

Jerzy ADAMCZYK^{1,2}, dr inż.,
Jan M. OLCHOWIK^{1,2}, prof.dr hab.,
Robert TOMASZEWSKI¹, mgr

¹Państwowa Szkoła Wyższa
im. Papieża Jana Pawła II
Instytut Informatyki
ul. Sidorska 95/97 Biała Podlaska

²Politechnika Lubelska

MOŻLIWOŚĆ ZAPEWNIENIA CIEPŁEJ WODY PRZY POMOCY KOLEKTORÓW SŁONECZNYCH NA PRZYKŁADZIE INSTALACJI ZREALIZOWANEJ W TUCHOWIE

STRESZCZENIE

W obecnych czasach preferuje się rozwiązania instalacji grzewczych wykorzystujących odnawialne źródła energii, z uwagi na ograniczone zasoby paliw kopalnych oraz zapobieganie emisji zanieczyszczeń do atmosfery. Jednym z takich rozwiązań są instalacje przygotowania ciepłej wody w dużych budynkach wspomagane kolektorami słonecznymi. W pracy przedstawiono wyniki 6 letnich badań eksploatacyjnych wielkoskalowej instalacji kolektorów słonecznych płaskich zlokalizowanych na dachu Klasztoru Redemptorystów w Tuchowie w Polsce. Kolektory słoneczne pokrywały średnio 37% potrzeb cieplnych instalacji ciepłej wody w skali roku, w półroczu zimowym 15.9%, a w półroczu letnim 56.5%. Przeanalizowano koszty przygotowania ciepłej wody w instalacji z kolektorami i bez, oraz obliczono czas zwrotu nakładów inwestycyjnych.

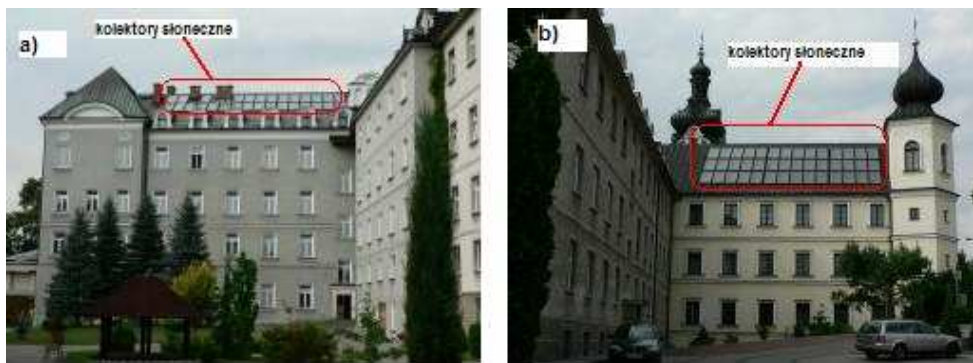
1. Wstęp

W obliczu wyczerpujących się zasobów konwencjonalnych nośników energii oraz ubocznych efektów spalania paliw kopalnych, jak zanieczyszczenie atmosfery, niszczenie warstwy ozonowej oraz globalne ocieplenie, coraz częściej promuje się odnawialne źródła energii. Ponieważ są one jednym z najbardziej odpowiednich środków na rozwiązanie tych problemów [1]. Jednym z takich rozwiązań są instalacje kolektorów słonecznych wspomagające instalacje grzewcze czy też przygotowania ciepłej wody w budynku, których

ceny spadały stopniowo w okresie ostatnich 30 lat, podczas gdy ceny oleju i gazu cały czas się wahały. Przeprowadzono już wiele badań zarówno małych instalacji słonecznych [2], jak i wielkoskalowych [2,3]. Jednak ciągle są potrzebne nowe wyniki badań i analiz zarówno odnośnie promieniowania słonecznego, metod określania potencjału energii słonecznej na cele przygotowania ciepłej wody w wybranym obszarze [1], jak także innych pomocnych przy edukacji specjalistów, którzy będą przygotowani do projektowania, instalacji i obsługi takich systemów. Z tego względu ważne jest, aby specjaliści znali także sprawności i charakterystyczne parametry istniejących instalacji, które są otrzymywane na podstawie badań eksperymentalnych. Celem niniejszej pracy jest pokazanie działania wielkoskalowej instalacji kolektorów słonecznych na podstawie 6 letnich badań w specyficznym budynku, jakim jest seminarium /akademik dla alumnów/.

2. Instalacja słoneczna

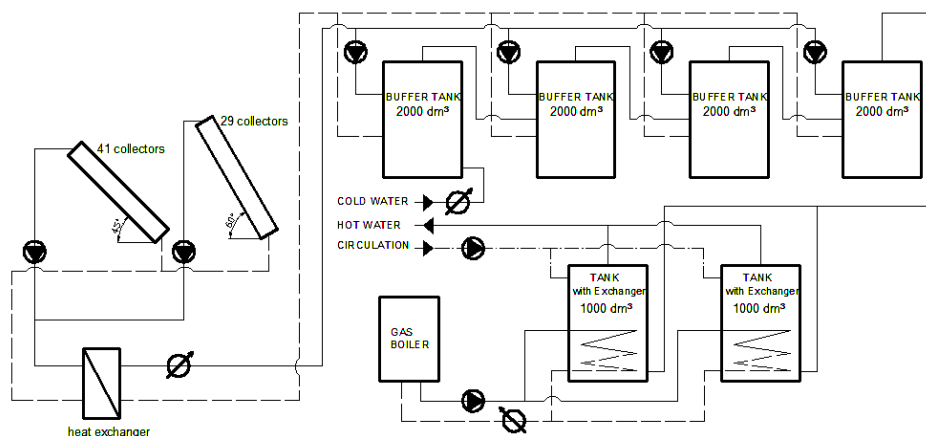
Badania prowadzono w Klasztorze Redemptorystów w Tuchowie w Polsce, gdzie wykonana jest wielkoskalowa instalacja kolektorów słonecznych służących do przygotowania ciepłej wody. Instalacja została zrealizowana w listopadzie 2001 roku i jest przeznaczona do przygotowania ciepłej wody o temperaturze 50°C , przy jednostkowym zapotrzebowaniu na ciepłą wodę na poziomie $70 \text{ dm}^3/(\text{d}\cdot\text{os.})$. W instalacji zastosowano płaskie kolektory słoneczne w ilości 70 sztuk o łącznej powierzchni 127 m^2 . Kolektory zostały zainstalowane na dwóch połaciach dachowych, jako dwie niezależne baterie. Pierwsza bateria kolektorów zorientowana jest w kierunku wschodnim i nachylona do płaszczyzny poziomej pod kątem 60° (rys. 1a), a druga skierowana jest na zachód i nachylona do płaszczyzny poziomej pod kątem 45° (rys. 1b).



Rys. 1 Kolektory słoneczne w Klasztorze Redemptorystów w Tuchowie zorientowane a) na wschód; b) na zachód.

Fig. 1 Solar collectors on Redemptorist Monastery's roof in Tuchów facing to a) the East b) the West

Kolektory przygotowują w tym przypadku ciepłą wodę w układzie biwalentnym, czyli wspomagane są kotłem na paliwo gazowe o mocy 90 kW, który załączany jest w chwilach niedoboru energii promieniowania słonecznego. Instalacja przygotowania ciepłej wody (rys. 2) wyposażona jest w zasobniki akumulacyjne o łącznej pojemności 8.000 dm³.



Rys 2. Schemat technologiczny instalacji solarnej w Klasztorze Redemptorystów w Tuchowie

Fig 2. Technological diagram of solar system used in Redemptorist Monastery in Tuchów

Pomiary były wykonywane codziennie o godzinie 21.45 w okresie od listopada 2001 do listopada 2007 roku i obejmowały między innymi następujące wartości:

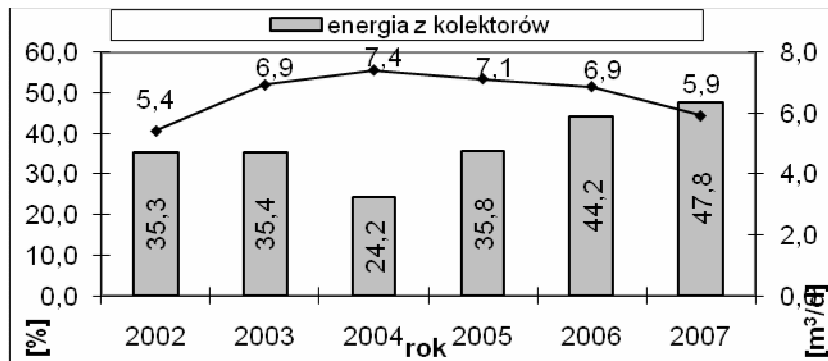
- zużycie ciepłej wody w m³;
- ilość energii dostarczonej do przygotowania ciepłej wody przez kocioł gazowy w GJ;
- ilość energii dostarczonej do przygotowania ciepłej wody przez instalacje kolektorów słonecznych w GJ;
- ilość energii traconej w instalacji cyrkulacji ciepłej wody w budynku w GJ.

Z uwagi na dużą liczbę danych użyto wartości uśrednionych do dalszej analizy.

3. Otrzymane wyniki

3.1. Energii słoneczna w całkowitej ilości energii na cele przygotowania ciepłej wody

Instalacja kolektorów słonecznych pracujących w systemie biwalentnym przygotowania ciepłej wody przyczynia się do zmniejszenia zużycia energii dostarczanej ze źródeł konwencjonalnych, co można wyrazić dla poszczególnych lat okresu pomiarowego (rys. 3) poprzez iloraz ciepła dostarczonego z kolektorów do całkowitego ciepła zużytego do przygotowania ciepłej wody w %.

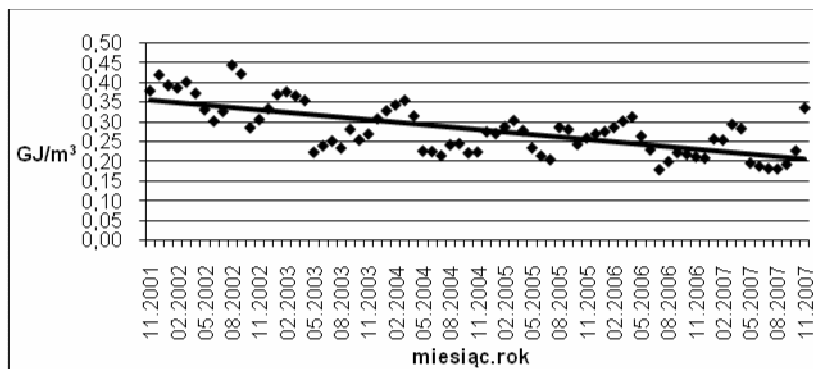


Rys. 3. Średni roczny stopień pokrycia potrzeb cieplnych instalacji ciepłej wody przez kolektory słoneczne z okresu pomiarowego

Fig. 3. Average year's degree of coverage of heat needs for hot water plumbing provided by solar collectors during measurement period

Na podstawie rys. 3 można zauważyć, że w systemie wielkoskalowym wykorzystujących kolektory słoneczne do przygotowania ciepłej wody stopień pokrycia potrzeb cieplnych przez kolektory słoneczne (SPT) waha się w przedziale od 24.2% do 47.8%. Dlatego też podczas oceny długoterminowej instalacji słonecznej nie jest łatwo założyć średnioroczny stopień pokrycia potrzeb cieplnych przez kolektory słoneczne z uwagi na ich uzależnienie od występujących warunków pogodowych, w szczególności nasłonecznienia. Na rys. 3 przedstawiono również średniodobowe zużycie wody ciepłej w analizowanej instalacji i zauważono, że nie miało ono większego wpływu SPBT w skali roku.

Innym czynnikiem, który miał wpływ na SPT w skali roku była ilość energii potrzebnej do przygotowania 1 m³ ciepłej wody użytkowej, co zostało przedstawione na rys. 4.



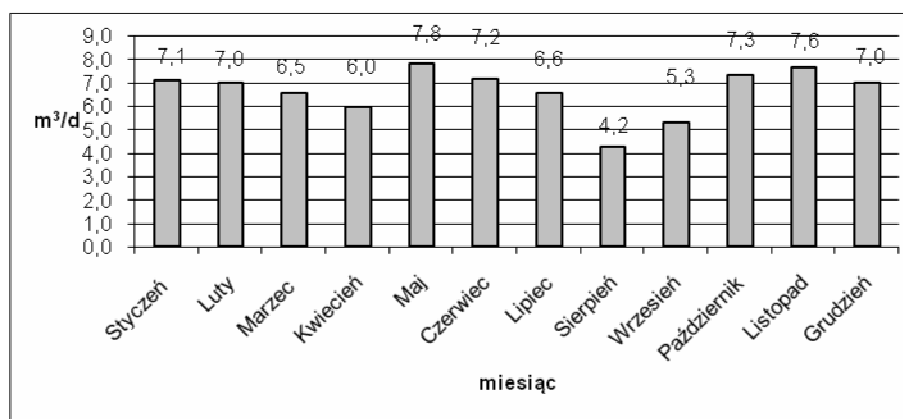
Rys. 4. Wskaźnik zapotrzebowania ciepła do przygotowania 1m³ ciepłej wody w całym okresie

Fig. 4. Heat demand rate for providing 1m³ of hot water during whole period

Z rys. 4. wynika, że ilość energii potrzebnej do przygotowania ciepłej wody wykazuje tendencję spadkową, co ma znaczny wpływ na wartość wskaźnika SPT. Na obniżenie zużycia energii w badanej instalacji wpłynęły przeprowadzone prace termomodernizacyjne izolacji przewodów rozprowadzających oraz cyrkulacyjnych ciepłej wody.

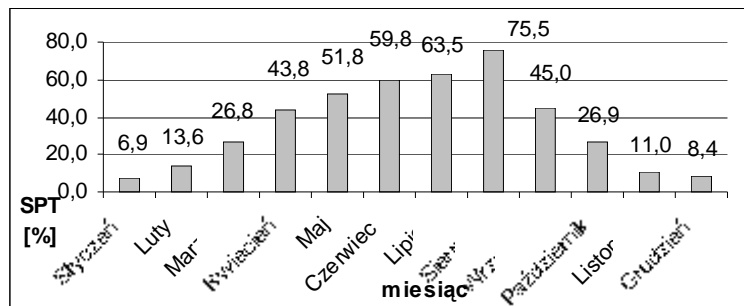
Ponadto na ilość energii potrzebnej do przygotowania 1m^3 wody ciepłej ma wpływ także jej temperatura wymagana lub zadana na wypływie u odbiorcy. Im mniejsza wymagana temperatura tym większa wartość wskaźnika SPT.

Wskaźnik SPT w sezonie letnim wynosi 66.25% i jest większy o 9.7% od SPT dla półrocza letniego i o 50.34% w porównaniu do półrocza zimowego. Dla półrocza zimowego wskaźnik SPT przyjmował wartość średnią równą 15.91%, co pokazuje, że istnieje możliwość wspomagania przygotowania ciepłej wody przez instalację kolektorów słonecznych w półroczu zimowym. Zauważono również, że wartość wskaźnika wymaganej ilości ciepła na przygotowanie ciepłej wody była największa w półroczu zimowym i wynosiła średnio $0,29\text{GJ}/\text{m}^3$. Jest to spowodowane między innymi zwiększonymi stratami ciepła w obiegu cyrkulacyjnym oraz zwiększonym zapotrzebowaniem na ciepłą wodę użytkową w półroczu zimowym. Należy również zwrócić uwagę na fakt, że w czasie kiedy instalacja wielko płaszczyznowa jest w stanie pokryć potrzeby cieplne instalacji ciepłej wody w większym stopniu (sezon letni), to zapotrzebowanie na ciepłą wodę obniża się. Dlatego już na etapie projektowania bardzo ważnym jest stwierdzenie, czy projektowana instalacja ciepłej wody będzie pracowała możliwie maksymalnie efektywnie. Problem ten pojawia się często przy szkołach czy też uczelniach wyższych, które są zamknięte w sezonie letnim, jak także w budownictwie wielorodzinnym, gdzie w miesiącach wakacyjnych obserwuje się spadek zużycia ciepłej wody z uwagi na sezon urlopowy mieszkańców. W analizowanej obiekcie, można powyższy przypadek zauważyć w miesiącu sierpniu (rys. 5), kiedy średnio dobowe zużycie ciepłej wody spada do poziomu $4,2\text{m}^3/\text{d}$, ponieważ w tym okresie znaczna część duchownych opuszcza klasztor.



Rys. 5. Średniobowe zużycie ciepłej wody w poszczególnych miesiącach okresu
Fig. 5. Average for day hot water consumption in each month of examined period

Natomiast wskaźnik SPT dla poszczególnych miesięcy okresu pomiarowego został przedstawiony na rys. 6.

