanych dni pomiarowych zawarte zostało w tabeli 14. Uśrednione wartości współczynników obliczone zostały dla każdej z grup dwukrotnie. Pierwsza średnia wyliczana była dla wszystkich dni branych pod uwagę w danej grupie warunków pogodowych, druga zaś osobno dla dni z określonego trybu sterowania w obrębie grupy. W każdej z grup odnotowano zauważalne różnice pomiędzy wartościami współczynników X_{Sol} i $X_{\dot{Q}_u}$ w zależności od trybu pracy sterownika.

Tabela 14. Zestawienie uśrednionych wartości współczynników dla różnych grup pogodowych

Grupa pogodowa	Średnia dla grup pogodowych		Najefektywniejszy tryb sterowania	Średnia dla najefektywniejszego trybu	
	$\bar{X}_{Sol}$	$\bar{X}_{\dot{Q}_u}$		$\bar{X}_{Sol}$	$\bar{X}_{\dot{Q}_u}$
I	0,54	0,66	ŚREDNI	0,61	0,74
II	0,39	0,61	SZYBKI	0,45	0,70
III	0,57	0,63	WOLNY	0,59	0,76
IV	0,36	0,55	WOLNY	0,41	0,64

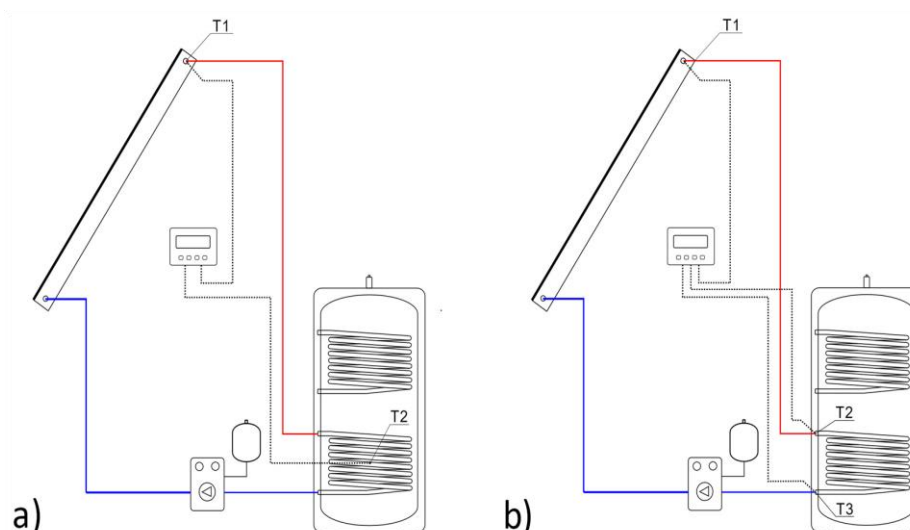
W grupie pierwszej średnie wyniki współczynników obliczone dla najefektywniejszego trybu pracy sterownika (średni) okazały się wyższe o około 13% i 12% odpowiednio dla współczynników $\bar{X}_{Sol}$ oraz $\bar{X}_{\dot{Q}_u}$. Oznacza to, że średni tryb pracy sterownika zastosowany dla dni z pierwszej grupy pogodowej mógłby przynieść zauważalnie lepsze uzyski energetyczne. W drugiej grupie pogodowej najlepszy okazał się najszybszy z trybów pracy sterownika. Przełożyło się to na wzrosty na poziomach 15% i 14,7% względem ogólnej średniej. Może to wskazywać, że w dniach z grupy drugiej, a więc tych o silnym, lecz zmiennym promieniowaniu, przyspieszenie pracy pompy skutkuje ogólną poprawą efektywności działania słonecznego systemu grzewczego. W obrębie grupy trzeciej zawierającej dni z niską wartością promieniowania i jednocześnie dużymi wahaniami operacji słonecznej wskazany został najwolniejszy z trybów pracy. Dodatkowo okazało się, że przyrosty były skrajnie różne: 3% dla $\bar{X}_{Sol}$ oraz 20% dla $\bar{X}_{\dot{Q}_u}$. Może to sugerować, że jeden z zaproponowanych współczynników jest bardziej wrażliwy na spowolnienie pracy pompy niż ten drugi. W ostatniej z analizowanych grup obliczono wzrosty na poziomach 13,9% i 16%, które nie odbiegają już w tak zauważalny sposób od siebie i jednocześnie wyraźnie wskazują, że dostosowanie trybu pracy sterownika do warunków konkretnej grupy znacząco wpływa na pracę systemu grzewczego.

Warto również podkreślić, iż dzięki wykorzystaniu zaproponowanej metodyki, bazując na otrzymanych wynikach, sformułować można wskazania dotyczące najefektywniejszych trybów w każdej z omawianych grup pogodowych. Możliwym stało się również porównywanie pomiędzy sobą rozpatrywanych sposobów sterowania i zmniejszenie ogólnego wpływu warunków atmosferycznych na ostateczną ocenę konkretnego trybu sterowania. W związku z pozytywną oceną skuteczności przyjętej metodyki, została ona wykorzystana na dalszych etapach prac badawczych jako narzędzie umożliwiające porównywanie ze sobą różnych metod sterowania wykorzystywanych w słonecznych systemach grzewczych.

5.2. Omówienie analizowanych metod sterowania

Kolejnym etapem prac badawczych było wykorzystanie zaproponowanej metodyki w celu porównania ze sobą różnych metod sterowania. W celu zrealizowania klasycznego sterowania proporcjonalnego wykorzystuje się dwie informacje z słonecznego systemu grzewczego. Są nimi wartości temperatur na kolektorze ($T1$) oraz w zasobniku ($T2$). Następnie, proporcjonalnie do wartości różnicy tych temperatur ($T1 - T2$),ysterowana zostaje praca grupy pompowej. Zależność funkcyjna pomiędzy różnicą temperatur a prędkością z jaką pompa tłoczy czynnik roboczy w układzie hydraulicznym określona jest w postaci charakterystyki pracy pompy.

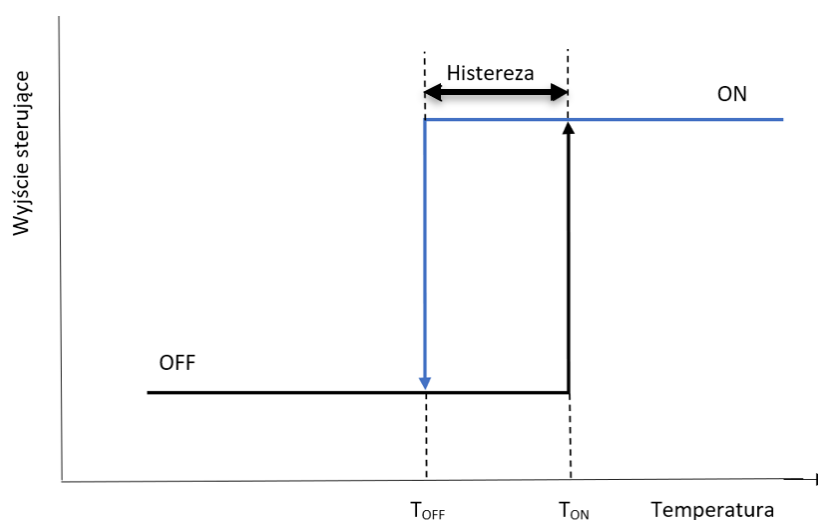
W trakcie badań wstępnych zaobserwowano pewien istotny problem występujący podczas pracy systemu grzewczego. Istota problemu polegała na tym, że obie klasyczne metody sterowania (dwustanowa oraz proporcjonalna) dopuszczają do wystąpienia tzw. dryfu termicznego. Zjawisko to polega na odpływie skumulowanej uprzednio energii cieplnej z zasobników wodnych z powrotem do pętli kolektorów słonecznych i obserwowane jest głównie przy dużych obciążeniach cieplnych. Brak informacji dotyczących temperatury na węzownicy uniemożliwia systemowi sterowania pokonanie takiego problemu. W związku z tym zaproponowana została pewna modyfikacja w systemie sterowania, której celem było wyeliminowanie lub zmniejszenie wpływu tego negatywnego efektu. W przeciwieństwie do poprzedniej metody, proponowany sposób sterowania (IPC - Indirect Proportional Control) wykorzystuje dodatkowe informacje dostarczane przez trzeci czujnik temperatury przedstawiony na rysunku 5.10b. W tym nowym podejściu, sterowanie pompą obiegową uzależnione jest również od różnicy temperatur kolektor - zasobnik, ale tym razem temperaturę zasobnika zdefiniowano jako różnicę temperatur czynnika roboczego na węzownicy wlotowej i wylotowej wymiennika ($T2 - T3$). To nowe podejście pozwala na uwzględnienie dodatkowych, bardzo ważnych z punktu widzenia strategii sterowania informacji. Pierwsza korzyść płynąca z zastosowania tego rozwiązania związana jest z temperaturą czynnika roboczego w zasobniku. W tym przypadku jej wartość jest ustalana w sposób pośredni przy wykorzystaniu pomiarów temperatur na węzownicy wymiennika solarnego. Umożliwia to skuteczniejszy proces kontrolowania energii jaka przekazywana jest do samego czynnika. Druga z zalet polega ujęciu w procesie sterowania dodatkowej informacji poziomu strat ciepła w pętli hydraulicznej. Zestawienie obu układów przedstawiono na rysunku 5.10.



Rys. 5.10. Zestawienie badanych systemów sterowania. Układ klasycznego (a) oraz zaproponowanego systemu sterowania (b)

W związku z powyższym w dalszych rozdziałach pracy, skupiono się na analizie trzech metod sterowania w słonecznych systemach grzewczych, tj. ON-OFF, sterowanie proporcjonalne oraz IPC.

Metoda sterowania dwustanowego zaimplementowana w sterownikach słonecznych polega na zdefiniowaniu wartości ΔT , po przekroczeniu której urządzenie załączy pompę hydrauliczną z maksymalną możliwą prędkością pracy. Dodatkowo bardzo często punkt załączenia pompy do pracy nie pokrywa się z punktem rozłączenia pracującej pompy. Taka własność w technice nazywana jest histerezą. Wykorzystując ową metodę pompa może przyjmować jedynie dwa określone stany: włączona i wyłączona. Największymi zaletami takiego sposobu sterowania są niepodważalna prostota i łatwość implementacji. Schemat działania metody ON-OFF przedstawiono na rysunku 5.11.



Rys. 5.11. Schemat działania metody ON-OFF

Badania metody ON-OFF przeprowadzone zostały z wykorzystaniem przemysłowego kontrolera dwustanowego ESCO PT-20+ (rys.5.12).



Rys. 5.12. Solarny kontroler dwustanowy ESCO PT-20+

Urządzenie to stanowi typowy przykład regulatora różnicowego. Zakres pomiarowy kontrolera PT-20+ wynosi od -50 do 370 °C. Model ten jest przystosowany do pracy z rezystancyjnymi czujnikami temperatury Pt100. Producent urządzenia deklaruje, że umożliwia ono regulację temperatury w systemach grzewczych z dokładnością do $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Podstawowym modulem urządzenia jest 16 amperowy przekaźnik o mocy 3,6 kW oraz żywotności 100 tysięcy cykli. Dodatkowo umożliwia on regulację dwustanową z ustawieniem histerezy załącz/rozłącz. Pełna specyfikacja wykorzystywanego sterownika przedstawiona została w tabeli 15.

Tabela 15. Specyfikacja sterownika ESCO PT-20+

Wejścia:	wejście: Pt100 wejście cyfrowe (normalnie zwarte lub rozwarte)
Zakres pomiarowy:	-30...+370 °C
Dokładność pomiaru:	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
Okres próbkowania:	330 ms
Rozdzielczość wskazań:	0,1 °Cw całym zakresie
Rozdzielczość nastawy:	0,1 °Cw całym zakresie
Wyświetlacz:	LED, 4 cyfry o wysokości 11mm z ikonami graficznymi
Metoda regulacji:	ON-OFF z histerezą
Stopień i klasa ochrony:	IP65 / II
Zasilanie:	230VAC $\pm 15\%$ lub 12VAC/DC lub 24AC/DC, max 3VA
Warunki pracy:	-5...60 °C; 0...85% RH (bez kondensacji)
Warunki składowania:	-40...85 °C; 0...85% RH (bez kondensacji)

Implementacja sterowania za pomocą metody proporcjonalnej zrealizowana została z wykorzystaniem sterownika solarnego ST-402n firmy Tech (rys.5.13). Sterownik ten stanowi wyspecjalizowane urządzenie przeznaczone do szerokiej gamy zastosowań regulacyjnych

w słonecznych systemach grzewczych. Z punktu widzenia realizowanych badań jego najważniejsza funkcjonalność to możliwość dostosowywania obrotów roboczych pompy do parametru ΔT . Sterownik ten posiada 10 (1-10) zaprogramowanych przez producenta biegów, pod którymi kryją się różne charakterystyki pracy pompy. Wybrane wartości zadeklarowane przez producenta w karcie katalogowej urządzenia przedstawiono w tabeli 16.



Rys. 5.13. Sterownik solarny Tech ST-402n

Możliwe jest podłączenie do niego dodatkowego urządzenia, tj. pompy obiegowej, grzałki elektrycznej lub podanie sygnału do kotła c.o. w celu jego rozpalenia. Urządzenie to współpracuje z dwoma czujnikami temperatury Pt1000 oraz umożliwia regulację temperatury w zakresie od - 8°C do 90°C.

Tabela 16. Zestawienie przykładowych parametrów pracy sterownika solarnego ST-402n

	Współczynnik biegów 3	Współczynnik biegów 4	Współczynnik biegów 5	Obroty robocze pompy
ΔT (kolektor – zasobnik)	$\Delta 3$	$\Delta 4$	$\Delta 5$	10%
	$\Delta 6$	$\Delta 8$	$\Delta 10$	20%
	$\Delta 9$	$\Delta 12$	$\Delta 15$	30%
	$\Delta 12$	$\Delta 16$	$\Delta 20$	40%
	$\Delta 15$	$\Delta 20$	$\Delta 25$	50%

W celu przeprowadzenia badań z wykorzystaniem zaproponowanej metody IPC wybrano trzecie urządzenie, które pozwoliło na sterowanie wydajnością pompy cyrkulacyjnej w sposób uzależniający pracę pompy od intensywności wymiany ciepła przez węzownicę podgrzewacza c.w.u. Sterownik G-425-P01 Geco (rys. 5.14) współpracował z trzema czujnikami temperatury

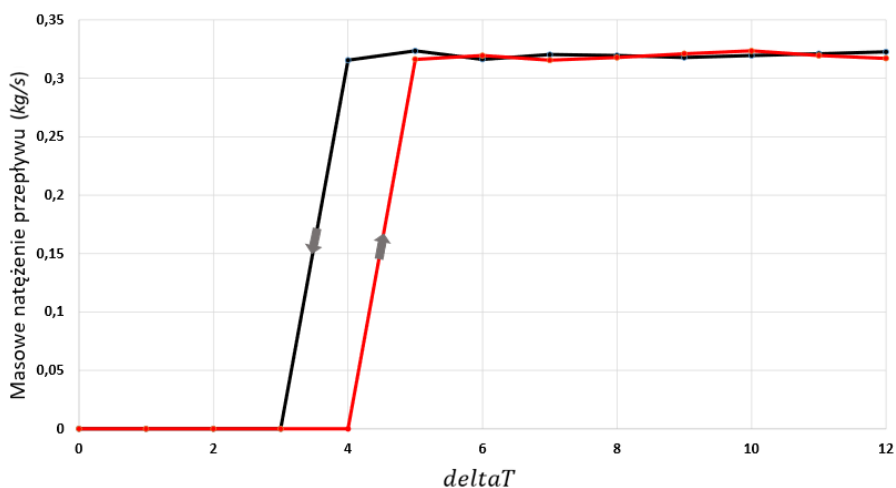
Pt1000, stale analizującymi zmiany temperatur w kolektorach słonecznych, na zasilaniu oraz powrocie z wężownicy.



Rys. 5.14. Sterownik G-425-P01 Geco

Podczas eksperymentalnych testów sterowników solarnych nie rejestrowano zużycia energii cieplnej przez system. Skuteczność algorytmu sterowania została oceniona na podstawie końcowej temperatury czynnika roboczego w zbiorniku. Na koniec dnia pomiarowego dane były zapisywane, a układ hydrauliczny schładzany do warunków początkowych. Po testach sterownik był wymieniany na inny z testowanej grupy. W czasie prac badawczych orientacja układu kolektorów słonecznych została ustalona na azymut południowy, a kąt nachylenia w stosunku do płaszczyzny horyzontu $\beta = 40^\circ$.

Pierwsza zmierzona charakterystyka masowego natężenia przepływu czynnika roboczego w funkcji różnicy temperatur dotyczyła regulatora ESCO PT-20+. Urządzenie należy do grupy termostatów różnicowych, które sterują pracą pompy w trybie ON-OFF. Sterownik umożliwia ustawienie wartości załączenia i wyłączenia pompy. Wyniki pomiarów charakterystyki masowego natężenia przepływu w funkcji różnicy temperatur ΔT przedstawiono na rysunku 5.15.

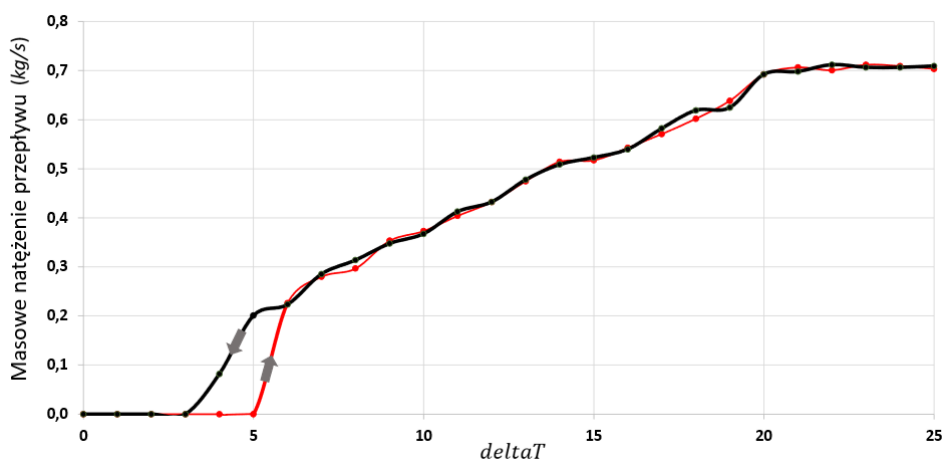


Rys. 5.15. Wyniki pomiarów charakterystyki masowego natężenia przepływu w funkcji różnicy temperatur

Po przekroczeniu progu załączenia pompa jest uruchamiana z maksymalną mocą wyjściową. Próg załączenia grupy pompowej do pracy ($T_{ON} = 4^{\circ}\text{C}$) ustawiony był na wyższą wartość niż próg wyłączenia ($T_{OFF} = 3^{\circ}\text{C}$). Pozwoliło to uniknąć w systemie grzewczym krótkotrwałych cykli pompowania określanych fachowo jako zjawisko short-cycling.

Przed przetestowaniem charakterystyki sterownika proporcjonalnego Tech ST-420n, próg włączenia i próg wyłączenia zostały skonfigurowane na takie same wartości jak w przypadku sterownika ON-OFF w celu uniknięcia wpływu zmiany tego parametru na działanie systemu. Charakterystykę sterownika proporcjonalnego przedstawiono na rysunku 5.16.

W przypadku sterowania proporcjonalnego, po przekroczeniu wartości progowej załączenia zadaniem grupy pompowej jest wymuszenie przepływu w układzie proporcjonalnego do wartości parametru ΔT . Zauważyć można, że wzrost różnicy temperatur powoduje proporcjonalny wzrost masowego natężenia przepływu czynnika roboczego w układzie. Zależność ta jest liniowa aż do osiągnięcia wartości nasycenia 0,7 kg/s. Maksymalne osiągane masowe natężenie przepływu jest mniejsze niż w przypadku regulatora dwustanowego. Podobnie jak w przypadku poprzedniego sterownika, ustawienie różnych wartości progu włączenia i progu wyłączenia powoduje histerezę sterowania.

