

Optymalizacja pracy zasobnika ciepła w elektrowni słonecznej z centralnym absorberem

inż. Aleksandra Jezioro*
Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska

e-mail: ola.jezioro@op.pl

Słowa kluczowe: elektrownia słoneczna, kolektor słoneczny, zasobnik ciepła, optymalizacja, model matematyczny

Streszczenie

Niniejsza praca dotyczy uproszczonej optymalizacji pracy zasobnika ciepła w elektrowni słonecznej z centralnym absorberem. Optymalizacja ta została dokonana ze względu na aspekt energetyczny oraz ekonomiczny. Założono, iż analizowana elektrownia słoneczna zlokalizowana jest w południowo – wschodniej części Polski – Zamość. Wzorem do wykonania analizy była istniejąca elektrownia „wieżowa” Gemasolar. Elektrownia ta zlokalizowana jest w Hiszpanii, okolice Sevilli.

Analiza energetyczna obejmuje obliczenia z uwagi na maksymalizację produkcji energii elektrycznej. Uzasadnia ona rozbudowanie obiektu elektrowni słonecznej o zasobnik ciepła. Roczna sprawność energetyczna definiowana (3.2.10) jako iloraz sumy energii elektrycznej uzyskanej z promieniowania słonecznego i dodatkowej energii elektrycznej pochodzącej z zasobnika ciepła do energii pochodzącej z promieniowania słonecznego, dla pojedynczego zasobnika ciepła plasuje się na poziomie 42%. Zamontowanie kolejnych zasobników powoduje wzrost sprawności energetycznej. Takie założenia powodują, iż roczny przychód ze sprzedaży wyprodukowanej energii elektrycznej dla pojedynczego zasobnika ciepła wynosi około 8 800 tys. zł (tab.3.3.2).

Optymalizacja pracy zasobnika ciepła ze względu na aspekt ekonomiczny (wykorzystanie zasobnika w szczycie zapotrzebowania) wskazuje, iż roczna sprawność energetyczna (definiowana jak wyżej) dla pojedynczego zasobnika ciepła wynosi 36%.

* Rozdział przygotowano podczas pracy nad projektem dyplomowym magisterskim wykonywanym przez autora w Instytucie Techniki Ciepłej na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej, pod opieką dra inż. Tomasza Burego.

Kolejne zasobniki ciepła nie powodują widocznego wzrostu sprawności energetycznej. Zauważono natomiast wzrost rocznego przychodu ze sprzedaży energii elektrycznej o 80 000zł.

Wykaz podstawowych oznaczeń i symboli

a – pole powierzchni pojedynczego lustra w elektrowni Gemasolar, m^2 ;

A_{zw} – powierzchnia pola heliostatów; m^2 ;

c_w – ciepło właściwe wody, $\frac{kJ}{kg \cdot K}$;

c_{soli} – ciepło właściwe roztworu soli, $\frac{kJ}{kg \cdot K}$;

ρ_{soli} – średnia gęstość roztworu soli $\frac{kg}{m^3}$;

E_{eli} – wyprodukowana energia elektryczna w i-tej godzinie, MJ;

E_{elm} – wyprodukowana energia elektryczna w m-tym miesiącu, MJ;

$E_{el\ dod\ i}$ – dodatkowa energia elektryczna w i-tej godzinie, pozyskana z zasobnika ciepła, MJ;

$E_{el\ dod\ m}$ – dodatkowa energia elektryczna w m-tym miesiącu, pozyskana z zasobnika ciepła, MJ;

i_1 – entalpia właściwa pary na wlocie do turbiny parowej, $\frac{kJ}{kg}$;

i_{2s} – teoretyczna entalpia właściwa pary za turbiną parową, $\frac{kJ}{kg}$;

i_2 – rzeczywista entalpia właściwa pary za turbiną parową, $\frac{kJ}{kg}$;

i_3 – entalpia właściwa pary na wlocie do wytwornicy pary, $\frac{kJ}{kg}$;

I_s – nasłonecznienie, $\frac{W}{m^2}$;

I_{si} – bezpośrednie natężenia promieniowania w i-tej godzinie $\frac{W}{m^2}$;

m – kolejny miesiąc;

\dot{m}_1 – strumień masowy pary na wlocie do turbiny parowej, $\frac{kg}{s}$;

\dot{m}_{soli} – strumień masowy roztworu soli, $\frac{kg}{s}$;

n – niezbędna ilość luster;

N_{eln} – nominalna moc elektryczna, MW;

N_{eli} – moc elektryczna w i-tej godzinie, MW;

$N_{el\ dod\ zc\ i}$ – dodatkowa moc elektryczna z zasobnika ciepła w i-tej godzinie, MW;

$N_{el\ sum\ i}$ – sumaryczna moc elektryczna w i-tej godzinie, MW;

N_{iT} – moc wewnętrzna turbiny parowej, MW;

p_1 – ciśnienie pary na wlocie do turbiny parowej, Pa;

p_2 – ciśnienie pary na wylocie z turbiny parowej, Pa;

t_{in} – wlotowa temperatura roztworu soli, °C;

t_{out} – wylotowa temperatura roztworu soli, °C;

ΔT_{soli} – różnica temperatury roztworu soli w obiegu pierwotnym;

t_1 – temperatura pary na wlocie do turbiny parowej, °C;

t_3 – temperatura wody zasilającej na wlocie do wytwornicy pary, °C;

Q_s – energia pochodząca z promieniowania słonecznego, kJ;

\dot{Q}_{sp} – rzeczywisty strumień ciepła pochodzący z promieniowania słonecznego, *MW*;
 \dot{Q}_{spn} – nominalny strumień ciepła pochodzący z promieniowania słonecznego, *MW*;
 \dot{Q}_{spi} – strumień ciepła pochodzący z promieniowania słonecznego w i-tej godzinie, *MW*;
 \dot{Q}_{spm} – strumień ciepła pochodzący z promieniowania słonecznego w m-tym miesiącu, *MW*;
 \dot{Q}_{WP} – strumień ciepła wymieniony w wytwornicy pary, *MW*;
 V_{mag} – objętość zmagazynowanej soli, m^3 ;
 V_{obl} – obliczona objętość zasobnika ciepła, m^3 ;
 V_{pobi} – objętość soli pobranej z zasobnika w i-tej godzinie, m^3 ;
 V_{sumi} – sumaryczna objętość zmagazynowanej soli w i-tej godzinie, m^3 ;
 V_{solzci} – objętość soli potrzebnej z zasobnika ciepła w i-tej godzinie, m^3 ;
 $V_{solpobzci}$ – objętość soli pobranej z zasobnika ciepła w i-tej godzinie, m^3 ;
 $V_{\%i}$ – procentowy stopień zapełnienia zasobnika w i-tej godzinie, %;
 η_A – sprawność absorbera, %;
 η_{emG} – sprawność elektromechaniczna generatora, %;
 η_{iT} – sprawność wewnętrzna turbiny, %;
 η_{mT} – sprawność mechaniczna turbiny, %;
 η_{WP} – sprawność wytwornicy pary, %;

1 Wprowadzenie

Energia elektryczna jest produktem, powstającym w elektrowni, w wyniku następujących po sobie procesów konwersji pierwotnych substratów. Energia podlega prawom rynku, jest ona produktem obrotowym na rynku cieszącym się zadowalającym popytem.

Zużycie energii elektrycznej z roku na rok jest coraz większe. Wzrost ten spowodowany jest rozwojem oraz lepszym standardem życia mieszkańców cywilizowanych państw.

W celu wytworzenia energii elektrycznej, wykorzystuje się następujące źródła energii:

- konwencjonalne źródła energii;
- alternatywne źródła energii.

Do pierwszej grupy źródeł energii, które wykorzystywane są znacznie szybciej niż odnawiają swoje zasoby, zaliczamy paliwa kopalne. Są to substancje, które powstały w wyniku rozkładu związków organicznych, zalegających długi czas pod powierzchnią ziemi. Paliwa kopalne obejmują:

- węgiel kamienny;
- gaz ziemny;
- torf.
- węgiel brunatny;
- ropę naftową.

Druga grupa, zawiera zasoby energii, których wykorzystanie nie powoduje zbyt długiego deficytu oraz takie, które potrafią odnowić się w krótkim czasie:

- promieniowanie słoneczne;
- wiatr;
- woda;
- geotermia [1].