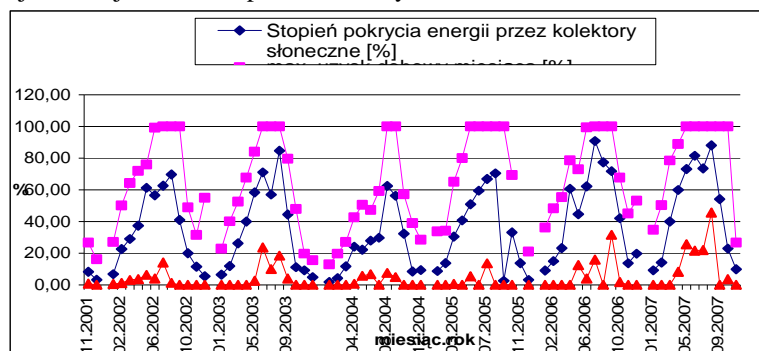


Rys. 6. Wskaźnik SPT w poszczególnych miesiącach okresu pomiarowego
Fig. 6. SPT indicator in each month of measurement period

Największym średnim wskaźnikiem SPT z okresu 6 lat charakteryzuje się miesiąc sierpień (75.5%) a najmniejszym styczeń 6.9%. Na takie zróżnicowanie w wartościach wskaźnika SPT w poszczególnych okresach pomiarowych miały wpływ nie tylko warunki pogodowe, lecz także straty ciepła w obiegu cyrkulacyjnym. Ponieważ im większa strata ciepła tym większa wymagana temperatura wody na wypływie ze zbiornika, co skutkuje automatycznie obniżeniem wartości wskaźnika SPT, co można zauważyć dla miesięcy półroczia zimowego.

Należy pamiętać, że wykorzystując kolektory słoneczne do przygotowania ciepłej wody trzeba uwzględnić, że choć średni stopień pokrycia dla danego miesiąca jest wysoki, to mogą wystąpić dni, w których potrzeby cieplne będzie pokrywało wyłącznie źródło konwencjonalne.

Dla badanej instalacji zostało to pokazane na rys. 7.



Rys. 7. Zestawienie średniego, maksymalnego dobowego oraz minimalnego dobowego wskaźnika SPT w okresie pomiarowym

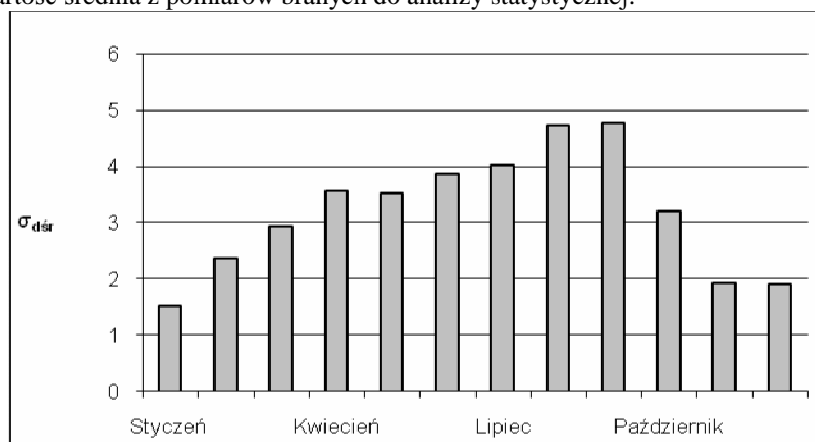
Fig. 7. Comparison of average, maximal for day and minimal for day SPT indicator during measurement period

Dlatego warto się przypatrzyć wartościom odchylenia od średniej wartości wskaźnika SPT, która została zaprezentowana na rys. 8. Wartość odchylenia od wartości średniej została obliczona przy wykorzystaniu równania (1) oraz (2).

$$\sigma = [(1/(n-1)) \cdot \sum (d_i - d_{sr})^2]^{0.5} \quad (1)$$

$$\sigma_{d_{sr}} = \sigma / n^{-2} \quad (2)$$

gdzie: n - liczba pomiarów branych do analizy statystycznej; d_i - wartość i -tego pomiaru; d_{sr} - wartość średnia z pomiarów branych do analizy statystycznej.



Rys. 8. Wartości odchylenia dla wartości średniej w poszczególnych miesiącach okresu pomiarowego

Fig. 8. Deviation from average value for SPT indicator during measurement period

Z rys. 8 wynika, że najbardziej stabilnie pracowała instalacja w miesiącu styczniu, ponieważ wartość odchylenia od wartości średniej przyjmowała najmniejszą wartość 1.51. Natomiast najmniej stabilnie pracowała instalacja we wrześniu, kiedy to odchylenie od średniej wartości wyniosło 4.77, przy średnim dla całego okresu pomiarowego na poziomie 3.19.

3.2. Efekty ekonomiczne

Inwestorzy, którzy decydują się na kupno kolektorów słonecznych do wspomagania przygotowania ciepłej wody liczą między innymi na oszczędności. Takiego rodzaju oszczędności można zauważyć analizując koszt przygotowania ciepłej wody w instalacji wyposażonej w kolektory słoneczne i bez nich, co zostało przedstawione dla analizowanego budynku klasztoru na rys. 9. Koszt przygotowania ciepłej wody w instalacji z kolektorami słonecznymi jest mniejszy o koszty energii dostarczonej z kolektorów, gdyby miała być ona wytworzona z konwencjonalnych nośników energii. Tu autorzy, wyliczyli

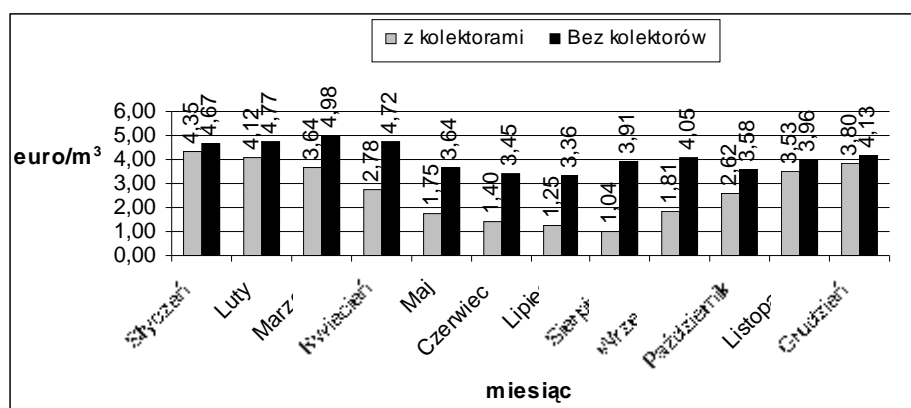
oszczędności (S) uzyskane dzięki zaoszczędzonemu paliwie gazu ziemnego przy wykorzystaniu formuł (3) oraz (4).

$$V = Q / (W_g \cdot \eta), m^3 \quad (3)$$

gdzie: V - ilość zaoszczędzonego gazu ziemnego w m^3 ; Q - ilość ciepła zaoszczędzona dzięki kolektorom słonecznym w MJ; W_g - wartość opałowa gazu ziemnego, równa $W_g = 31 MJ/m^3$; η - sprawność kotła gazowego o mocy 90 kW, $\eta = 0.7$.

$$S = V \cdot K, zł \quad (4)$$

gdzie: K - koszt $1 m^3$ gazu ziemnego, $K = 0.32 \text{ €/m}^3$.



Rys. 9. Koszt przygotowania $1 m^3$ ciepłej wody w poszczególnych miesiącach okresu pomiarowego dla instalacji wspomaganej kolektorami i bez kolektorów.

Fig. 9. Cost of preparing $1 m^3$ of hot water in each month of measurement period for plumbing with solar collectors and without them

Na podstawie wykresu 11 wynika, że koszty przygotowania ciepłej wody w instalacji wspomaganej kolektorami słonecznymi jest średnio o 1.84 razy mniejszy od kosztu przygotowania ciepłej wody za pomocą tylko kotła gazowego. Największa różnica w kosztach przygotowania ciepłej wody jest w miesiącach letnich i wynosi ona 2.98 razy mniej na korzyść instalacji z kolektorami słonecznymi.

W przypadku kolektorów słonecznych ważnym jest, aby instalacja zwróciła się w jak najszybszym okresie czasu. Dlatego postanowiono wyliczyć prosty czas zwrotu inwestycji (Simple Pay Back Time - SPBT) dla analizowanej instalacji, wykorzystując zależność (5).

$$SPBT = N / S_a, \text{ euro} \quad (5)$$

gdzie: N - nakład inwestycyjny w euro; S_a - suma oszczędności rocznych w stosunku do układu odniesienia w euro/rok.

Z uwagi na to, że nakłady inwestycyjne na modernizację całej instalacji wody ciepłej, oraz kotłowni w Klasztorze wyniósł 270 000 PLN prosty czas zwrotu inwestycji przyjął wartość $SPBT=14$ lat. Dodatkowo stały średni wzrost cen nośników energii w analizowanym czasie wyniósł 8% rocznie. Biorąc powyższe pod uwagę czas zwrotu poniesionych nakładów wyniesie prawie 7 lat. Jednak należy zauważyć, że całkowity koszt obejmował również wykonanie i zakup instalacji konwencjonalnej (gazowej) przygotowania ciepłej wody, co w znacznej mierze podwyższyło całkowity koszt inwestycyjny. Ponadto inwestycja została dofinansowana w sumie w 87% procentach, dlatego tylko 13% całej sumy inwestycji zapłacił Klasztor. Dla tego przypadku, zwrot środków zainwestowanych przez Klasztor w modernizację instalacji ciepłej wody zwróciły się po 4.7 latach od uruchomienia instalacji. Można zauważyć, że przyjazna polityka w kraju w postaci dotacji, obniżenia podatku i tym podobnych przedsięwzięć jest bardzo ważna dla zwiększenia rozwoju instalacji słonecznych.

Należy także pamiętać, że w analizie SPBT nie zostały uwzględnione dodatkowe koszty związane z rewitalizacją lasów, czy też koszty leków dla alergików, spowodowane nadmierną emisją zanieczyszczeń powstających w wyniku spalania paliw kopalnych. Zastosowanie kolektorów słonecznych wiąże się również ze zmniejszeniem emisji zanieczyszczeń do atmosfery.

4. Podsumowanie

Sześciu letnia analiza wielkoskalowej instalacji kolektorów słonecznych w Klasztorze Redemptorystów pokazała, że zastosowanie kolektorów słonecznych do przygotowania ciepłej wody w dużym budynku pokrywa potrzeby cieplne instalacji ciepłej wody średnio w 37% w skali roku. Największym stopniem pokrycia potrzeb cieplnych instalacji ciepłej wody przez kolektory słoneczne równym 75.5% charakteryzował się miesiąc sierpień. W tym miesiącu uzyskano także największe oszczędności finansowe na przygotowanie 1m^3 wody ciepłej, ponieważ 1m^3 kosztował 3.78 razy mniej od 1m^3 wody ciepłej przygotowanej tylko za pomocą kotła gazowego.

Zauważono również, że istnieją możliwości wspomagania przygotowania ciepłej wody przez kolektory słoneczne w okresie zimowym, kiedy to 15.91% potrzeb cieplnych pokrywane jest kolektory słoneczne.

W przypadku dużych instalacji z kolektorami słonecznymi, czas zwrotu inwestycji nie jest zbyt korzystny, w tym przypadku $SPBT=14$ lat, jednak dla dużych instalacji można uzyskać wsparcie finansowe, które w tym przypadku pozwoliło na zwrot kosztów własnych w okresie 4.7 lat.

Instalacje wykorzystujące kolektory słoneczne do przygotowania ciepłej wody, nie tylko generują oszczędności finansowe, lecz także przyczyniają się do obniżenia emisji produktów spalania paliw kopalnych do atmosfery, dlatego mogą być alternatywą dla istniejących konwencjonalnych instalacji przygotowania ciepłej wody szczególnie w obliczu ogólnoświatowej tendencji do obniżania emisji gazów cieplarnianych do atmosfery.

5. Spis literatury:

- [1]. Wnuk R. „Wykorzystanie odnawialnych źródeł ciepła w budownictwie – poradnik”
- [2]. Boeker E., van Grondelle R. „Fizyka środowiska” PWN 2002 r

[3]. Pluta Z. "Słoneczne instalacje energetyczne" Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2003 r.

POSSIBILITY OF PROVIDING HEAT WATER BY USING SOLAR COLLECTORS BASED ON EXAMPLE OF A SYSTEM EXECUTED IN TUCHÓW

SUMMARY

Nowadays heating systems using renewable resources of energy are preferred. It is because fossil fuel resources are limited. Moreover, pollutant emissions into atmosphere should be reduced. One of systems of that kind, are hot water installations with solar collectors, which are used in large buildings. In this paper, results of six year experiments with large scale system of planar solar collector are presented. Installation was placed on Redemptorist Monastery's roof in Tuchów, Poland. Solar collectors' degree of coverage of hot water demand was in average 37% in year's scale. For winter period it was 15.9%, and for summer it was 56.5%. Costs of preparing hot water in systems: with solar collectors and without them were analysed. Time of payback was also calculated.

Jerzy ADAMCZYK^{1,2}, dr inż.,
Jan M. OLCHOWIK^{1,2}, prof.dr hab.,
Robert TOMASZEWSKI¹, mgr,
Mateusz ADAMCZYK³, mgr

¹Państwowa Szkoła Wyższa
im. Papieża Jana Pawła II
Instytut Informatyki
ul. Sidorska 95/97 Biała Podlaska

²Politechnika Lubelska

³Uniwersytet Warszawski

MOŻLIWOŚĆ ZMNIEJSZENIA ZAPOTRZEBOWANIA NA CIEPŁO PRZY ZASTOSOWANIU ROLET OKIENNYCH ZEWNĘTRZNYCH

STRESZCZENIE

Obecnie w wielu obiektach instaluje się rolety zewnętrzne. Mają one zabezpieczać mieszkania przed włamaniem. Jednak większość z zainstalowanych rolet ma za zadanie poprawienie warunków izolacyjności cieplnej obiektów budowlanych. Rolety zewnętrzne zabezpieczające posiadają szereg zalet tj.:

- stanowią dodatkowe zabezpieczenie termiczne okien przed stratami ciepła w zimie,
- stanowią dodatkowe zabezpieczenie termiczne okien przed nadmiernym nagrzewaniem się pomieszczeń w lecie,
- tłumią docierające z zewnątrz (od wewnątrz) dźwięki co stanowi bardzo skuteczną dodatkową ochronę akustyczną,
- dają możliwość wentylacji pomieszczeń dzięki perforacji pancerza - takie rozwiązanie zapobiega tworzeniu się przeciągów,
- chronią okna przed niszczycielskimi wpływami czynników atmosferycznych,
- gwarantują 100% dyskrecji i prywatności, uzyskując efekt pełnego zaciemnienia (pełnej izolacji optycznej), możemy osiągnąć przemianę dnia w noc, co szczególnie ważne jest dla osób pracujących w nocy i potrzebujących pełnowartościowego snu w dzień.

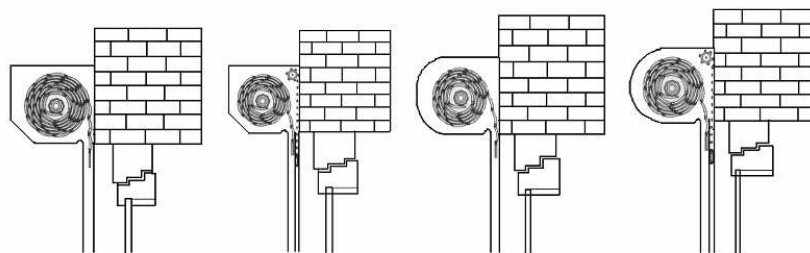
1. Wstęp

Modernizacje już istniejących domów oraz budynków użyteczności publicznej mają na ogół polepszyć ich jakość energetyczną (tzw. termomodernizację). O ile prawidłowe docieplenie ścian w już istniejących budynkach pozwala uzyskać współczynnik przenikania ciepła od $0,26 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ do $0,18 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, to w przypadku wymiany okien współczynnik przenikania ciepła wynosi $1,0 - 1,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Z powyższego można zauważyć iż współczynnik przenikania ciepła przegród przezroczystych jest ponad czterokrotnie większy niż przegród nieprzezroczystych.

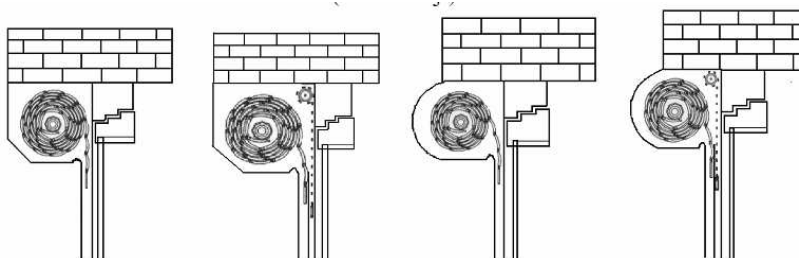
W nowym prawie budowlanym (Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. (Dz. U. z dnia 15 czerwca 2002 r.) zauważalny jest wymóg do stosowania dużych powierzchni okien i przeszklonych elewacji budynków, co z pewnością w okresie letnim wpłynie negatywnie na komfort cieplny. W myśl rozporządzenia minimalna wielkość okien liczona w świetle ościeżnicy powinna wynosić przynajmniej $1/8$ powierzchni podłogi w pomieszczeniach przeznaczonych na stały pobyt ludzi.