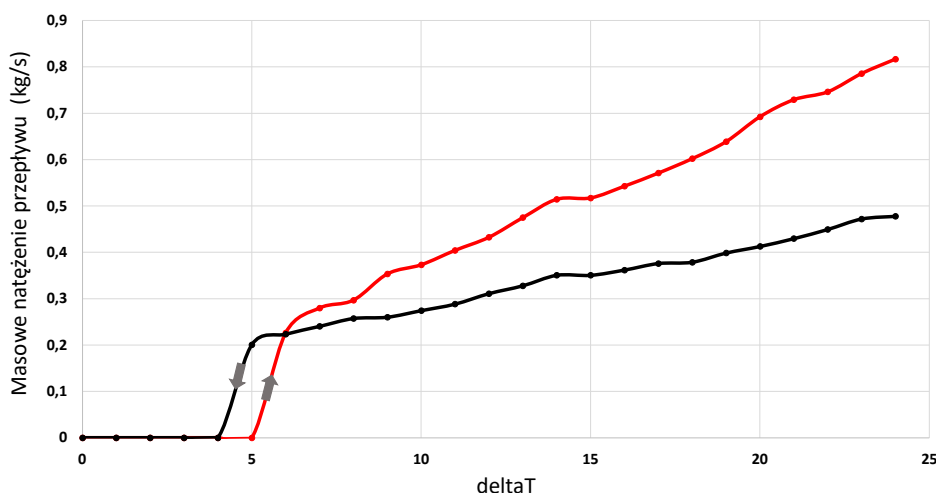


Rys. 5.16. Wyniki pomiarów charakterystyki masowego natężenia przepływu w funkcji różnicy temperatur

Ostatnie badanie dotyczyło charakterystyki sterownika IPC. Sterownik ten pozwala również na określenie warunków rozruchu i wyłączenia pompy. Uruchomienie pompy wymaga spełnienia dwóch niezależnych warunków (5.8):

$$\begin{cases} T_{COIL_INPUT} - T_{COIL_OUTPUT} > 5 \\ T_{COLLECTOR} - T_{TANK} > 5 \end{cases} \quad (5.8)$$

W przeciwieństwie do klasycznych sterowników, różnica temperatur kolektor-zbiornik nie jest jedynym kryterium uruchomienia systemu. Konieczne jest również osiągnięcie wymaganej różnicy temperatur pomiędzy wejściem i wyjściem węzownicy wymiennika solarnego. Charakterystykę, według której pracował sterownik IPC przedstawiono na rysunku 5.17.



Rys. 5.17. Wyniki pomiarów charakterystyki masowego natężenia przepływu w funkcji różnicy temperatur sterownika IPC

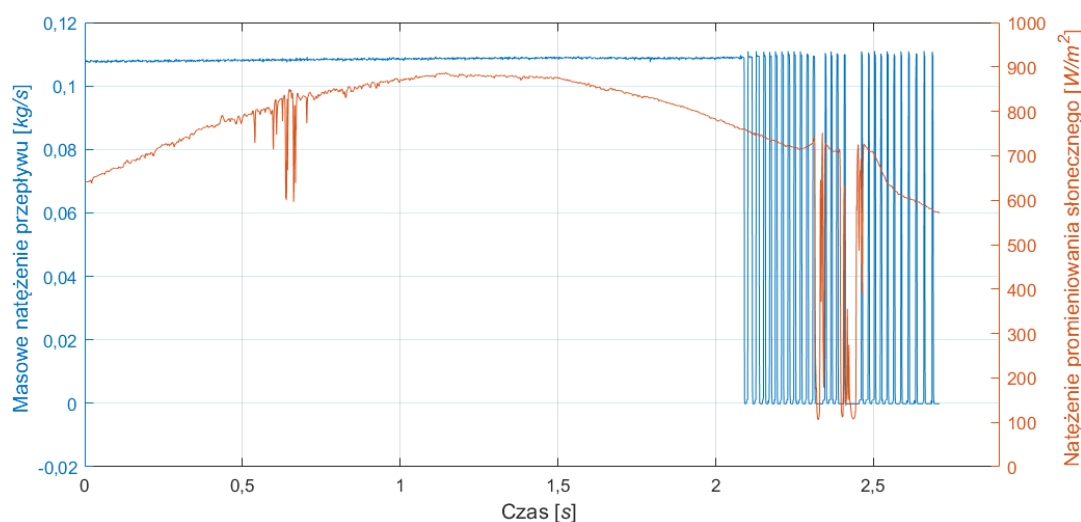
Z wykorzystaniem trzech omówionych kontrolerów przeprowadzone zostały dalsze badania eksperymentalne. Prace badawcze z tego etapu realizowano w warunkach naturalnych w okresie od wiosny 2017 r. do jesieni 2022 r. W badaniach eksperymentalnych wykorzystano trzy sterowniki solarne z różnymi algorytmami sterowania. Badania eksperymentalne były każdorazowo poprzedzone określeniem początkowych warunków termodynamicznych układu testowego. Temperatura czynnika roboczego została obniżona do $T_{init} = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ w celu wyeliminowania wpływu warunków początkowych na wyniki testów. Podczas testów zewnętrznych rejestrowano temperatury na wylocie i wlocie do układu kolektorów słonecznych, temperaturę czynnika na wlocie, wylocie i wewnątrz zbiornika wody, a także temperaturę otoczenia układu kolektorów słonecznych. Ponadto rejestrowano również wartości globalnego natężenia promieniowania słonecznego, prędkości wiatru, wilgotności względnej, ciśnienia i masowego natężenia przepływu czynnika roboczego. Dane pomiarowe były rejestrowane z częstotliwością 1 Hz i zapisywane jako macierz danych dla każdego dnia pomiarowego. W wyniku przeprowadzonych prac eksperymentalnych zebrano 172 próbki testowe w postaci dni pomiarowych, które następnie podzielono na cztery grupy pogodowe wykorzystując zaproponowany klasyfikator. Podsumowanie wyników badań eksperymentalnych przeprowadzonych dla różnych metod sterowania słonecznym systemem grzewczym przedstawiono w tabeli 17.

Tabela 17. Zestawienie wyników badań eksperymentalnych

Grupa pogodowa	Metoda sterowania	Ilość dni	Średnia końcowa temperatura czynnika w zasobniku °C								
I	ON-OFF	13	<table><tr><th>Metoda sterowania</th><th>Średnia końcowa temperatura czynnika w zasobniku °C</th></tr><tr><td>ON-OFF</td><td>57,4</td></tr><tr><td>PROPORCJONALNE</td><td>54,1</td></tr><tr><td>IPC</td><td>53,9</td></tr></table>	Metoda sterowania	Średnia końcowa temperatura czynnika w zasobniku °C	ON-OFF	57,4	PROPORCJONALNE	54,1	IPC	53,9
	Metoda sterowania	Średnia końcowa temperatura czynnika w zasobniku °C									
	ON-OFF	57,4									
PROPORCJONALNE	54,1										
IPC	53,9										
PROPORCJONALNE	13										
IPC	10										
II	ON-OFF	14	<table><tr><th>Metoda sterowania</th><th>Średnia końcowa temperatura czynnika w zasobniku °C</th></tr><tr><td>ON-OFF</td><td>50,3</td></tr><tr><td>PROPORCJONALNE</td><td>52,5</td></tr><tr><td>IPC</td><td>55,1</td></tr></table>	Metoda sterowania	Średnia końcowa temperatura czynnika w zasobniku °C	ON-OFF	50,3	PROPORCJONALNE	52,5	IPC	55,1
	Metoda sterowania	Średnia końcowa temperatura czynnika w zasobniku °C									
	ON-OFF	50,3									
PROPORCJONALNE	52,5										
IPC	55,1										
PROPORCJONALNE	18										
IPC	15										
III	ON-OFF	20	<table><tr><th>Metoda sterowania</th><th>Średnia końcowa temperatura czynnika w zasobniku °C</th></tr><tr><td>ON-OFF</td><td>44,2</td></tr><tr><td>PROPORCJONALNE</td><td>47,9</td></tr><tr><td>IPC</td><td>47,8</td></tr></table>	Metoda sterowania	Średnia końcowa temperatura czynnika w zasobniku °C	ON-OFF	44,2	PROPORCJONALNE	47,9	IPC	47,8
	Metoda sterowania	Średnia końcowa temperatura czynnika w zasobniku °C									
	ON-OFF	44,2									
PROPORCJONALNE	47,9										
IPC	47,8										
PROPORCJONALNE	13										
IPC	18										
IV	ON-OFF	15	<table><tr><th>Metoda sterowania</th><th>Średnia końcowa temperatura czynnika w zasobniku °C</th></tr><tr><td>ON-OFF</td><td>45,2</td></tr><tr><td>PROPORCJONALNE</td><td>49,5</td></tr><tr><td>IPC</td><td>49,7</td></tr></table>	Metoda sterowania	Średnia końcowa temperatura czynnika w zasobniku °C	ON-OFF	45,2	PROPORCJONALNE	49,5	IPC	49,7
	Metoda sterowania	Średnia końcowa temperatura czynnika w zasobniku °C									
	ON-OFF	45,2									
PROPORCJONALNE	49,5										
IPC	49,7										
PROPORCJONALNE	10										
IPC	13										

Grupa I:

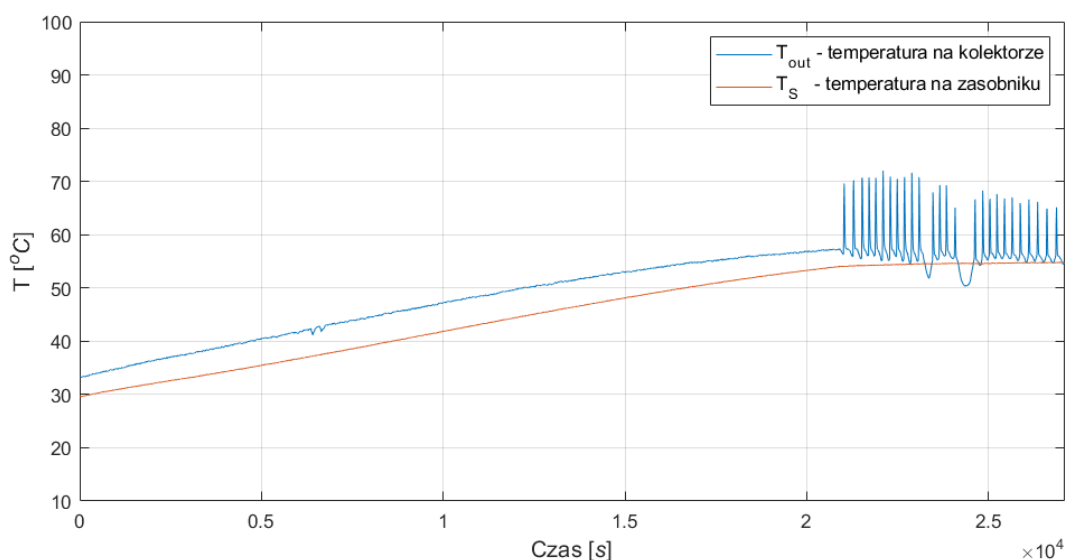
Stwierdzono, że w grupie pierwszej, która cechuje się najlepszymi warunkami pogodowymi (wysoka wartość promieniowania połączona z niskimi wahaniami operacji słonecznej), najprostsza z dostępnych metod sterowania (ON-OFF) okazała się zdecydowanie najlepsza. Wyniki jakie oferuje regulator dwustanowy przewyższają wyniki uzyskane przy pomocy bardziej złożonych regulatorów proporcjonalnego i IPC o około 6%. W oparciu o uzyskane pomiary można stwierdzić, że w dobrych i stabilnych warunkach promieniowania słonecznego najważniejszym aspektem okazuje się efektywne przekazywanie ciepła z układu kolektorów słonecznych do zbiorników magazynujących wodę. Najlepszym sposobem na zapewnienie odpowiedniej efektywności transferu energii okazuje się zadanie przez regulator solarny wysokich wartości masowego natężenia przepływu. Ponadto należy zauważyć, że oba regulatory proporcjonalne dały podobne i zauważalnie gorsze wyniki w odniesieniu do regulatora dwustanowego. Różnice w zastosowanych algorytmach proporcjonalnych nie miały w tej grupie pogodowej wyraźnego wpływu na efektywność słonecznego systemu grzewczego. Oznacza to, że zaproponowana modyfikacja nie przyniosła istotnych korzyści w omawianej grupie warunków pogodowych. Dane pomiarowe obejmujące zmiany natężenia promieniowania słonecznego oraz masowego natężenia przepływu zebrane dla tego przykładowego dnia z I grupy (12.06) zaprezentowano na rysunku 5.18.



Rys. 5.18. Wyniki pomiarów operacji słonecznej oraz masowego natężenia przepływu w dniu 12 czerwca.
Metoda sterowania: ON-OFF

Zauważyć należy również wzrost temperatury czynnika w zasobniku podążający za wzrostem temperatury czynnika na wyjściu z baterii kolektorów słonecznych (rysunek 5.19). Temperatura na kolektorze płynnie wzrasta w ciągu dnia pomiarowego. Widoczne wahania wskazują prawdopodobnie na momenty, gdy regulator dwustanowy włącza i wyłącza grupę

pompową zgodnie z algorytmem działania. Zauważyć można również, że system sterowania cechował się bardzo dynamicznymi reakcjami na wahania warunków widoczne na wykresie natężenia promieniowania słonecznego pod koniec dnia. Częste włączanie i wyłączanie systemu nie są jednak pożądanym zjawiskiem z punktu widzenia eksploatacji systemu grzewczego. Może to doprowadzić do uszkodzenia elementów systemu. Temperatura zasobnika rośnie w zauważalnie wolniejszym tempie niż temperatura kolektora. Poza tym stabilizuje się ona ostatecznie na niższym poziomie temperatury. Obserwowane zachowanie jest charakterystyczne dla tego typu układów i wynika z bezwładności czasowej jaką wprowadza konieczność przetransportowania energii z jednego miejsca słonecznego systemu grzewczego do miejsca docelowego, czyli zasobników.

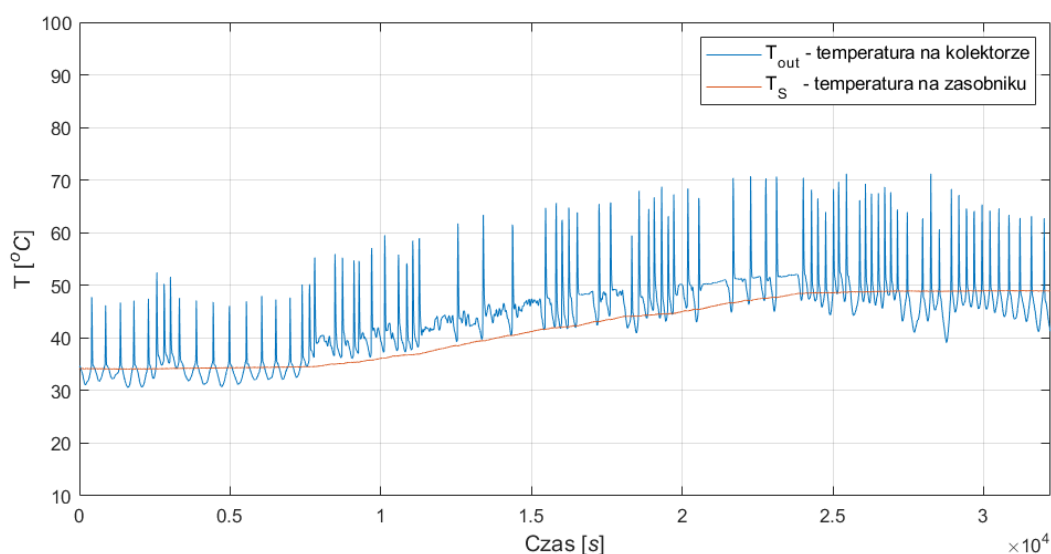


Rys. 5.19. Wyniki pomiarów temperatur na kolektorze i zasobniku w dniu 12 czerwca.

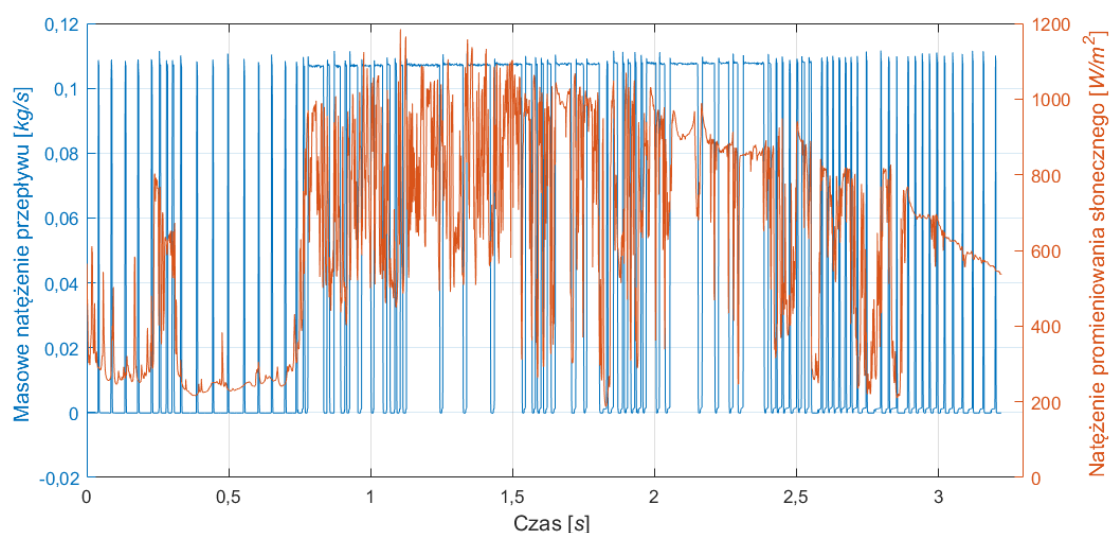
Grupa II:

Wyniki dla drugiej analizowanej grupy pogodowej wykazują znaczną redukcję końcowej temperatury osiąganą w zasobnikach wodnych. Wynika to z dużej zmienności promieniowania słonecznego, która charakteryzuje tę grupę. Można zaobserwować, że w warunkach znacznej zmienności nasłonecznienia sterowanie ON-OFF nie jest już najlepszym wyborem. Częste przesterowywanie grupy pompowej może nie nadążać za szybkimi zmianami warunków. Najlepszą w takich warunkach okazała się zaproponowana metoda sterowania IPC. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest uwzględnienie w procesie sterowania informacji na temat temperatur czynnika na wejściu i wyjściu węzownicy wymiennika. Pozwala to na precyzyjniejsze dostosowywanie pracy systemu do zmienności otoczenia. W takich warunkach energia słoneczna nie jest również najefektywniej wykorzystywana przez standardowy regulator proporcjonalny, którego to wykorzystanie skutkuje niezamierzonym i niepożądanym wyprowadzaniem ciepła

z systemu (dryf termiczny). Dzieje się tak szczególnie wtedy, gdy zgromadzona energia dociera do górnej części słonecznego wymiennika ciepła. Problem ten jest bardzo z punktu widzenia projektowania skutecznych metod sterowania słonecznymi systemami grzewczymi. Zgodnie z wynikami badań zaproponowane rozwiązanie zapobiega temu zjawisku. W sytuacji, kiedy na węzownicy zostanie wykryta wysoka temperatura, spełniony zostanie warunek progowy wyłączenia pompy, a dryf cieplny zostanie wyeliminowany. Takie podejście zapewnia większą kontrolę nad procesem, zwiększa efektywność i stabilizuje pracę słonecznego systemu grzewczego w dniach takich jak 3.07 (rys. 5.20 oraz rys. 5.21).