Promieniowanie słoneczne budzi największe oczekiwania spośród wszystkich wymienionych wcześniej alternatywnych źródeł energii. Nadzieja ta oparta jest o najważniejszą zaletę, dostępność tej formy energii oraz brak wytwarzania szkodliwych dla środowiska zanieczyszczeń. Ograniczeniami dla tego źródła energii są warunki klimatyczne oraz wysokie

nakłady inwestycyjne. Podstawowe sposoby wykorzystania energii promieniowania słonecznego obejmują:

- wykorzystanie w procesach niskotemperaturowych promieniowania bezpośredniego i rozproszonego;
- wykorzystanie promieniowania bezpośredniego w procesach wysokotemperaturowych;
- bezpośrednia konwersja promieniowania słonecznego na energię elektryczną – ogniwa fotowoltaiczne.

Płaski kolektor słoneczny, poprzez absorpcję energii słonecznej stanowi źródło energii niskotemperaturowej. Energia ta może być wykorzystywana do:

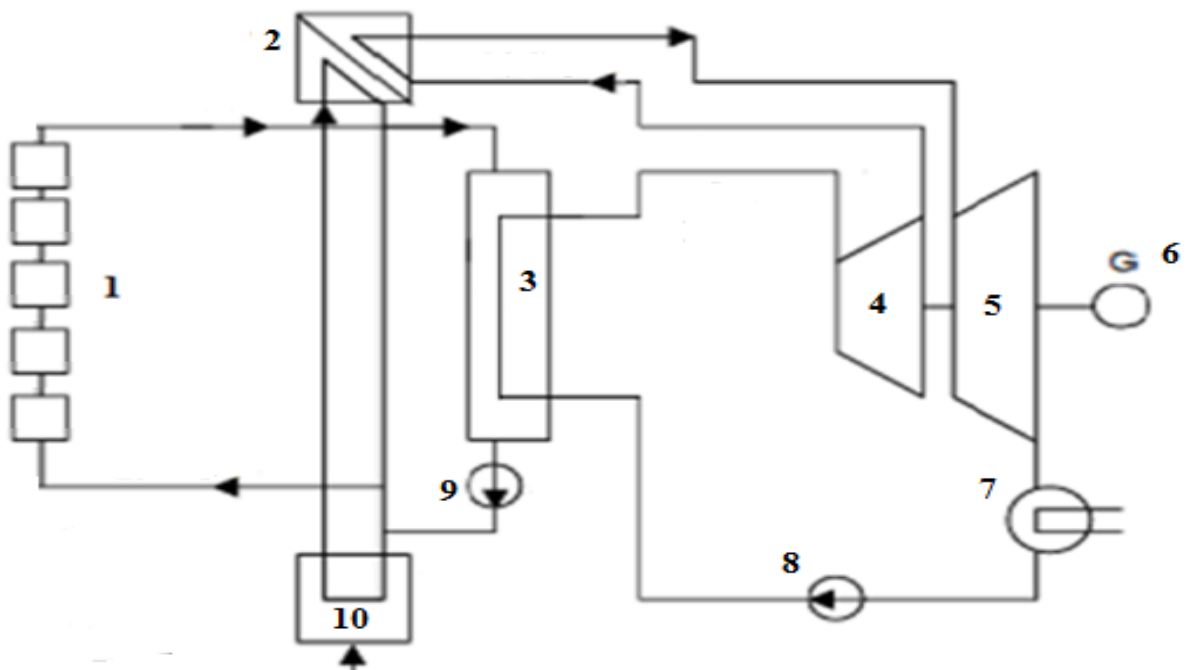
- suszenia płodów rolnych oraz podgrzewania gruntu w tunelach;
- ogrzewnictwa (biura, domy mieszkalne);
- ciepłownictwa (ciepła woda użytkowa);
- rekreacji (podgrzewanie wody w stawach hodowlanych oraz w basenach kąpielowych).

Wykorzystanie energii słonecznej w Polsce w zastosowaniach rolniczych jest największe oraz najbardziej uzasadnione ekonomicznie [2].

1.1 Charakterystyka elektrowni słonecznych

1.1.1. Farmowe elektrownie słoneczne

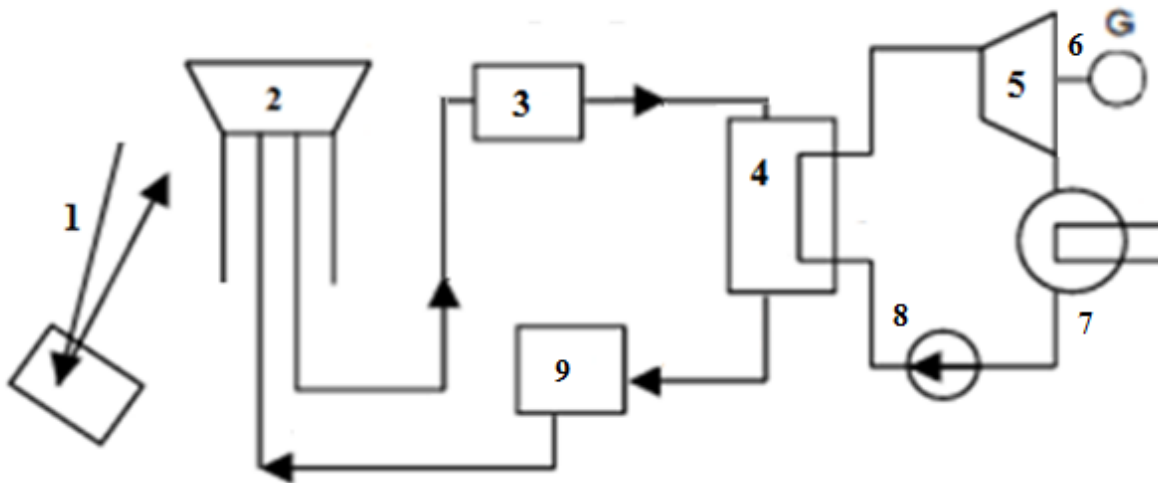
Siłownie słoneczne wykorzystujące nośnik energii w sposób zdecentralizowany, wyposażone w obieg pośredni czynnika roboczego nazywane są farmami słonecznymi. Rysunek 1.1.1 przedstawia schemat „farmowej” elektrowni słonecznej. Farma słoneczna zobrażowana na rysunku 1.1.1 składa się z koncentratorów parabolicznych (1), tworzących obieg pierwotny. Konwersja promieniowania słonecznego w ciepło ma miejsce w równoległe połączonych absorberach rurowych. W obiegu pierwotnym jako nośnik ciepła stosuje się oleje syntetyczne, które podgrzewane są w kolektorach do temperatury około 390°C . W wytwornicy pary, będącej izobarycznym wymiennikiem ciepła, dochodzi do przekazania ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym obiegu pierwotnego, a czynnikiem obiegowym obiegu wtórnego. W wyniku procesu powstaje para o temperaturze 370°C oraz ciśnienie 10MPa. Para świeża doprowadzana jest do części wysokoprężnej turbiny (7), gdzie ekspanduje, a następnie kierowana jest do przegrzewacza wtórnego (4) w celu ponownego ogrzania do temperatury pary świeżej. Przegrzana para kierowana jest na kolejny stopień - część niskoprężną turbiny (8), następnie para trafia do skraplacza (10). Powstały kondensat za pomocą pompy (11) jest tłoczony do wytwornicy pary. Opisany układ wyposażony jest w dodatkowe źródło ciepła w postaci kotła. Stosowane jest paliwo gazowe lub ciekłe. Sprawność konwersji energii słonecznej w elektryczną w systemie zdecentralizowanym wynosi około 15%.