2. Sposób zainstalowania rolet na budynku

W zależności od możliwości zainstalowania rolet można zaobserwować typowe rozwiązania przedstawione na poniższych schematach

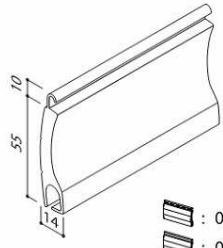
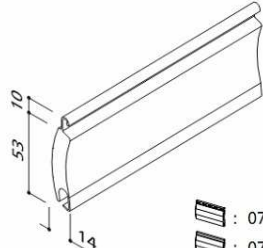
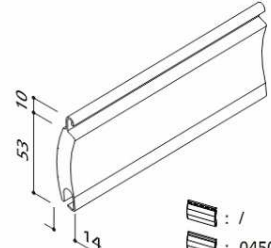
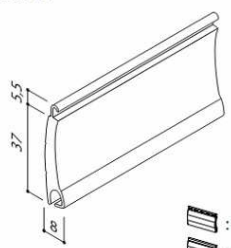
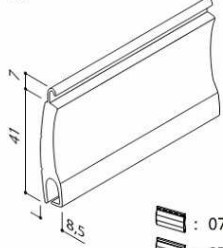
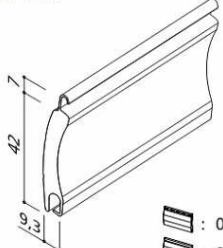
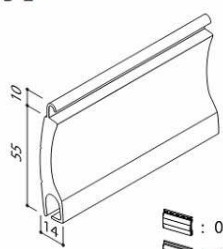
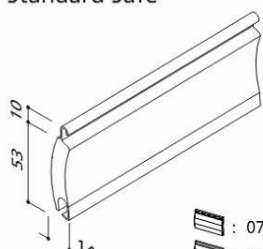
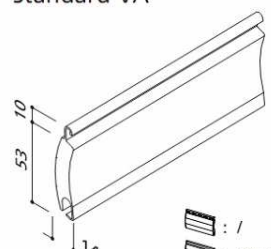


Rys. 1 Roleta montowana na murze (na elewacji)
Fig. 1. The blind is mounted on the wall (on elevation)



Rys. 2 Roleta montowana we wnęce (na ościeżnicy)
Fig. 2 The blind is mounted in a recess (in frame)

Sposób zainstalowania rolet powoduje różną grubość warstwy powietrza między szybą okna a roletą. Powyższe wpływa na wartość oporu cieplnego warstwy powietrza. Oprócz możliwości zainstalowania rolet na budynku można zaobserwować różnej wielkości elementy, z których wykonane są rolety:

| | | |
|--|---|---|
| <p>H 55 E</p>  <p>: 0750 .. : 0755 ..</p> | <p>Standard Safe</p>  <p>: 0766 .. : 0767 ..</p> | <p>Standard VA</p>  <p>: / : 0450</p> |
| <p>HR 37</p>  <p>: 0711 .. : 0712 ..</p> | <p>HR 41</p>  <p>: 0713 .. : 0714 ..</p> | <p>HK 842</p>  <p>: 0721 .. : 0722 ..</p> |
| <p>H 55 E</p>  <p>: 0750 .. : 0755 ..</p> | <p>Standard Safe</p>  <p>: 0766 .. : 0767 ..</p> | <p>Standard VA</p>  <p>: / : 0450</p> |

Rys. 3 Pióra rolet.

Fig. 3. Blind's shafts

Obudowa pióra wykonana jest z tworzywa sztucznego, a wypełnienie z pianki typu PIR. Na podstawie przyjętych rozwiązań określono wartość średniego ważonego współczynnika przenikania ciepła rolety, wartość współczynnika ciepła zespołu okno roleta w zależności od grubości warstwy powietrznej. Otrzymane wyniki zebrano w tabeli:

Tabela 1. Zestawienie wyników
Tabela 1 Summary of results

| | U _{sr} | U _o | R _p | UZ1 | U _o | R _p | UZ2 | UZ1A | UZ2A |
|---------------|-----------------|----------------|----------------|----------|----------------|----------------|----------|----------|----------|
| HR 37 | 3,069867 | 1,7 | 0,17 | 0,976579 | 1,1 | 0,11 | 0,743584 | 0,976579 | 0,743584 |
| HR 41 | 2,994549 | 1,7 | 0,17 | 0,915604 | 1,1 | 0,11 | 0,707699 | 0,968828 | 0,739081 |
| HK 842 | 4,84544 | 1,7 | 0,17 | 1,036683 | 1,1 | 0,11 | 0,777925 | 1,105443 | 0,816013 |
| Super Mini E | 3,200923 | 1,7 | 0,17 | 0,934016 | 1,1 | 0,11 | 0,718649 | 0,989467 | 0,751032 |
| Mini E | 2,913214 | 1,7 | 0,17 | 0,907854 | 1,1 | 0,11 | 0,70306 | 0,960155 | 0,734023 |
| HL 837 | 3,000993 | 1,7 | 0,17 | 0,916205 | 1,1 | 0,11 | 0,708058 | 0,969501 | 0,739473 |
| Mini Safe | 2,898255 | 1,7 | 0,17 | 0,906396 | 1,1 | 0,11 | 0,702185 | 0,958524 | 0,73307 |
| Mini VA | 2,898255 | 1,7 | 0,17 | 0,906396 | 1,1 | 0,11 | 0,702185 | 0,958524 | 0,73307 |
| ER 54 | 2,058212 | 1,7 | 0,17 | 0,803798 | 1,1 | 0,11 | 0,638998 | 0,844528 | 0,664474 |
| ECO 55 | 2,196419 | 1,7 | 0,17 | 0,824048 | 1,1 | 0,11 | 0,65173 | 0,86691 | 0,678252 |
| Norma | 2,219803 | 1,7 | 0,17 | 0,827318 | 1,1 | 0,11 | 0,653774 | 0,87053 | 0,680466 |
| HE 55 | 2,196419 | 1,7 | 0,17 | 0,824048 | 1,1 | 0,11 | 0,65173 | 0,86691 | 0,678252 |
| Standard Safe | 2,219803 | 1,7 | 0,17 | 0,827318 | 1,1 | 0,11 | 0,653774 | 0,87053 | 0,680466 |
| Standard VA | 2,219803 | 1,7 | 0,17 | 0,827318 | 1,1 | 0,11 | 0,653774 | 0,87053 | 0,680466 |

Gdzie przyjęto następujące oznaczenia:

U_{sr} – średni współczynnik przenikania ciepła rolety, W/m²·K

U_o – współczynnik przenikania ciepła okna, W/m²·K

R_p – opór cieplny warstwy powietrza, m²·K/W

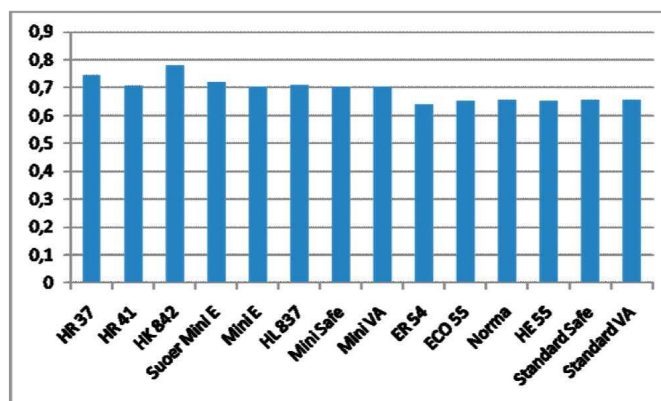
UZ1 - współczynnik przenikania ciepła zespołu okno U_o = 1,7 W/m²·K, warstwa powietrza 5 cm, roleta,

UZ2 - współczynnik przenikania ciepła zespołu okno U_o = 1,1 W/m²·K, warstwa powietrza 15 cm, roleta

UZ1A - współczynnik przenikania ciepła zespołu okno U_o = 1,1 W/m²·K, warstwa powietrza 5 cm, roleta,

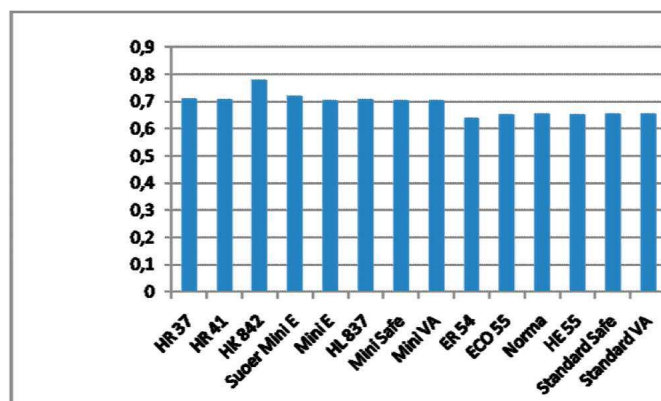
UZ2A - współczynnik przenikania ciepła zespołu okno U_o = 1,1 W/m²·K, warstwa powietrza 15 cm, roleta.

Otrzymane wyniki zobrazowano na poniższych wykresach



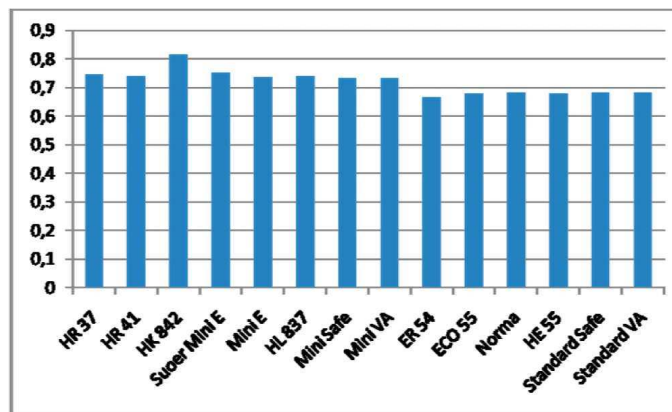
Wykres 1. Współczynnik przenikania ciepła zespołu okno $U_o = 1,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, warstwa powietrza 15 cm, roleta.

Chart 1. Heat penetration coefficient for group consisting of: window $U_o = 1,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, layer of air, blind 15 cm



Wykres 2. Współczynnik przenikania ciepła zespołu okno $U_o = 1,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, warstwa powietrza 5 cm, roleta

Chart 2. Heat penetration coefficient for group consisting of: window $U_o = 1,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, layer of air, blind 5 cm



Wykres 3. Współczynnik przenikania ciepła zespołu okno
 $U_o = 1,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, warstwa powietrza 15 cm, roleta.

Chart 3. Heat penetration coefficient for group consisting of: window $U_o = 1,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$,
 layer of air, blind 15 cm

Straty ciepła na m powierzchni okna zmniejszyły się w zależności od pierwotnego współczynnika przenikania ciepła okna, jak i grubości warstwy powietrza. W przypadku okien o współczynniku przenikania ciepła $U_o = 1,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ straty ciepła zmniejszyły się od 48% do prawie 60% średnio można przyjąć 54%, a przy oknach o współczynniku przenikania ciepła $U_o = 1,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ straty ciepła zmniejszyły się od 33% do 38%.

Przyjmując dodatkowo powierzchnie zewnętrzną wymiany ciepła przegród budynku oraz udział powierzchni okien w wysokości normatywnej 15% otrzymamy iż straty ciepła całego obiektu zmniejszą się w przypadku zastosowania rolet przy oknach o współczynniku $U_o = 1,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ o 24%, i o współczynniku $U_o = 1,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ o 15%.

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 r. wartość miesięcznych zysków ciepła od nasłonecznienia przez okna w przegrodach pionowych można określić z zależności:

$$Q_{s1,s2} = 2 C_1 \cdot A_1 \cdot I_1 \cdot g \cdot k_d \cdot Z, \text{ kWh/ miesiąc} \quad (1)$$

gdzie:

C - udział pola powierzchni szklonej do całkowitego pola powierzchni okna, 0,7

A_i - pole powierzchni okna, m

I_i - Wartość energii promieniowania słonecznego w sezonie ogrzewczym na płaszczyznę pionową, kWh/m miesiąc

c , - współczynnik korekcyjny wartości I_i ze względu na nachylenie płaszczyzny połąci dachowej ściany pionowe = 1

Z - współczynnik zacienienia budynku ze względu na jego usytuowanie oraz przesłony na elewacji budynku,

g - współczynnik przepuszczalności energii promieniowania słonecznego przez oszklenie.

Poniżej przedstawiono zyski ciepła przez okno o powierzchni 1 m² bez zastosowanych urządzeń przeciwsłonecznych.

Tabela 2. Zyski ciepła przez okna bez urządzeń przeciwsłonecznych.

Table 2. Heat savings for windows without antisol systems

| orientacje | Zyski od promieniowania słonecznego w Wh | | | | | | | | | | | |
|------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| N | 7298,349 | 8300,979 | 17732,47 | 24270,21 | 34699,5 | 37002,91 | 37716,31 | 30193,79 | 21995,79 | 12456,86 | 7096,112 | 6181,96 |
| E | 2606,543 | 3134,194 | 6912,963 | 10492,83 | 13351,29 | 15402,78 | 15946,58 | 13002,55 | 8509,32 | 4745,751 | 2539,045 | 2093,133 |
| S | 10477,06 | 12912,2 | 20987,32 | 28727,23 | 35351,09 | 37921,91 | 38029,49 | 36758,61 | 26564,4 | 18424,16 | 11877,87 | 8849,904 |

Promieniowanie słoneczne w okresie chłodnym powoduje zmniejszenie na zapotrzebowanie energii na cele grzewcze, ale w okresie ciepłym jest „zanieczyszczeniem” które wymusza konieczność chłodzenia pomieszczenia lub ochłodzenia powietrza wentylującego.

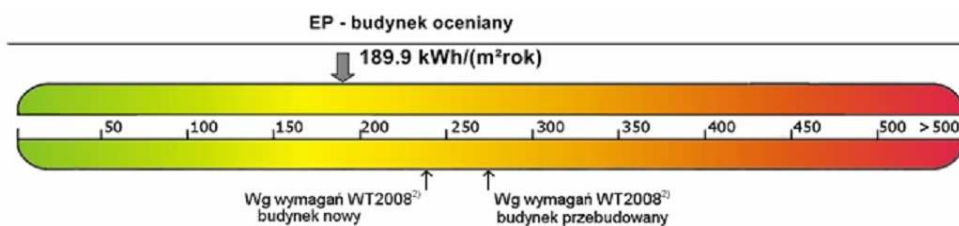
Określając miesięczne zapotrzebowanie strat ciepła w pomieszczeniu zlokalizowanym w III strefie klimatycznej o wymiarach 5 x 3,5 x 2,4 m z oknem zorientowanym w kierunku południowym o wymiarach 1,5 x 2 m i porównamy je z zyskami od promieniowania słonecznego. Analizy zostaną przeprowadzone w miesiącu styczniu. Zyski ciepła w wyniku promieniowania słonecznego wyniosły **237,9 MJ**.

Straty ciepła przez okno o współczynniku przenikania ciepła $U = 1,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ wyniosą **302,2MJ**, a w przypadku zastosowania rolet zamykanych po zmroku i otwieranych o świcie straty zmniejszą się do **210,3 MJ**. Przy oknach o współczynniku przenikania ciepła $U = 1,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ odpowiednio otrzymamy 207,7 MJ i 163,7 MJ. Zastosowanie rolet ma wpływ na zapotrzebowanie energii pierwotnej w okresie zimowym.

Dodatkowo w okresie letnim ze względu na promieniowanie słoneczne należy chłodzić powietrze wewnątrz pomieszczeń. Rolety opuszczane w czasie gdy okno jest opromieniane spowodują zmniejszenie zysków ciepła przez przegrody przezroczyste o ponad 70%. Powyższe zmniejszy zapotrzebowanie mocy chłodniczej na cele wentylacji. Efekty ekonomiczne będą znaczne gdyż wytworzenie 1 kW chłodu jest od 3 do 4 razy droższe niż uzyskanie 1kW ciepła.