Rys. 5.20. Wyniki pomiarów temperatur na kolektorze i zasobniku w dniu 3 lipca



Rys. 5.21. Wyniki pomiarów operacji słonecznej oraz masowego natężenia przepływu w dniu 3 lipca. Metoda sterowania: ON-OFF

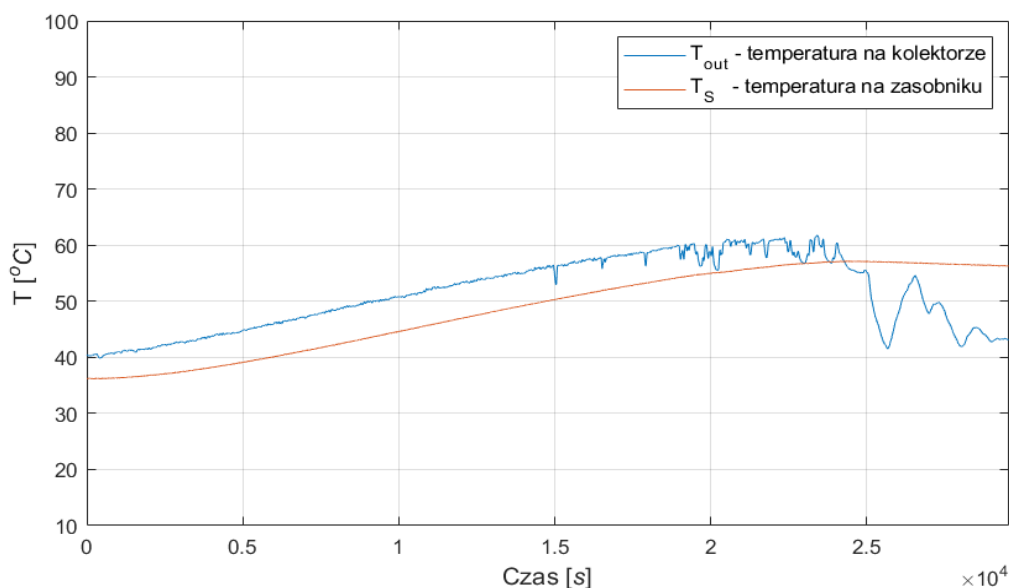
Na rysunku 5.20 zaprezentowano zmiany temperatury czynnika roboczego na kolektorze oraz w zasobniku wodnym w funkcji czasu. Analizując dane należy zauważyć, że temperatura

na kolektorze podlegała bardzo dużym fluktuacjom, co sugeruje, że warunki promieniowania słonecznego musiały ulegać częstym zmianom. Takie wahania temperatury mogą wynikać przede wszystkim z przerywanej operacji słonecznej spowodowane zasłonięciem Słońca przez chmury. Potwierdzenie takich przypuszczeń odnaleźć można na rysunku 5.21, gdzie zaprezentowano charakter zmierzono tego dnia promieniowania słonecznego. Temperatura zasobnika także wykazuje pewne wahania, są one jednak zdecydowanie mniej wyraźne niż te odnotowane na kolektorze. Jest to prawdopodobnie spowodowane efektem buforowania zmian temperatury przez masę wody w zasobniku. Duża ilość czynnika odbierającego ciepło sprawia, że system wykazuje mniejszą wrażliwość na krótkotrwałe zmiany temperatury na kolektorze. Po raz kolejny zaobserwować można charakterystyczne dla systemów grzewczych przesunięcie w czasie wpływu zmiany temperatury na kolektorze na temperaturę w zasobniku.

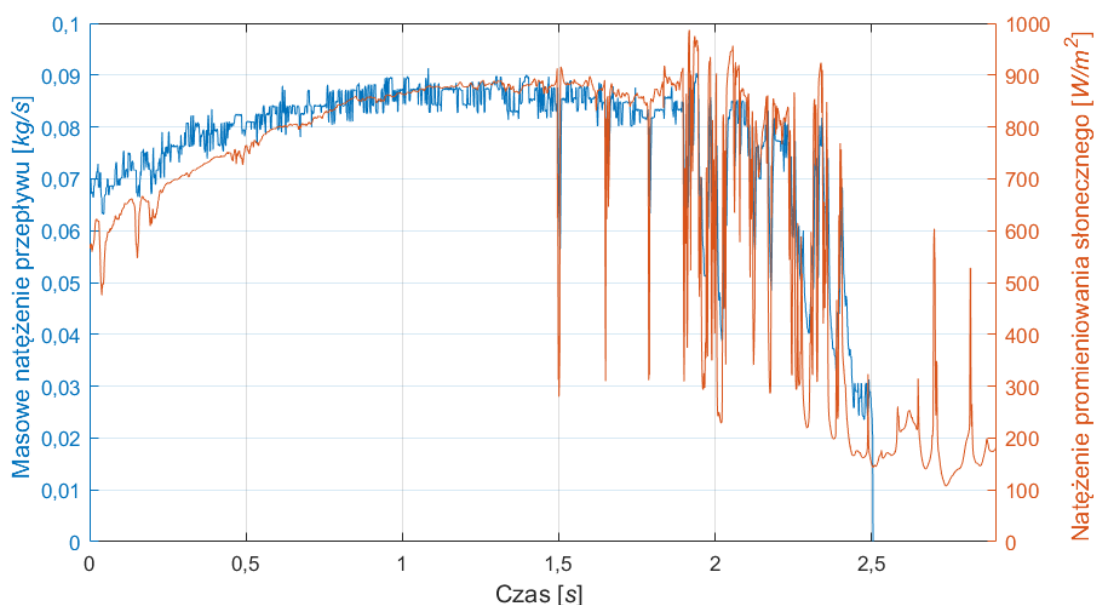
Grupa III:

Analiza efektywności wybranych metod sterowania w słonecznych systemach grzewczych dla dni z trzeciej grupy wykazała, że najwyższe średnie wyniki temperatury końcowej czynnika roboczego w zasobniku osiągnięto dla obu proporcjonalnych metod sterowania. Wyniki osiągnięte podczas ich zastosowania sugerują, że ta grupa algorytmów dużo lepiej radzi sobie w dni o niestabilnym i słabym poziomie natężenia promieniowania słonecznego. Warto zauważyć, iż obie metody z grupy algorytmów proporcjonalnych dają bardzo zbliżone rezultaty, a wyraźna przewaga metody IPC widoczna w poprzedniej grupie nie ma w tym przypadku miejsca. Może to oznaczać, że zjawisko dryfu termicznego nie jest już tak istotnym problemem w czasie rozważania dni o niskim potencjale promieniowania słonecznego. Obie metody proporcjonalne wykazują większą responsywność na zakłócenia w jakich pracuje słoneczny system grzewczy. Umożliwiają płynne dostosowywanie przepływu czynnika roboczego w układzie hydraulicznym nawet w warunkach niskiego nasłonecznienia. Duża różnica w uzyskanych wynikach jest natomiast zauważalna w przypadku sterowania dwustanowego (ON-OFF). W omawianej grupie jest ono wyraźnie najgorsze z punktu widzenia osiąganych w zasobniku temperatur. Po raz kolejny przyczyn takiego stanu rzeczy należy się dopatrywać w istotnym utrudnieniu za jakie uznać należy zmienność warunków pogodowych. Sterowanie dwustanowe wyraźnie nie nadąża za dynamiką tych zmian i w związku z tym okazuje się mniej efektywne energetycznie w porównaniu do bardziej zaawansowanych metod sterowania. Analizując średnie końcowe wyniki temperatur na zasobniku, należy zauważyć wyraźny spadek ich wartości w odniesieniu do dwóch wcześniej omówionych grup pogodowych niezależnie od wybranej metody sterowania. Wskazuje to na silną korelację pomiędzy wartością promieniowania słonecznego w danym dniu, a zyskiem energetycznym. Przykładem dnia pomiarowego z trzeciej

grupy z realizacją sterowania proporcjonalnego jest 30 maja zaprezentowany na rysunku 5.22 oraz rysunku 5.23



Rys. 5.22. Wyniki pomiarów temperatur na kolektorze i zasobniku w dniu 30 maja



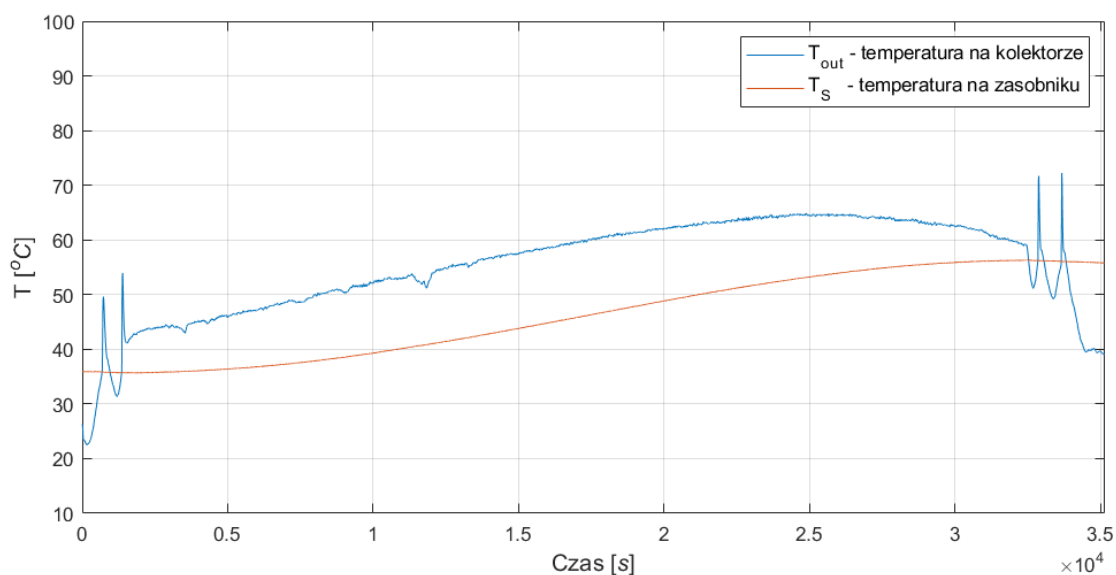
Rys. 5.23. Wyniki pomiarów operacji słonecznej oraz masowego natężenia przepływu w dniu 30 maja. Metoda sterowania: PROPORCJONALNA

Klasyczna metoda proporcjonalna oferuje temperatury wyższe średnio prawie o 4°C niż metoda sterowania ON-OFF. Odnosząc się do wartości samych przyrostów temperatury, stwierdzić należy, że są one niskie (zazwyczaj kilkanaście stopni) głównie ze względu na niekorzystne warunki słoneczne. Temperatura czynnika na kolektorze wzrasta stopniowo i stabilizuje się na pewnym poziomie. Temperatura zasobnika wzrasta zauważalnie wolniej a po wystąpieniu wahań poziomemu natężeniu promieniowania (rys.5.22) jej wzrost zostaje zahamowany.

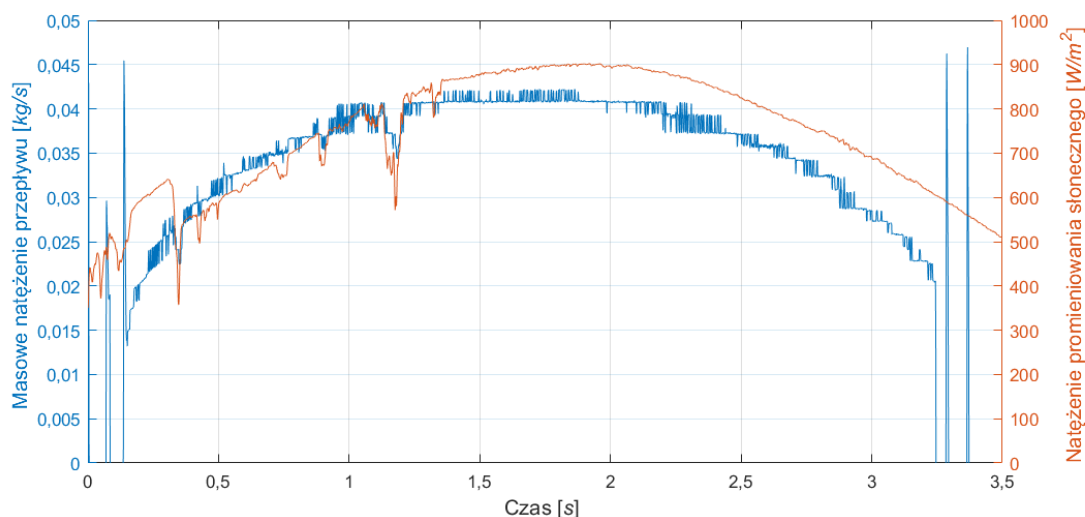
Wskazuje to, że słoneczny system grzewczy miał trudności z dalszym pozyskiwaniem energii w zaistniałych w trakcie badań warunkach. Obserwując pracę klasycznego regulatora, w takich warunkach można bardzo dobrze wskazać olbrzymią przewagę, jaką metody proporcjonalne zyskują nad sterowaniem dwustanowym. Z wykresu zmian masowego natężenia przepływu widać jak aktywnie regulator dostosowywał parametry pracy układu hydraulicznego do zmienności warunków. Gwałtownym spadkom natężenia promieniowania odpowiadają gwałtowne spadki masowego natężenia przepływu, niewielkie wahania promieniowania skutkują za to odpowiednio słabszą reakcją układu sterowania. Taka elastyczność systemu jest olbrzymią zaletą eksploatacyjną i ma swój wydzźwięk w postaci wyższych uzysków cieplnych podczas pracy z wykorzystaniem metod proporcjonalnych.

Grupa IV:

Rozszerzając analizę o dni z grupy czwartej, gdy promieniowanie słoneczne było słabe, ale stabilne, warto zwrócić uwagę na kilka ważnych aspektów. Po pierwsze, podobnie jak w poprzedniej grupie, metoda sterowania ON-OFF jest znów wyraźnie gorsza od pozostałych. Fakt uzyskania takich wyników może dziwić z punktu widzenia dobrej stabilności promieniowania w tej grupie. Po przeanalizowaniu kilku niezależnych przypadków stwierdzono, że jest to negatywny efekt nadmiernej prędkości z jaką tłoczony był czynnik roboczy w układzie hydraulicznym. W komercyjnych systemach sterowania dwustanowego pompy pracują z ustaloną i niezmienną prędkością, bez względu na zmieniające się warunki otoczenia. Brak możliwości dostosowania prędkości obrotowej pompy do warunków zewnętrznych skutkuje nieefektywnym wykorzystaniem dostępnej energii promieniowania słonecznego. Pomimo tego, że na kolektorach nadal generowane jest ciepło, jego ilość jest bardzo ograniczona ze względu na słabsze promieniowanie. W wyniku pracy grupy pompowej z pełną wydajnością dochodzi do przekazywania ciepła do zasobnika wody szybciej niż jest ono w stanie się gromadzić na kolektorach. Taki stan rzeczy bezpośrednio przekłada się na niekorzystny stosunek ciepła napływającego do ciepła oddawanego z zasobnika. Po drugie, biorąc pod uwagę zarówno temperatury mierzone na zasobniku jak i przepływ czynnika roboczego w instalacji hydraulicznej, to metody proporcjonalne wydają się utrzymywać słoneczny system grzewczy bliżej optymalnych dla maksymalizacji uzysków cieplnych warunków pracy. Nie istnieje wyraźna rozbieżność pomiędzy dwiema testowanymi metodami z tej grupy. Wartości przyrostów temperatur w obu przypadkach jest na podobnym i niskim poziomie, co jest zrozumiałe w kontekście słabego nasłonecznienia. Przykładem dnia o takich parametrach jest 22.05 przedstawiony na rysunku 5.24 oraz rysunku 5.25.



Rys. 5.24. Wyniki pomiarów temperatur na kolektorze i zasobniku w dniu 22 maja



Rys. 5.25. Wyniki pomiarów operacji słonecznej oraz masowego natężenia przepływu w dniu 22 maja. Metoda sterowania: IPC

Na rysunku 5.24 zaobserwować można, charakterystyczny przebieg temperatur na kolektorze i zasobniku świadczący o tym, że system grzewczy dobrze radzi sobie z odbiorem ciepła i działa w efektywny sposób. Na samym początku oraz na samym końcu dnia pomiarowego zaobserwowano gwałtowne wahania temperatury kolektora, które nie miały jednak znaczącego wpływu na temperaturę w zasobniku. Na rysunku 5.25 zauważyć można, że wahania te były skorelowane z poziomem natężenia promieniowania a ich bezpośrednią przyczyną były gwałtowne zmiany nasłonecznienia. Poza tymi dwoma obszarami przebieg natężenia promieniowania w dniu 22 maja ma bardzo stabilny charakter, który przekłada się również na stabilny przebieg masowego natężenia przepływu w systemie przez cały dzień. Jest to kolejne potwierdzenie

efektywnego działania słonecznego systemu grzewczego i sugestia o właściwym dobraniu metody sterowania do panujących warunków eksploatacyjnych.

Dla wszystkich testowanych metod sterowania średnia końcowa temperatura wody w zasobniku jest zawsze wyższa dla dni o wyższych wartościach wskaźnika E_{rad} . To wskazuje, że uzyski energetyczne zależą w większym stopniu od poziomu promieniowania słonecznego, a w mniejszym od jego zmienności. Czynnikiem promieniowania ma znaczący wpływ na efektywność energetyczną słonecznego systemu grzewczego. Średnia wartość promieniowania słonecznego nie wykazuje jednak dużego wpływu na efektywność proporcjonalnych metod sterowania. Działają one w bardzo zbliżony sposób w warunkach niskiego promieniowania niezależnie od jego zmienności. Oznacza to, że metody z grupy proporcjonalnych są w stanie dobrze radzić sobie z zakłóceniami i wahaniami warunków minimalizując wpływ tego parametru na efektywność systemu. Zmienność promieniowania słonecznego (E_{var}) jest jednak czynnikiem, którego nie powinno się pomijać podczas wyboru metody sterowania w systemie grzewczym. Sprawia on, że proces sterowania jest trudniejszy, bardziej złożony i wymagający. Zdecydowanie jest to kolejny z aspektów, który powinien determinować wybór strategii sterowania.

Jak wynika z przeprowadzonych badań, metoda sterowania ON-OFF w ogólnym ujęciu okazała się mniej efektywna od metod proporcjonalnej oraz IPC. Trend ten jest nad wyraz widoczny w grupach III i IV, kiedy wskaźnik E_{rad} przyjmuje wartości poniżej średnich co oznacza, że poziom promieniowania słonecznego jest bardzo niski. Jedyną grupą warunków, dla których sterowanie ON-OFF pozwoliło uzyskać najlepsze rezultaty to grupa I. Z punktu widzenia trudności zadania sterowania do jakiego wykorzystany zostaje kontroler słoneczny, grupa o wysokim i stabilnym poziomie promieniowania jest zdecydowanie najłatwiejsza i najmniej wymagająca. W mniej sprzyjających warunkach pogodowych zalecane jest wykorzystanie bardziej zaawansowanych proporcjonalnych metod sterowania. W celu maksymalizacji efektywności energetycznej systemu grzewczego powinno się wybierać metody, które pozwalają na dynamiczne dostosowywanie działania systemu do zmiennych warunków otoczenia. Szczególnym przypadkiem są dni przynależne do grupy II, czyli te o dużych wartościach promieniowania podlegające ciągłym wahanom. Jest to zdecydowanie najtrudniejsza grupa pod względem złożoności zadania sterowania. Wnioskiem z uzyskanych dla takich dni wyników jest potrzeba modyfikacji klasycznej metody sterowania proporcjonalnego na wzór zaproponowanej metody IPC, która okazała się w takich warunkach niepodważalnie lepsza.

Następnym etapem prac badawczych było przeprowadzenie symulacji komputerowych niezależnie dla każdego z dni, przy czym uzyskane wyniki podzielono na cztery ustalone wcześniej grupy. Celem tych działań było potwierdzenie oraz uogólnienie wniosków wynikających

z danych eksperymentalnych. Podczas symulacji do modelu słonecznego systemu grzewczego zadawano zarejestrowane na stanowisku badawczym warunki otoczenia oraz wykorzystywano zalecaną na podstawie wcześniejszej analizy metodę sterowania. Wyniki symulacji dla każdej grupy zostały uśrednione w celu zniwelowania anomalii i uzyskania zasadniczego trendu w aspekcie najlepszej metody sterowania. Ostatecznie otrzymane w ten sposób wyniki symulacyjne porównano z wynikami uzyskanymi na drodze eksperymentalnej.