Rys. 1.1.1 Schemat słonecznej elektrowni „farmowej”; 1 – pole kolektorów z zwierciadłami parabolicznymi, 2– przegrzewacz wtórny, 3 – wytwornica pary, 4 – część wysokoprężna turbiny, 5 – część niskoprężna turbiny, 6 – generator, 7 – skraplacz, 8 – pompa czynnika w obiegu wtórnym, 9– pompa czynnika w obiegu pierwotnym, 10 – wspomagająca komora spalania [3]

1.1.2. Elektrownie słoneczne z centralnym absorberem

Energia słoneczna wykorzystywana jest w znacznie efektywniejszy sposób w elektrowniach słonecznych wieżowych (Rys.1.1.2). System scentralizowany obejmuje absorber centralny umieszczony na wieży (2) oraz zwierciadła (1) podążające za ruchem Słońca na nieboskłonie w ciągu dnia. Wieża koncentruje promienie słoneczne, które uległy odbiciu od powierzchni zwierciadeł. Obieg parowy dla obu typów elektrowni jest taki sam. Zastosowanie tego typu elektrowni jest efektywniejsze ($\eta <18\% - 25\%>$), gdyż czynnik roboczy w obiegu pierwotnym osiąga wyższe poziomy temperatury, niż dla elektrowni „farmowej”. Wyższy poziom temperaturowy zostaje osiągnięty dzięki zastosowaniu koncentratorów skupiających, które przyczyniają się do zwiększenia gęstości promieniowania słonecznego od 1,5 do 10 000 razy. Przy takim rozwiązaniu technologicznym temperatura czynnika roboczego w systemach zdecentralizowanych może dochodzić do 4 000 K (tzw. piece słoneczne). Sprawność cieplna dla takiego typu kolektora jest niższa niż dla kolektora płaskiego. Wynika to z diametralnie różnych różnic temperatury między czynnikiem obiegowym, a otoczeniem. W celu efektywniejszego wykorzystania energii promieniowania słonecznego stosuje się układ nadążny, odpowiadający za ustawienie koncentratorów pod odpowiednim kątem oraz śledzenie ruchu Słońca.



Rys. 1.1.2 Schemat słonecznej elektrowni „wieżowej” z ciekłymi solami metali w konturze pierwotnym, 1 – pole heliostatów, 2 – wieża z absorberem, 3, 9 – zbiornik medium chłodzącego, 4 – wytwornica pary, 5 – turbina, 6 – generator, 7 – skraplacz, 8 – pompa czynnika w obiegu wtórnym [3].

1.1.3. Fotowoltaiczne elektrownie słoneczne

Kolejny sposób wykorzystania energii słonecznej jest to bezpośrednia zamiana na energię elektryczną. Taki sposób pozyskiwania energii przyczynia się jednocześnie do redukcji emisji dwutlenku węgla – wytwarzanie prądu nie generuje żadnych szkodliwych związków, takich jak gazy cieplarniane. Konwersja ta realizowana jest w ogniwach fotowoltaicznych. Ogniwo słoneczne to element półprzewodnikowy, który realizuje proces konwersji w wyniku zjawiska fotowoltaicznego. Oparte jest na półprzewodnikowym złączu typu p-n, w którym elektrony przemieszczają się do obszaru n dzięki fotonom światła słonecznego o energii większej niż szerokość przerwy energetycznej półprzewodnika. Dziury natomiast przemieszczają się do obszaru p. To przemieszczenie ładunku powoduje pojawienie się zewnętrznego napięcia elektrycznego. Najczęściej stosowanymi materiałami półprzewodnikowymi są krzem (Si), german (Ge), cyna (Sn). Energetyczna sprawność wytwarzania energii elektrycznej w fotoogniwie w warunkach laboratoryjnych szacowana jest na około 29%. Rzeczywiście, osiągnięte w komercyjnie dostępnych modułach fotowoltaicznych, wartości są niższe niż 20%. Ten sposób wykorzystania energii słonecznej może być najbardziej efektywny. Elektryczność jest uniwersalną formą energii, wykorzystywaną do zasilania wszelkich urządzeń elektrycznych, ale także do ogrzewania lub przygotowania ciepłej wody.

Fotoogniwa stosowane są jako trwałe i niezawodne źródła energii między innymi w następujących przypadkach:

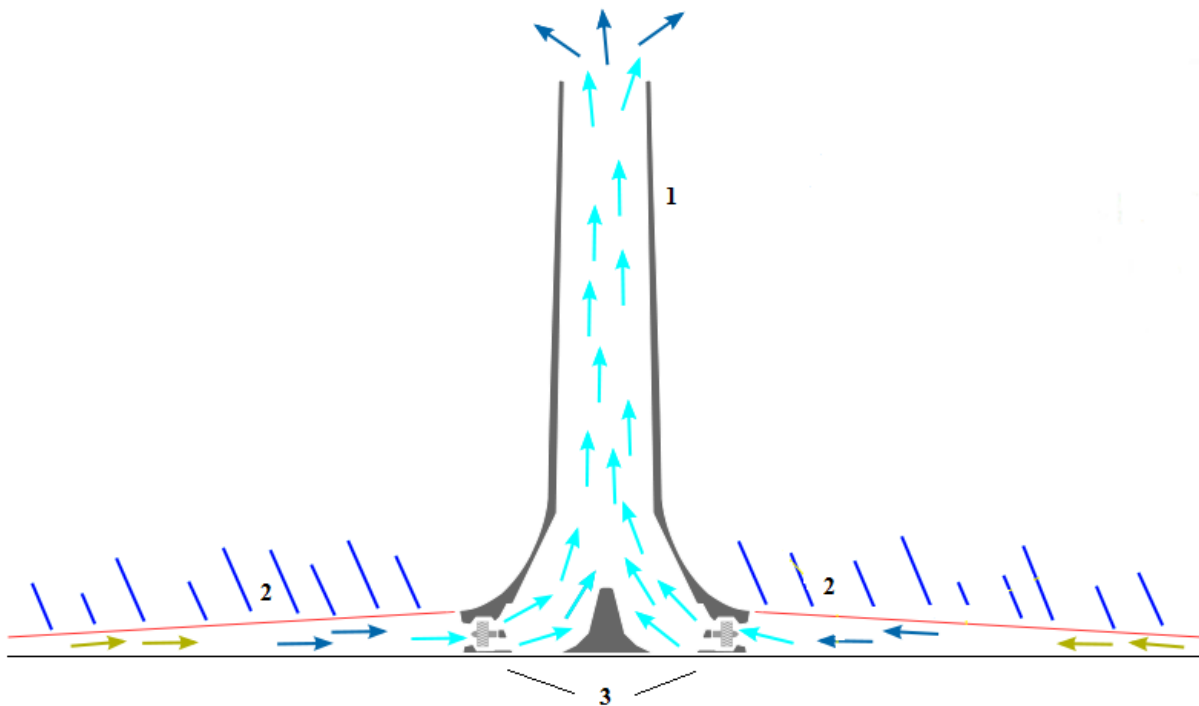
- elektrowniach słonecznych;
- elektronika użytkowa (zegarki, kalkulatory);
- lampy ogrodowe;
- oświetlenie znaków drogowych i wspomaganie sygnalizacji świetlne.

Bezpośrednia konwersja energii promieniowania słonecznego znalazła zastosowanie w farmach słonecznych zajmujących duże powierzchnie. Elektrownie słoneczne są instalacjami o prostej konstrukcji. Składają się z następujących elementów:

- moduły słoneczne – baterie;
- inwertery – urządzenie przekształcające ładunki pobrane z baterii na energię elektryczną;
- przewody umożliwiające połączenie elementów składowych, wraz z akcesoriami niezbędnymi do montażu [2].

1.1.4. Elektrownie słoneczne z wieżą turbinową

W obecnej chwili wieże słoneczne są rozwiązaniem koncepcyjnym, ale bardzo ciekawym. W wieżach turbinowych (Rys.1.1.4) wykorzystuje się efekt kominowy do napędu turbin powietrznych napędzających generatory elektryczne. Wieża ta jest betonową, pustą w środku konstrukcją. U podstawy tej wieży zamontowany jest szereg turbin powietrznych (3). Teren wokół wieży solarnej zabudowany jest szklaną konstrukcją (2). Na końcu szklarni znajdują się swobodne wloty powietrza. Promieniowanie słoneczne padające na powierzchnię szklanych dachów specjalnych szklarni powoduje ich nagrzewanie. Kolejno, krążące wewnątrz powietrze, odbiera ciepło od ogrzanych powierzchni, podwyższając swoją temperaturę do poziomu 70°C . W tym momencie powietrze wewnątrz ma wyższą temperaturę niż powietrze otaczające wieżę (20°C). Podgrzane powietrze powoduje tworzenie się różnic gęstości pomiędzy powietrzem znajdującym się w kominie, szklarnią, a powietrzem zewnętrznym. Powstała różnica temperatury wywołuje powstawanie dużego podciśnienia w kominie. Nagrzane powietrze przemieszcza się w kierunku komina (1), kolejno wznosząc się ku górze. Taki ruch jest konsekwencją wypychania gorących mas powietrza przez chłodniejsze powietrze znajdujące się u podstawy szklanego kolektora. Wypychane, gorące powietrze z dużą prędkością napędza turbiny umieszczone w dolnej części komina. Prędkość ta dochodzi do 15 m/s. Wieża turbinowa pracuje również przy mniejszym nasłonecznieniu oraz w nocy, wykorzystując ciepło nagromadzone w ziemi.