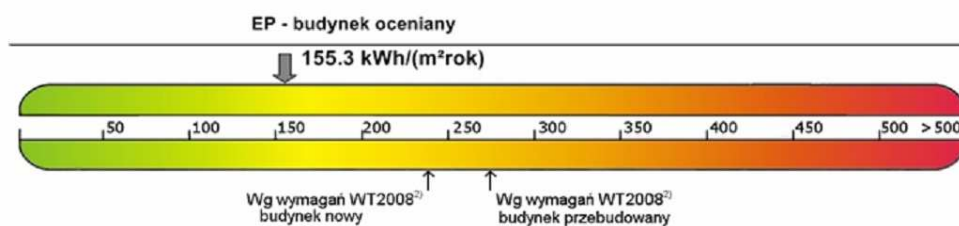
Jak podano powyżej zastosowanie rolet wpłynie na wartość zapotrzebowania na energię pierwotną /EP/. Poniżej przedstawiono uzyskane efekty w przypadku ogrzewania bez uwzględnienia wpływu rolet na EP w okresie ciepłym. Przeanalizowano budynek jednorodzinny zlokalizowany w Łodzi, III strefa klimatyczna. Wartość współczynnika przenikania ciepła łącznie z roletą.

| ŚWIADECTWO CHARAKTERYSTYKI ENERGETYCZNEJ | | |
|--|------------------------------------|--|
| budynku mieszkalnego nr 1 | | |
| Ważne do: 2019-12-16 | | |
| Budynek oceniany: | | |
| Rodzaj budynku | Dom jednorodzinny | |
| Adres budynku | 90-057 Łódź ul. Sienkiewicza 85/87 | |
| Całość/Część budynku | --- | |
| Rok zakończenia budowy/rok oddania do użytkowania | 2009 | |
| Rok budowy instalacji | 2009 | |
| Liczba lokali mieszkalnych | 0 | |
| Powierzchnia użytkowa (A_{u} , m ²) | 240,0 | |
| Cel wykonania świadectwa | Budynek nowy Najem/sprzedaż | |



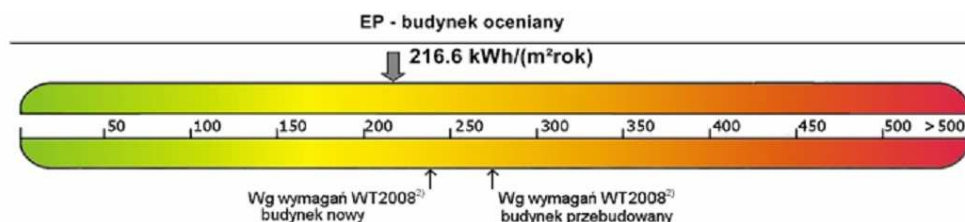
Wartość EP przy współczynniku przenikania ciepła okna $U = 1,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ okno w kierunku południowym

Heat penetration coefficient value for window $U = 1,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ facing to south



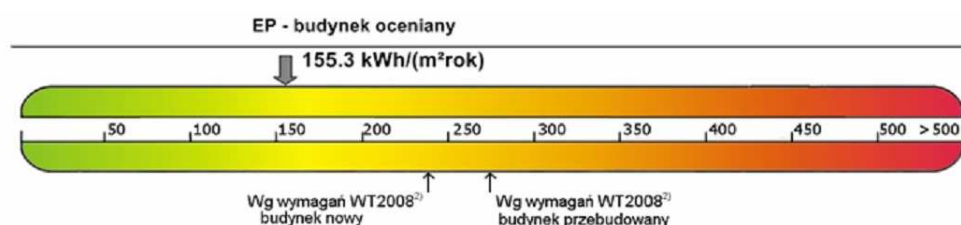
Wartość EP przy współczynniku przenikania ciepła okna $U = 0,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ okno w kierunku południowym

Heat penetration coefficient value for window $U = 0,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ facing to south



Wartość EP przy współczynniku przenikania ciepła okna $U = 1,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ okno w kierunku północnym

Heat penetration coefficient value for window $U = 1,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ facing to north



Wartość EP przy współczynniku przenikania ciepła okna $U = 0,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ okno w kierunku północnym

Heat penetration coefficient value for window $U = 0,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ facing to north

3. Wnioski

Jak wykazano powyżej zastosowanie rolet wydatnie wpłynie na zmniejszenie zapotrzebowania energii na cele grzewcze w obiektach. Można przyjąć iż przy zamkniętych roletach w okresie chłodnym zapotrzebowanie ciepła zmniejszy się od 15% do 20%. Efektywność ograniczenia strat ciepła wzrośnie w przypadku zastosowania automatycznego sterowania roletami /po zmierzchu zamykane i o świcie otwierane.

W analizach należałoby rozpatrzyć dodatkowo wpływ rolet na straty ciepła przy zmiennych warunkach pogodowych /infiltracja powietrza przy silnych wiatrach. Przeprowadzenie rozszerzonych analiz umożliwi podawanie inwestorom pełnej informacji o zaletach zastosowania rolet.

Zastosowanie rolet wydatnie wpłynie na zmniejszenie zapotrzebowania energii na cele grzewcze jak i chłodnicze w obiektach. Można przyjąć iż przy zamkniętych roletach w okresie chłodnym zapotrzebowanie ciepła zmniejszy się od 15% do 20%, a w przypadku okresów ciepłych zmniejszy zyski ciepła przez okna o ponad 70%. Efektywność ograniczenia strat ciepła wzrośnie w przypadku zastosowania automatycznego sterowania roletami /po zmierzchu zamykane i o świcie otwierane.

W analizach należałoby rozpatrzyć dodatkowo wpływ rolet na straty ciepła przy zmiennych warunkach pogodowych /infiltracja powietrza przy silnych wiatrach. Przeprowadzenie rozszerzonych analiz umożliwi podawanie inwestorom pełnej informacji o zaletach zastosowania rolet.

**THE POSSIBILITY OF THE DECREASE OF THE DEMAND
OF THE HEAT AT THE USE OF THE EXTERNAL
ROLLER-BLINDS OF THE WINDOW**

SUMMARY

Nowadays, external blinds are installed on many buildings. Their purpose is to prevent burglary. However, most of blinds are also installed for heat savings. External safety blinds have many advantages:

- they provide additional heat savings for windows during winter,
- they are additional prevention for windows from excessive rooms' heating in the summer,
- they provide additional acoustic protection from outside and from inside,
- they provide possibility of rooms' ventilation by armours perforation, which prevents from formation of draughts,
- they protect windows from being affected by destructive,
- they guarantee 100% discretion and private, getting effect of full darkening (full optical isolation), one can achieve day to night transformation, which is especially important for people working in night and demanding proper sleep at day.

Anita BEDNARSKA, mgr inż.

Andrzej STĘPIEŃ, dr inż.

Instytut Technologii Eksploatacji - Państwowy Instytut Badawczy
Zakład Technologii Proekologicznych
ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom
e-mail: andrzej.stepien@itee.radom.pl

BIOPALIWA EMULSYJNE DO ZASILANIA ŹRÓDEŁ CIEPŁA MAŁEJ I ŚREDNIEJ MOCY

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań właściwości fizykochemicznych opracowanych kompozycji biopaliw emulsyjnych na bazie oleju roślinnego. Zaobserwowano wysoki poziom lepkości emulsji przy zawartości wody od ok. 1 do ok. 5%, co może komplikować procesy spalania w typowych urządzeniach grzewczych.

1. WPROWADZENIE

Właściwa organizacja procesu spalania jest uwarunkowana głównie przez jakość rozpylania paliwa. Kluczowym zagadnieniem wydaje się optymalizacja składu paliwa pod względem fizykochemicznym pozwalającym na ich ekonomiczne spalanie, bez dodatkowego obciążania środowiska.

Jedną z możliwości spełnienia bardzo restrykcyjnych wymogów dotyczących limitów emisji CO₂ jest zastosowanie paliw odnawialnych. Dotychczasowe wyniki prac badawczych wskazują na duży potencjał paliw emulsyjnych. Paliwa takie zawierałyby częściowo wodę, która nie jest szkodliwa dla środowiska. Spalanie paliw emulsyjnych przebiega inaczej niż paliw tradycyjnych. Na podstawie analizy naukowej literatury zagranicznej oraz badań polskich zauważono, że obecność wody w paliwie w postaci zemulgowanej poprawia proces spalania oraz zmniejsza straty energetyczne.

2. Emulsje – charakterystyka ogólna, typy emulsji

Emulsja jest to układ dyspersyjny czyli niejednorodny fizycznie, niejednorodny chemicznie, który składa się z dwóch niemieszających się wzajemnie cieczy, z których jedna jest fazą ciągłą (faza zewnętrzna emulsji), a druga jest fazą rozdrobnioną (faza wewnętrzna emulsji). Faza wewnętrzna jest rozproszona w fazie zewnętrznej w postaci

niewielkich kropelek. Faza ciągła emulsji zwana jest również ośrodkiem dyspersyjnym [1, 4, 8].

W emulsjach jedna z cieczy jest fazą polarną (najczęściej jest nią woda lub jej roztwór), oznacza się ją symbolem W. Drugi składnik emulsji to ciecz nierozpuszczalna w wodzie, jest on, bez względu na swój skład oraz charakter chemiczny, nazywana olejem i oznaczana jako O [1, 4, 5, 8].

2.1. Metody otrzymywania emulsji

Metody wytwarzania emulsji dzieli się na dwa typy: dyspersyjne i kondensacyjne.

Metody kondensacyjne (chemiczne) [5, 7]:

- Wytwarzanie emulsji poprzez zmniejszenie rozpuszczalności – Stanem wyjściowym jest roztwór prawdziwy (ośrodek dyspersyjny) (np. olej). Wprowadza się do niego ciecz (np. woda), w której znajdująca się w roztworze rozpuszczona substancja (np. emulgator) źle się rozpuszcza. Przy odpowiedniej szybkości dolewania cieczy, właściwej temperaturze i odpowiednim mieszaniu otrzymuje się emulsję.
- Wytwarzanie emulsji poprzez dodanie emulgatora – Emulgator jest rozpuszczany bądź wstępnie emulgowany w fazie olejowej lub wodnej. Następnie ten roztwór jest dodawany do fazy zewnętrznej, bądź faza wewnętrzna jest dodawana do roztworu [9].

Metody dyspersyjne (mechaniczne) [5]:

- Wytwarzanie mechaniczne w młynach koloidowych – Fazę rozpraszającą i substancję rozdrabnianą wprowadza się do młyna, następnie całość wprowadzana jest w ruch obrotowy. Rozdrobnienie następuje w skutek tarcia.
- Zastosowanie ultradźwięków – Pochodzące z generatora drgania ultradźwiękowe działają na naczynia zawierające substancje przeznaczone na fazy rozproszoną i rozpraszającą.
- Zastosowanie różnego rodzaju mieszalników lub homogenizerów – Podczas mechanicznej emulgacji, praca potrzebna to zmniejszenia rozmiaru kropelek cieczy oraz związany z tym wzrost powierzchni granicznej są dostarczane układowi dzięki siłom tarcia.

2.2. Właściwości emulsji

Na przebieg procesu spalania emulsyjnych paliw ciekłych istotny wpływ mają ich właściwości fizykochemiczne, tj.: gęstość, lepkość, stopień zdyspergowania oraz, ze względów organizacyjnych i praktycznych trwałość (stabilność) emulsji.

2.2.1. Lepkość emulsji

W praktyce można operować jedynie emulsjami o określonej lepkości, dlatego opór, który stawia emulsja podczas przepływu jest jedną z najważniejszych właściwości emulsji. Do głównych czynników kształtujących lepkość emulsji należą [1]:

- Obecność w emulsji pęcherzyków powietrza, co powoduje wzrost lepkości emulsji.

- Stopień dyspersji emulsji. Emulsje drobno zdyspergowane posiadają większą lepkość od emulsji grubo zdyspergowanych.
- Lepkość poszczególnych faz, z których składa się emulsja. Lepkość emulsji jest praktycznie niezależna od lepkości fazy wewnętrznej. Duża zawartość fazy wewnętrznej wpływa niekorzystnie na lepkość. Istotny czynnik decydujący o lepkości emulsji to lepkość fazy zewnętrznej. Znaczna lepkość fazy zewnętrznej wpływa dodatnio na stabilność emulsji.
- Czas przechowywania emulsji. Obserwuje się zjawisko wzrostu lepkości emulsji z czasem jej przechowywania, jednak po wymieszaniu tej emulsji lepkość często powraca do swej poprzedniej wartości. Zależy to jednak od natury emulgatora użytego do sporządzenia emulsji.

2.2.2. Stabilność emulsji

Czynniki wpływające na trwałość emulsji:

- napięcie międzyfazowe (powierzchniowe)
- wielkość kulek fazy rozproszonej - emulsja o większej dyspersji będzie trwalsza, ze względu na mniejszą masę pojedynczej kuleczki i związaną z tym większą ich ruchliwość.

Z termodynamicznego punktu widzenia niestabilność emulsji oznacza podwyższenie napięcia powierzchniowego na granicy rozdziału faz, a to powoduje wzrost wielkości kropeł. Trwałość układu emulsyjnego uzależniona jest od działania dwóch czynników. Jednym z nich jest napięcie powierzchniowe, działa ono w kierunku koalescencji kropełek emulsji. Drugim czynnikiem jest siła kohezji błonki powierzchniowej, utworzonej przez emulgator, która przeciwdziała koalescencji. Wraz ze spadkiem napięcia powierzchniowego, stabilność emulsji rośnie [9, 10].

Na trwałość emulsji wpływ ma wiele czynników, tj.: zmiana temperatury, hydroliza oraz starzenie. Destrukcyjnie na trwałość układu działają zmiany koloidowe w budowie emulgatora, które są wywoływane przez czynniki fizyczne. Wynika stąd, że znajomość struktury i własności fizykochemicznych emulgatorów jest kluczowe podczas tworzenia emulsji [10].

2.3. Równowaga hydrofilowo-lipofilowa (HLB)

Praktyczne wykorzystanie związków powierzchniowo czynnych narzuca konieczność znajomości wielkości udziału, jaki we właściwościach danego związku mają części hydrofilowa oraz hydrofobowa (lipofilowa) [1]. Ten udział wyraża współczynnik HLB (ang. hydrophile lipophile balance). Jego wartość oznacza się doświadczalnie bądź oblicza się na podstawie wzorów. Najczęściej stosowanymi metodami obliczeń współczynnika HLB to metody Griffina i Daviesa. Znajomość budowy surfaktanta pozwala prognozować jego cechy użytkowe, metody Griffina i Daviesa są na tym oparte [1].

2.3.1. System HLB według Griffina

Według Griffina wskaźnik ten mieści się w umownej skali liczbowej od 0 do 20. W uproszczeniu wartość HLB 0 odpowiada właściwościom hydrofobowym, a wartość HLB

20 odpowiada właściwościom hydrofilowym związku powierzchniowo czynnego. Wartość HLB 10 oznacza, że właściwości hydrofobowe i hydrofilowe związku są zrównoważone [2].

Klasyfikacja ta oparta jest na wynikach badań eksperymentalnych, wykazały one że związki o danej wartości HLB wykazują określone właściwości użytkowe. Zależność pomiędzy użytkowymi właściwościami emulgatorów a wartością wskaźnika HLB przedstawiono w tabeli 1 [1].

Tabela 1. Zależność pomiędzy właściwościami użytkowymi surfaktantów a wartością wskaźnika HLB

Table 1. The relationship between the properties and uses of surfactants and the value of HLB index

| Właściwości użytkowe | Wartość HLB |
|---------------------------------|-------------|
| Środki antypieniące | 1,5 – 3 |
| Emulgatory typu W/O | 3 – 6 |
| Środki zwilżające i powlekające | 7 – 9 |
| Emulgatory typu O/W | 8 – 18 |
| Środki piorące | 13 – 15 |
| Solubilizatory | 13 – 18 |

2.3.2 System HLB według Daviesa

Budowa chemiczna cząsteczki emulgatora, a w szczególności rodzaj strukturalnych elementów cząsteczki decyduje o jego równowadze hydrofilowo-hydrofobowej. Metoda Griffina nie uwzględnia tych elementów. Davies wziął pod uwagę te braki i zaproponował własną wartość liczbową współczynnika HLB. Zastosował on doświadczalnie ustalone hydrofilowe i lipofilowe wartości udziałów elementów strukturalnych związków powierzchniowo czynnych.

Wartości HLB odnoszące się do poszczególnych grup strukturalnych przedstawiono w tabeli 2 [1].

Tabela 2. Wartości HLB odnoszące się do grup strukturalnych

Table 2. HLB numbers relative to structural groups

| Grupy hydrofilowe | HLB | Grupy hydrofobowe | HLB |
|---|------|--|-------------|
| -SO ₄ ⁻ Na ⁺ | 38,7 | -CH ₃ | -0,475 |
| -COO ⁻ K ⁺ | 21,1 | -CH ₂ - | -0,475 |
| -COO ⁻ Na ⁺ | 19,1 | =CH- | -0,475 |
| -N (amina trzeciorzędowa) | 9,4 | -CF ₃ - | -0,870 |
| -COO ⁻ (ester sorbitanowy) | 6,8 | -CF ₂ - | -0,870 |
| -COO ⁻ (ester wolny) | 2,4 | pierścień benzenowy | -1,662 |
| -COOH | 2,1 | Pochodne grup | HLB |
| -OH (wolne) | 1,9 | Grupa etoksylova, -OCH₂CH₂- | 0,33 |
| -OH (pierścień sorbitanowy) | 1,3 | Grupa propoksylova, - | -0,15 |
| -O- | 0,5 | OCH ₂ CH(CH ₃)- | |

2.3.3 Dobór emulgatora według HLB

Im niższa jest wartość HLB związku powierzchniowo czynnego, tym lepsza jest jego rozpuszczalność w olejach i związkach hydrofobowych. Im wyższa wartość HLB, tym związek bardziej hydrofilowy i jego rozpuszczalność w wodzie rośnie, a maleje rozpuszczalność w olejach [2].