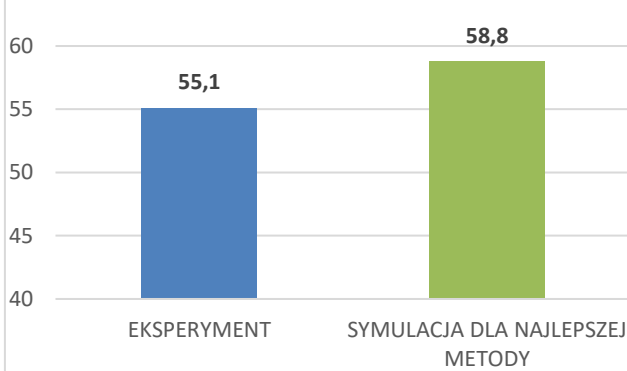
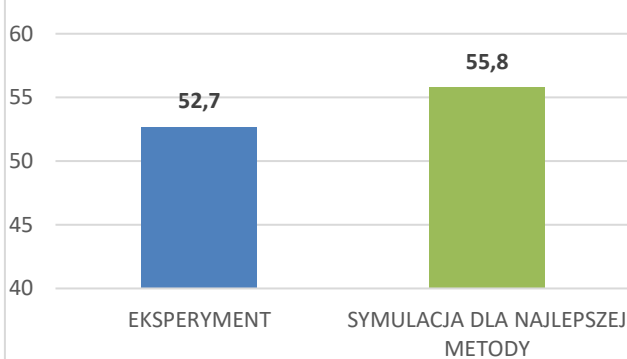
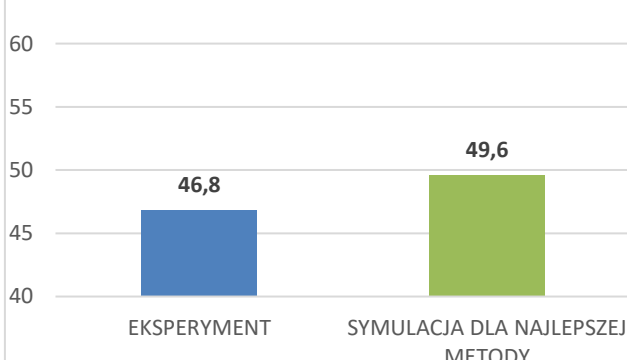
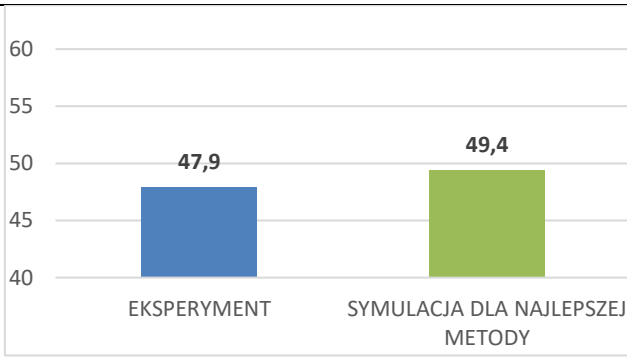
Dla wszystkich czterech zaproponowanych grup warunków pogodowych uśrednione wyniki badań komputerowych przewidują zauważalnie wyższe średnie temperatury na zasobniku niż wartości uzyskane podczas badań eksperymentalnych. Wynika to z faktu, że badania symulacyjne przeprowadzono dla tych samych dni jednak z zalecaną dla danej grupy metodą sterowania. Symulacje komputerowe z parametrami różnych scenariuszy warunków pogodowych zgromadzonych podczas badań eksperymentalnych umożliwiły przetestowanie innych metod sterowania dla dokładnie takich samych warunków jakie zarejestrowano w rzeczywistym eksperymencie. W związku z otrzymanymi wynikami należy stwierdzić, że wykorzystanie zaproponowanego czterostanowego klasyfikatora warunków atmosferycznych pozwoliło na dobranie dla każdej z grup takich metod sterowania słonecznym systemem grzewczym, które pozwoliły na podniesienie jego efektywności przetwarzania dostępnych zasobów energetycznych. Wskazują na w jednoznaczny sposób wartości średnich końcowych temperatur na zasobniku uzyskane w symulacjach komputerowych przeprowadzonych dla tego samego zbioru dni, lecz z zalecaną metodą sterowania. Wyraźny wzrost temperatur względem tych osiąganych w grupie eksperymentalnej sugerował możliwość podniesienia efektywności słonecznego systemu grzewczego poprzez dobranie odpowiedniej metody sterowania.

Analiza wyników wykazała, iż zaproponowana metodyka porównawcza umożliwiła wskazanie tych metod sterowania, które pozwalają oczekiwać wyników lepszych od tych uzyskanych w rzeczywistym eksperymencie. Dzięki identyfikacji bardziej efektywnych metod sterowania możliwe jest nie tylko poprawienie wydajności systemów grzewczych, ale również zmniejszenie ich negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Dodatkowo przeprowadzone prace badawcze pokazały jak istotnym jest łączenie danych eksperymentalnych z zaawansowanymi technikami symulacyjnymi w celu uzyskiwania dokładniejszych i użytecznych wyników badawczych.

Zestawienie uśrednionych wyników obliczonych dla wskazanych metod sterowania w każdej z grup pogodowych danych eksperymentalnych oraz symulacji komputerowej zawarto w tabeli 18.

5. Analiza metod sterowania wykorzystywanych w słonecznych systemach grzewczych

Tabela 18. Zestawienie uśrednionych wyników danych eksperymentalnych i symulacji komputerowej

Grupa pogodowa	Najlepsza metoda sterowania	Średnia końcowa temperatura w zasobniku °C						
I	ON-OFF	 <table><tr><th>Metoda</th><th>Średnia końcowa temperatura w zasobniku °C</th></tr><tr><td>EKSPERYMENT</td><td>55,1</td></tr><tr><td>SYMULACJA DLA NAJLEPSZEJ METODY</td><td>58,8</td></tr></table>	Metoda	Średnia końcowa temperatura w zasobniku °C	EKSPERYMENT	55,1	SYMULACJA DLA NAJLEPSZEJ METODY	58,8
Metoda	Średnia końcowa temperatura w zasobniku °C							
EKSPERYMENT	55,1							
SYMULACJA DLA NAJLEPSZEJ METODY	58,8							
II	IPC	 <table><tr><th>Metoda</th><th>Średnia końcowa temperatura w zasobniku °C</th></tr><tr><td>EKSPERYMENT</td><td>52,7</td></tr><tr><td>SYMULACJA DLA NAJLEPSZEJ METODY</td><td>55,8</td></tr></table>	Metoda	Średnia końcowa temperatura w zasobniku °C	EKSPERYMENT	52,7	SYMULACJA DLA NAJLEPSZEJ METODY	55,8
Metoda	Średnia końcowa temperatura w zasobniku °C							
EKSPERYMENT	52,7							
SYMULACJA DLA NAJLEPSZEJ METODY	55,8							
III	PROPORCJONALNE IPC	 <table><tr><th>Metoda</th><th>Średnia końcowa temperatura w zasobniku °C</th></tr><tr><td>EKSPERYMENT</td><td>46,8</td></tr><tr><td>SYMULACJA DLA NAJLEPSZEJ METODY</td><td>49,6</td></tr></table>	Metoda	Średnia końcowa temperatura w zasobniku °C	EKSPERYMENT	46,8	SYMULACJA DLA NAJLEPSZEJ METODY	49,6
Metoda	Średnia końcowa temperatura w zasobniku °C							
EKSPERYMENT	46,8							
SYMULACJA DLA NAJLEPSZEJ METODY	49,6							
IV	PROPORCJONALNE IPC	 <table><tr><th>Metoda</th><th>Średnia końcowa temperatura w zasobniku °C</th></tr><tr><td>EKSPERYMENT</td><td>47,9</td></tr><tr><td>SYMULACJA DLA NAJLEPSZEJ METODY</td><td>49,4</td></tr></table>	Metoda	Średnia końcowa temperatura w zasobniku °C	EKSPERYMENT	47,9	SYMULACJA DLA NAJLEPSZEJ METODY	49,4
Metoda	Średnia końcowa temperatura w zasobniku °C							
EKSPERYMENT	47,9							
SYMULACJA DLA NAJLEPSZEJ METODY	49,4							

5.3. Określenie wpływu sterowania adaptacyjnego na efektywność energetyczną słonecznego systemu grzewczego

Utylitarnym i docelowym rozwiązaniem badanego problemu naukowego było opracowanie sterownika adaptacyjnego. Miał on umożliwiać dobór odpowiedniej metody sterowania do panujących aktualnie warunków pracy słonecznego systemu grzewczego. W celu potwierdzenia słuszności wniosków płynących z analizy połączonych wyników badań eksperymentalnych oraz symulacyjnych w praktyce, zaprogramowany został nowy kontroler słoneczny, który pozwalał na automatyczne zmiany metody sterowania w oparciu o ocenę 5-minutowych interwałów czasu. Był to ostatni etap prac badawczych który pozwolił na przetestowanie sformułowanych zaleceń eksploatacyjnych.

Sterownik adaptacyjny zbudowany został z wykorzystaniem układu Arduino Mega 2560 opartego na mikrokontrolerze Atmega. Wybór tego urządzenia do stworzenia sterownika adaptacyjnego podyktowany był kilkoma jego ważnymi zaletami. Po pierwsze do dyspozycji dostępne były 54 cyfrowe piny I/O oraz 16 pinów przeznaczonych na sygnały analogowe. Czynnik ten miał niezwykle ważne znaczenie z punktu widzenia złożoności realizowanego zadania oraz konieczności obsługi wielu analogowych czujników występujących w słonecznym systemie grzewczym. Najważniejsze parametry techniczne układu Arduino Mega 2560 zawarto w tabeli 19.

Tabela 19. Najważniejsze parametry układu sterownika adaptacyjnego

Mikrokontroler	ATmega2560
Napięcie robocze	5 V
Napięcie wejściowe (zalecane)	7-12 V
Napięcie wejściowe (graniczne)	6-20 V
Piny wejść/wyjść cyfrowych	54 (z czego 15 zapewnia wyjście PWM)
Piny wejść analogowych	16
Prąd stały na pin we/wy	20 mA
Prąd stały na pin 3,3 V	50 mA
Pamięć flash	256 KB, z czego 8 KB wykorzystywane przez bootloader
Pamięć sram	8 KB
Eeprom 4 kb	4 KB
Prędkość zegara 16 mhz	16 MHz
Ledy	13
Długość	101,52 mm
Szerokość	53,3 mm
Waga	37g

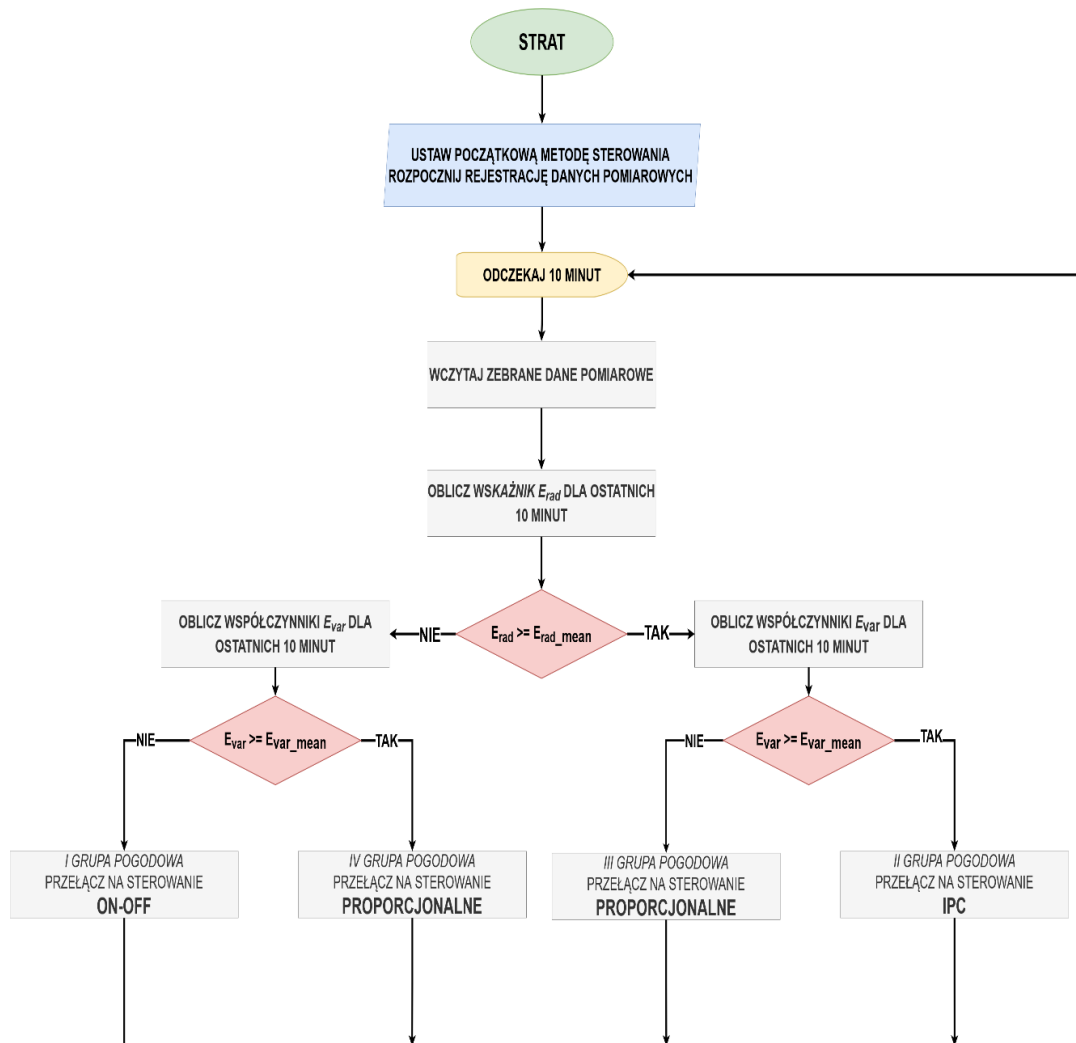
Spośród wejść/wyjść cyfrowych 15 z nich mogło zostać wykorzystanych do sterowania typu PWM (modulacja szerokości impulsu) co umożliwiło odpowiednie wysterowanie grupy pompowej w układzie hydraulicznym. Duże ilości pamięci Flash, SRAM oraz EEPROM umożliwiły stworzenie zamierzonego i odpowiednio złożonego programu, który zawierał wszystkie instrukcje, obszerne biblioteki i dokładne algorytmy sterowania porównywanymi ze sobą metod. Istotna ze względów praktycznych była również kompatybilność układu z szeroką gamą sensorów i modułów przemysłowych umożliwiającą szybkie modyfikacje projektu.

Zadanie jakie zrealizować miał omówiony układ obejmowało dwa aspekty:

- przełączanie trybu pracy pomiędzy trzema przebadanymi metodami sterowania na podstawie ostatnich 10 minut pomiarów warunków pogodowych,
- przejęcie funkcji jaką do tej pory w systemie grzewczym realizował klasyczny sterownik solarny, tj. wysterowanie pracy grupy pompowej w zależności od parametru ΔT zgodnie z algorytmem ustalonej metody.

Realizacja obu tych funkcji wymagała stworzenia takiego algorytmu działania sterownika adaptacyjnego, który byłby w stanie dynamicznie dostosowywać parametry pracy grupy pompowej w oparciu o ustalone warunki przy jednoczesnym zapewnieniu elastyczności umożliwiającej łatwe i szybkie dostosowanie się sterowania do zmian. Schemat blokowy algorytmu działania, zaprojektowanego na potrzeby badań, adaptacyjnego sterownika słonecznego przedstawiono na rysunku 5.26.

Rozpoczynając działanie zaprogramowanego sterownika użytkownik wybiera początkową metodę sterowania, która realizowana jest w pierwszym cyklu pracy. Jednocześnie na tym etapie rozpoczyna się rejestracja podstawowych danych pomiarowych ze słonecznego systemu grzewczego. W następnej kolejności oczekiwany jest interwał 10 minut pracy systemu na określonych wcześniej parametrach w celu zebrania wystarczającej ilości danych do przeprowadzenia procesu adaptacji metody sterowania. Po wczytaniu zarejestrowanych danych pomiarowych obliczony zostaje wskaźnik E_{rad} , który niesie w sobie informację na temat ilości energii słonecznej w ostatnich 10 minutach pracy systemu. Na podstawie porównania jego wartości ze średnią wartością E_{rad_mean} obliczoną wcześniej dla wszystkich zebranych dni pomiarowych podejmowana jest decyzja o wyborze dalszej ścieżki algorytmu. Następnie po obliczeniu wartości współczynnika zmienności E_{var} dokonywane jest porównanie go, tym razem z jego uśrednioną dla wszystkich wcześniejszych prób pomiarowych wartością E_{var_mean} .



Rys. 5.26. Algorytm działania sterownika adaptacyjnego

W wyniku dwóch przeprowadzonych porównań algorytm jest w stanie sklasyfikować i przypisać analizowany interwał czasowy do jednej z czterech wcześniej zdefiniowanych grup pogodowych za pomocą zaproponowanego klasyfikatora. W oparciu o dotychczasowe wyniki badań oraz spostrzeżenia eksploatacyjne dokonane na etapie analizy metod sterowania w słonecznych systemach grzewczych narzucona zostaje zalecana dla danej grupy pogodowej metoda sterowania. Każda z metod została uprzednio zaprogramowana w pamięci sterownika adaptacyjnego zgodnie ze zbadanymi i przedstawionymi we wcześniejszych rozdziałach parametrami, algorytmami i charakterystykami pracy. Po sklasyfikowaniu warunków oraz zmianie metody sterowania, niezależnie od wskazanej grupy pogodowej, następuje kolejny 10-minutowy interwał czasu, na podstawie którego przeprowadzona zostanie kolejna iteracja cyklu pracy. Adaptacyjny sterownik słoneczny realizuje swoje zadanie w pętli, która wywoływana jest tak długo jak trwa sam dzień pomiarowy. Tak zaprojektowane urządzenie zapewnia możliwość dostosowywania metody sterowania pracą słonecznego systemu grzewczego do panujących

warunków. Zamierzonym efektem było efektywniejsze wykorzystanie energii słonecznej w różnych warunkach pogodowych.

W ramach końcowego etapu prac badawczych przeprowadzone zostały badania eksperymentalne z wykorzystaniem zaprojektowanego sterownika adaptacyjnego. Badania polowe przeprowadzone w 2023 roku w okresie od maja do lipca pozwoliły na zgromadzenie 53 użytecznych próbek. Dalszej analizie poddano 40 próbek, wśród których znalazło się po 10 dni z każdej grupy pogodowej. W celu oceny wpływu pracy sterownika adaptacyjnego na efektywność pracy słonecznego systemu grzewczego zestawiono te dane z 40 uprzednio zebranymi próbkami. Próbkę referencyjną uzyskano dla klasycznej proporcjonalnej metody sterowania w domyślnym trybie pracy sterownika ST-402n. Wyniki pomiarów dla obu grup zestawiono w tabeli 20.

W każdej z grup pogodowych obliczone zostały średnie wartości wskaźników E_{rad} energii dostępnej na powierzchni kolektorów słonecznych w okresie dnia pomiarowego oraz E_z energii zgromadzonej w zasobniku magazynującym na koniec dnia pomiarowego. Na ich podstawie obliczony został dla każdej z grup współczynnik efektywności konwersji energii cieplnej zachodzącej w słonecznym systemie grzewczym X_{Sol} .