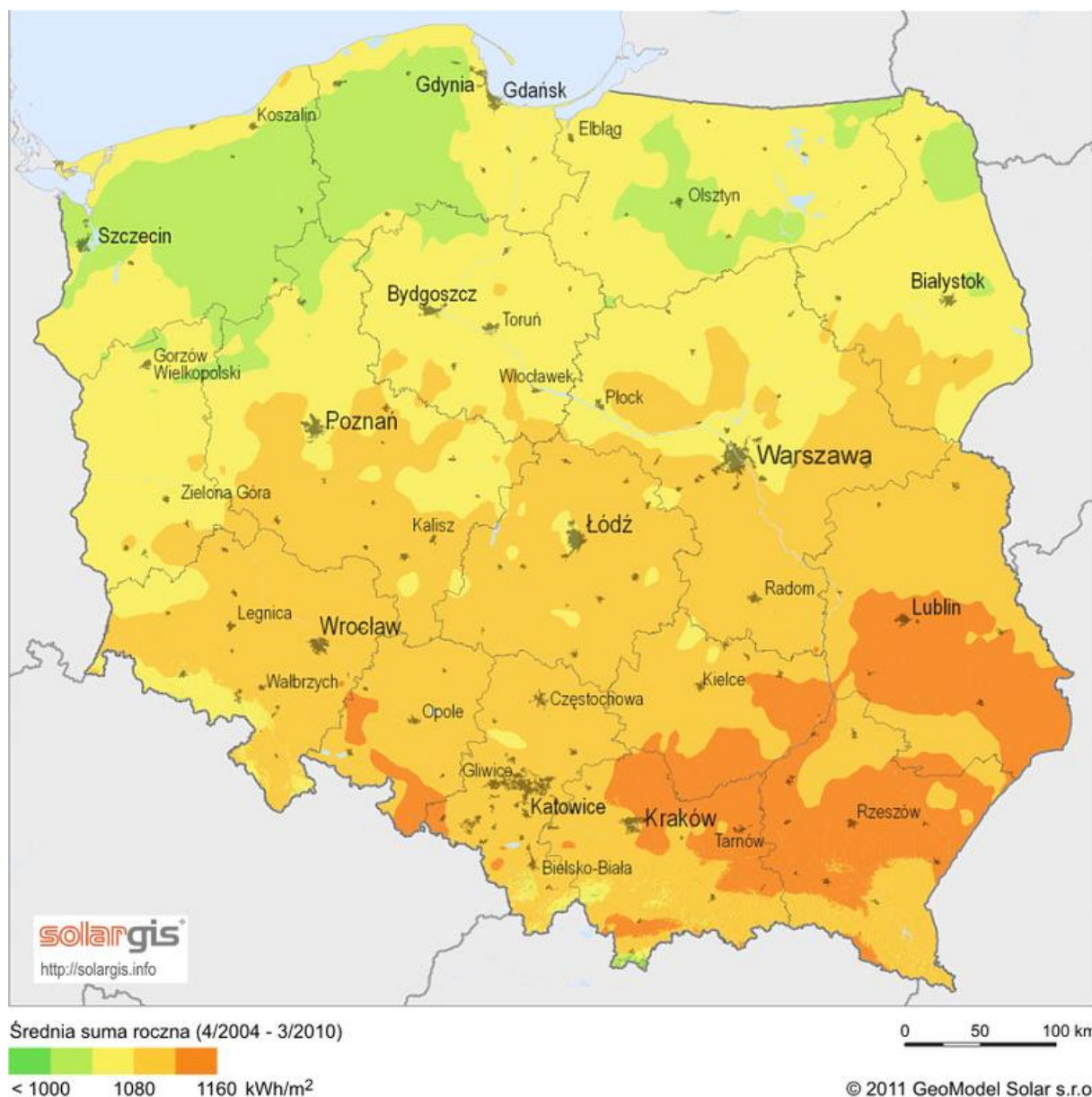


Rys.1.1.4 Budowa oraz zasada działania wieży słonecznej, 1- komin, 2 – pole kolektorów, 3- turbiny wiatrowe;[4]

Wieże słoneczne powinny budować się na obszarach o największym promieniowaniu słonecznym oraz o dużych powierzchniach. Wynika to z rozmiarów konstrukcyjnych wieży oraz ze sposobu wykorzystania efektu cieplnego. Najkorzystniejszym miejscem dla takiej instalacji są tereny pustynne. Moc takiej instalacji zależy od powierzchni przeszklonej oraz od wysokości komina. Wraz ze wzrostem wysokości temperatura powietrza obniża się o 1°C na każde 100 m. Zależność ta wpływa na siłę ciągu komina, która jest wprost proporcjonalna do różnicy temperatury pomiędzy szczytem komina, a jego podstawą. Wysokość komina wpływa na różnicę ciśnień.

1.2 Charakterystyka warunków helioenergetycznych w Polsce

Energia, która dociera do powierzchni Ziemi w postaci promieniowania słonecznego stanowi niewielką część energii wysyłanej przez Słońce. Gęstość produkowanej energii jest mała - na powierzchnię 1m^2 umieszczoną poza atmosferą ziemską oraz prostopadłą do kierunku promieniowania słonecznego pada około $1,35\text{ kW}$ strumienia energii. Strumień tej energii ulega osłabieniu w wyniku przejścia przez atmosferę ziemską. Osłabienie to spowodowane jest na skutek odbicia, absorpcji w gazach atmosferycznych oraz rozproszenia. Na ilość energii wpływ mają warunki atmosferyczne – zachmurzenie oraz zanieczyszczenia. Najkorzystniejsze warunki atmosferyczne, tj. największa ilość absorbowanej energii słonecznej, nie występują na równiku lecz w strefie umiarkowanej – 40 równoleżnik. Różnice te spowodowane są dłuższymi czasami dobowego nasłonecznienia. Położenia Polski wskazuje na to, iż należy ona do korzystnej strefy helioenergetycznej. Polska, podobnie jak Niemcy czy Francja leży w strefie klimatycznej umiarkowanej, pomiędzy $49.$ a $55.$ równoleżnikiem (nieznaczny dystans do $40.$ równoleżnika).



Rys. 1.2 Rozkład nasłonecznienia na terenie Polski [6]

Nasłonecznienie różnych regionów Polski jest zbliżone - rysunek 1.2. Średnia ilość energii słonecznej docierającej do powierzchni Ziemi na terytorium Polski wynosi od $900 \frac{\text{kWh}}{\text{a} \cdot \text{m}^2}$ do $1160 \frac{\text{kWh}}{\text{a} \cdot \text{m}^2}$. Natomiast średnia liczba godzin słonecznych w ciągu roku to 1 600. Na uprzemysłowionych obszarach Polski (zanieczyszczony Śląsk) oraz południu kraju panują najgorsze warunki helioenergetyczne. Wschodnia część Polski zaliczana jest do obszarów, na których warunki helioenergetyczne są najkorzystniejsze [5].

2 Charakterystyka analizowanej elektrowni słonecznej

Analizowana elektrownia „wieżowa” została zlokalizowana w południowo – wschodniej części Polski, w województwie lubelskim (rys.2.1). Wybór lokalizacji potwierdzony jest panującymi tam najkorzystniejszymi warunkami helioenergetycznymi. Tabela 2.1 przedstawia dane techniczne elektrowni Gemasolar. Struktura analizowanego obiektu oparta została na istniejącej od 4 października 2011 r. elektrowni słonecznej zlokalizowanej w Hiszpanii.