Znajomość wartości HLB pozwala na wstępną ocenę właściwości użytkowych związku powierzchniowo czynnego i wstępną selekcję związku pod względem możliwości jego zastosowania [2].

Teoria HLB znalazła zastosowanie nie tylko do przewidywania kierunków potencjalnego wykorzystania surfaktanta, ale przede wszystkim do doboru właściwego emulgatora w procesie tworzenia emulsji. W celu wytworzenia przez daną fazę lipofilową emulsji z wodą o optymalnej dyspersji i trwałości, użyta faza lipofilowa wymaga zastosowania jako emulgatora surfaktanta lub mieszaniny surfaktantów. Doświadczalnie stwierdzono, że optymalną dyspersję i trwałość emulsji uzyskuje się wtedy, gdy wartość HLB surfaktanta użytego jako emulgator ma wartość tzw. wymaganej liczby HLB (WHLB). Wartość WHLB zależy od rodzaju substancji lipofilowej oraz od rodzaju tworzonej emulsji. Wymagana liczba HLB dla różnych substancji olejowych przedstawiona jest w tabeli 3 [1].

Tabela 3. Wymagana liczba HLB (WHLB) dla różnych substancji lipofilowych.

Table 3. Required HLB number for different lipophilic substances

| Substancja lipofilowa | Emulsja W/O | Emulsja O/W |
|-----------------------|-------------|-------------|
| Alkohol cetylowy | - | 15 |
| Alkohol stearylowy | - | 14 |
| Kwas stearynowy | 6 | 15 |
| Lanolina | 8 | 10 |
| Oleje roślinne | ok. 5 | ok. 10 |
| Parafina ciekła | 5 | 12 |
| Parafina stała | 4 | 11 |
| Wazelina | 5 | 12 |
| Wosk pszczeli | 4 | 12 |

Z tabeli 3 wynika, że WHLB emulgatora dla emulsji na bazie oleju roślinnego utworzenia powinna wynosić ok. 5 (oleje roślinne), jednak we względu na różne właściwości poszczególnych partii olejów roślinnych liczba ta może się zmieniać. Dlatego ostateczny dobór emulgatora do konkretnej emulsji uzależniony jest od prób doświadczalnych.

3. Wytworzenie emulsji

Celem badań eksperymentalnych było skomponowanie stabilnej emulsji wodno-olejowej na bazie oleju rzepakowego rafinowanego oraz zbadania możliwości zastosowania tego typu emulsji jako paliwo ciepłownicze.

Opracowanie składu kompozycji paliwowej polegało na właściwym doborze komponentów. Kompozycje miały charakteryzować się najbardziej optymalną stabilnością. Następnym etapem opracowywania składu emulsji było wykonanie szeregu badań fizykochemicznych, takich jak gęstość, lepkość kinematyczna i lepkość dynamiczna.

Do sporządzenia emulsji paliwowej użyto następujących surowców (komponentów):

- Olej rzepakowy rafinowany (dalej określany jako BAZA),
- Woda wodociągowa,
- Emulgatory.

Zakres badań obejmował opracowanie emulsji zawierającej jeden z wymienionych emulgatorów bądź ich mieszaninę. Opracowane emulsje zawierały odpowiednio 0,99%, 1,98%, 4,9%, 9,8% i 14,71% wody.

Spośród wszystkich wykonanych kompozycji paliwowych wytypowano pięć, które charakteryzowały się optymalną stabilnością. W tabeli 4 przedstawiono kompozycje wybrane do badań fizykochemicznych.

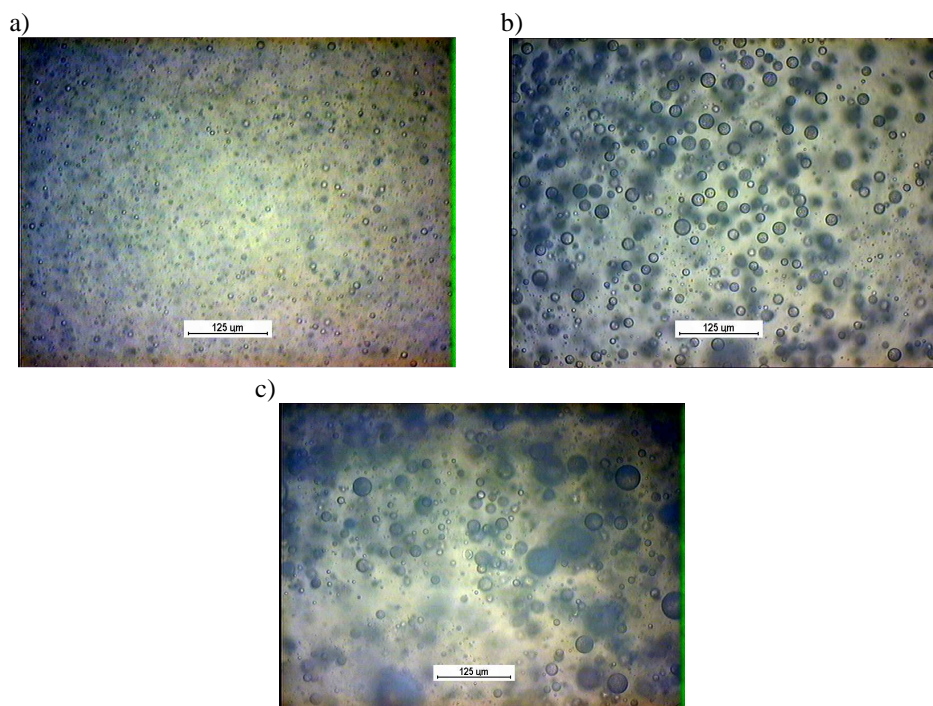
Tabela 4. Skład kompozycji wytypowanych do badań fizykochemicznych

Table 4. Composition content of samples selected for physical / chemical analysis

| Kompozycja | Skład |
|------------|---|
| 1* | 0,99% woda, 98,02% olej rzepakowy, 0,99% emulgator |
| 2* | 1,98% woda, 97,03% olej rzepakowy, 0,99% emulgator |
| 3* | 4,9% woda, 93,14% olej rzepakowy, 1,96% emulgator |
| 4* | 9,8% woda, 88,24% olej rzepakowy, 1,96% emulgator |
| 5* | 14,71% woda, 83,33% olej rzepakowy, 1,96% emulgator |

Na rysunku 1 a przedstawiono emulsję 2*, 1 b przedstawiono emulsję 4*, na rysunku 1 c emulsję 5*. Wszystkie zdjęcia wykonano przy 200 krotnym powiększeniu.

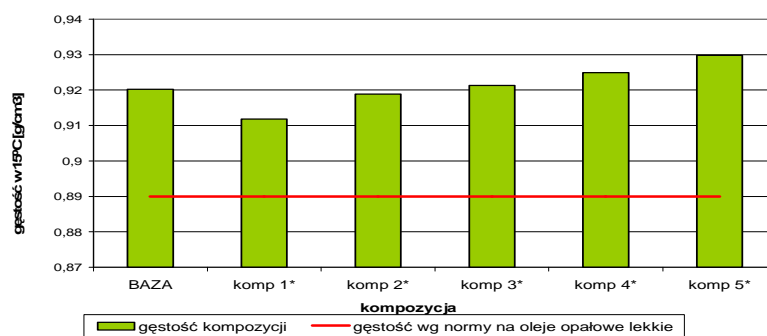
Badane emulsje charakteryzują się zmienną wielkością kropeł. Średnice kropeł wody na rysunku 1a (emulsja zawierająca 1,98% wody) wynoszą od ok. 2,5 μm do ok. 10 μm . Średnice kropeł wody na rysunku 1b (emulsja zawierająca 9,8% wody) wynoszą od ok. 2,5 μm do ok. 22,5 μm . Średnice kropeł wody na rysunku 1c (emulsja zawierająca 14,71% wody) wynoszą od ok. 2,5 μm do ok. 45 μm .



Rys. 1. Emulsja zawierająca: a) 1,98% wody, b) 9,8% wody, c) 14,71% wody
 Fig. 1. Emulsion containing: a) 1,98% of water, b) 9,8% of water, c) 14,71% of water

4. Badanie gęstości wytypowanych kompozycji

Badanie zostało wykonane przy użyciu piknometru zgodnie z normą PN-EN-ISO 3838:2005. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 2.



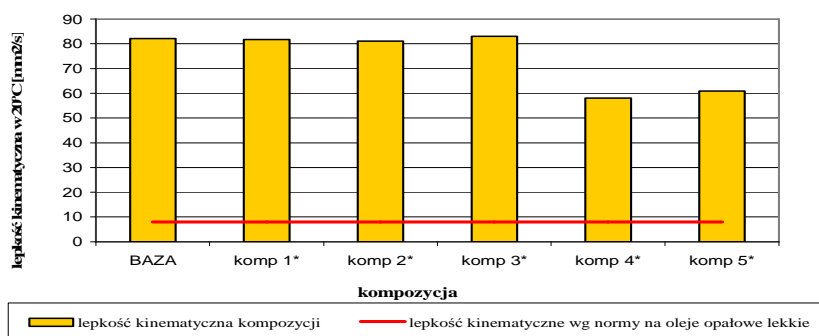
Rys. 2. Gęstość - zestawienie gęstości BAZY i wytypowanych próbek z gęstością wg normy PN-C-96024:2001

Fig. 2. Density – comparison of BAZA density and density of selected samples with density according to PN-C-96024:2001 standard

Z danych na wykresie wynika, że badane kompozycje oraz kompozycja bazowa, czyli olej rzepakowy rafinowany, charakteryzują się wyższą gęstością niż określono w normie przedmiotowej dla olejów opałowych lekkich wg PN-C-96024:2001 (dla oleju opałowego L-2 maksymalna gęstość wynosi $0,890 \text{ g/cm}^3$, a dla oleju opałowego L-1 maksymalna gęstość wynosi $0,860 \text{ g/cm}^3$). Podczas badań stwierdzono, że najniższą gęstość, czyli $0,9118 \text{ g/cm}^3$ posiadała kompozycja 1*, zawierająca 0,99% wody. Gęstość rosła liniowo wraz z większą zawartością wody w kompozycjach. Gęstość zbliżoną do gęstości kompozycji bazowej, czyli $0,9213 \text{ g/cm}^3$, uzyskała kompozycja 3* o 4,9% zawartości wody. Najwyższą gęstość posiadała kompozycja 5* o 14,71% zawartości wody, wynosiła ona $0,9298 \text{ g/cm}^3$.

5. Badanie lepkości kinematycznej wytypowanych kompozycji

Badanie zostało wykonane przy użyciu wiskozymetru Ubbelohde'a w 20°C wg normy badawczej PN-EN ISO 3104:2004 i ASTM D 445:2006. Na rys. 3 przedstawiono wyniki badań lepkości kinematycznej opracowanych kompozycji emulsji na bazie oleju rzepakowego rafinowanego.



Rys. 3. Lepkość kinematyczna - zestawienie lepkości BAZY i wytypowanych kompozycji z lepkością kinematyczną wg normy PN-C-96024:2001

Fig. 3. Viscosity – comparison of BAZA viscosity and viscosity of selected samples with viscosity according to PN-C-96024:2001 standard

Z danych na rysunku 3 wynika, że badane kompozycje charakteryzują się dużo wyższą lepkością kinematyczną niż określono w normie przedmiotowej dla olejów opałowych lekkich wg PN-C-96024:2001 (dla L-2 maksymalna lepkość wynosi $8 \text{ mm}^2/\text{s}$, a dla L-1 maksymalna lepkość to $6 \text{ mm}^2/\text{s}$). Podczas badań stwierdzono, że lepkość w 20°C zmieniała się nieznacznie dla kompozycji 1*, 2* i 3*, zawierających odpowiednio 0,99%, 1,98% i 4,9% wody, w stosunku do BAZY, czyli oleju rzepakowego rafinowanego i wynosiła ok. $80 \text{ mm}^2/\text{s}$. Najniższą lepkość uzyskały kompozycje 4* ($58 \text{ mm}^2/\text{s}$) i 5* ($60,9 \text{ mm}^2/\text{s}$), zawierające odpowiednio 9,8% i 14,71% wody.

6. PODSUMOWANIE

Na podstawie wyników badań emulsji wysnuto następujące wnioski:

1. Emulsje wodno-paliwowe stosowane w ciepłownictwie są emulsjami typu W/O. Do tworzenia takich emulsji przeważnie używane są emulgatory niejonowe zawierające w cząsteczkach tlenek etylenu oraz kwasy tłuszczowe.
2. WHLB emulgatora, który zostanie wykorzystany do utworzenia emulsji wodno-paliwowej powinno wynosić ok. 5 (oleje roślinne), jednak ze względu na różne właściwości poszczególnych partii olejów roślinnych liczba ta może się zmieniać.
3. Wzrost zawartości wody w kompozycji pogorszył jakość dyspersji wody w emulsji. Widać to na podstawie wyników badań lepkości emulsji, gdyż emulsje drobno zdyspergowane posiadają większą lepkość od emulsji grubo zdyspergowanych.
4. Spalanie emulsji w standardowych kotłach może być w poważny sposób utrudnione, gdyż jakość dyspersji wpływa w oczywisty sposób na efektywność spalania emulsji.

7. LITERATURA

- [1] Zieliński R.: Surfaktanty – towaroznawcze i ekologiczne aspekty ich stosowania. Akademia Ekonomiczna w Poznaniu, Poznań, 2000.
- [2] Przondo J.: Związki powierzchniowo czynne i ich zastosowanie w produktach chemii gospodarczej. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom, 2007.
- [3] Brend W.S., Glinka R.: Technologia kosmetyków. Oficyna Wydawnicza, Łódź, 2001.
- [4] Sonntag H.: Koloidy. PWN, Warszawa, 1982.
- [5] Tomassi W., Jankowska H.: Chemia fizyczna. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1973
- [6] Pigoń K., Ruziewicz Z.: Chemia fizyczna. Część 1. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1986
- [7] Gumiński K.: Wykłady z Chemii fizycznej. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1973
- [8] Dutkiewicz E.T.: Fizykochemia powierzchni. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1998
- [9] Heusch R., Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry – Emulsions. Vol A9. Bayer AG, Leverkusen, Niemcy, 2001
- [10] Gilewicz J.: Emulsje. PWN, Warszawa, 1957

EMULSION BIOFUELS FOR SMALL AND MEDIUM SIZE HEAT SOURCES

SUMMARY

The paper discusses selected results from physical/chemical analysis of developed vegetable oil based emulsion biofuels. A high viscosity level of emulsions containing approximately 1 to 5% of water was observed, which may complicate combustion processes in typical heating sources.

Wojciech BIALIK, dr inż.

Stanisław GIL, dr inż.

Piotr MOCEK, dr inż.

Politechnika Śląska

Zespół Energetyki Procesowej Katedry Metalurgii

ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

e-mail: wojciech.bialik@polsl.pl, stanislaw.gil@polsl.pl, piotr.a.mocek@polsl.pl,

OPTIMALIZACJA NUMERYCZNA KONSTRUKCJI AKUMULATORA ENERGII CIEPLNEJ DO WSPÓŁPRACY Z KOLEKTOREM SŁONECZNYM

STRESZCZENIE

Efektywność wykorzystania energii odnawialnej jest zależna od rozwiązania problemów z jej gromadzeniem i przesyłem, a tym samym z wyborem optymalnego akumulatora. W powyższej pracy skupiono się na optymalizacji numerycznej konstrukcji wytypowanych akumulatorów energii cieplnej do współpracy z kolektorem słonecznym. Ideą autorów jest opracowanie wstępnej koncepcji stosunkowo prostego w wykonaniu i taniego podpodłogowego akumulatora ciepła.

1. WPROWADZENIE

Wymagania dotyczące ochrony środowiska, rosnąca świadomość ekologiczna społeczeństwa, a także coraz mniejsze zasoby naturalnych paliw kopalnych spowodowały wzrost zainteresowania zastosowaniem odnawialnych źródeł energii. Na rynku pojawiają się coraz bardziej zaawansowane technicznie urządzenia i systemy energetyczne do produkcji energii cieplnej i elektrycznej z odnawialnych źródeł energii oraz technologie do produkcji biopaliw pierwszej i drugiej generacji (np. DME) [1-5].