Tabela 20. Zestawienie wyników badań polowych dla sterowników klasycznego i adaptacyjnego

	KLASYCZNY STEROWNIK SŁONECZNY				STEROWNIK ADAPTACYJNY			
Liczba dni pomiarowych	40				40			
Grupa pogodowa	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Liczba dni w każdej grupie	10	10	10	10	10	10	10	10
Średnia wartość E_{rad} (energia dostępna na kolektorze)	22,4 kWh	21,7 kWh	15,2 kWh	15,8 kWh	22,6 kWh	20,3 kWh	14,9 kWh	14,7 kWh
Średnia wartość E_z (energia zebrana na zasobniku)	13,8 kWh	10,4 kWh	7,8 kWh	9,0 kWh	15,2 kWh	12,6 kWh	9,1 kWh	8,8 kWh
$X_{Sol} = \frac{E_z}{E_{rad}}$	0,62	0,48	0,51	0,57	0,67	0,62	0,61	0,60
Różnica pomiędzy sterownikami w danej grupie	-	-	-	-	+0,05 +8,1%	+0,14 +29,5%	+0,10 +19,0%	+0,03 +5,1%
$\sum E_{rad}$	755 kWh				719 kWh			
$\sum E_z$	416 kWh				453 kWh			
X_{Sol}	0,55				0,63			
Wzrost efektywności	-				+12,7%			

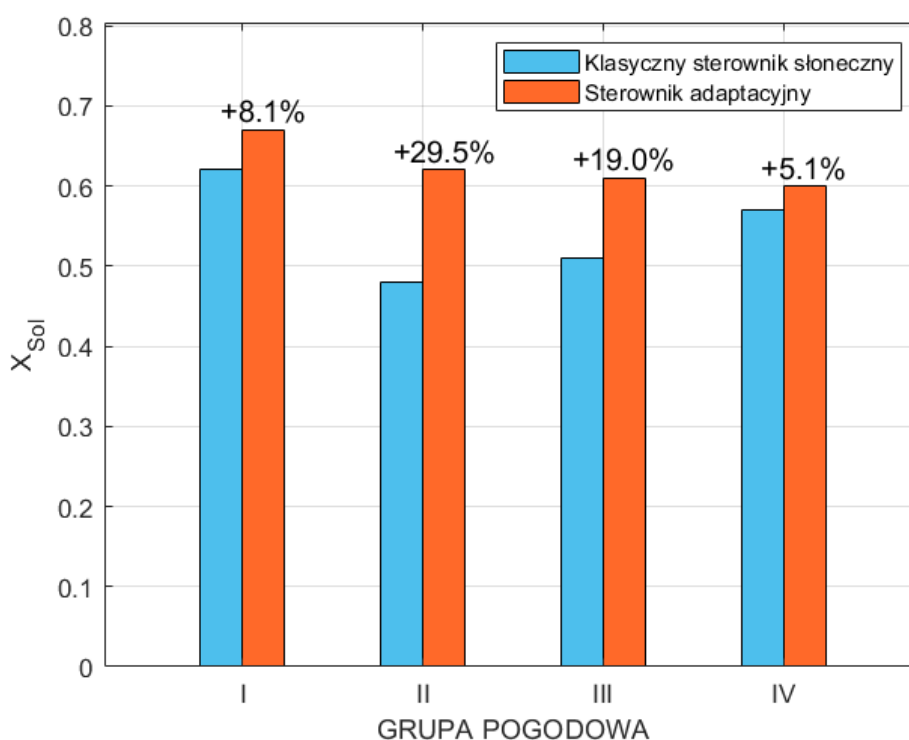
Podczas korzystania z klasycznego sterownika słonecznego, średnie wartości wskaźnika E_{rad} wahają się od 15,8 kWh do 22,4 kWh. Zgodnie z oczekiwaniami, dużo większy potencjał dostępnej energii zauważalny jest w przypadku dwóch pierwszych grup pogodowych, dla których cechą natywną była wyższa od przeciętnej wartość promieniowania słonecznego w ciągu dnia. Analogicznie energia dostępna w grupach III i IV jest odpowiednio mniejsza. Zauważyć należy również, że w obu parach wyższymi wartościami wskaźnika E_{rad} cechują się grupy o mniejszej zmienności promieniowania. Jeśli chodzi o energię zgromadzoną na zasobniku, jest już ona dużo bardziej zróżnicowana dla każdej z grup i mieści się w przedziale od 7,8 kWh do 13,8 kWh. Wynika to z różnic w warunkach pogodowych w poszczególnych grupach oraz różnym stopniem efektywności prowadzenia procesu odbioru ciepła przez klasyczny sterownik słoneczny dla poszczególnych grup. Największa ilość zebranej energii cieplnej zarejestrowana został w grupie I, zaś zdecydowanie najniższa w IV grupie pogodowej. Wartości współczynników efektywności obliczone na podstawie omówionych wskaźników mieszczą się w zakresie od 0,48 do 0,62. Oznacza to, że istnieje wyraźne zróżnicowanie efektywności pracy słonecznego systemu grzewczego w odniesieniu do poszczególnych grup pogodowych.

Interesującym spostrzeżeniem może być fakt, że skrajne współczynniki efektywności otrzymano dla grupy I (0,62) oraz II (0,48). Mimo tego, że obie te grupy cechowały się wysokim i zbliżonym potencjałem dostępnej energii, efektywność pracy systemu grzewczego jest dla nich zupełnie różna. Przyczyny takiego stanu rzeczy upatrywać należy w parametrze zmienności promieniowania, którego wysoka wartość dla grupy (II) znacząco utrudnia zadanie efektywnego gromadzenia ciepła. W grupach III oraz IV zauważyć można podobny trend, który nie jest jednak aż tak wyraźny. W obu przypadkach ponad połowa dostępnej w ciągu dnia energii została zgromadzona w zasobniku wodnym.

W przypadku dni, gdzie wykorzystywano zaprojektowany sterownik adaptacyjny, wartości wskaźnika E_{rad} są nieco niższe i mieszczą się w przedziale od 14,7 kWh dla grupy IV do 22,6 kWh dla grupy I. Po raz kolejny uwagę należy zwrócić na dużą różnicę dostępnej energii słonecznej w przypadku grup I oraz II względem grup III i IV. Waha się ona w granicach kilku kilowatogodzin i jest wynikiem znacznie wyższych wartości natężenia promieniowania słonecznego w ciągu dnia z dwóch pierwszych grup. W grupach III oraz IV ilość dostępnej energii jest bardzo zbliżona, zaś pomiędzy grupą I i II różnica wynosi 2,3 kWh. W odniesieniu do zgromadzonej energii zauważyć można, że istnieje duża rozpiętość zmierzonych wartości, od 8,8 kWh zanotowanej w przypadku dni z grupy IV do 15,2 kWh dla dni z grupy I. Współczynniki X_{sol} obliczone niezależnie dla każdej z grup są tym razem do siebie bardzo zbliżone. Mieszczą się one w wąskim przedziale 0,6 - 0,67.

Sterownik adaptacyjny pozwolił na zachowanie stabilnej efektywności gromadzenia energii. Oznacza to, że w przypadku wykorzystania sterownika adaptacyjnego powiodło się ograniczenie wpływu warunków pogodowych na efektywność procesu gromadzenia energii cieplnej w słonecznym systemie grzewczym. Jest on w stanie lepiej niż klasyczny sterownik słoneczny dostosowywać działanie systemu do zmiennych warunków słonecznych w celu maksymalizacji zgromadzonej energii.

Wartości współczynnika efektywności energetycznej X_{sol} uzyskane podczas badań z wykorzystaniem sterownika adaptacyjnego są znacznie wyższe od swoich odpowiedników uzyskanych w poszczególnych grupach dla sterownika klasycznego. Porównanie wyników dla obu sterowników z podziałem na grupy pogodowe przedstawiono na rysunku 5.27.



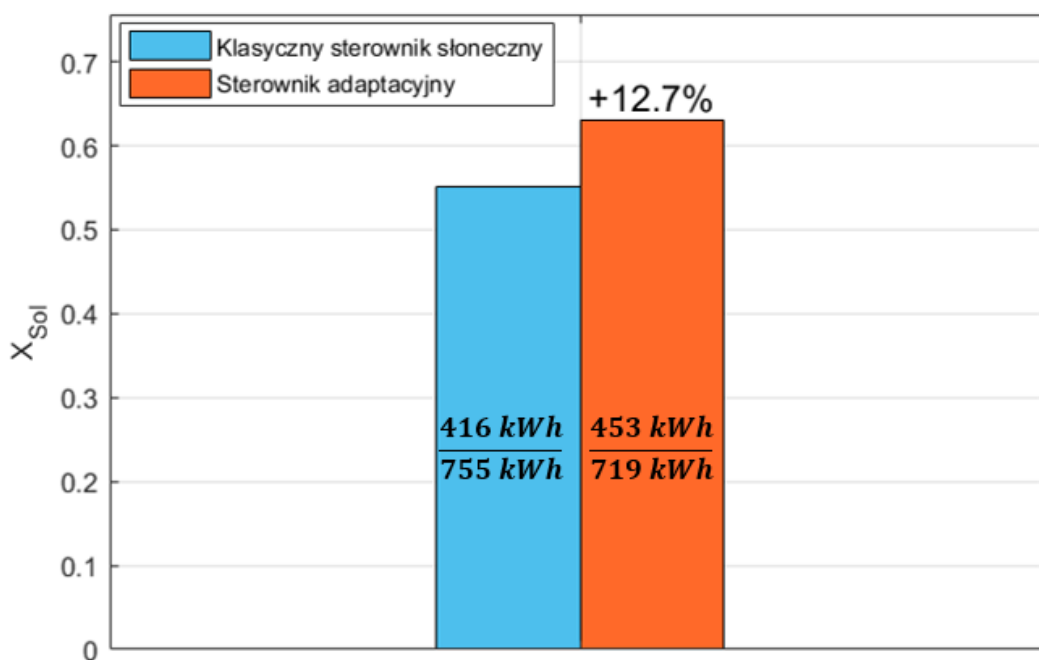
Rys. 5.27. Zestawienie wyników sterownika klasycznego ze sterownikiem adaptacyjnym w każdej z grup pogodowych

W każdej z analizowanych grup uzyskano zauważalnie wyższą efektywność gromadzenia energii dostępnej na powierzchni kolektorów w zasobniku wodnym dla sterownika adaptacyjnego. Jest on w każdym przypadku bardziej efektywny w procesie gromadzenia energii cieplnej od klasycznego sterownika wskazanego jako najlepszy w danej grupie. Oznacza to, że adaptacja metody sterowania do warunków pogodowych pozwala na poprawę efektywności systemu w omawianych warunkach pogodowych. Zdecydowanie najwyższy przyrost współczynnika efektywności X_{sol} (aż 29,5%) odnotowano w grupie II. Taki znaczący wzrost efektywności

względem wartości odniesienia sugeruje, że mechanizm adaptacyjny jest szczególnie ważny i skuteczny w warunkach mocnego i niestabilnego promieniowania słonecznego. Zauważalnie mniejszy, lecz wciąż bardzo istotny przyrost efektywności zmierzono w przypadku dni z grupy II. Wynosił on 19% na korzyść sterownika adaptacyjnego i pozwala na stwierdzenie, że zmienność promieniowania jest czynnikiem, który bardzo mocno zwiększa korzyści wynikające z implementacji metod adaptacyjnych.

Mniejsze różnice widoczne w przypadku grup I i IV odpowiednio 8,1% oraz 5,1% - mogą wskazywać, że oba porównywane sterowniki działają w tych warunkach w zbliżony do siebie sposób. Warto podkreślić, że sterowanie adaptacyjne wciąż przewyższa możliwościami sterowanie klasyczne. Wyniki te podkreślają zasadność i wartość zastosowania sterownika adaptacyjnego w sterowaniu pracą słonecznego systemu grzewczego.

Ostatnim wartościowym krokiem na tym etapie prac badawczych było zestawienie ze sobą sumarycznych wartości energii dostępnej w ciągu wszystkich porównywanych dni pomiarowych bez podziału na grupy pogodowe. Wynik takiego zestawienia zaprezentowano na rysunku 5.28.



Rys. 5.28. Sumaryczne wartości stosunków pozyskanej/dostępnej energii dla obu sterowników

W przypadku dni, podczas których w celach sterowania wykorzystywano klasyczny sterownik słoneczny, całkowita ilość energii promieniowania dostępnej na powierzchni kolektorów słonecznych wynosiła 755 kWh. Sumarycznie około 416 kWh z tej energii udało zgromadzić się w zasobnikach wodnych. Liczby te przekładają się na efektywność gromadzenia energii z użyciem klasycznego sterownika na poziomie 0,55. Jeśli chodzi o wykorzystanie sterownika

adaptacyjnego, w ciągu 40 analizowanych dni zmierzono sumę 719 kWh dostępnej energii z czego 453 kWh udało się zmagazynować w zasobnikach. Współczynnik efektywności X_{Sol} w przypadku sterownika adaptacyjnego wyniósł w związku z tym 0,63. Taki stan rzeczy przekłada się na uzyskanie wzrostu w efektywności procesu gromadzenia energii o 12,7% na korzyść zaprojektowanego sterownika.

Przewaga zaproponowanego rozwiązania jest jeszcze bardziej zauważalna, gdy uwzględni się fakt, że pomimo mniejszego dostępnego potencjału to sterownik adaptacyjny pozwolił na zgromadzenie większej ilości energii cieplnej w zasobnikach. **Adaptacyjne sterowanie natężeniem przepływu czynnika roboczego w słonecznym systemie grzewczym, wyposażonym w czterostanowy klasyfikator warunków atmosferycznych, umożliwiło zatem osiągnięcie wzrostu efektywności energetycznej systemu w zakładanym zakresie. Potwierdzono zatem słuszność hipotezy badawczej.** Podsumowując, szczegółowa analiza zebranych danych pozwala stwierdzić, że wykorzystanie sterowania adaptacyjnego przynosi znaczące korzyści w aspekcie poprawy efektywności gromadzenia energii w słonecznych systemach grzewczych. Jest to bardzo ważne z punktu widzenia technicznego, ekonomicznego oraz ekologicznego.

6. ZAKOŃCZENIE

6.1. Podsumowanie prac badawczych

W niniejszej pracy zaprezentowane zostały wyniki badań eksperymentalnych i symulacyjnych, które pozwoliły na opracowanie zupełnie nowego podejścia do tematyki doboru strategii sterowania w słonecznych systemach grzewczych.

Przeprowadzona analiza statystyczna pozwoliła na zbadanie dokładnego wpływu określonych warunków eksploatacyjnych na funkcjonowanie słonecznego systemu grzewczego. Udało się wskazać istotne statystycznie zależności pomiędzy zmiennymi oraz określić ich rodzaj oraz sposób w jaki afektują działanie słonecznego systemu grzewczego. Określając parametry pracy oraz przedstawiając przyjęte założenia i uproszczenia stworzono komputerowy model procesu transportu energii cieplnej w słonecznym systemie grzewczym. Użyteczność stworzonego modelu poddana została pozytywnej ocenie z wykorzystaniem rzeczywistych danych pomiarowych. Zaprezentowano i dokładnie scharakteryzowano stanowisko pomiarowe zlokalizowane na Politechnice Koszalińskiej, na którym przeprowadzono badania eksperymentalne. Zbudowane w celach pomiarów sprawności cieplnej kolektorów słonecznych zgodnie z normą ISO 9806:2017 umożliwiło przeprowadzenie badań niezbędnych do analizy strategii sterowania w tych systemach. Okres realizacji prac badawczych obejmował lata 2016 - 2023 a wyniki rzeczywistych pomiarów miały kluczowe znaczenie na każdym etapie prac.

Dane pomiarowe pozwoliły na dokonanie walidacji stworzonego modelu symulacyjnego oraz przeprowadzenie analizy porównawczej różnych strategii sterowania. To zaś umożliwiło wykorzystanie modelu komputerowego do określenia najlepszej metody sterowania dla każdej z zaproponowanych grup pogodowych a następnie weryfikację postawionych hipotez oraz ocenę skuteczności działania nowego sterownika adaptacyjnego. Główne badania prowadzone były w warunkach naturalnych. Do analizy końcowej wykorzystano 172 próbki z różnych dni pomiarowych. Były to przede wszystkim dni z przełomu wiosny, całego okresu letniego oraz pierwszych miesięcy jesiennych. Zgromadzono w ten sposób grupy 62 dni, gdy system działał z regulacją ON-OFF, 54 dni z klasyczną regulacją proporcjonalną oraz 56 próbek pomiarowych, kiedy wykorzystywana została metoda IPC.

Na podstawie analizy zebranych danych pomiarowych oraz wyników symulacji komputerowych sformułowane zostały następujące wnioski końcowe i zalecenia eksploatacyjne.

6.2. Wnioski końcowe

1. W zależności od zastosowanej metody sterowania, uzyski ciepłne różniły się znacząco dla każdej z grup pogodowych. Oznacza to, że istnieje możliwość zwiększenia efektywności energetycznej słonecznych systemów grzewczych poprzez dostosowanie odpowiedniej metody sterowania do określonych warunków pogodowych. Uzależnienie strategii sterowania od warunków eksploatacyjnych pozwala na polepszenie wydajności systemu grzewczego co podkreśla wagę zaprezentowanych badań.
2. W warunkach wysokich wartości natężenia promieniowania słonecznego oraz małej zmienności warunków pogodowych wszystkie badane metody sterowania dawały bardzo zbliżone wyniki. Co więcej, okazało się, że wykorzystanie najprostszej z porównywanych metod (ON-OFF) doprowadziło do uzyskania największych przyrostów energii cieplnej w tak zdefiniowanych warunkach eksploatacyjnych. Dzieje się tak ze względu na charakterystyczne dla sterowania dwustanowego szybkie przetłaczanie czynnika roboczego w instalacji hydraulicznej. Utrzymywanie wysokich wartości masowego natężenia przepływu skutkuje najefektywniejszym transferem energii cieplnej z powierzchni kolektorów słonecznych do zasobnika wodnego. Dodatkową zaletą metody dwustanowej jest fakt, iż jest ona zdecydowanie najprostszym sposobem sterowania spośród wszystkich analizowanych. Nie wymaga skomplikowanych sterowników i precyzyjnych elementów pomiarowych w celu skutecznej realizacji algorytmu. Zebrane wyniki badań wyraźnie wskazują, że dla słonecznych i bezchmurnych dni powinna to być preferowana metoda sterowania.
3. Sytuacja ulega całkowitej zmianie, jeśli warunki pogodowe podlegają dynamicznym wahaniom. Bez względu na poziom wartości natężenia promieniowania słonecznego koniecznym okazuje się wtedy zastosowanie metod proporcjonalnych. Główną przyczyną takiego stanu rzeczy jest zdolność tych metod do osiągania wysokich uzysków cieplnych w warunkach przejściowych. Istota sterowania proporcjonalnego, polegająca na dostosowywaniu pracy grupy pompowej do aktualnej różnicy temperatur kolektor - zasobnik, pozwala na uwzględnienie zmiennych warunków pogodowych co skutkuje efektywniejszym wykorzystaniem energii słonecznej. Na niekorzyść metod proporcjonalnych może przemawiać jednak ich poziom skomplikowania i potrzeba wykorzystania bardziej zaawansowanego sprzętu. Ponadto osiągnane efekty w dużej mierze zależą od bezwładności systemu grzewczego, tj. pojemności zasobników, skomplikowanej konfiguracji. Im system grzewczy jest większy, tym wyraźniejsze korzyści płyną z wykorzystywania metod proporcjonalnych.

4. Użycie proporcjonalnych metod sterowania zalecane jest również podczas dni o stałych i niskich wartościach natężenia promieniowania słonecznego. Okazuje się, iż pomimo stabilności warunków pogodowych, wykorzystanie w takim przypadku sterowania dwustanowego nie przynosi najlepszych rezultatów. Powodem jest zbyt niskie tempo narastania temperatury na absorberze w odniesieniu do stałej wysokiej prędkości z jaką czynnik roboczy zostaje przetłoczony do zasobnika. W rezultacie braku możliwości dostosowania prędkości pompy do warunków pracy systemu, odnotowywane są niekorzystne z punktu widzenia strategii sterowania działania sterownika. Skutkuje to wyraźnie gorszymi uzyskami energetycznymi niż w przypadku wykorzystania metod proporcjonalnych w tej grupie.
5. Najtrudniejszym z analizowanych scenariuszy okazał się przypadek, gdy ilość dostępnej energii słonecznej jest wysoka, lecz podlega częstym zakłóceniom. Naturalnym wyborem w takich warunkach jest powinna być metoda sterowania proporcjonalnego, jednak już na etapie badań wstępnych zaobserwowano istotny problem z jej wykorzystaniem. Sposób działania standardowo wykorzystywanych regulatorów proporcjonalnych powodował, że skutecznie zbierały energię słoneczną w warunkach wysokiej zmienności promieniowania, jednak przy dużym obciążeniu miały one tendencję wyprowadzania w trakcie pracy uprzednio zgromadzonej energii cieplnej z systemu. Zjawisko niezamierzonego odpływu energii cieplnej nazwano dryfem termicznym. Jest ono najłatwiejsze do zarejestrowania przy dużych obciążeniach cieplnych zaś brak informacji dotyczących temperatury na węzownicy uniemożliwia standardowym systemom wyeliminowanie tego problemu. W celu wyeliminowania takich sytuacji zaproponowana została nowa, autorska metoda sterowania nazwana IPC. System zmodyfikowano oraz wyposażono w dodatkowy czujnik temperatury, który okazał się niezbędny do realizacji tej metody. Algorytm działania metody IPC pozwolił zapobiec oddawaniu zgromadzonej energii i przełożyło się na wyższą efektywność energetyczną systemu grzewczego w takich warunkach pracy.
6. Z przeprowadzonych działań wynika, że analiza wpływu warunków atmosferycznych na skuteczność wybranych metod sterowania w słonecznych systemach grzewczych przyniosła olbrzymie korzyści w aspekcie praktycznym. Umożliwiła ona przede wszystkim zaprojektowanie adaptacyjnego sterownika słonecznego. Zebrane wyniki oraz zaprezentowane analizy wyraźnie wskazują, że zastosowanie regulatora uwzględniającego wnioski z przeprowadzonych badań porównawczych metod sterowania,

pozwoiliło uzyskać znaczącą poprawę w porównaniu do klasycznego sterowania. Wzrost efektywności gromadzenia EPS wyniósł 12,7% na korzyść zaprojektowanego rozwiązania. Przekłada się to na zarówno na zwiększenie wydajności systemu jak i na wzrost walorów ekonomicznych oraz ekologicznych takich inwestycji. W kontekście szybko rosnącego zapotrzebowania na efektywne wykorzystywanie odnawialnych źródeł energii, rozwój i implementacja tego typu rozwiązań są kluczowymi czynnikami.