Tab. 2.1 Dane techniczne elektrowni wieżowej Gemasolar zlokalizowanej w Hiszpanii

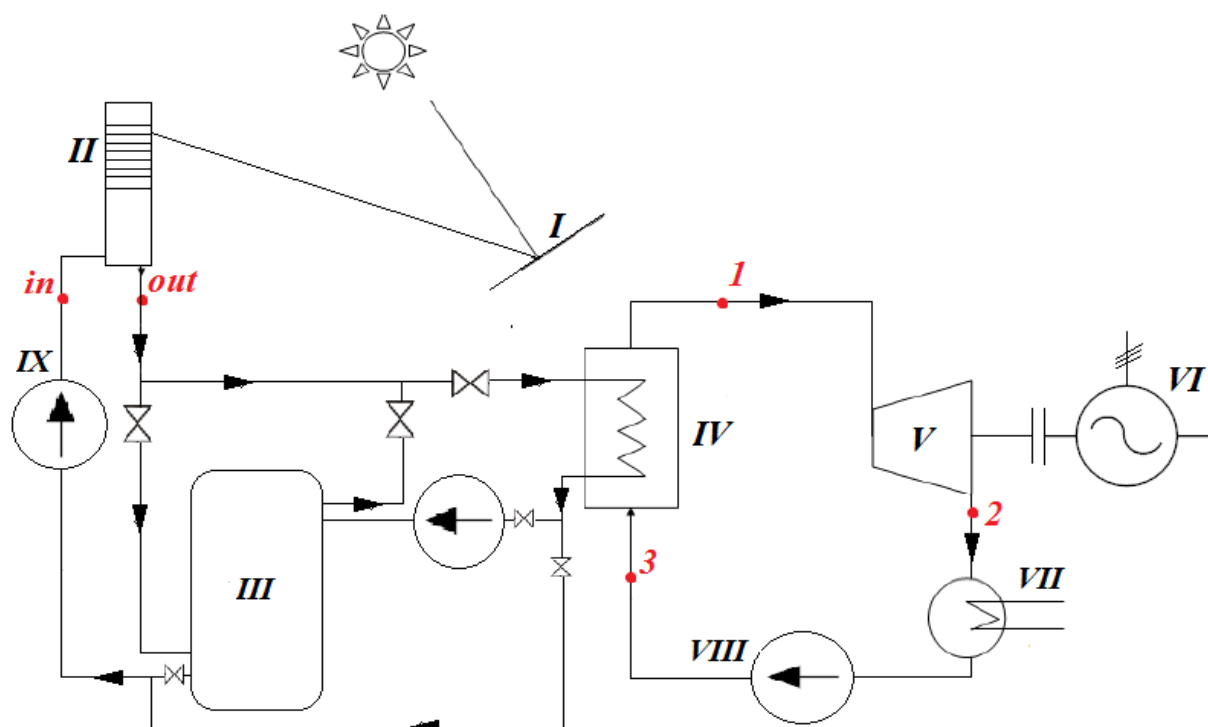
<i>Dana techniczne</i>	<i>Wartość</i>	<i>Jednostka</i>
Liczba heliostatów	2650	-
Wysokość wieży	140	m
Powierzchnia odbijająca	304750	m ²
Moc elektryczna układu	19,9	MW
Roczna produkcja energii elektrycznej	110	GWh
Sprawność energetyczna elektrowni	40	%



Rys.2.1 Lokalizacja elektrowni słonecznej na terytorium Polski [7]

2.1 Absorber

Powierzchnia absorbera (rys.2.1.1 – element nr II) jest powierzchnią pochłaniającą promieniowanie słoneczne kierowane z heliostatów. Absorbery różnią się pomiędzy sobą skutecznością pochłaniania energii – współczynnik absorpcji. To tutaj ma miejsce konwersja energii promieniowania słonecznego w ciepło. Parametrem określającym efektywność procesu konwersji jest sprawność absorbera (η_A). W absorberze przepływa czynnik roboczy (nośnik ciepła), charakteryzujący się zadowalającymi warunkami wymiany ciepła (c_{soli}) oraz magazynowania ciepła. Nośnik ciepła może być transportowany do specjalnego zasobnika ciepła w celu akumulacji energii. Czynnikiem roboczym jest roztopiona sól, składająca się z mieszaniny azotanu potasu (KNO_3) oraz azotanu sodu ($NaNO_3$). W układzie uzyskuje się wysoki poziom temperatury, wynosi ona $565^{\circ}C$ (t_{out}) (tab. 2.1). Krążąca w obiegu pierwotnym sól dociera do wytwornicy pary. Element, w którym dochodzi do wymiany ciepła pomiędzy czynnikiem grzejącym obiegu pierwotnego, a wodą, która zmienia się w parę wodną.



Rys. 2.1.1 Schemat analizowanego elektrowni słonecznej z zasobnikiem ciepła: I – pole heliostatów, II – wieża absorbera, III – zasobnik ciepła, IV – wytwornica pary, V – turbina parowa, VI – generator elektryczny, VII – skraplacz, VIII – pompa wody zasilającej w obiegu parowym, IX – pompa czynnika grzejącego w instalacji solarnej;

Tab.2.1.1 Parametry charakteryzujące absorber – przyjęte do obliczeń

<i>Opisywana wielkość</i>	<i>Symbol</i>	<i>Przyjmowana wartość</i>	<i>Jednostka</i>
Ciepło właściwe roztworu soli	c_{soli}	0,95	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Temperatura wlotowa	t_{in}	290	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura wylotowa	t_{out}	565	$^{\circ}\text{C}$
Sprawność absorbera	η_A	87	%

2.2 Część turbinowa

Turbozespół elektrowni słonecznej napędzany jest parą wodną, która powstaje w wymienniku ciepła (IV) – wytwornicy pary. Otrzymana para wodna kierowana jest do turbiny (V), gdzie ulega rozprężeniu. Kolejno rozprężona para dociera do skraplacza (VII), gdzie ulega skropleniu. Otrzymany kondensat jest przepompowywany (VIII) do wytwornicy pary. Opisany obieg turbinowy jest obiegiem zamkniętym. Dla takiego obiegu turbinowego, założono parametry termodynamiczne typowe dla elektrowni parowej opalanej paliwem konwencjonalnym. (Tab. 2.2.1)

Tab. 2.2.1 Parametry charakteryzujące obieg turbinowy

<i>Opisywana wielkość</i>	<i>Symbol</i>	<i>Przyjmowana wartość</i>	<i>Jednostka</i>
Ciepło właściwe wody	c_w	4,19	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Moc elektryczna	N_{el}	10	MW
Ciśnienie w punkcie 1	p_1	16,50	MPa
Ciśnienie w punkcie 2	p_2	5	kPa
Temperatura w punkcie 1	t_1	535	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura w punkcie 3	t_3	280	$^{\circ}\text{C}$
Sprawność wewnętrzna turbiny	η_{iT}	80	%
Sprawność mechaniczna turbiny	η_{mT}	98	%
Spr. elektromechaniczna generatora	η_{emG}	99	%
Sprawność wytwornicy pary	η_{WP}	95	%

W oparciu o wyżej przedstawione parametry oraz o aplikację SteamProperty wyznaczono wartości entalpii właściwej pary w punkcie 1 i 2_s, przedstawione w tabeli 2.2.2 [8].

Tab. 2.2.2 Wyznaczone wartości entalpii właściwej pary [8]

<i>Wyznaczana wielkość</i>	<i>Symbol</i>	<i>Otrzymana wartość</i>	<i>Jednostka</i>
Entalpia właściwa w punkcie 1	i_1	3392,40	$\frac{kJ}{kg}$
Entalpia właściwa w punkcie 2s	i_{2s}	1954,37	$\frac{kJ}{kg}$

Kolejno w oparciu o wzór na sprawność wewnętrzną turbiny η_{iT} wyznaczono entalpię właściwą w punkcie 2 – i_2 (2.2.1):

$$\eta_{iT} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{2s}} \quad (2.2.1)$$

$$i_2 = i_1 - \eta_{iT} \cdot (i_1 - i_{2s})$$

Znajomość parametrów oraz powyższy wzór na sprawność wewnętrzną turbiny umożliwiają wyznaczenie entalpii właściwej za turbiną parową:

$$i_2 = 3392,40 - 0,8 \cdot (3392,40 - 1954,37) = 2241,98 \frac{kJ}{kg}$$

Bilans energii dla turbiny parowej (2.2.2) oraz zależność na moc dla turbozespołu (2.2.3), przyczyniły się do wyznaczenia strumienia czynnika roboczego \dot{m}_1 (2.2.4) w obiegu parowym:

$$i_1 \cdot \dot{m}_1 = i_2 \cdot \dot{m}_2 + N_{iT} \quad (2.2.2)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$N_{el} = N_{iT} \cdot \eta_{emG} \cdot \eta_{mT} \quad (2.2.3)$$

$$\dot{m}_1 = \frac{N_{el}}{(i_1 - i_2) \cdot \eta_{emG} \cdot \eta_{mT}} \quad (2.2.4)$$