Idea budownictwa energooszczędnego wymusza na środowisku naukowym i otoczeniu technicznym opracowywanie coraz nowszych materiałów budowlanych oraz układów do pozyskiwania i gromadzenia energii cieplnej celem jej efektywnego wykorzystania. Zastosowanie w budynkach mieszkalnych zintegrowanego układu kolektorów słonecznych z pompą ciepła i akumulatorem energii cieplnej w układach ciepłej wody

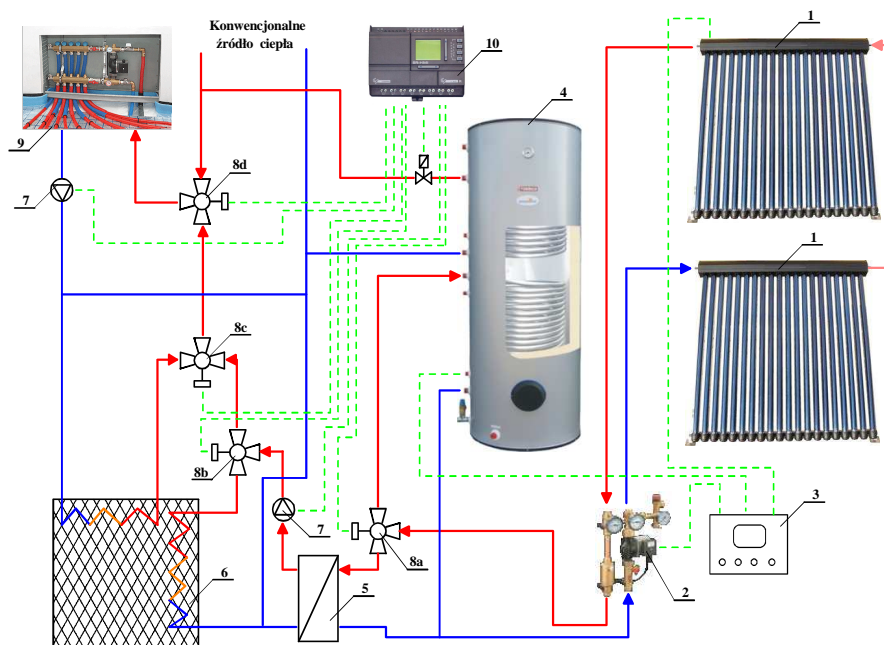
użytkowej i centralnego ogrzewania, nie jest rozwiązaniem nowym. Istnieją liczne prace naukowe na temat tego typu systemów grzewczych, których nie sposób wszystkich przytoczyć w powyższej publikacji [6-13].

Istotnym problemem w pozyskaniu stałego natężenia strumienia energii słonecznej jest jego zależność od pór roku i przypadkowy charakter pogody. Naturalnym krokiem więc wydaje się być magazynowanie energii cieplnej. Lecz pojawiają się następne problemy natury technicznej jak: dopasowanie wydajności źródła energii do zmiennego zapotrzebowania na energię, efektywne gromadzenie energii oraz optymalizacja procesu jej przekazywania [3]. Większość sposobów akumulacji energii cieplnej opiera się na wykorzystaniu własności cieplnych materii (pojemność i przewodnictwo cieplne, entalpia przemiany fazowej) oraz na efekcie cieplnym reakcji chemicznych. Akumulatory ciepła można podzielić na cztery grupy: zbiorniki wodne, materiały zmieniające fazę, reakcje termochemiczne oraz podziemne zbiorniki (jaskinie, warstwy wodonośne i otwory wiercone w ziemi). Każdy z tych akumulatorów ma swoje wady i zalety [2, 3, 10].

Efektywność wykorzystania energii odnawialnej jest zależna od rozwiązania problemów z jej gromadzeniem i przesyłem, a tym samym z wyborem optymalnego akumulatora. W powyższej pracy skupiono się na optymalizacji numerycznej konstrukcji wytypowanych akumulatorów energii cieplnej do współpracy z kolektorem słonecznym. Ideą autorów jest opracowanie wstępnej koncepcji stosunkowo prostego w wykonaniu i taniego podpodłogowego akumulatora ciepła.

2. INSTALACJA SOLARNA I EKSPERYMENTY

Na rysunku 1 przedstawiono propozycję układu do współpracy kolektorów słonecznych z odbiornikami ciepła w budynku jednorodzinnym zamieszkałym przez cztery osoby. Powyższe rozwiązanie pokazano jako schemat instalacji solarnej współpracującej z zasobnikiem ciepłej wody użytkowej o pojemności 475 dm³ (4) oraz instalacją ogrzewania podłogowego o powierzchni 70 m² (9) i akumulatora ciepła (6). Strumień energii promieniowania słonecznego ulega konwersji w dwóch rurowych kolektorach słonecznych typu heat-pipe (po 33 rury w każdym z nich (1)). Medium obiegowe w tym układzie (w postaci roztworu glikolu) przepływa przez zestaw pompowy (2) oraz zawór trójdrożny (8a), który przełącza płynący nośnik energii cieplnej na węzownicę zasobnika (4) lub płytowy przekazywacz ciepła (5). Pracę zestawu pompowego nadzoruje sterownik układu solarnego (3). W zależności od temperatury wody w zasobniku zawór trójdrożny regulowany jest sterownikiem mikroprocesorowym (10). Poprzez przekazywacz ciepła (5) strumień zaabsorbowanej energii słonecznej transportowany jest do obiegu wodnego, który zasila, w zależności od ustawienia zaworu trójdrożnego (8b), układ ogrzewania podłogowego (9) lub akumulator ciepła (6). Ogrzewanie podłogowe może być zasilane z trzech różnych źródeł ciepła. W okresie zimowym, przy małym nasłonecznieniu lub śniegu zalegającym na kolektorach, dominującą rolę odgrywa strumień energii dostarczany

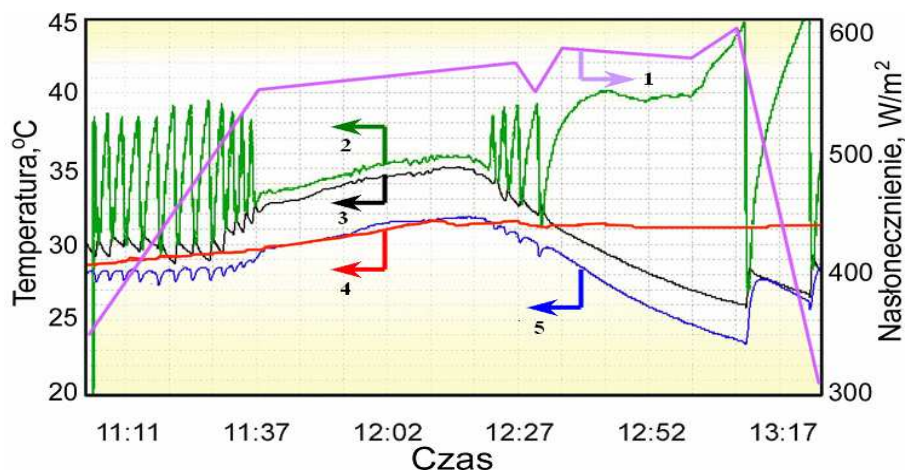


Rys. 1. Schemat instalacji solarnej
Fig. 1. Diagram of solar heating system

z konwencjonalnego źródła ciepła. W okresach wiosennym i jesiennym natomiast, gdy można efektywniej wykorzystać promieniowanie słoneczne, układ ten może być zasilany bezpośrednio strumieniem energii z kolektorów poprzez odpowiednie przełączenie zaworów (8b; 8c; 8d) lub pośrednio w okresie wieczornym dzięki zgromadzonym nadwyżkom energii w akumulatorze ciepła (6). Obieg wody w układzie zapewniają dwie pompy (7). Nad realizacją algorytmu regulacji na podstawie danych pomiarowych (punkty pomiarowe nie zaznaczono na schemacie) czuwa mikroprocesorowy sterownik (10).

Na schemacie instalacji solarnej pominięto układ rozpraszania energii wpięty w obieg powrotny wodnego roztworu glikolu. Jego zadaniem jest zabezpieczenie przed przekroczeniem maksymalnej temperatury obiegów w sezonie letnim, gdy ilość pozyskanej energii słonecznej przekracza zapotrzebowanie.

W obecnej fazie projektu wykonano wstępną serię pomiarów na rzeczywistym obiekcie założonym z kolektorów słonecznych i zasobnika c.w.u widocznych z prawej strony na rysunku 1. Zestaw pomiarowy składał się z termometrów rezystancyjnych Pt 100 kl. 1/10 DIN B firmy Ampero Thermo-EST sprzężonych z radiowym układem transmisji danych firmy LS Elektronik współpracującym z komputerowym programem wizualizacji danych pomiarowych. Pomiarów natężenia przepływu mediów w obiegu dokonano rotametrami z odpowiednio dobranymi zakresami przepływu. Poniżej na rys. 2 przedstawiono fragment rejestrowanych danych przebiegu temperatur w instalacji solarnej w godzinach 11÷13 (11.04.2010) oraz wykres nasłonecznienia dla centrum Katowic.



Rys. 2. Temperatury w instalacji solarnej i wykres nasłonecznienia
 Fig. 2. Temperatures in the solar installation and the insolation chart

Krzywa (1) charakteryzuje przebieg nasłonecznienia, które wzrastając, w okolicach godziny 13 osiąga swoje maksimum (ok. 600 Wm^{-2}), a następnie gwałtownie maleje. Temperatura medium obiegowego w kolektorze (2) w okresie gwałtownego wzrostu nasłonecznienia (godz. 11÷11⁴⁰) oscyluje osiągając maksimum 39.5°C . Jest to związane z ustawieniem sterownika instalacji solarnej, w którym próg włączenia pompy $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$ (pomiędzy temperaturą kolektora, a temperaturą wody w zasobniku). Gdy wartość nasłonecznienia osiągnęła ok. 550 Wm^{-2} sterownik układu tak modulował wydajnością pompy, aby wydłużyć okres jej włączenia przy zachowaniu $\Delta T > \Delta T_{\min}$. Pojawiające się zachmurzenie ok. godz. 12³⁰ wywołało ponowną okresową pracę pompy. Krzywe (3) i (4) przedstawiają przebieg temperatury na wlocie i wylocie z węzownicy układu solarnego zbiornika c.w.u. Krzywa (4) natomiast opisuje zmianę temperatury wody w zasobniku. W okolicach godz. 12¹⁵ można zauważyć spadek temperatury wody w zasobniku, co było spowodowane chwilowym poborem ciepłej wody przez użytkowników i napływem zimnej o temperaturze ok. 7°C . Powyższe pomiary temperatur i natężenia przepływu posłużyły jako dane wejściowe do modelowania numerycznego optymalnego rozwiązania parametrów i konstrukcji akumulatora ciepła w domowej instalacji solarnej.

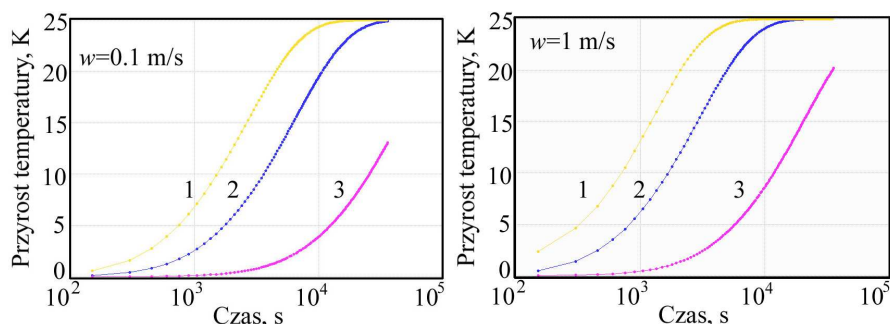
3. OPTIMALIZACJA NUMERYCZNA AKUMULATORA CIEPŁA

Obliczenia prowadzone były w programie „Fluent 6.2”, który pozwala na wyznaczenie parametrów przepływowych w postaci przestrzennych lub powierzchniowych rozkładów wielkości fizycznych zdefiniowanych w równaniach zachowania, hipotezach domykających i równaniach stanu. Podziały numeryczne zastosowane w procedurach programu opierają się na metodzie bilansów elementarnych, zwanej też metodą objętości skończonych. Metoda ta zbudowana została w oparciu o uniwersalne postaci równań

algebraicznych, przekształconych z równań różniczkowych, sporządzonych dla elementarnych wymiarów powierzchniowych lub objętościowych i (w przypadku obliczeń stanów nieustalonych) elementarnego kroku czasowego. Podział numeryczny rozpoczyna się od analizy rozpatrywanego elementu lub kształtu.

Warunki brzegowe przyjęte do obliczeń to: prędkość i temperatura wody na dopływie oraz strumień strat ciepłych na ściankach urządzenia (przyjęty jako 5% strumienia energii płynu na dopływie). Początkowa temperatura wypełnienia w każdym obliczeniowym przypadku wynosiła 7°C. Przepływ wody w rurkach był laminarny, a warunki przenoszenia energii pomiędzy płynem, ścianką i wypełnieniem wyznaczane były w oparciu o standardowe procedury określania współczynnika wnikania z grubości warstwy przyścienniej. W obliczeniach przyjęto równy rozdział wody w każdej z rurek.

Program badań numerycznych obejmował analizę dynamiki procesu nagrzewania dla trzech rodzajów wypełnień o różnych współczynnikach wyrównywania temperatury α . Wyznaczano reakcję na skokowe podniesieni temperatury płynu na dopływie o 25°C. Na rysunku 3 zamieszczono przebieg zmian czasowych średniej temperatury akumulatora (liczonej jako stosunek energii zakumulowanej odniesiony do iloczynu masy wypełnienia i jego pojemności cieplnej). Dynamika ta określana była dla strumieni objętościowych wody wynoszących od $4 \cdot 10^{-2}$ - $4 \cdot 10^{-1} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Z obliczeń wynika, że największą szybkość gromadzenia energii cieplnej ma akumulator z wypełnieniem betonu i żwiru, natomiast najmniejszą z karborundu.



Rys. 3. Dynamika zmian średniej temperatury w warstwie wypełnień:

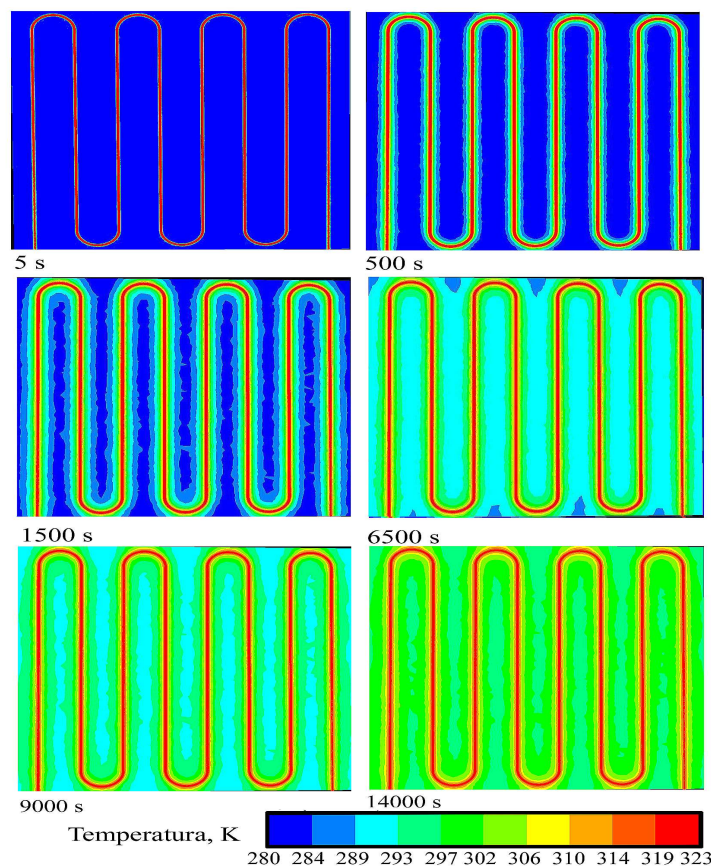
(1) beton i żwir; (2) żużel; (3) karborund

Fig. 3. The dynamics of changes of average temperature in the layer of fillings:

(1) concrete and gravel; (2) slag; (3) carborundum

Rysunek 4 ilustruje przykładowy przekrój przez akumulator w różnych stadiach nagrzewania. Prezentowane obliczenia prowadzone były przy prędkości wody w rurkach $w = 0.1 \text{ ms}^{-1}$ i dla żużla jako materiału wypełnienia akumulatora. Widoczne są gradientowe mapy termiczne pozwalające określić równomierność nagrzewania wypełnienia. Rozłożenie przestrzennych gradientów termicznych jest silnie zależne od rozmieszczenia rurek wodnych.

W dalszym programie badawczym planowana jest optymalizacja rozkładów przestrzennych i materiałów wypełnień w celu znalezienia optimum kosztowo-funkcjonalnego urządzenia.



Rys. 4. Rozkłady temperatury w przekroju przez wypełnienie akumulatora
 Fig. 4. Temperature distributions in cross-section by filling in the battery

4. PODSUMOWANIE

Prezentowane rezultaty badań skupiają się na określeniu taniej i prostej w wykonaniu konstrukcji akumulatora ciepła do współpracy z instalacją solarną.

Metodami numerycznymi możliwe jest określenie optymalnych parametrów wypełnienia i doboru materiałów, jednakże musi ono być poprzedzone badaniami doświadczalnymi.