7. Konkluzja powinna uwzględnić również znaczenie efektu synergii jaki osiągnany jest dzięki jednoczesnemu wykorzystaniu badań eksperymentalnych wraz z symulacjami komputerowymi. Wykorzystanie badań symulacyjnych pozwala na testowanie scenariuszy, sytuacji i warunków, które mogłyby być trudne, a często wręcz niemożliwe do zrealizowania na drodze eksperymentalnej. Badania polowe z kolei dostarczają niezbędnych danych do walidacji oraz kalibracji modeli symulacyjnych. Warto zauważyć, że połączenie tych dwóch narzędzi badawczych przyczynia się do głębszej analizy złożonych zjawisk a co za tym idzie do lepszego zrozumienia badanych obiektów i systemów. Uzyskane w ten sposób wyniki wpływają na ulepszenie metod badawczych oraz przyspieszają postęp naukowy w eksplorowanej dziedzinie. Integracja tych metod nie tylko wzbogaca wiedzę naukową i podnosi jakość prowadzonych badań, ale jednocześnie otwiera wiele nowych, niedostępnych wcześniej możliwości i innowacyjnych kierunków badań naukowych.

6.3. Kierunki dalszych badań

W kontekście dalszych prac badawczych związanych ze słonecznymi systemami grzewczymi istnieje wiele różnych kierunków badań, które mogą mieć bardzo pozytywny wpływ zarówno na rozwój samej technologii, jak i polepszenie efektywności wykorzystywanych urządzeń.

Zaprezentowane wyniki prac badawczych potwierdzają potrzebę dalszego rozwoju i wdrażania nowych, efektywniejszych strategii sterowania pracą słonecznych systemów grzewczych. Niezbędne jest przy tym uwzględnienie różnorodnych warunków pracy takich systemów i trudności wynikających ze sposobu ich eksploatacji. Badania prowadzone w tych kierunkach mogą w znaczącym stopniu przyczynić się do zwiększenia wydajności słonecznych systemów grzewczych oraz ich przyjazności dla środowiska naturalnego.

Wartym wskazania kierunkiem dalszych prac badawczych jest również potencjalna analiza ekonomiczna istniejących oraz dopiero projektowanych słonecznych systemów grzewczych. Odpowiednio zaawansowany model ekonomiczny pozwoliłby na precyzyjne określenie

opłacalności inwestowania w rozbudowę systemu grzewczego oraz dobranie odpowiednich strategii ewentualnych inwestycji. To z kolei na pewno wpłynęłoby na popularyzację tego typu rozwiązań oraz zwiększenie świadomości społeczeństwa odnośnie do ekologicznych i ekonomicznych korzyści płynących z wykorzystania odnawialnych źródeł energii.

Kolejnym planowanym krokiem eksploracji tematyki wyboru strategii sterowania w słonecznych systemach grzewczych jest wykorzystanie w tych celach metod sztucznej inteligencji (AI). Sterowniki wykorzystujące zagadnienia AI to zaawansowane urządzenia techniczne będące jednym z komponentów nowoczesnych systemów sterowania. Wykazują one duży potencjał do poprawy wydajności w szerokim spektrum zastosowań, co pozwala przypuszczać, że również w tym zagadnieniu pozwolą na uzyskanie lepszych efektów końcowych. Zgromadzone wyniki pomiarów eksperymentalnych zostaną w związku z tym zastosowane w procesie uczenia maszynowego sztucznych sieci neuronowych, przez co przystosowane zostaną one do kontrolowania procesu transferu ciepła i podejmowania automatycznie decyzji o wyborze strategii sterowania w słonecznym systemie grzewczym.

Spośród możliwych kierunków dalszych prac warto wspomnieć o możliwości rozbudowy zewnętrznej platformy pomiarowej. Aktualne stanowisko badawcze zbudowano z myślą o przeprowadzaniu badań z wykorzystaniem jednego lub dwóch kolektorów słonecznych. Pozwala to na symulowanie warunków pracy małych domowych systemów grzewczych. W przyszłości planowana jest rozbudowa stanowiska umożliwiająca badanie dużych baterii złożonych z wielu kolektorów słonecznych w różnych konfiguracjach pracy. Pozwoli to na uwzględnienie kolejnego czynnika eksploatacyjnego w procesie wyboru odpowiednich strategii sterowania w słonecznych systemach grzewczych. Dodatkowo, przy okazji rozbudowy stanowiska, planowane jest również opracowanie jeszcze bardziej zaawansowanego systemu kontrolno-pomiarowego. Jego zadaniem będzie ciągle śledzenie parametrów pracy, monitorowanie oraz rejestrowanie wydajności systemu grzewczego.

Właściwym kierunkiem dalszych badań wydaje się również praca nad polepszeniem opracowanego narzędzia jakim jest komputerowy model słonecznego systemu grzewczego. Pomimo dobrej jakości i odpowiedniej zbieżności wyników symulacji z eksperymentami, można jeszcze popracować nad zwiększeniem tej dokładności np. poprzez integrację modelu symulacyjnego z danymi pogodowymi w czasie rzeczywistym. Ponadto opracowany model mógłby być rozszerzony o możliwość symulacji bardziej złożonych systemów grzewczych w różnych konfiguracjach oraz przystępniejszy interfejs użytkownika do jego obsługi. Czas i praca poświęcone na ulepszenie modelu komputerowego mogą jeszcze bardziej zwiększyć jego użyteczność.

Bibliografia

- [1] Abokersh, M., El-Morsi, M., Sharaf, O., and Abdelrahman, W. "On-demand Operation of a Compact Solar Water Heater Based on U-pipe Evacuated Tube Solar Collector Combined with Phase Change Material." *Solar Energy* 155 (2017): 1130–1147. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.07.008>.
- [2] Abokersh, M.H., Vallès, M., Saikia, K., Cabeza, L.F., and Boer, D. "Techno-economic Analysis of Control Strategies for Heat Pumps Integrated into Solar District Heating Systems." *Journal of Energy Storage* 42 (2021): 103011. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103011>.
- [3] Abou Akrouh, M., Chahine, K., Faraj, J., Hachem, F., Castelain, C., and Khaled, M. "Advancements in Cooling Techniques for Enhanced Efficiency of Solar Photovoltaic Panels: A Detailed Comprehensive Review and Innovative Classification." *Energy and Built Environment* (2023). <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.11.002>.
- [4] Abu Mallouh, M., AbdelMeguid, H., and Salah, M. "A Comprehensive Comparison and Control for Different Solar Water Heating System Configurations." *Engineering Science and Technology, an International Journal* 35 (2022): 101210. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2022.101210>.
- [5] Alawi, O.A., Kamar, H.M., Mallah, A.R., Mohammed, H.A., Sabrudin, M.A.S., Newaz, K.M.S., Najafi, G., and Yaseen, Z.M. "Experimental and Theoretical Analysis of Energy Efficiency in a Flat Plate Solar Collector Using Monolayer Graphene Nanofluids." *Sustainability* 13 (2021): 5416. <https://doi.org/10.3390/su13105416>.
- [6] Almahmoud, S., and Jouhara, H. "Experimental and Theoretical Investigation on a Radiative Flat Heat Pipe Heat Exchanger." *Energy* 174 (2019): 972–984. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.027>.
- [7] Al-Mamun, M. R., Roy, H., Islam, M. S., Ali, M. R., Hossain, M. I., Aly, M. A. S., Khan, M. Z. H., Marwani, H. M., Islam, A., Haque, E., Rahman, M. M., and Awual, M. R. "State-of-the-art in Solar Water Heating (SWH) Systems for Sustainable Solar Energy Utilization: A Comprehensive Review." *Solar Energy* 264 (2023): 111998. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111998>.
- [8] Araújo, A., and Silva, R. "Energy Modeling of Solar Water Heating Systems with On-off Control and Thermally Stratified Storage Using a Fast Computation Algorithm." *Renewable Energy* 150 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.026>.
- [9] Araújo, A., Ferreira, A. C., Oliveira, C., Silva, R., and Pereira, V. "Optimization of Collector Area and Storage Volume in Domestic Solar Water Heating Systems with On–Off Control A Thermal Energy Analysis Based on a Pre-Specified System Performance." *Applied Thermal Engineering* 219, Part D (2023): 119630. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119630>.
- [10] Araújo, A., Silva, R., and Pereira, V. "Solar Thermal Modeling for Rapid Estimation of Auxiliary Energy Requirements in Domestic Hot Water Production: On-off Versus Proportional Flow Rate Control." *Solar Energy* 177 (2019): 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.11.003>.
- [11] Azad, E. "Theoretical and Experimental Investigation of Heat Pipe Solar Collector." *Experimental Thermal and Fluid Science* 32 (2008): 1666–1672. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2008.05.011>.
- [12] Azhar, K. M., and Idres, A. H. "Analysis of Energy Savings for Residential Electrical and Solar Water Heating Systems." *Case Studies in Thermal Engineering* 27 (2021): 101347. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101347>.

- [13] Azhar, K.M., Hamakhan, I.A., and Weli, R.B. "Effect of Collector Tilt Angle on the Performance of Solar Water Heating System in Erbil of Iraq." *International Journal of Heat and Technology* 40, no. 5 (2022): 1293-1298. <https://doi.org/10.18280/ijht.400523>.
- [14] Behling, R., and Grüner, F. "Diagnostic X-ray Sources—Present and Future." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 878 (2018): 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.05.034>.
- [15] Belhocine, A. "Numerical Study of Heat Transfer in Fully Developed Laminar Flow Inside a Circular Tube." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 85 (2016): 2681–2692. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8104-0>.
- [16] Belhocine, A., and Omar, W.W. "Numerical Study of Heat Convective Mass Transfer in a Fully Developed Laminar Flow with Constant Wall Temperature." *Case Studies in Thermal Engineering* 6 (2015): 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2015.08.003>.
- [17] Belhocine, A., and Wan Omar, W.Z. "An Analytical Method for Solving Exact Solutions of the Convective Heat Transfer in Fully Developed Laminar Flow Through a Circular Tube." *Heat Transfer—Asian Research* 46 (2017): 1342–1353. <https://doi.org/10.1002/htj.21277>.
- [18] Bober, L. "Fale Elektromagnetyczne." Accessed via <https://leszekbober.pl/fizyka/ruch-drgajacy-i-falow/fale-elektromagnetyczne/>.
- [19] Bohdal, T., & Charun, H. *Zasady transportu ciepła cz.1*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2012.
- [20] Bohdal, T., and Charun, H. *Zasady Transportu Ciepła cz.2*. Koszalin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2013.
- [21] Brahim, T., and Jemni, A. "Numerical Case Study of Packed Sphere Wicked Heat Pipe Using Al₂O₃ and CuO Based Water Nanofluid." *Case Studies in Thermal Engineering* 8 (2016): 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2016.09.002>.
- [22] Brottier, L., Naudin, S., Veesser, V., Terrom, G., and Bennacer, R. "Field Test Results of an Innovative PV/T Collector for Solar Domestic Hot Water." *Energy Procedia* 91 (2016): 276-283. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.219>.
- [23] Brown, S., and Beausoleil-Morrison, I. "Experimental Performance of a Full-scale Solar Thermal System Designed to Meet Residential Heating Demands with Passive Solar Energy." *Solar Energy* 264 (2023): 112044. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112044>.
- [24] Brownson, J. R. S. *Solar Energy Conversion Systems*. Academic Press, 2014. ISBN 9780123970213. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397021-3.00026-0>.
- [25] Budden, K.G. *The Propagation of Radio Waves: The Theory of Radio Waves of Low Power in the Ionosphere and Magnetosphere*. Cambridge University Press, 1985.
- [26] Budea, S., and Bădescu, V. "Improving the Performance of Systems with Solar Water Collectors Used in Domestic Hot Water Production." *Energy Procedia* 112 (2017): 398-403. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1088>.
- [27] Budea, S., and Simionescu, Ș. M. "Solar Hybrid System for Electricity and Air Heating - Experimental Research." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1185, no. 1 (2023): Article 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1185/1/012001>.

- [28] Burden, R.L., and Faires, J.D. *Numerical Analysis*. 10th ed. Boston, MA: Cengage Learning, 2015. <https://doi.org/10.13140/2.1.4830.2406>.
- [29] Buzás, J., and Farkas, I. "Solar Domestic Hot Water System Simulation Using Block-oriented Software." <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:45215781>, 2000.
- [30] Buzás, J., Farkas, I., Biró, A., and Németh, R. "Modelling and Simulation Aspects of a Solar Hot Water System." *Mathematics and Computers in Simulation* 48, no. 1 (1998): 33-46. ISSN 0378-4754.
- [31] Camacho, E.F., Rubio, F.R., Berenguel, M., and Valenzuela, L. "A Survey on Control Schemes for Distributed Solar Collector Fields. Part II: Advanced Control Approaches." *Solar Energy* 81 (2007): 1252-1272. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.01.001>.
- [32] Chapra, S.C., and Canale, R.P. *Numerical Methods for Engineers*. 7th ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 978-0-07-339792-4.
- [33] Chiang, W., Permana, I., Wang, F., Chen, H., & Erdenebayar, M. (2022). Experimental investigation for an innovative hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) solar system. *Energy Reports*, 8(suppl. 15), 910-918. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.264>
- [34] Chwieduk, D. (2018). Podstawy pozyskiwania energii słonecznej. W D. Chwieduk & M. Jaworski (red.), *Energetyka odnawialna w budownictwie. Magazynowanie energii* (s. 101–112).
- [35] Daghigh, R., and Shafieian, A. "Theoretical and Experimental Analysis of Thermal Performance of a Solar Water Heating System with Evacuated Tube Heat Pipe Collector." *Applied Thermal Engineering* 103 (2016): 1219-1227. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.041>.
- [36] Dua, B., Hub, E., and Kolhe, M. "An Experimental Platform for Heat Pipe Solar Collector Testing." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 17 (2013): 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.009>.
- [37] Duffie, J.A., and Beckman, W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1991. ISBN 978-0-470-87366-3.
- [38] Ehsanul, K., Pawan, K., Sandeep, K., Adedeji, A., and Ki-Hyun, K. "Solar Energy: Potential and Prospects." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018): 894–900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>.
- [39] Ertekin, C., Kulcu, R., and Evrendilek, F. "Techno-Economic Analysis of Solar Water Heating Systems in Turkey." *Sensors* 8 (2008): 1252-1277. <https://doi.org/10.3390/s8021252>.
- [40] Esmaeilzadeh, A., Silakhori, M., Ghazali, N.N.N., Metselaar, H.S.C., Bin Mamat, A., Sanjani, M.S.N., and Iranmanesh, S. "Thermal Performance and Numerical Simulation of the 1-Pyrene Carboxylic-Acid Functionalized Graphene Nanofluids in a Sintered Wick Heat Pipe." *Energies* 13 (2020): 6542. <https://doi.org/10.3390/en13246542>.
- [41] Essa, M.A., Mostafa, N.H., and Ibrahim, M.M. "An Experimental Investigation of the Phase Change Process Effects on the System Performance for the Evacuated Tube Solar Collectors Integrated with PCMs." *Energy Conversion and Management* 177 (2018): 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.045>.
- [42] European Commission. "Fit for 55': Delivering the EU's 2030 Climate Target on the Way to Climate Neutrality." COM (2021) 550 final. Brussels, Belgium: Consilium, 2021.

- [43] European Commission. "Focus on Solar Energy: Harnessing the Power of the Sun." 2022. https://commission.europa.eu/news/focus-solar-energy-harnessing-power-sun-2022-09-13_pl.
- [44] European Economic and Social Committee. "Opinion of the European Economic and Social Committee on 'The Social Implications of Transport and Energy Developments.'" *Official Journal of the European Union* C175 (2009): 43–49.
- [45] European Parliament and Council. "Directive 2009/28/EC on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources." *Official Journal of the European Union* (2009).
- [46] Eurostat. "Ec.europa.eu/Eurostat 2022." 2022.
- [47] Fadhl, B., Wrobel, L.C., and Jouhara, H. "Numerical Modelling of the Temperature Distribution in a Two-phase Closed Thermosyphon." *Applied Thermal Engineering* 60 (2013): 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.06.044>.
- [48] Faegh, M., and Shafii, M.B. "Experimental Investigation of a Solar Still Equipped with an External Heat Storage System Using Phase Change Materials and Heat Pipes." *Desalination* 409 (2017): 35–128. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.01.023>.
- [49] Fan, J., and Furbo, S. "Buoyancy Effects on Thermal Behavior of a Flat-Plate Solar Collector." *Journal of Solar Energy Engineering*. <https://doi.org/10.1115/1.2840611>.
- [50] Fasiolo, M., Nedellec, R., Goude, Y., and Wood, N. S. "Scalable Visualisation Methods for Modern Generalized Additive Models." *Journal of the Royal Statistical Society: Series B* 29, no. 1 (2020): 78–86.
- [51] Fasiolo, M., Wood, S. N., Zaffran, M., Nedellec, R., and Goude, Y. "qgam: Bayesian Nonparametric Quantile Regression Modeling in R." *Journal of Statistical Software* 100, no. 9 (2021): 1–31. <https://doi.org/10.18637/jss.v100.i09>.
- [52] Feliński, P., and Sekret, R. "Effect of a Low-cost Parabolic Reflector on the Charging Efficiency of an Evacuated Tube Collector/Storage System with a PCM." *Solar Energy* 144 (2017): 758–766. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.073>.
- [53] Fernández-Seara, J., Piñeiro, C., Dopazo, J.A., Fernandes, F., and Sousa, P.X.B. "Experimental Analysis of a Direct Expansion Solar Assisted Heat Pump with Integral Storage Tank for Domestic Water Heating Under Zero Solar Radiation Conditions." *Energy Conversion and Management* 59 (2012): 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.01.018>.
- [54] Feynman, R.P., Leighton, R.B., and Sands, M. *The Feynman Lectures on Physics*. New Millennium ed. Basic Books, 2011. ISBN: 978-0-465-02414-8.
- [55] Filipowicz, M., Wajss, P., Tomski, M., Szubel, M., Sornek, K., and Gastoł, M. "Wykorzystanie Skoncentrowanego Promieniowania Słonecznego w Warunkach Polskich." *Rynek Instalacyjny* nr 12/2012.
- [56] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. *Annual Report*. 2021–2022. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/annual_reports/fraunhofer-ise-annual-report-2021-2022.pdf.
- [57] Global Climate & Energy Project. "Energy Flow Charts."
- [58] Gogół, W., and Jaworski, A. J. "Low Mass Flow Rate in Flat-plate Liquid Heating Solar Collectors." Institute of Heat Engineering.
- [59] Gogół, W., ed. *Konwersja Termiczna Energii Promieniowania Słonecznego w Warunkach Krajowych*. Komitet Termodynamiki i Spalania, Wydział IV Nauk Technicznych, Polska Akademia Nauk, 1993.