Podstawiając wielkości liczbowe do zależności (1.2.4) uzyskano:

$$\dot{m}_1 = \frac{10 \cdot 1000}{(3392,40 - 2241,98) \cdot 0,99 \cdot 0,98} = 8,96 \frac{kg}{s}$$

W celu wyznaczenia strumienia ciepła wymienianego w wytwornicy pary \dot{Q}_{WP} zdefiniowano bilans energii dla tego wymiennika ciepła (2.2.5):

$$\dot{Q}_{WP} \cdot \eta_{WP} + \dot{m}_1 \cdot i_3 = \dot{m}_1 \cdot i_1 \quad (2.2.5)$$

gdzie:

$$i_3 = c_w \cdot t_3 \quad (2.2.6)$$

Z przyjętych parametrów do obliczeń, znajdujących się w tab. 2.2.1. wyliczono entalpię właściwą w punkcie 3:

$$i_3 = 4,19 \cdot 280 = 1173,20 \frac{kJ}{kg}$$

Następnie przekształcając zależność (2.2.5):

$$\dot{Q}_{WP} = \frac{\dot{m}_1 \cdot (i_1 - i_3)}{\eta_{WP}}$$

oraz podstawiając odpowiednie wartości parametrów, wyznaczono strumień ciepła (\dot{Q}_{WP}) wymieniany w wytwornicy pary przy nominalnej mocy turbiny.

$$\dot{Q}_{WP} = \frac{8,96 \cdot (3392,40 - 1173,20)}{0,95} = 20930,56 \text{ kW} \approx 20,93 \text{ MW}$$

Zapisanie bilansu ciepła dla wytwornicy pary, od strony układu solarnego (2.2.7) oraz znajomość wartości strumienia ciepła przekazywanego od roztworu soli do czynnika termodynamicznego (\dot{Q}_{WP}) w układzie parowym umożliwiły wyznaczenie strumienia masowego roztworu soli w układzie solarnym \dot{m}_{soli} (2.2.8)

$$\dot{Q}_{WP} + \dot{m}_{soli} \cdot i_{in} = \dot{m}_{soli} \cdot i_{out} \quad (2.2.7)$$

$$\dot{m}_{soli} = \frac{\dot{Q}_{WP}}{c_{soli} \cdot (t_{out} - t_{in})} \quad (2.2.8)$$

Strumień masowy wynosi:

$$\dot{m}_{soli} = \frac{20930,56}{0,95 \cdot (565 - 290)} = 80,12 \frac{kg}{s}$$

W celu uzyskania rzeczywistego strumienia ciepła pochodzącego z promieniowania słonecznego (\dot{Q}_{sp}) skorzystano z zależności (2.2.9):

$$\dot{Q}_{sp} = \frac{\dot{Q}_{WP}}{\eta_A} \quad (2.2.9)$$

Otrzymano:

$$\dot{Q}_{sp} = \frac{20930,56}{0,87} = 24056,61 \text{ kW} \approx 24,06 \text{ MW}$$

2.3 Pole zwierciadeł

Wzorcowa elektrownia Gemasolar zajmuje powierzchnię około 185 hektarów. Obejmuje ona 2 650 heliostatów (rys.2.1.1 – element nr I), czyli urządzeń wyposażonych w płaskie zwierciadło, odpowiedzialnych za kierowanie promieni słonecznych w ustalonym kierunku nieruchomego odbiornika - centralnego absorbera. Powierzchnia pojedynczego lustra wynosi 115 m².

Na podstawie dokonanych założeń oraz obliczeń w ramach projektu inżynierskiego [9] oszacowano, iż elektrownia „wieżowa”, która będzie obecnie analizowana składa się z 1 717 heliostatów (n) (2.3.2) o łącznej powierzchni (A_{zw}) (2.3.1) około 20 hektarów (197 359,16 m²).

$$\dot{Q}_{sp} = I_s \cdot A_{zw} \quad (2.3.1)$$

Wymagana powierzchnia heliostatów:

$$A_{zw} = \frac{\dot{Q}_{sp}}{I_s}$$
$$A_{zw} = \frac{24,06 \cdot 10^6}{121,91} = 197359,16 \text{ m}^2$$

W celu wyznaczenia ilości lusterek przyjęto, iż powierzchnia jednego urządzenia odpowiada powierzchni urządzeń wykorzystywanych w elektrowni solarnej Gemasolar (a). Ta powierzchnia to 115 m².

$$n = \frac{A_{zw}}{a} \quad (2.3.2)$$
$$n = \frac{197359,16}{115} = 1716,17 \approx 1717 \text{ sztuk}$$

2.4 Zasobnik ciepła

Elektrownia Gemasolar jest pierwszą elektrownią na świecie, która działa nieprzerwanie przez 24h. Taki czas pracy zapewniony jest poprzez gromadzenie ciepłego roztworu soli w zasobniku ciepła. Zmagazynowane ciepło wykorzystywane jest w momencie, gdy natężenie promieniowania słonecznego nie zapewnia pracy elektrowni „wieżowej” na parametrach nominalnych, w okresach niesprzyjających warunków atmosferycznych albo podczas doliny nocnej. Założono, iż w analizowanej elektrowni słonecznej, w warunkach polskich, występujący tam zasobnik ciepła powinien zapewnić pracę w wymiarze 12h (t_{pracy}). Na podstawie poniższych równań wyznaczono konieczną objętość zasobnika ciepła:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{soli} \cdot c_{soli} \cdot \Delta T_{soli} \quad (2.4.1)$$

$$\rho_{soli} = \frac{m_{soli}}{V_{obl}} \quad (2.4.2)$$

Ostatecznie objętość zasobnika ciepła obliczono w oparciu o poniższy wzór:

$$V_{obl} = \frac{\dot{Q} \cdot t_{pracy}}{\rho_{soli} \cdot c_{wsoli} \cdot \Delta T_{soli}} \quad (2.4.3)$$
$$V_{obl} = 1\,820,58 \text{ m}^3$$

3 Optymalizacja pracy zasobnika ciepła

Przeprowadzona w ramach projektu inżynierskiego [9] analiza wykazała, iż efektywność pracy układu elektrowni słonecznej wyposażonej w warunkach polskich w centralny absorber można znacznie poprawić poprzez zainstalowanie na obiekcie zasobnika ciepła. W ramach projektu magisterskiego analizowany wcześniej układ rozszerzono więc o zasobnik ciepła, który, jak zaznaczono wcześniej, powinien zapewnić ciągłą pracę elektrowni słonecznej z mocą nominalną oraz w warunkach bez nasłonecznienia przez 12 godzin. Takie założenia powodują, iż instalowany zasobnik ciepła powinien mieć około $1\,820 \text{ m}^3$ całkowitej objętości (obliczenia w punkcie 2.4).

3.1 Definicja kryteriów optymalizacji funkcji celu

Optymalizację pracy zasobnika ciepła przeprowadzono równoległe ze względu na dwa aspekty:

- aspekt efektywności energetycznej;
- aspekt efektywności ekonomicznej.

Wspólnymi założeniami dla wyżej wymienionych aspektów jest fakt, iż czynnikiem, w którym magazynowane jest ciepło jest roztwór soli – mieszanina azotanu potasu (KNO_3) oraz azotanu sodu (NaNO_3). Temperatura mieszaniny przy dopływie wynosi 290°C , natomiast temperatura przy wypływie to 565°C . Dodatkowo zasobnik ciepła uruchamia się po raz pierwszy, gdy zapełni się do 50% swojej objętości (tj. 910 m^3). Najważniejszym założeniem jest warunek dotyczący produkcji. W związku z tym, dąży się do jak najdłuższej pracy elektrowni słonecznej na parametrach znamionowych tj. 10 MWe. W obliczeniach założono, iż analizowany zasobnik ciepła jest doskonale izolowany.

3.2 Optymalizacja efektywności energetycznej

W tym podrozdziale skupiono się nad analizą elektrowni słonecznej z centralnym absorberem oraz zasobnikiem ciepła pod względem energetycznym. Dzięki analizie uzyskano wartości miesięcznych sprawności energetycznych oraz rocznej sprawności energetycznej.