Z pośród rozpatrywanych materiałów wypełnienia największą szybkość gromadzenia energii cieplnej ma akumulator z wypełnieniem betonu i żwiru.

Efektywne wykorzystanie akumulatora jest przewidywane jako uzupełnienie instalacji solarnej w sytuacji nadmiaru energii płynu.

Rozłożenie przestrzennych gradientów termicznych jest silnie zależne od rozmieszczenia rurek wodnych.

5. LITERATURA

- [1]. Thirugnanasambandam M., Iniyan S., Goic R.; A review of solar thermal technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 312 – 322.
- [2]. Bałys M.R., Buczek B.; Akumulacja ciepła w monolitach węglowych dla magazynowania energii – rozważania modelowe, *Polityka energetyczna* 12 (2009) 119 – 127.
- [3]. Wita A., Balcerzak A., Mirosław-Świątek D.; System grzewczy z gruntowym akumulatorem energii cieplnej - wyniki eksperymentów, XIV Konferencja naukowa – metody komputerowe w projektowaniu i analizie konstrukcji hydrotechnicznych, Korbielew (2002) 229 –241.
- [4]. Vaivudh S., Rakwichian W., Chindaruksa S.; Heat transfer of high thermal energy storage with heat exchanger for solar trough power plant, *Energy Conversion and Management* 49 (2008) 3311–3317.
- [5]. Zheng D., Cao W.; Retrofitting for DME process by energy-flow framework diagram, *Chemical Engineering and Processing* 46 (2007) 2–9.
- [6]. Schmidt T., Mangold D., Müller-Steinhagen H.; Central solar heating plants with seasonal storage in Germany, *Solar Energy* 76 (2004) 165–174.
- [7]. Raab S., Mangold D., Müller-Steinhagen H.; Validation of a computer model for solar assisted district heating systems with seasonal hot water heat store, *Solar Energy* 79 (2005) 531–543.
- [8]. Ming T., Liu W., Pan Y., Xu G.; Numerical analysis of flow and heat transfer characteristics in solar chimney power plants with energy storage layer, *Energy Conversion and Management* 49 (2008) 2872–2879.
- [9]. Pahud D.; Central solar heating plants with seasonal duct storage and short-term water storage: design guidelines obtained by dynamic system simulations, *Solar Energy* 69 (2000) 495–509.
- [10]. Ohga H., Mikoda K., Energy performance of borehole thermal energy storage systems. *Proceedings of Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro* (2001) 1009 – 1016.
- [11]. Lin M.C., Chun L.J., Lee W.S., Chen S.L.; Thermal performance of a two-phase thermosyphon energy storage system, *Solar Energy* 75 (2003) 295–306.
- [12]. Denholm P., Kulcinski G.L.; Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems, *Energy Conversion and Management* 45 (2004) 2153–2172.
- [13]. Ragoonanan V., Davidson J.H., Homan K.O., Mantell S.C.; The benefit of dividing an indirect thermal storage into two compartments: Discharge experiments, *Solar Energy* 80 (2006) 18–31.

NUMERICAL OPTIMIZATION OF CONSTRUCTION BATTERY HEAT TO COOPERATE THE SOLAR COLLECTOR

SUMMARY

Renewable energy efficiency is dependent on the solution of problems of its collection and transmission, and thus the choice of optimal battery construction. In this work focuses on numerical optimization of selected design of thermal energy storage for use with solar collector. Ideas of the authors is to develop a concept relatively easy to make and cheap battery underfloor heating.

Maria Anna BUKOWSKA, dr inż.
Mateusz NIEMCZYK

Politechnika Rzeszowska
Zakład Ciepłownictwa i Klimatyzacji
ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów
e-mail: maria.bukowska@prz.edu.pl

PRZYKŁADOWA ANALIZA TERMOWIZYJNA BUDYNKU POD KĄTEM TERMOMODERNIZACJI

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono przykładową analizę termowizyjną budynku, którą warto przeprowadzić przed podjęciem zabiegów docieplania. Badania pozwalają na dość dokładną analizę stanu przegród budowlanych i na jej podstawie można wskazać właściwy kierunek termomodernizacji. Zabiegi te pozwolą na wprowadzeniu w budynku zmian, które spowodują zmniejszenie zużycia energii oraz spowodują obniżenie kosztów eksploatacyjnych dla budynku.

1. WPROWADZENIE

Termomodernizacja jest zabiegiem polegającym na wprowadzeniu w budynku zmian, które w efekcie końcowym spowodują zmniejszenie zużycia energii oraz wpłyną na obniżenie kosztów eksploatacyjnych. W obecnej dobie osiąga się to przez pewne zabiegi do których zalicza się przede wszystkim docieplenie budynku oraz wymianę stolarki okiennej i drzwi. Dla osiągnięcia pełnego efektu wprowadza się również drugi etap zmian, tzn. usprawnienie lub wymiana instalacji centralnego ogrzewania, ciepłej wody użytkowej i wentylacji.

Narzędziem pomocnym w określaniu stanu technicznego budynków, więc również jego wad wykonawczych i powstałych przez długie lata w trakcie eksploatacji, są kamery termowizyjne. Termowizja jest metodą badawczą, polegającą na zdalnej i bezdotykowej ocenie rozkładu temperatury na powierzchni badanego ciała. Metoda ta oparta jest na obserwacji i zapisie rozkładu promieniowania podczerwonego wysyłanego przez każde ciało, którego temperatura jest wyższa od zera bezwzględnego i przekształceniu tego promieniowania na światło widzialne.

Dzięki zastosowaniu kamer termowizyjnych można wykrywać wady izolacji termicznej przegród zewnętrznych i mostki termiczne, nieszczelności i pęknięcia budynku, które są przyczyną ucieczki ciepła. Analizy takiej dokonuje się na wykonanych zdjęciach termowizyjnych dzięki specjalistycznym programom komputerowym.

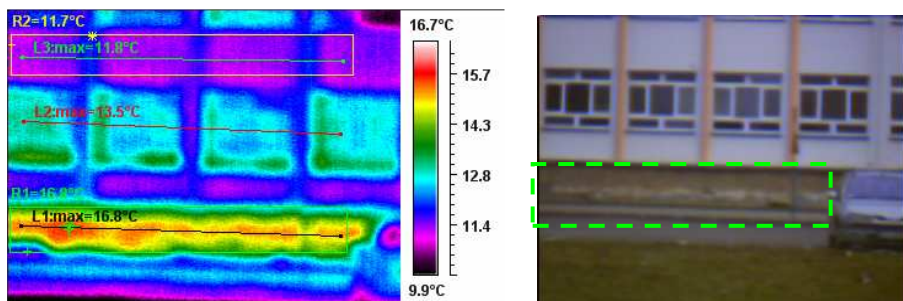
2. ANALIZA TERMOWIZYJNA OBIEKTU

2.1. Opis analizowanego budynku

Przykładową analizę wykonano dla budynku „K” który jest własnością Politechniki Rzeszowskiej. Położony jest on w Rzeszowie przy Al. Powstańców Warszawy. Jest to zespół w którym znajdują się: sale wykładowe, sale ćwiczeń, laboratoria i pomieszczenia pracownicze. Wybudowany on został w latach siedemdziesiątych XX wieku, posiada dwie kondygnacje oraz jest częściowo podpiwniczony. Wysokość jego wynosi 8,70 m n.p.t.

2.2. Ściany piwnic

Zewnętrzne ściany piwnic (Fot.1) wykonane są z cegły ceramicznej pełnej na zaprawie cementowo-wapiennej grubości 52 cm. Od zewnątrz znajduje się okładzina z płyt kamiennych (wapień zwykły) o grubości 4 cm, a od wewnątrz jest tynk cementowo-wapienny. Obliczony współczynnik przenikania ciepła przegrody z uwzględnieniem mostków cieplnych wynosi $U_k=1.21$ [W/m²K]. Tak więc na dzień dzisiejszy warunek nie spełniony, ponieważ wartość współczynnika U_k musi być mniejsza lub równa wartości współczynnika przenikania ciepła $U_{k(max)}$, zawartego w PN. Według PN współczynnik $U_{k(max)} = 0,30$ [W/m²K].



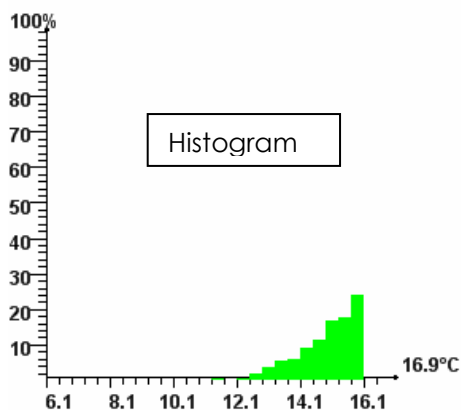
Obraz termalny

Obraz widzialny

Fot.1. Ściana zewnętrzna przed termomodernizacją

Fot.1. Wall before termomodernization

Przedstawiona na termogramie w obszarze R1, występująca różnica temperatur na zaznaczonym do analizy fragmencie ściany jest dość znacząca i wynosi 6°C. Uwidoczniono niejednorodność „powierzchniową” fragmentu analizowanej przegrody. Szczegółowy rozkład temperatur na powierzchni przegrody przedstawiony jest na histogramie Rys. 1. oraz w tabeli, przy temperaturze powietrza zewnętrznego wynoszącej +9.2°C.



| Lp. | Przedział temperatur | Udział % |
|-----|----------------------|----------|
| 1 | 10,9°C ÷ 11,3°C | 0,3 |
| 2 | 11,3°C ÷ 11,7°C | 0,6 |
| 3 | 11,7°C ÷ 12,1°C | 0,4 |
| 4 | 12,1°C ÷ 12,5°C | 0,7 |
| 5 | 12,5°C ÷ 12,9°C | 2,2 |
| 6 | 12,9°C ÷ 13,3°C | 3,9 |
| 7 | 13,3°C ÷ 13,7°C | 5,7 |
| 8 | 13,7°C ÷ 14,1°C | 6,2 |
| 9 | 14,1°C ÷ 14,5°C | 9,4 |
| 10 | 14,5°C ÷ 14,9°C | 11,7 |
| 11 | 14,9°C ÷ 15,3°C | 16,8 |
| 12 | 15,3°C ÷ 15,7°C | 17,8 |
| 13 | 15,7°C ÷ 16,9°C | 24,2 |

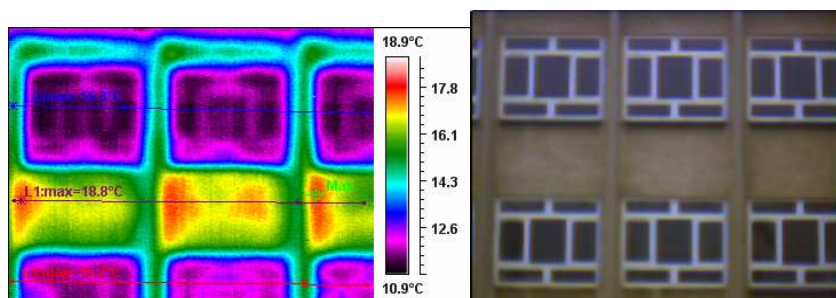
Rys.1. Histogram rozkładu temperatur

Fig.1. Temperature distribution

Łatwo zauważyć, iż nie znając prawdziwej „struktury ściany” którą można zobaczyć jedynie okiem kamery termowizyjnej, projektując dla niej grubość warstwy docieplającej, zawsze można popełnić błąd. Obliczenia grubości izolacji nie uwzględniają wad ukrytych przegrody. Przegroda ta nie będzie prawidłowo ocieplona.

2.3. Ściana podokienna

Ściany zewnętrzne wykonano jako prefabrykowane ramy żelbetowe ocieplane od zewnątrz styrobetonem grubości 12 cm na całej wysokości ramy. W pasie podokiennym znajduje się płyta żelbetowa grubości 10 cm. Ściana obustronnie pokryta jest tynkiem cementowo-wapiennym grubości 1,5 cm. Obliczony współczynnik przenikania ciepła przegrody z uwzględnieniem mostków cieplnych $U_k=1.26 \text{ [W/m}^2\text{K]} > U_{k(\max)}=0,30 \text{ [W/m}^2\text{K]}$.

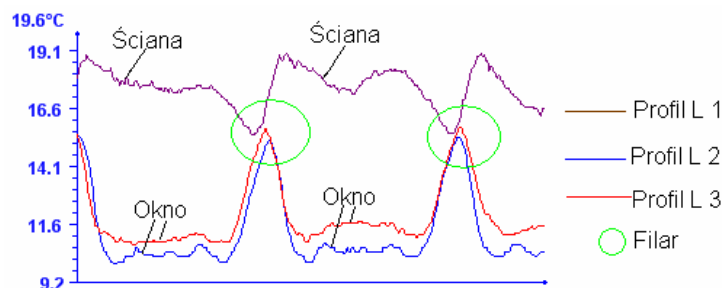


Obraz termalny

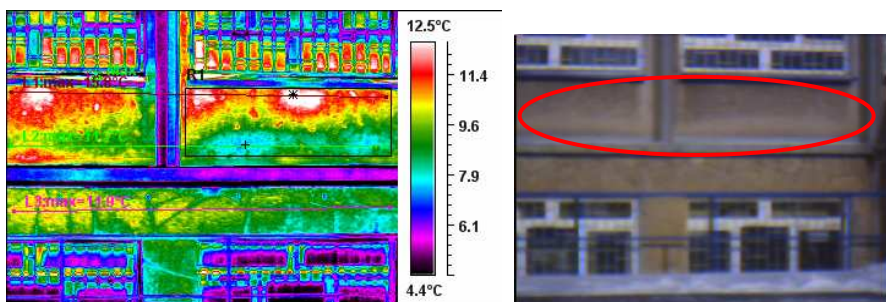
Obraz widzialny

Fot.2. Ściana zewnętrzna przed termomodernizacją

Fot.2. Wall before termomodernization



Rys.2. Ściana zewnętrzna przed termomodernizacją
Fig.2. Wall before thermomodernization



Fot.3. Ściana zewnętrzna przed termomodernizacją
Fot.3. Eksternal wall before thermomodernization

Różnica temperatur na powierzchni analizowanej przegrody podokiennej wynosiła nawet do 10°C. Na uwagę zasługuje fakt, że od strony południowo-zachodniej budynku wszystkie analizowane przegrody były w znacznie gorszym stanie technicznym niż pozostałe.

2.4. - Słupy, pilastry - filar międzyokienny

Słupy i pilastry wykonano jako prefabrykowane ramy żelbetowe ocieplane od zewnątrz styrobetonem grubości 30 cm na całej wysokości. Grubość płyty żelbetowej słupów i nadproży wynosi 25 cm. Słupy i pilastry obustronnie pokryte są tynkiem cementowo-wapiennym grubości 1,5 cm. Obliczony współczynnik przenikania ciepła przegrody z uwzględnieniem mostków cieplnych wynosi $U_k=0.69$ [W/m²K]. Tak więc podobnie jak we wszystkich pozostałych przypadkach warunek nie spełniony, ponieważ wartość współczynnika U_k jest większa od wartości współczynnika przenikania ciepła $U_{k(max)}$, zawartego w PN. Na wykresie Rys. 2. filary międzyokienne zaznaczono okręgiem. Ich charakterystyka termiczna okazuje się znacznie lepsza niż pozostałych fragmentów ścian zewnętrznych.

3. PODSUMOWANIE

Badania termowizyjne budynku wykazały, że obiekt charakteryzuje się dużymi wadami izolacyjności. Teoretyczne współczynniki przenikania ciepła U dla przegród są znacznie większe od zawartych w Dzienniku Ustaw, maksymalnych wartości współczynnika przenikania ciepła $U_{k(max)}$. Na zdjęciach termowizyjnych wykazano wiele występujących wad. Widoczny jest na nich niejednorodny rozkład temperatury na powierzchniach ścian oraz występujące mostki cieplne.

Bardzo duże zróżnicowanie temperatur, bo wynoszące kilka lub nawet kilkanaście stopni na stosunkowo małej powierzchni przegrody podokiennej, świadczą wręcz o „gąbczastej” strukturze tej ściany. Na podstawie histogramu, tylko około 1% powierzchni ściany można uznać w chwili wykonywania badań za spełniającą wymagania zgodne z przytaczaną PN.

Obliczeniowy współczynnik przenikania ciepła U dla tych ścian jest w każdym przypadku większy od jedności. Projektując ocieplenie należy doprowadzić do kilkakrotnego zmniejszenia wartości współczynnika przenikania ciepła U .

Wykryte wady mają istotny wpływ na zapotrzebowanie na ciepło dla celów grzewczych i doprowadziły do wystąpienia lokalnych, negatywnych efektów cieplno-wilgotnościowych, a co za tym idzie obniżenia komfortu cieplnego pomieszczeń.