- [60] Granqvist, C.G. "Materials Science for Solar Energy Conversion Systems." In *Renewable Energy*, Vol. 1. Pergamon, 1991. ISBN 9780080409375. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-040937-5.50003-6>.
- [61] Greenpeace. "Energy [R]evolution: A Sustainable USA Energy Outlook." 2009. <https://www.greenpeace.org/usa/wp-content/uploads/legacy/Global/usa/report/2009/4/energy-r-evolution-a-sustain.pdf>.
- [62] Gryciuk, M., Kwasiborski, M., and Wiecka, A. "Report Synthesis. Vision of Solar Thermal Energy Development in Poland and Action Plan Up to 2020." Institute For Renewable Energy (IEO), 2009.
- [63] Haghighat, F., and Singh, D. "Improved Control Strategy for Forced Flow Solar Water Heating Systems." *Energy Conversion and Management* 28, no. 4 (1988): 323-326. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(88\)90053-2](https://doi.org/10.1016/0196-8904(88)90053-2).
- [64] Haigh, J.D. "The Sun and the Earth's Climate: Absorption of Solar Spectral Radiation by the Atmosphere." <https://doi.org/10.12942/lrsp-2007-2>.
- [65] Hamed, M., Fellah, A., and Brahim, A.B. "Parametric Sensitivity Studies on the Performance of a Flat Plate Solar Collector in Transient Behavior." *Energy Conversion and Management* 78 (2014): 938-947. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.017>.
- [66] Han, X., Li, C., and Ma, H. "Performance Studies and Energy-Saving Analysis of a Solar Water-Heating System." *Processes* 9 (2021): 1536. <https://doi.org/10.3390/pr9081536>.
- [67] Hansen, G., Næss, E., and Kristjansson, K. "Analysis of a Vertical Flat Heat Pipe Using Potassium Working Fluid and a Wick of Compressed Nickel Foam." *Energies* 9 (2016): 170. <https://doi.org/10.3390/en9030170>.
- [68] Hassan, A.A., Elwardany, A.E., Ookawara, S., and El-Sharkawy, I.I. "Performance Investigation of a Solar-powered Adsorption-based Trigeneration System for Cooling, Electricity, and Domestic Hot Water Production." *Applied Thermal Engineering* 199 (2021): 117553. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117553>.
- [69] Hongbing, C., Yutong, G., Haoyu, N., Xiaoli, Y., and Xilin, C. "Optimization and Performance Study of Residential Centralized Solar Domestic Hot Water System." *Energy Procedia* 158 (2019): 6431-6437. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.176>.
- [70] Institute for Renewable Energy. "Rynek Fotowoltaiki w Polsce 2022." <https://ieo.pl/dokumenty/aktualnosci/25052022/raport%20rynek%20fotowoltaiki%20w%20polsce%202022%20-%20streszczenie.pdf>.
- [71] Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. "Solar Atlas." <https://klimat.imgw.pl/pl/solar-atlas/#sis/Monthly>.
- [72] International Energy Agency. *Electricity Market Report - July 2021*. IEA, Paris, 2021. <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-july-2021>.
- [73] International Energy Agency. *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. 2021.
- [74] IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Edited by H.-O. Pörtner et al. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2022. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- [75] ISO 9806:2017. *Solar Energy-Solar Thermal Collectors—Test Methods*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2017.
- [76] ITU. *Radio Regulations* (PDF) (p. 7). Geneva, CH: International Telecommunication Union, 2016. ISBN 9789261191214.

- [77] Januszajtis, A. *Fale*. Warszawa, Poland: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1991. ISBN 83-01-09708-6.
- [78] Jung, E. G., and Boo, J. H. "Experimental Observation of Thermal Behavior of a Loop Heat Pipe with a Bypass Line Under High Heat Flux." *Energy* 197 (2020): 117241. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117241>.
- [79] Jung, E.G., and Boo, J.H. "A Novel Analytical Modeling of a Loop Heat Pipe Employing the Thin-Film Theory: Part I—Modeling and Simulation." *Energies* 12 (2019): 2408. <https://doi.org/10.3390/en12122403>.
- [80] Jurasz, J., Canales, F.A., Kies, A., Guezgouz, M., and Beluco, A. "A Review on the Complementarity of Renewable Energy Sources: Concept, Metrics, Application, and Future Research Directions." *Solar Energy* 195 (2020): 703–724. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.087>.
- [81] Kalogirou, S. A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. 2nd ed. Academic Press, 2013.
- [82] Kalogirou, S.A. "Solar Thermal Collectors and Applications." *Progress in Energy and Combustion Science* 30 (2004): 231-295. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.001>.
- [83] Kamiński, K. "Analiza Wpływu Wybranych Cech Geometrycznych i Właściwości Termofizycznych Kolektorów Słonecznych Cieczowych na Ich Parametry Ciepłno-Przepływowe: Praca Doktorska." 2015.
- [84] Kamiński, K., and Krzyżyński, T. "Modeling and Simulation of the Solar Collector Using Different Approaches." In *Mechatronics: Ideas, Challenges, Solutions and Applications*. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 414. Springer, Cham, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26886-6_9.
- [85] Kamiński, K., Królikowski, T., Błażejowski, A., and Knitter, R. "Significant Parameters Identification for Optimal Modelling of the Harp-type Flat-Plate Solar Collector." *Smart Innovation, Systems and Technologies* 155 (2019): 495–505. <https://doi.org/10.3390/en14020261>.
- [86] Kardaś, A., Malinowski, S., and Popkiewicz, M. *Nauka o Klimacie*. Wydawnictwo Sonia Draga Post factum, 2023. ISBN 978-83-811-0752-5.
- [87] Kicsiny, R. "Transfer Functions of Solar Heating Systems with Pipes for Dynamic Analysis and Control Design." *Solar Energy* 150 (2017): 596-607. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.006>.
- [88] Kicsiny, R., and Farkas, I. "Improved Differential Control for Solar Heating Systems." *Solar Energy* 86 (2012): 3489-3498. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.08.020>.
- [89] Kicsiny, R., Székely, R., Hermanucz, P., and Géczi, G. "Explicit Analytical Solution of a Differential Equation Model for Solar Heating Systems." *Solar Energy* 222 (2021): 219-229. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.007>.
- [90] Klein, S.A. "Calculation of Flat-Plate Collector Loss Coefficients." *Solar Energy* 17 (1975): 79-80.
- [91] Komitet do Spraw Europejskich. *Krajowy Plan na Rzecz Energii i Klimatu na Lata 2021-2030 (KPEiK)*. 2019.
- [92] Kowalski. "Analiza Zapotrzebowania na Energię Elektryczną w Polsce w Kontekście Europejskiego Zielonego Ładu." 2021.
- [93] Kryzia, D., Gawlik, L., and Pełowska, M. "Conditions for Development of Clean Technologies of Energy Generation from Fossil Fuels." *Energy Policy Journal* 19 (2016): 63–74. ISSN 1429-6675.
- [94] Kudela, L., Chylek, R., and Pospisil, J. "Performant and Simple Numerical Modeling of District Heating Pipes with Heat Accumulation." *Energies* 12 (2019): 633. <https://doi.org/10.3390/en12040633>.

- [95] Kujawska, A., Zajączkowski, B., Wilde, L., and Buschmann, M. "Geyser Boiling in a Thermosyphon with Nanofluids and Surfactant Solution." *International Journal of Thermal Sciences* 139 (2019): 195–216. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.02.001>.
- [96] Kulkarni, M., Deshmukh, D., Shekhawat, S., and Deshmukh, M. "Optimization of Solar Hot Water Storage Tank Performance During Charging Process Using Buckingham's Theorem." 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6879-1_44.
- [97] Kulkarni, M.V., Deshmukh, D.S., and Shekhawat, S.P. "An Innovative Design Approach of Hot Water Storage Tank for Solar Water Heating System Using Artificial Neural Network." *Materials Today Proceedings* 46 (2021): 5400-5405. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.058>.
- [98] Kusto, Z. "Politechnika Gdańska: Wykorzystanie Energii Słonecznej."
- [99] Laseinde, O. T., and Ramere, M. D. "Efficiency Improvement in Polycrystalline Solar Panel Using Thermal Control Water Spraying Cooling." *Procedia Computer Science*
- [100] Li, W.T., Tushar, W., Yuen, C., Ng, B.K.K., Tai, S., and Chew, K.T. "Energy Efficiency Improvement of Solar Water Heating Systems—An IoT Based Commissioning Methodology." *Energy and Buildings* 224 (2020): 110231. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110231>.
- [101] Li, X., Wang, Z., Li, J., Yang, M., Yuan, G., Bai, Y., Chen, L., Xu, T., and Gilmanova, A. "Comparison of Control Strategies for a Solar Heating System with Underground Pit Seasonal Storage in the Non-heating Season." *Journal of Energy Storage* 26 (2019): 100963. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100963>.
- [102] Lüdecke, D. "sjPlot: Data Visualization for Statistics in Social Science." R package version 2.8.15. Dostęp: <https://CRAN.R-project.org/package=sjPlot>, 2023.
- [103] Lüdecke, D., Ben-Shachar, M., Patil, I., Waggoner, P., and Makowski, D. "Performance: An R Package for Assessment, Comparison and Testing of Statistical Models." *Journal of Open Source Software* 6, no. 60 (2021): 3139. <https://doi.org/10.21105/joss.03139>.
- [104] Luo, Y., Andresen, J., Clarke, H., Rajendra, M., and Maroto-Valer, M. "A Decision Support System for Waste Heat Recovery and Energy Efficiency Improvement in Data Centres." *Applied Energy* 250 (2019): 1217–1224. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.029>.
- [105] Ma, R., Li, J., Jin, F., Cao, Y., and Zhao, X. "Fuzzy Theory-based Energy-saving Control of Solar Thermal Supplemental Multi-energy Heating System." *Energy Reports* 8, Supplement 6 (2022): 636-646. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.065>.
- [106] Maddah, H., Ghazvini, M., and Ahmadi, M.H. "Predicting the Efficiency of CuO/Water Nanofluid in Heat Pipe Heat Exchanger Using Neural Network." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 104 (2019): 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.02.002>.
- [107] Makowski, D., Lüdecke, D., Patil, I., Thériault, R., Ben-Shachar, M., and Wiernik, B. "Automated Results Reporting as a Practical Tool to Improve Reproducibility and Methodological Best Practices Adoption." Dostęp: <https://easystats.github.io/report/>.
- [108] Martorana, F., Bonomolo, M., Leone, G., Monteleone, F., Zizzo, G., and Beccali, M. "Solar-assisted Heat Pumps Systems for Domestic Hot Water Production in Small Energy Communities." *Solar Energy* 217 (2021): 113-133. <https://doi.org/10.3390/app10175968>.

- [109] Matuszczyk, P., Popławski, T., and Flaszka, J. "Potencjał i Możliwości Energii Promieniowania Elektromagnetycznego Słońca." *Przegląd Elektrotechniczny*. bwmeta1.element.baztech-77ffa5dc-3222-49eb-a49b-7bb4a1f77c64.
- [110] Meena, C.S., Raj, B.P., Saini, L., Agarwal, N., and Ghosh, A. "Performance Optimisation of Solar-assisted Heat Pump System for Water Heating Applications." *Energies* 14 (2021): 3534. <https://doi.org/10.3390/en14123534>.
- [111] Mehdipour, R., Baniamerian, Z., Golzardi, S., and Sohel-Murshed, S. "Geometry Modification of Solar Collector to Improve Performance of Solar Chimneys." *Renewable Energy* 162 (2020): 160–170. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.151>.
- [112] Ntsaluba, S., Zhu, B., and Xia, X. "Optimal Flow Control of a Forced Circulation Solar Water Heating System with Energy Storage Units and Connecting Pipes." *Renewable Energy* 89 (2016): 108-124. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.047>.
- [113] Obstawski, P., Bakon', T., and Czekalski, D. "Comparison of Solar Collector Testing Methods—Theory and Practice." *Processes* 8 (2020): 1340. <https://doi.org/10.3390/pr8101340>.
- [114] Oliva, A., Costa, M., and P.S.C.D. "Numerical Simulation of Solar Collectors: The Effect of Nonuniform and Nonsteady State of the Boundary Conditions." *Solar Energy* 47 (1991): 359–373. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(91\)90030-Z](https://doi.org/10.1016/0038-092X(91)90030-Z).
- [115] Papadimitratos, A., Sobhansarbandi, S., Pozdin, V., Zakhidov, A., and Hassanipour, F. "Evacuated Tube Solar Collectors Integrated with Phase Change Materials." *Solar Energy* 129 (2016): 9–10. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.12.040>.
- [116] Papillon, P., Paulus, C., Chèze, D., & Lefrançois, F. (2014). A simplified design tool for solar DHW systems in multi-family houses with decentralized storages. *Energy Procedia*, 48, 757-767. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.088>
- [117] Peterson, B. G., and Carl, P. "PerformanceAnalytics: Econometric Tools for Performance and Risk Analysis." R package version 2.0.4. Dostęp: <https://CRAN.R-project.org/package=PerformanceAnalytics>, 2020.
- [118] Peterson, R. A. "Finding Optimal Normalizing Transformations via best-Normalize." *The R Journal* 13, no. 1 (2021): 310-329. <https://doi.org/10.32614/RJ-2021-041>.
- [119] Peterson, R. A., and Cavanaugh, J. E. "Ordered Quantile Normalization: A Semiparametric Transformation Built for the Cross-validation Era." *Journal of Applied Statistics* 47, no. 13-15 (2020): 2312-2327. <https://doi.org/10.1080/02664763.2019.1630372>.
- [120] Pluta, *Podstawy Teoretyczne Fototermicznej Konwersji Energii Słonecznej*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2000. ISBN: 978-83-7814-177-8.
- [121] Pogue, B.W., and Wilson, B.C. "Optical and X-ray Technology Synergies Enabling Diagnostic and Therapeutic Applications in Medicine." *Journal of Biomedical Optics* 23, no. 12 (2018): 1-17. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.23.12.121610>.
- [122] Polska Akademia Nauk. *Komunikat 08/2022 Interdyscyplinarnego Zespołu Doradczego ds. Kryzysu Klimatycznego*, 2022.
- [123] Pourasl, H. H., Barenji, R. V., and Khojastehnezhad, V. M. "Solar Energy Status in the World: A Comprehensive Review." *Energy Reports* 10 (2023): 3474-3493. <https://doi.org/10.1016/j.egyrt.2023.10.022>.

- [124] Quezada–Garcia, S., Sanchez–Mora, H., Polo–Labarrios, M., and Cazares–Ramirez, R. "Modeling and Simulation to Determine the Thermal Efficiency of a Parabolic Solar Trough Collector System." *Case Studies in Thermal Engineering* 16 (2019): 100523. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100523>.
- [125] R Core Team. "R: A Language and Environment for Statistical Computing." R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Dostęp: <https://www.R-project.org/>, 2023.
- [126] Ramkumar, P., Sivasubramanian, M., Raveendiran, P., and Kanna, P.R. "An Experimental Inquisition of Waste Heat Recovery in Electronic Component System Using Concentric Tube Heat Pipe Heat Exchanger with Different Working Fluids Under Gravity Assistance." *Microprocessors and Microsystems* 83 (2021): 104033. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2021.104033>.
- [127] Rehman, H., Hirvonen, J., and Sirén, K. "Design of a Simple Control Strategy for a Community-size Solar Heating System with a Seasonal Storage." *Energy Procedia* 91 (2016): 486-495. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.183>.
- [128] Reinders, A., Verlinden, P., van Sark, W., and Freundlich, A. *Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications*. Wiley, 2017. ISBN: 978-1-118-92746-5.
- [129] Revelle, W. "psych: Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research." Northwestern University, Evanston, Illinois. R package version 2.3.9. Dostęp: <https://CRAN.R-project.org/package=psych>, 2023.
- [130] Rongshan, W., Kui, O., Xiaotian, B., Xiong, G., and Chuandong, C. "High-precision Smart Calibration System for Temperature Sensors." *Sensors and Actuators A: Physical* 297 (2019): 11156. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111561>.
- [131] Rosenberg, D. *Methods for the Numerical Solution of Partial Differential Equations*. New York, NY, USA: American Elsevier Publishing Co, 1969. ISBN: 9780444000491.
- [132] Ruelas, A., Velázquez, N., Villa-Angulo, C., Acuña, A., Rosales, P., and Suastegui, J. "A Solar Position Sensor Based on Image Vision." *Sensors* 17 (2017): 1742. <https://doi.org/10.3390/s17081742>.
- [133] Saloux, E., and Candanedo, J. A. "Model-based Predictive Control to Minimize Primary Energy Use in a Solar District Heating System with Seasonal Thermal Energy Storage." *Applied Energy* 291 (2021): 116840. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116840>.
- [134] Schweiger, H.F., Fabris, C., Ausweger, G., and L., H. "Examples of Successful Numerical Modelling of Complex Geotechnical Problems." *Innovative Infrastructure Solutions* 4 (2019). <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0189-5>.
- [135] Selmi, M., Al-Khawaja, M., and Marafia, A. "Validation of CFD Simulation for Flat Plate Solar Energy Collector." *Renewable Energy* 33 (2008): 383–387. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.02.003>.
- [136] Shen, C., Zhang, Y., Wang, Z., Zhang, D., and Liu, Z. "Experimental Investigation on the Heat Transfer Performance of a Flat Parallel Flow Heat Pipe." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 168 (2021): 120856. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120856>.
- [137] Siegel, P. "Studying the Energy of the Universe." NASA, 2002.
- [138] Song, E.-H., Lee, K.-B., Rhi, S.-H., and Kim, K. "Thermal and Flow Characteristics in a Concentric Annular Heat Pipe Heat Sink." *Energies* 13 (2020): 5282. <https://doi.org/10.3390/en13205282>.
- [139] Statistics Poland. "Energia ze Źródeł Odnawialnych w 2022 Roku." 2022. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/energia-ze-zrodel-odnawialnych-w-2022-roku,10,6.html>.

- [140] Stolarski, M.J., Warminski, K., Krzyzaniak, M., Olba–Ziety, E., and Stachowicz, P. "Energy Consumption and Heating Costs for a Detached House Over a 12-year Period - Renewable Fuels Versus Fossil Fuels." *Energy* 204 (2020): 117952. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117952>.
- [141] Streimikiene, D., Siksnyte-Butkiene, I., and Lekavicius, V. "Energy Diversification and Security in the EU: Comparative Assessment in Different EU Regions." *Economies* 11, no. 83 (2023). <https://doi.org/10.3390/economies11030083>.
- [142] Tagliapietra, S. *Global Energy Fundamentals: Economics, Politics, and Technology*. Cambridge University Press, 2020. <https://doi.org/10.1017/9781108861595>.
- [143] Tajdaran, S., Kendrick, C., Hopkins, E., and Bonatesta, F. "Geometrical Optimisation of Transpired Solar Collectors Using Design of Experiments and Computational Fluid Dynamics." *Solar Energy* 197 (2020): 527–537. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.018>.
- [144] Tariq, S.L., Ali, H.M., Akram, M.A., Janjua, M.M., and Ahmadlouydarab, M. "Nanoparticles Enhanced Phase Change Materials (NePCMs)—A Recent Review." *Applied Thermal Engineering* 176 (2020): 115305. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115305>.
- [145] Tian, S., Lu, Y., Zhou, X., Zhang, L., An, J., Yan, D., Shi, X., and Jin, X. "A New Perspective of Solar Hot Water System Operation Optimization: Supply and Demand Matching." *Renewable Energy* 207 (2023): 89–104. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.016>.
- [146] Tomaszewski, K. *Bezpieczeństwo Energetyczne Państwa*. ISBN 987-83-7285-860-3, 2019.
- [147] Tóth, J., and Farkas, I. "Mathematical Modelling of Solar Thermal Collectors and Storages." *Acta Technologica Agriculturae* 22 (2019): 128–133. <https://doi.org/10.2478/ata-2019-0023>.
- [148] Turgut, O., and O.N. "Three-dimensional Numerical and Experimental Study of Forced Convection Heat Transfer on Solar Collector Surface." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 36 (2009): 274–279. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.10.017>.
- [149] Tytko, R. *Urządzenia i Systemy Energetyki Odnawialnej*. ISBN: 978-83-8111-260-8, 2022.
- [150] United Nations Environment Programme. *Climate Change 2023: Synthesis Report*, 2023.
- [151] United Nations Framework Convention on Climate Change. *Paris Agreement*. FCCC/CP/2015/10/Add.1. UNFCCC, 2016.
- [152] Verma, S.K., Gupta, N.K., and Rakshit, D. "A Comprehensive Analysis on Advances in Application of Solar Collectors Considering Design, Process and Working Fluid Parameters for Solar to Thermal Conversion." *Solar Energy* 208 (2020): 1114–1150. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.042>.
- [153] Villasmil, W., Narula, K., de Oliveira Filho, F., and Patel, M. K. "Simulation Method for Assessing Hourly Energy Flows in District Heating System with Seasonal Thermal Energy Storage." *Renewable Energy* 151 (2020): 1250–1268. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.121>.
- [154] Villasmil, W., Troxler, M., Hendry, R., Schuetz, P., and Worlitschek, J. "Control Strategies of Solar Heating Systems Coupled with Seasonal Thermal Energy Storage in Self-sufficient Buildings." *Journal of Energy Storage* 42 (2021): 103069. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103069>.
- [155] Villasmil, W., Troxler, M., Hendry, R., Schuetz, P., and Worlitschek, J. "Parametric Cost Optimization of Solar Systems with Seasonal Thermal Energy Storage for Buildings." *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124603003>.