Wykonane obliczenia, oparto o dane meteorologiczne godzinowe dostępne na stronie Ministerstwa Inwestycji i Rozwoju [10]. W powyżej wymienionym źródle, znajdują się między innymi wartości bezpośredniego natężenia promieniowania słonecznego dla każdej godziny roku (I_{si}), które zostały wykorzystane do obliczenia strumienia ciepła pochodzącego z promieniowania słonecznego według poniższego wzoru:

$$\dot{Q}_{spi} = I_{si} \cdot A_{zw} \quad (3.2.1)$$

Z wcześniej przeprowadzonych obliczeń wiadomo, iż do pracy elektrowni słonecznej na parametrach znamionowych, tj. moc elektryczna równa 10 MWe, potrzebne jest 24,06 MW ciepłej strumienia energii promieniowania słonecznego. Powyższą wiedzę wykorzystano w celu przeliczenia godzinowych wartości strumieni ciepła pochodzącego z promieniowania słonecznego na godzinową wartość mocy elektrycznej ($N_{el\ i}$).

$$N_{el\ i} = \frac{\dot{Q}_{sp\ i} \cdot N_{el\ n}}{\dot{Q}_{sp\ n}} \quad (3.2.2)$$

Jeśli strumień ciepła w i -tej godzinie ($\dot{Q}_{sp\ i}$) przyjmuje wartość większą niż 24,06 MW, wówczas tej wartości przypisana jest zgodnie z użytą formułą wartość 10 MW mocy elektrycznej ($N_{el\ n}$). Kolejno otrzymane godzinowe wartości mocy elektrycznej ($N_{el\ i}$) przeliczono zgodnie ze wzorem 3.2.3 na godzinowe wartości energii elektrycznej:

$$E_{el\ i} = N_{el\ i} \cdot 3600 \quad (3.2.3)$$

Zainstalowany zasobnik ciepła jest wykorzystywany, gdy energia pozyskiwana z promieniowania słonecznego (Q_s) jest większa od wymaganej nominalnej wartości. Wartości pozyskiwanej energii przeliczono na objętość soli jaką można zmagazynować przy założonej różnicy temperatury:

$$V_{mag\ i} = \frac{Q_{sp\ i}}{\rho_{soli} \cdot c_{wsoli} \cdot \Delta T_{soli}} \quad (3.2.4)$$

Powyżej opisane wstępne obliczenia wykorzystane zostały dalej w celu stworzenia modelu obliczeniowego dla pierwszego wariantu analizy.

Pierwszym krokiem w modelu obliczeniowym było wyznaczenie sumarycznej objętości zmagazynowanej soli. Obliczona ona jest według poniższego wzoru:

$$V_{sum\ i} = \sum V_n + V_{mag\ n+1} - V_{pob\ i} \quad (3.2.5)$$

W celu określenia czasu pierwszego uruchomienia określono procentowy stopień zapełnienia zasobnika ciepła według wzoru 3.2.6:

$$V_{\%i} = \frac{V_{sum\ i}}{V_{obl}} \cdot 100\% \quad (3.2.6)$$

Zgodnie z przedstawionymi kryteriami optymalizacyjnymi funkcji celu pierwsze uruchomienie zasobnika ciepła, dla danych z ministerstwa, dla instalacji uruchomionej z pierwszym dniem roku, może nastąpić już czwartego dnia.

Kolejno, na podstawie różnicy mocy promieniowania słonecznego ($\dot{Q}_{sp\ i}$) oraz koniecznej mocy potrzebnej do pracy na parametrach znamionowych ($\dot{Q}_{sp\ n}$) określono objętość soli potrzebnej z zasobnika ciepła (V_{solzci}):

$$V_{sol\ ZC\ i} = \frac{|\dot{Q}_{sp\ i} - \dot{Q}_{sp\ n}| \cdot 3600 \cdot 1\ 000\ 000}{\rho_{soli} \cdot c_{wsoli} \cdot \Delta T_{soli}} \quad (3.2.7)$$

Kolejno sformułowano warunek pozwalający wyznaczyć objętość soli pobranej z zasobnika ciepła ($V_{sol\ pob\ ZC\ i}$). Warunek ten obejmuje trzy kryteria. Pierwsze z nich dotyczy kontroli możliwości pierwszego uruchomienia zasobnika ciepła. Kolejne monitoruje różnicę mocy z promieniowania słonecznego i mocy potrzebnej do pracy na parametrach nominalnych ($\dot{Q}_{sp\ i} - \dot{Q}_{sp\ n}$). Ostatni warunek definiowany jest przez zależność pomiędzy sumaryczną objętością zmagazynowanej soli, a objętością soli potrzebnej z zasobnika.

Tak wyznaczoną wykorzystywaną objętość, przeliczono według wzoru 3.2.8, na dodatkową moc elektryczną z zasobnika ciepła:

$$N_{el\ dod\ ZC\ i} = \frac{V_{sol\ ZC} \cdot \rho_{soli} \cdot c_{wsoli} \cdot \Delta T_{soli}}{3600 \cdot 1\ 000\ 000 \cdot \dot{Q}_{sp\ n}} \cdot N_{el\ n} \quad (3.2.8)$$

Moc elektryczna z promieniowania słonecznego ($N_{el\ i}$) wraz z dodatkową mocą elektryczną z zasobnika ciepła dla i -tej godziny ($N_{el\ dod\ ZC\ i}$), stanowią sumaryczną moc promieniowania:

$$N_{el\ sum\ i} = N_{el\ dod\ ZC\ i} + N_{el\ i} \quad (3.2.9)$$

Następnie założono tendencję zużycia energii elektrycznej przez odbiorców (tj. doliny oraz szczyty zapotrzebowania). Na podstawie założeń określono, iż dolina trwa od północy do 6.00, pomiędzy 12.00 - 14.00 oraz 22.00 – 00.00. Pozostałe godziny, to godziny szczytowego zapotrzebowania. Takie założenia, wraz z odpowiednimi obliczeniami posłużyły do wyznaczenia dochodu ze sprzedaży sumarycznej energii elektrycznej. Zgodnie z danymi udostępnionymi przez dostawców energii [11], założono, iż stawki dla doliny oraz dla szczytu są następujące: $0,1790 \frac{zł}{kWh}$, $0,3472 \frac{zł}{kWh}$.

Sprawność energetyczna dla analizowanej elektrowni słonecznej obliczono na podstawie wzoru 3.2.10:

$$\eta_m = \frac{E_{el\ dod\ m} + E_{el\ m}}{Q_{sp\ m}} \cdot 100\% \quad (3.2.10)$$

Wartości sprawności energetycznej dla poszczególnym miesięcy oraz roczną sprawność energetyczną przedstawiono w tabeli 3.3.1.

3.3 Analiza z uwagi na maksymalizację produkcji elektryczności

W pierwszym etapie analizy dokonano obliczeń z uwagi na maksymalizację produkcji energii elektrycznej. Zgodnie z wcześniejszymi informacjami przyjęto, iż pierwsze uruchomienie zasobnika ciepła może nastąpić po jego naładowaniu do połowy pojemności (czyli zmagazynowaniu około $910\ m^3$ gorącej soli). Po tym zasobnik jest wykorzystywany kiedy tylko jest taka potrzeba, tj. kiedy moc promieniowania słonecznego jest niższa niż

24,06 MW. W tabeli 3.3.1 zestawiono miesięczne wartości sprawności energetycznej dla tego wariantu. Podczas obliczeń okazało się jednak, że w pewnych okresach roku moc promieniowania słonecznego gromadzonego przez układ 1717 heliostatów wystarczyłaby do naładowania nawet kilku zasobników ciepła. Z tego powodu przeprowadzono analizę obliczeniową dla następujących trzech wariantów, z założeniem odpowiednio dwóch, trzech i czterech zasobników ciepła o objętości 1820 m³ każdy.

Tab. 3.3.1 Obliczona sprawność miesięczna oraz roczna analizowanej elektrowni słonecznej – analiza energetyczna

	<i>I zasobnik ciepła</i>	<i>II zasobniki ciepła</i>	<i>III zasobniki ciepła</i>	<i>IV zasobniki ciepła</i>
<i>Miesiąc</i>	<i>Sprawność energetyczna</i>			
-	%			
1	60,47	60,47	60,47	60,47
2	55,99	56,29	56,29	56,29
3	42,43	47,16	49,14	51,13
4	52,54	54,45	54,45	54,45
5	36,78	41,33	43,73	45,58
6	39,46	45,04	47,18	48,13
7	39,87	45,27	47,98	49,04
8	37,17	41,68	43,53	45,04
9	45,17	52,25	54,18	55,82
10	51,90	56,47	56,47	56,47
11	55,49	56,39	56,39	56,39
12	55,91	55,91	55,91	55,91
Roczna sprawność energetyczna				
%	42,06	46,65	48,46	49,64

Tabela 3.3.2 obrazuje roczny zysk ze sprzedaży energii elektrycznej w zależności od liczby zamontowanych zasobników ciepła w elektrowni słonecznej.

Tab. 3.3.2 Roczny przychód ze sprzedaży energii elektrycznej – optymalizacja energetyczna

<i>Roczny przychód ze sprzedaży energii elektrycznej</i>			
<i>PLN</i>			
<i>I zasobnik ciepła</i>	<i>II zasobniki ciepła</i>	<i>III zasobniki ciepła</i>	<i>IV zasobniki ciepła</i>
8 787 166,72	9 740 263,52	10 110 940,46	10 341 688,42

3.4 Optymalizacja efektywności ekonomicznej

Analizę elektrowni słonecznej z centralnym absorberem oraz zasobnikiem ciepła rozszerzono o analizę ekonomiczną. Analiza ta miała na celu wyznaczenie przychodu, przy uwzględnieniu korzystnych warunków ekonomicznych. Analiza ekonomiczna jest analogiczna do powyższej analizy energetycznej, uzupełniona o jedno kryterium. Różnica, występuje w miejscu określenia objętości soli pobranej z zasobnika ciepła ($V_{sol\ pob\ ZC\ i}$). Dodatkowe kryterium, stanowi określenie pory dnia (dolina, szczyt). Zmagazynowana energia w roztworze soli, ze względów ekonomicznych wykorzystywana jest podczas szczytów zapotrzebowania. Takie założenie poparte jest ceną energia elektrycznej ustanowioną przez dostawców ($0,1790 \frac{zł}{kWh}$ - dolina , $0,3472 \frac{zł}{kWh}$ - szczyt).

3.5 Wyniki z optymalizacją efektywności ekonomicznej

Tab. 3.5.1 Obliczona sprawność miesięczna oraz roczna analizowanej elektrowni słonecznej – analiza ekonomiczna

	<i>I zasobnik ciepła</i>	<i>II zasobniki ciepła</i>	<i>III zasobniki ciepła</i>	<i>IV zasobniki ciepła</i>
<i>Miesiąc</i>	<i>Sprawność energetyczna</i>			
-	%			
1	60,47	60,47	60,47	60,47
2	55,99	56,29	56,29	56,29
3	42,43	47,16	42,19	42,19
4	52,54	54,45	51,78	51,78
5	36,78	41,33	32,73	34,08
6	39,46	45,04	34,14	34,14
7	39,87	45,27	35,98	37,02
8	37,17	41,68	34,07	35,00
9	45,17	52,25	47,05	48,97
10	51,90	56,47	56,47	56,47
11	55,49	56,39	56,39	56,39
12	55,91	55,91	55,91	55,91
Roczna sprawność energetyczna				
%	35,75	38,45	39,70	40,40

Tabela 3.5.2 obrazuje roczny przychód ze sprzedaży energii elektrycznej w zależności od liczby zamontowanych zasobników ciepła w elektrowni słonecznej.

Tab. 3.5.2 Roczny przychód ze sprzedaży energii elektrycznej – optymalizacja ekonomiczna

<i>Roczny przychód ze sprzedaży energii elektrycznej</i>			
<i>PLN</i>			
<i>I zasobnik ciepła</i>	<i>II zasobniki ciepła</i>	<i>III zasobniki ciepła</i>	<i>IV zasobniki ciepła</i>
8 868 474,63	9 583 294,04	9 913 142,59	10 098 650,87

4 Podsumowanie i wnioski końcowe

Polska, pomimo iż nie należy do krajów wiodących znaczący prym w produkcji energii z odnawialnych źródeł energii, posiada korzystne warunki helioenergetyczne. Słońce, należące do podstawowych źródeł darmowej oraz pozbawionej groźnych dla środowiska zanieczyszczeń energii, w oparciu o proces przetwarzania umożliwia produkcję energii elektrycznej cieszącej się popytem.

Artykuł obejmuje optymalizację pracy zasobnika ciepła w elektrowni słonecznej z centralnym absorberem. Optymalizacja ta została dokonana ze względu na aspekt energetyczny oraz ekonomiczny. Założono, iż analizowana elektrownia słoneczna zlokalizowana jest w południowo – wschodniej części Polski – Zamość.

Analiza energetyczna obejmuje obliczenia z uwagi na maksymalizację produkcji energii elektrycznej. Wyliczono, iż roczna sprawność energetyczna dla analizowanego obiektu, wyposażonego w pojedynczy zasobnik ciepła wynosi 42,06 %, natomiast roczny przychód ze sprzedaży energii elektrycznej wynosi około 8 800 tys. zł. Analiza otrzymanych wyników informuje, iż moc promieniowania słonecznego gromadzonego przez 1717 heliostatów, w pewnych okresach roku wystarcza do naładowania równolegle większej ilości zasobników. Przeprowadzone obliczenia dla kolejnych wariantów obrazują, iż wraz ze zwiększającą się liczbą zasobników ciepła, roczna sprawność energetyczna oraz zysk ze sprzedaży energii elektrycznej wzrasta. Najkorzystniejsze jest zamontowanie równolegle dwóch zasobników ciepła. Takie rozwiązanie powoduje wzrost o 5 punktów procentowych rocznej sprawności energetycznej. Wzrost ten stanowi 11% rocznej sprawności dla rozwiązania z pojedynczym zasobnikiem ciepła.

Analiza ekonomiczna, przeprowadzona ze względu na pracę zasobnika ciepła w szczycie zapotrzebowania obrazuje, iż roczna sprawność energetyczna dla pojedynczego zasobnika ciepła jest niższa niż w poprzednim wariantcie i wynosi 36%. W tym przypadku montaż kolejnych zasobników ciepła nie powoduje widocznych wzrostów wartości sprawności energetycznej. Analiza ekonomiczna obrazuje również, iż obiekt z pojedynczym zasobnikiem ciepła, uzyskuje przychód o 80 tys. zł większy w skali roku, niż w dokonanej analizie energetycznej,

Bibliografia

- [1] W. M. Lewandowski, Proekologiczne źródła energii, Warszawa: WNT, 2007.
- [2] J. Szargut i A. Ziębik, Podstawy Energetyki Ciepłej, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1998.
- [3] Opracowanie własne na podstawie: T. Chmielniak, Technologie Energetyczne, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2004.
- [4] Opracowanie własne na podstawie:
https://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Solar_updraft_tower_pl.svg
- [5] J. Cieśliński i J. Mikielwicz, Niekonwencjonalne źródła energii, Gdańsk: Politechnika Gdańska, 1996.
- [6] Opracowanie własne na podstawie: <https://pl.wikipedia.org/wiki/Insolacja>
- [7] Opracowanie własne na podstawie: <https://www.google.pl/maps>
- [8] Dane z aplikacji SteamProperty
- [9] Projekt inżynierski pt: "Analiza energetyczna pracy elektrowni słonecznej z centralnym absorberem i zasobnikiem ciepła" - autor Aleksandra Jezioro, rok akademicki 2016/2017
- [10] <https://www.miir.gov.pl/strony/zadania/budownictwo/charakterystyka-energetyczna-budynkow/dane-do-obliczen-energetycznych-budynkow-1/>
- [11] <https://tauron.optimalenergy.pl/cennik/cennik-dla-domu/>

Optimization of heat storage at a solar plant with a central absorber

eng. Aleksandra Jezioro
Institute of Thermal Technology, Silesian University of Technology

e-mail: ola.jezioro@op.pl

Keywords: solar plant, solar collector, storage tank, optimization, mathematical model

Abstract

The work deals with a simplified optimization of a heat storage operation in a solar plant with a central absorber. This optimization was done due to the energy and economic aspects. It was assumed that the analyzed solar power plant is located in the South-eastern part of Poland - Zamość. The existing "Gemasolar" tower type solar power plant was the model for the analysis. This power plant is located in Spain, near Sevilla.

Energy analysis includes the work of the heat storage whenever it is possible. It justifies the extension of the solar plant facility with a heat storage. The annual energy efficiency for such a solution is on the level of 42% for a single heat container. The installation of further trays increases the energy efficiency. Such assumptions cause that the profit from the sale of produced electricity for a single heat storage is about 8 800 thousand PLN. The optimization of heat storage operation due to the peak demand illustrates that the annual energy efficiency for a single heat storage is 36%. Subsequent heat storage tanks do not cause any visible increase in energy efficiency. However, an increase in profit from the sale of electricity by 80,000 PLN was noted.