- [156] Wang, X., Wang, Y., Chen, H., and Zhu, Y. "A Combined CFD/Visualization Investigation of Heat Transfer Behaviors During Geyser Boiling in Two-phase Closed Thermosyphon." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 121 (2018): 703–714. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.005>.
- [157] Wang, X., Wang, Y., Wang, Z., Liu, Y., Zhu, Y., and Chen, H. "Simulation-based Analysis of a Ground Source Heat Pump System Using Super-long Flexible Heat Pipes Coupled Borehole Heat Exchanger During Heating Season." *Energy Conversion and Management* 164 (2018): 132-143. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.001>.
- [158] Wei, W., Suzhou, D., Zundi, L., Yiping, D., Junye, H., and Mengyang, L. "Experimental Study on the Performance of a Novel Solar Water Heating System with and without PCM." *Solar Energy* 171 (2018): 12–604. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.005>.
- [159] Wickham, H. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York, 2016. ISBN 978-3-319-24277-4. Dostęp: <https://ggplot2.tidyverse.org>.
- [160] Wickham, H., and Bryan, J. "readxl: Read Excel Files." R package version 1.4.3. Dostęp: <https://CRAN.R-project.org/package=readxl>, 2023.
- [161] Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., and Vaughan, D. "dplyr: A Grammar of Data Manipulation." R package version 1.1.3. Dostęp: <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>, 2023.
- [162] Wiley. *The Handbook of Global Energy Policy*. ISBN: 9780470672648, 2013. <https://doi.org/10.1002/9781118326275>.
- [163] Wolańczyk, F. *Jak Wykorzystać Darowaną Energię: o Kolektorach Słonecznych i Ogniwach Fotowoltaicznych*. 2nd ed. Krosno, 2019.
- [164] Wood, S. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*, 2nd ed. Chapman and Hall/CRC, 2017.
- [165] Wood, S. N. "Fast Stable Restricted Maximum Likelihood and Marginal Likelihood Estimation of Semiparametric Generalized Linear Models." *Journal of the Royal Statistical Society: Series B* 73, no. 1 (2011): 3-36.
- [166] Wood, S. N. "Stable and Efficient Multiple Smoothing Parameter Estimation for Generalized Additive Models." *Journal of the American Statistical Association* 99, no. 467 (2004): 673-686.
- [167] Wood, S. N. "Thin-plate Regression Splines." *Journal of the Royal Statistical Society: Series B* 65, no. 1 (2003): 95-114.
- [168] Wood, S. N., Pya, N., and Säfken, B. "Smoothing Parameter and Model Selection for General Smooth Models (with Discussion)." *Journal of the American Statistical Association* 111 (2016): 1548-1575.
- [169] Xiong, Y., Wang, Z., Wu, Y., Xu, P., Ding, Y., Chang, C., and Ma, C. "Performance Enhancement of Bromide Salt by Nano-particle Dispersion for High-temperature Heat Pipes in Concentrated Solar Power Plants." *Applied Energy* 237 (2019): 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.026>.
- [170] Xu, B., Zhang, T., Wang, S., and Chen, Z. "Dynamic Characteristics and Energy Efficiency Evaluation of a Novel Solar Seasonal Thermal Storage - Heating System." *Applied Thermal Engineering* 234 (2023): 121223. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121223>.
- [171] Yang, K.-S., Jiang, M.-Y., Tseng, C.-Y., Wu, S.-K., and Shyu, J.-C. "Experimental Investigation on the Thermal Performance of Pulsating Heat Pipe Heat Exchangers." *Energies* 13 (2020): 269. <https://doi.org/10.3390/en13010269>.

- [172] Zhang, Z., Zhou, Y., Xin, X., Qian, J., and Liu, Y. "A Day-ahead Operation Regulation Method for Solar Water Heating Based on Model Predictive Control." *Energy and Buildings* 301 (2023): 113715. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113715>.
- [173] Zhou, X., Xie, Y., Huang, J. Li, L., and He, B. "BP Neural Network-based Prediction and Optimal Control of Thermoelectric Output of Distributed Solar PV/T Systems." *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences* <https://doi.org/10.2478/amns.2023.2.0>.
- [174] Zhou, X., Wu, L., Xiao, G., Tong, Z., and Li, H. "Experimental Investigation and Economic Analysis on a Solar Pure Water and Hot Water Hybrid System." *Applied Thermal Engineering* 195 (2021): 117182. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117182>.
- [175] Zhurbenko, V., ed. *Electromagnetic Waves*. InTech, 2011. <https://doi.org/10.5772/693>.
- [176] Zimny, J., Brzegowy, R., and Bielick, S. *Kolektory Słoneczne - Podstawy Teoretyczne, Budowa, Badania*. Seria wydawnicza: Problemy inżynierii mechanicznej, ekoenergetyki i inżynierii środowiska. ISBN: 978-83-63318-02-4, 2013.
- [177] Znaczkó, P. P., Szczepański, E., Kamiński, K. P., Chamier-Gliszczyński, N. J., and Kukulski, J. "Experimental Diagnosis of the Heat Pipe Solar Collector Malfunction. A Case Study." *Energies* 14, no. 11 (2021): 3050. <https://doi.org/10.3390/en14113050>.
- [178] Znaczkó, P., Kamiński, K., and Zuchniewicz, J. "A Correlation Study Between Weather Conditions and the Control Strategy of a Solar Water Heating System." In *Scholz S.G., Howlett R.J., Setchi R. (eds) Sustainable Design and Manufacturing 2020*. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 200. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8131-1_8.
- [179] "Agricultural Market Agency." Dostęp: <https://www.ure.gov.pl>.
- [180] "Budowa i Wytrzymałość Paneli Fotowoltaicznych." *Max Energy*. <https://max-energy.pl/fotowoltaika/budowa-i-wytrzymalosc-paneli-fotowoltaicznych/>.
- [181] "Co Wiemy o Albedo Ziemi." *Klimat Ziemi*. <https://klimatziemi.pl/co-wiemy-o-albedo-ziemi>.
- [182] "Czarny Chrom w Kolektorach - Połączenie Nowoczesności i Tradycji." *Instalacje Budowlane*. <https://www.instalacjebudowlane.pl/7272-23-55-czarny-chrom-w-kolektorach---polaczenie-nowoczesnosci-i-tradycji.html>.
- [183] "Energy Regulatory Office." <https://www.ure.gov.pl/pl>.
- [184] "Jak Działa Panel Fotowoltaiczny? Czym Jest Konwersja Fotowoltaiczna?" *Solsystem*. <https://solsystem.pl/jak-dziala-panel-fotowoltaiczny-czym-jest-konwersja-fotowoltaiczna>.
- [185] "Kolektor Próżniowy [Direct Flow czy Heat Pipe]." *SlideShare*. <https://www.slideshare.net/viblog/kolektor-pronowydirect-flow-czy-heat-pipe>.
- [186] "Kolektor Próżniowy o Przepływie." 2010. <http://solaris18.blogspot.com/2010/08/kolektor-prozniowy-o-przeplywie.html>.
- [187] "Kolektory Słoneczne Płaskie." *Hydrosan*. <https://hydrosan.opole.pl/baza-wiedzy/kolektory-sloneczne/kolektory-sloneczne-plaskie/pluta>.
- [188] "Kolektory Słoneczne." *Efekteko*. <http://www.efekteko.pl/baza-wiedzy-i-korzysci/kolektory-sloneczne>.
- [189] "Kolektory Słoneczne." *Powietrze Małopolska*. <https://powietrze.malopolska.pl/baza/kolektory-sloneczne/>.
- [190] "Mikroprofesor." <http://www.mikroprofesor.pl/info/?p=4499>.

- [191] "Odnawialne Źródła Energii." <https://zpe.gov.pl/b/odnawialne-zrodla-energii/PNP9uLjuF>.
- [192] "Pogrom w Fotowoltaice." *Business Insider Polska*. <https://businessinsider.com.pl/biznes/pogrom-w-fotowoltaice-dawid-zielinski-szef-columbus-energy-tysiace-malych-firm-znikna/zqdgllms>.
- [193] "Promieniowanie Słoneczne." *Wikipedia*. https://pl.wikipedia.org/wiki/Promieniowanie_s%C5%82oneczne.
- [194] "Promieniowanie UV." *Uwaga Słońce*. <https://www.uwagaslonce.pl/pl/promieniowanie-uv>.
- [195] "Promieniowanie." *Muzeum Geologiczne*. http://muzeum.pgi.gov.pl/lekcje_int/efekt/promieniowanie.htm.
- [196] "PWN Encyclopedia." <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/;3894614>.
- [197] "Rola Fotowoltaiki w Energetyce Rozproszonej." *Ondeflow*. <https://ondeflow.pl/artykuly/rola-fotowoltaiki-w-energetyce-rozproszonej/>.
- [198] "Solargis." www.solargis.info.
- [199] "Sprawność Kolektorów Słonecznych." *Liquimondo*. <http://www.liquimondo.nl/sprawnosci-kolektorow-slonecznych/>.
- [200] "Transformacja Energetyczna w Polsce: Edycja 2023." *Raportorium*, 2023. <https://raportorium.pl/raporty/transformacja-energetyczna-w-polsce-edycja-2023/#:~:text=,oraz%20dochod%C3%B3w%20z%20ich%20sprzeda%C5%BCy>.
- [201] "Uwarunkowania Środowiskowe Projektowania Budynków Energooszczędnych i Pasywnych: Aktywne i Pasywne Systemy Słoneczne." *Rynek Instalacyjny*. <https://www.rynekinstalacyjny.pl/artykul/kolektory-sloneczne/19889,uwarunkowania-srodowiskowe-projektowania-budynkow-energooszczednych-i-pasywnych-aktywne-i-pasywne-systemy-sloneczne>.
- [202] "Zjawisko Fotowoltaiczne." *Wikipedia*. https://pl.wikipedia.org/wiki/Zjawisko_fotowoltaiczne.

Spis rysunków

Rys. 1.1.	Podział energii otrzymywanej z OZE [57]	20
Rys. 1.2.	Teoretyczny potencjał OZE w stosunku do światowego zapotrzebowania energetycznego w ciągu roku [57]	21
Rys. 1.3.	Filary unii energetycznej [18]	21
Rys. 1.4.	Procentowy udział energii OZE w końcowym zużyciu energii brutto [140]	23
Rys. 1.5.	Udział energii elektrycznej z OZE w całkowitym zużyciu energii elektrycznej w poszczególnych krajach UE [46]	24
Rys. 1.6.	Procentowy udział mocy instalacji OZE zainstalowanych w Polsce w roku 2021 [92]	24
Rys. 1.7.	Widmo promieniowania słonecznego [152]	25
Rys. 1.8.	Widmo światła widzialnego [191]	26
Rys. 1.9.	Widmo promieniowania słonecznego [202]	27
Rys. 1.10.	Rysunek pomocniczy do zdefiniowania pojęcia masy optycznej [121]	28
Rys. 1.11.	Rysunek poglądowy do wyznaczania stałej słonecznej [115]	29
Rys. 1.12.	Rodzaje promieniowania słonecznego [191]	29
Rys. 1.13.	Odbijanie promieniowania w zależności od rodzaju podłoża [112]	30
Rys. 1.14.	Bilans promieniowania na powierzchni Ziemi [191]	31
Rys. 1.15.	Średnie wartości nasłonecznienia w Polsce w latach 2004-2010 [186]	34
Rys. 1.16.	Składowe potencjału EPS [43]	35
Rys. 1.17.	Dystrybucja ciepła w pasywnym słonecznym systemie grzewczym [134]	38
Rys. 1.18.	Uproszczony podział kolektorów słonecznych [196]	39
Rys. 1.19.	Rodzaje konfiguracji układu rurowego absorbera w kolektorze płaskim, 1 - układ harfowy, 2 - układ podwójnej harfy, 3 - układ poziomy meandrowy, 4 - układ pionowy meandrowy [177]	40
Rys. 1.20.	Schemat przykładowego słonecznego systemu grzewczego w uproszczonym ujęciu [13]	41
Rys. 1.21.	Oznaczenie kątów w układzie kolektor - Słońce [34]	45
Rys. 1.22.	Schemat przedstawiający zasadę działania sterownika słonecznego (opracowanie własne)	52
Rys. 1.23.	Przykładowe charakterystyki pracy wybranego sterownika solarnego (opracowanie własne)	53
Rys. 1.24.	Najpowszechniejsze metody sterowania pracą słonecznych systemów grzewczych (opracowanie własne)	54
Rys. 1.25.	Schemat przebiegu prac badawczych [4]	55
Rys. 1.26.	Blokowe modele symulacyjne porównywanych kolektorów słonecznych [147]	56
Rys. 1.27.	Zmiany wymaganej powierzchni kolektora słonecznego A w zależności od wybranych objętości dla zadanej frakcji słonecznej $F=0,8$ a) kolektor z pojedynczym przeszkleniem b) kolektor z podwójnym przeszkleniem [5]	58
Rys. 3.1.	Schemat przepływu strumieni energii w słonecznym systemie grzewczym	70
Rys. 3.2.	Schemat ideowy kolektora słonecznego	71
Rys. 3.3.	Uproszczony schemat ideowy modelowanego kolektora słonecznego	73
Rys. 3.4.	Schemat ideowy modelowanych przewodów hydraulicznych	74
Rys. 3.5.	Uproszczony schemat ideowy modelowanych przewodów grzewczych	76
Rys. 3.6.	Schemat modelowanego wymiennika ciepła	77
Rys. 3.7.	Uproszczony schemat ideowy modelowanego wymiennika ciepła	79
Rys. 3.8.	Schemat zasobnika magazynującego	80
Rys. 3.9.	Uproszczony schemat ideowy modelowanego zasobnika wodnego	81
Rys. 3.10.	Poglądowy schemat modelu symulacyjnego	83
Rys. 3.11.	Struktura modelu systemu grzewczego w programie Simscape z oznaczonymi węzłami	84
Rys. 3.12.	Schemat stanowiska badawczego kolektorów słonecznych	88
Rys. 3.13.	Stanowisko badawcze [83]	89
Rys. 3.14.	Wykorzystywane podczas prac badawczych urządzenia pomiarowe: a - pyranometr, b - anemometr, c - przetwornik wilgotności	90
Rys. 3.15.	System akwizycji danych z uruchomioną aplikacją pomiarową	91
Rys. 3.16.	Bateria kolektorów słonecznych zamontowana na platformie zewnętrznej	92

Rys. 3.17.	Porównanie wyników eksperymentu z wynikami symulacji dla dnia 22.05.2022.....	93
Rys. 3.18.	Porównanie wyników eksperymentu z wynikami symulacji dla dnia 8.06.2022.....	94
Rys. 3.19.	Porównanie uśrednionych wyników eksperymentu i symulacji komputerowej	95
Rys. 4.1.	Macierz korelacji opisująca powiązanie pomiędzy zmiennymi wraz z histogramami oraz wykresami rozrzutu badanych zmiennych (istotność w przypadku *** - $p < 0,001$, ** - $p < 0,010$).	105
Rys. 4.2.	Zależności funkcjonalne w modelu GAM wizualizacja efektów wygładzonych dla zmiennych niezależny	111
Rys. 4.3.	Wizualna diagnostyka modelu GAM (wykres kwantyl-kwantyl reszt modelu, wykres reszt względem liniowych wartości predyktora, histogram reszt modelu, wykres dopasowania względem obserwowanych wartości odpowiedzi).	112
Rys. 5.1.	Wartości współczynnika X_{sol} dla wybranych dni pomiarowych.....	117
Rys. 5.2.	Wartości współczynnika $X_{\dot{Q}_u}$ dla wybranych dni pomiarowych	119
Rys. 5.3.	Wartości współczynnika E_{var} dla wybranych dni pomiarowych	120
Rys. 5.4.	Charakterystyki pracy pompy dla zaproponowanych trybów	121
Rys. 5.5.	Podział dni na grupy pogodowe.....	122
Rys. 5.6.	Przebiegi czasowe promieniowania słonecznego oraz masowego natężenia przepływu w dniu 22.05.2018	123
Rys. 5.7.	Przebiegi czasowe promieniowania słonecznego oraz masowego natężenia przepływu w dniu 22.06.2018	123
Rys. 5.8.	Przebiegi czasowe promieniowania słonecznego oraz masowego natężenia przepływu w dniu 16.05.2018	124
Rys. 5.9.	Przebiegi czasowe promieniowania słonecznego oraz masowego natężenia przepływu w dniu 16.05.2018	125
Rys. 5.10.	Zestawienie badanych systemów sterowania. Układ klasycznego (a) oraz zaproponowanego systemu sterowania (b)	128
Rys. 5.11.	Schemat działania metody ON-OFF	128
Rys. 5.12.	Solarny kontroler dwustanowy ESCO PT-20+	129
Rys. 5.13.	Sterownik solarny Tech ST-402n	130
Rys. 5.14.	Sterownik G-425-P01 Geco.....	131
Rys. 5.15.	Wyniki pomiarów charakterystyki masowego natężenia przepływu w funkcji różnicy temperatur 131	
Rys. 5.16.	Wyniki pomiarów charakterystyki masowego natężenia przepływu w funkcji różnicy temperatur 132	
Rys. 5.17.	Wyniki pomiarów charakterystyki masowego natężenia przepływu w funkcji różnicy temperatur sterownika IPC	133
Rys. 5.18.	Wyniki pomiarów operacji słonecznej oraz masowego natężenia przepływu w dniu 12 czerwca. Metoda sterowania: ON-OFF	135
Rys. 5.19.	Wyniki pomiarów temperatur na kolektorze i zasobniku w dniu 12 czerwca.	136
Rys. 5.20.	Wyniki pomiarów temperatur na kolektorze i zasobniku w dniu 3 lipca.....	137
Rys. 5.21.	Wyniki pomiarów operacji słonecznej oraz masowego natężenia przepływu w dniu 3 lipca. Metoda sterowania: ON-OFF	137
Rys. 5.22.	Wyniki pomiarów temperatur na kolektorze i zasobniku w dniu 30 maja.....	139
Rys. 5.23.	Wyniki pomiarów operacji słonecznej oraz masowego natężenia przepływu w dniu 30 maja. Metoda sterowania: PROPORCJONALNA	139
Rys. 5.24.	Wyniki pomiarów temperatur na kolektorze i zasobniku w dniu 22 maja.....	141
Rys. 5.25.	Wyniki pomiarów operacji słonecznej oraz masowego natężenia przepływu w dniu 22 maja. Metoda sterowania: IPC.....	141
Rys. 5.26.	Algorytm działania sterownika adaptacyjnego	147
Rys. 5.27.	Zestawienie wyników sterownika klasycznego ze sterownikiem adaptacyjnym w każdej z grup pogodowych.....	150
Rys. 5.28.	Sumaryczne wartości stosunków pozyskanej/dostępnej energii dla obu sterowników.....	151

Spis tabel

Tabela 1. Zestawienie wartości parametrów różnych rodzajów kolektorów słonecznych	73
Tabela 2. Podstawowe parametry inicjalizacyjne do modelu komputerowego	85
Tabela 3. Specyfikacja techniczna pyranometru LP PYRA - 02.....	87
Tabela 4. Specyfikacja techniczna anemometru LAMBRECHT 14577	90
Tabela 5. Specyfikacja techniczna przetwornika wilgotności HD9008TR	90
Tabela 6. Specyfikacja techniczna czujników temperatury PT100 RTD	91
Tabela 7. Specyfikacja techniczna kolektora KSH-2.0	92
Tabela 8. Statystyki opisowe badanego zbioru, <i>Nobs</i> = 2000	103
Tabela 9. Wyniki procedury testowania modeli GAM o różnym składzie zmiennych	106
Tabela 10. Specyfikacja funkcji wygładzających ostatecznego modelu GAM	107
Tabela 11. Wyniki współczynników dopasowanego modelu GAM.....	108
Tabela 12. Ocena złożoności i znaczenia wartości wygładzających w modelu GAM	110
Tabela 13. Współczynniki dopasowanego modelu regresji liniowej.....	115
Tabela 14. Zestawienie uśrednionych wartości współczynników dla różnych grup pogodowych	126
Tabela 15. Specyfikacja sterownika ESCO PT-20+	129
Tabela 16. Zestawienie przykładowych parametrów pracy sterownika solarnego ST-402n.....	130
Tabela 17. Zestawienie wyników badań eksperymentalnych.....	134
Tabela 18. Zestawienie uśrednionych wyników danych eksperymentalnych i symulacji komputerowej	144
Tabela 19. Najważniejsze parametry układu sterownika adaptacyjnego.....	145
Tabela 20. Zestawienie wyników badań polowych dla sterowników klasycznego i adaptacyjnego	148