W świetle przeprowadzonych badań wynika jednoznacznie zalecenie termomodernizacji. Należałoby przy tym uwzględnić prawdziwą, wykazaną okiem kamery „gąbczastą” strukturę przegrody. Można przewidzieć, że na pewno wskazane jest zaprojektowanie grubszej warstwy izolacji. Należy więc zadać pytanie jak tą grubość ustalić.

Podsumowując można stwierdzić, iż warto zainwestować w badania termowizyjne przed podjęciem decyzji o termomodernizacji, gdyż w przeciwnym przypadku możemy być zaskoczeni niezupełnie dobrymi efektami podjętych zabiegów docieplenia budynku.

4. LITERATURA

- [1] Badania własne (materiały niepublikowane)
- [2] Żurawski J.: „TERMOWIZJA jako weryfikacja jakości prac izolacyjnych” Wyd. Dom Wydawniczy MEDIUM „IZOLACJE” 11-12/2008
- [3] <http://www.kape.gov.pl>
- [4] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz. U. Nr 75, poz. 690 z późniejszymi zmianami
- [5] Duda L., Robakiewicz M.: „Termomodernizacja budynków- poradnik, informator” Wyd. Centralny Ośrodek Informacji Budownictwa, Warszawa 1997
- [6] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz. U. Nr 75, poz. 690 z późniejszymi zmianami.

THERMOVISIONAL ANALYSIS OF THE BUILDING IN ASPECT OF THE THERMAL INSULATION

SUMMARY

The article includes thermovisional analysis performed for building which would be useful before thermo- modernization. By using this analysis, we can show a good direct of thermo-modernization. The purpose of this research was to indicate potential structural or performance defects which shouldn't be omitted in thermo-modernization. If we show a good direct of thermo-modernization, we will decrease energy consumption for building.

Maria Anna BUKOWSKA, dr inż.
Sławomir RABCZAK, dr inż.

Politechnika Rzeszowska
Zakład Ciepłownictwa i Klimatyzacji
ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów
e-mail: maria.bukowska@prz.edu.pl
e-mail: rabczak@prz.edu.pl

BADANIA TERMOWIZYJNE BUDYNKÓW KONSTRUKCJI STAŁOWEJ

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono analizę termowizyjną wybranych budynków, w aspekcie termomodernizacji. W ramach Programu Europejskiego ROBUST badaniami objęto kilka budynków konstrukcji stalowej. Są to zarówno budynki użyteczności publicznej, budynki wielko kubaturowe (hipermarkety), jak również małe domki jednorodzinne. Poddane analizie, wykonane kamerą termowizyjną termografy, pozwoliły na ocenę „cieplną” stanu budynków przed termomodernizacją. Zastosowane przez Inwestorów zalecenia termomodernizacyjne pozwoliły na uzyskanie oczekiwanego efektu tzn. poprawy stanu cieplnego analizowanego budynku, co potwierdzone zostało badaniami termowizyjnymi wykonanymi po przeprowadzonej termomodernizacji.

1. WPROWADZENIE

Badania termowizyjne stały się obecnie jedną z najbardziej rozpowszechnionych form diagnozowania „stanu cieplnego” wszelkiego rodzaju budynków. Termowizję wykorzystuje się również w diagnozowaniu elementów instalacji grzewczych, wentylacyjnych, klimatyzacyjnych, wodnych, gazowych oraz wielu innych, czyli wszędzie tam gdzie mamy do czynienia z co najmniej 10 stopniową różnicą temperatur pomiędzy obiektem oglądanym a otaczającym go środowiskiem.

Termowizja jest rodzajem telewizji ale wrażliwej na promieniowanie podczerwone zwane częściej w branży budowlanej promieniowaniem cieplnym. Analizowane okiem kamery termowizyjnej ciała mają zdolność wypromieniowania energii cieplnej, która jest przetwarzana na obraz termowizyjny w postaci „mapy” temperatur. Obrazy te poddawane

są obróbce specjalnie do tych celów przygotowanymi programami komputerowymi. Badania wykonane zostały kamerą termowizyjną Guide® IR 928+, zaś szczegółową analizę uzyskanych obrazów wykonano programem (Guide IR Analyser V 1.4).

2. ANALIZA BUDYNKÓW PRZED TERMOMODERNIZACJĄ

W artykule zaprezentowano analizę dla dwóch dużych budynków konstrukcji stalowej. Są to budynek „L” –zespół sal wykładowych i laboratoryjnych Politechniki Rzeszowskiej oraz jeden z dużych hipermarketów.

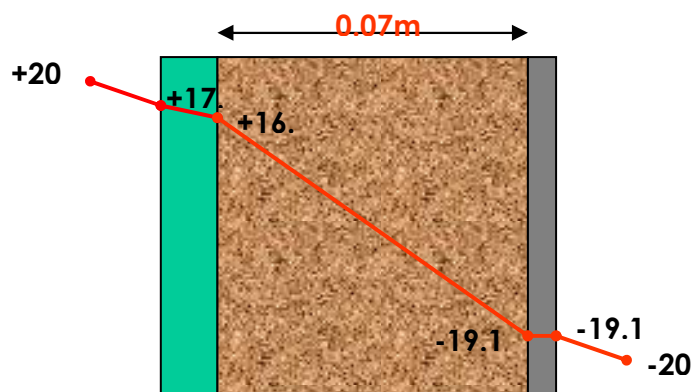
2.1. Budynek „L” Politechniki Rzeszowskiej

Pierwszy z nich budynek „L” poddany kompleksowej analizie, przed i po termomodernizacji, to zespół sal wykładowych i laboratoriów Politechniki Rzeszowskiej. Budynek przed zabiegami termomodernizacyjnymi wykazywał typowe wady wykonawcze dla budynków konstrukcji stalowej. Na przedstawionym zdjęciu termowizyjnym Fot. 1. widoczny jest efekt zbyt cienkiej warstwy izolacyjnej lub jej zupełny brak. Spowodowane jest to najczęściej niedbałym ułożeniem izolacji oraz prawdopodobnie niewłaściwego jej zakotwienia w przegrodzie, co spowodowało jej obsunięcie się w dolne partie ściany. Dodatkowo jeszcze, wybudowany kilkanaście lat wcześniej budynek, spełniał inne, ówczesne obowiązujące standardy. Współczynnik przenikania ciepła dla przegrody zewnętrznej analizowanego budynku wynosił $U = 0.543 \text{ [W/m}^2\text{K]}$. Grubość izolacji okazała się więc zbyt mała aby spełnić obecne wymagania dla ścian zewnętrznych. Konstrukcję ścian zewnętrznych, ilość i charakterystyczne parametry poszczególnych warstw przegrody przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Zespół budynków „L”- Konstrukcja ściany zewnętrznej
Table 1. Building assembly “L” - External walls construction

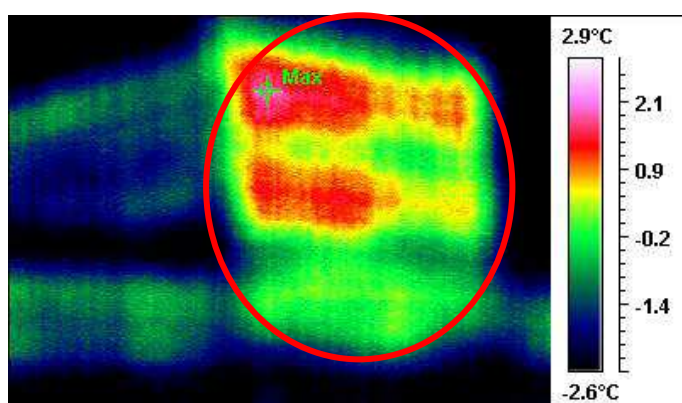
| Material | Type | Thick-ness | Thermal conduct. | Density | Heat resistance |
|-----------------------------------|------|------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| | | d [m] | λ [W/m ² K] | ρ [kg/m ³] | $R=d/\lambda$ [m ² K/W] |
| 1/ Gypsum-cardboards | S | 0.010 | 0.230 | 1000 | 0.043 |
| 2/ Mineral wool (inside walls) | S | 0.070 | 0.043 | 60 | 1.628 |
| 3/ Aluminium | S | 0.005 | 200.0 | 2700 | ~ 0.000 |

Na rys. 1. Przedstawiono rozkład temperatur wewnątrz przegrody. Zauważono zbyt niską temperaturę po wewnętrznej stronie przegrody, co dawało efekt uczucia chłodu dla osób siedzących w sali wykładowej w jej pobliżu. Efekt odczucia chłodu i rzeczywiste obniżenie temperatury był dodatkowo potęgowany w okresach występowania wiatru. Zimne powietrze wskutek szczelności przegrody przedostawało się do jej wnętrza.



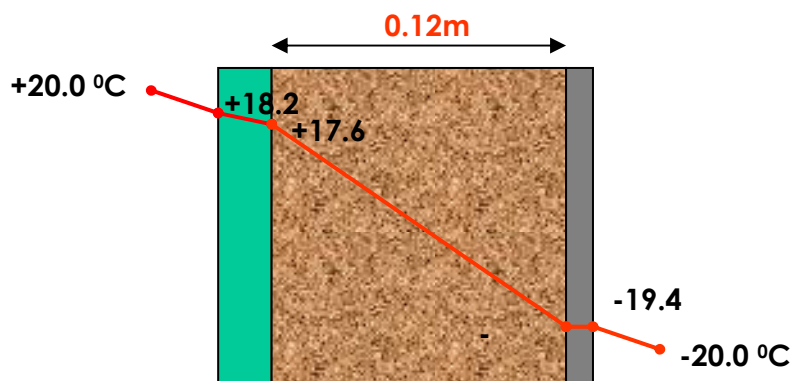
Rys.1. Rozkład temperatur w ścianie (budynek „L”) przed termomodernizacją
 Fig. 1. Temperature distribution in an external wall (building „L”) before thermomodernization

Zdjęcie termowizyjne analizowanej ściany budynku uwidacznia jej rzeczywiste mankamenty opisane już wcześniej. Różnica temperatur występujących na powierzchni zaznaczonej przegrody sięga nawet 5 stopni.



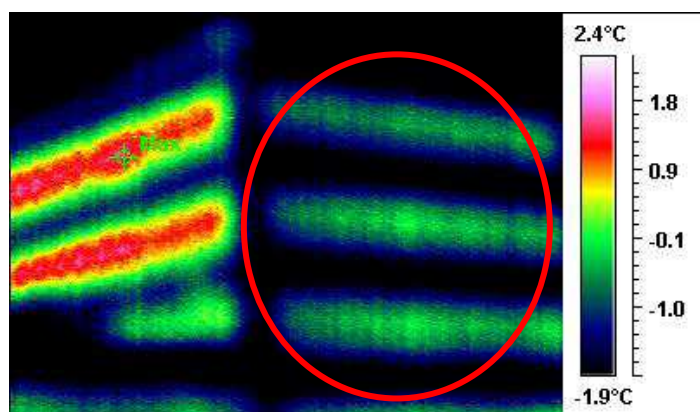
Fot. 1. Zdjęcie termowizyjne ściany zewnętrznej budynku „L” przed termomodernizacją
 Fig.1. Infrared image of walls of the “L” building before thermomodernization

Budynek poddano termomodernizacji dodając warstwę dodatkowej izolacji (pogrubiając warstwę wełny mineralnej) do grubości 0.12 m, dzięki czemu uzyskano współczynnik przenikania ciepła $U = 0.30 \text{ [W/m}^2\text{K]}$. Zmianie uległ również rozkład temperatury wewnątrz przegrody. Gradient ten jest znacząco korzystniejszy co przedstawiono na Rys. 2.



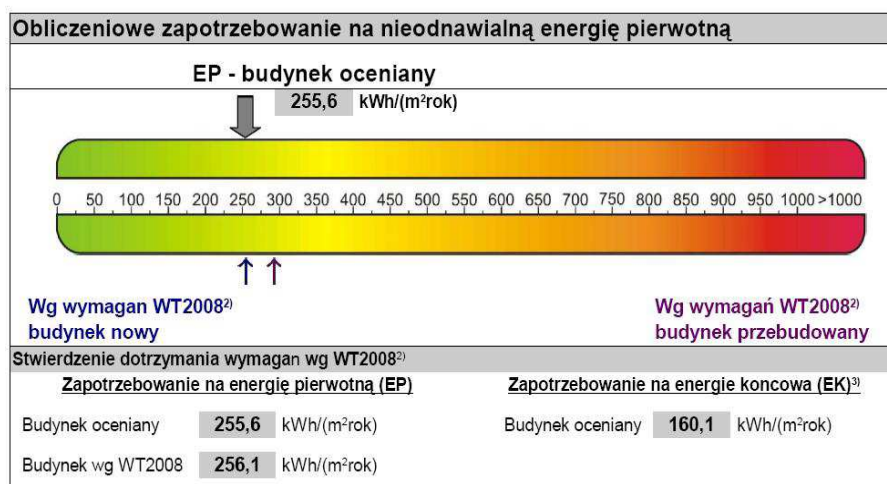
Rys.2. Rozkład temperatur w ścianie (budynek „L”) po termomodernizacji
 Fig. 2. Temperature distribution in an external wall (build. „L”) before thermomodernization

Zadbano o prawidłowe i staranne ułożenie wełny mineralnej, dzięki czemu uzyskano zamierzony efekt termomodernizacyjny Fot.2.



Fot. 2. Zdjęcie termowizyjne ścian zewnętrznej budynku „L” po termomodernizacji
 Fig.2. Infrared image of walls of the “L” building after thermomodernization

Wykonane obliczenia programem komputerowym potwierdzają poprawność wykonanej termomodernizacji. Efekt ten został dodatkowo potwierdzony certyfikatem wykonanym dla budynku, Rys.3.



Rys. 3. Wykres przedstawiający uzyskany efekt termomodernizacji dla budynku „L”

Fig. 3. Energy certificate showing effect of thermo modernization for “L” building

2.2. Budynek hali hipermarketu

Kompleks obejmuje hale sprzedaży, część magazynową wraz z zapleczem socjalno-biurowym oraz pomieszczenia chłodni.

Obiekt jest zabudową jednokondygnacyjną konstrukcji stalowej.

Konstrukcja istniejących ścian zewnętrznych to:



- blacha stalowa falowana o wysokości fali 5 cm, zewnętrzna – gr. 0.7 mm
- wypełnienie wełną mineralną – grubości 0.10 m
- ściany wewnętrzne z blachy stalowej falowanej o wysokości fali 2 cm, gr. 0.7 mm

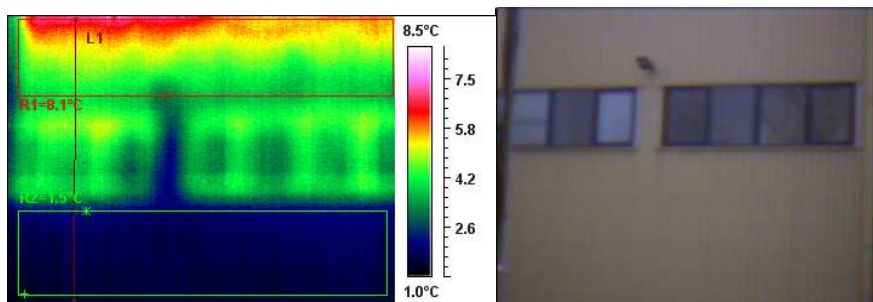
Fot. 3. Zdjęcie typowej ściany zewnętrznej stosowanej w hipermarketach

Fig. 3. Photo of typical external wall using in hypermarkets

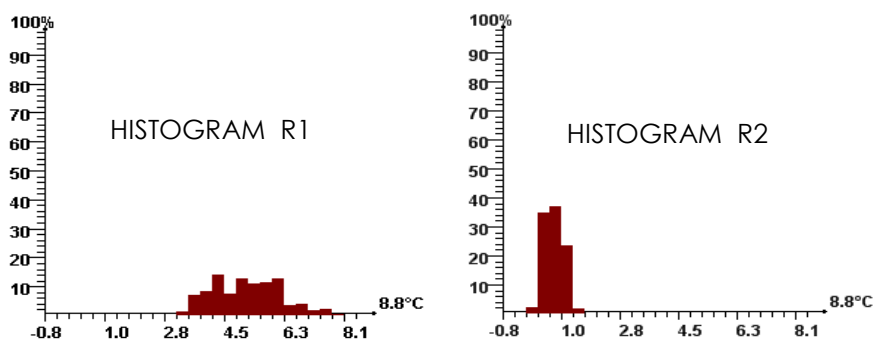
Na podstawie wykonanych zdjęć termowizyjnych na zewnątrz i w wielu pomieszczeniach budynku uwidoczniono, że nastąpiło „obsypanie” się wełny mineralnej oraz wystąpiły „nieszczelności technologiczne”.

Na ścianach zewnętrznych budynku na termografie Fot. 3, widoczne są różne barwy świadczące o różnej grubości warstwy izolacyjnej przegród budowlanych. Na podstawie wykonanych zdjęć termowizyjnych, sporządzono histogramy rozkładu temperatur (Rys. 4.) dla fragmentów R1 i R2 analizowanych ścian zewnętrznych. Z rozkładu temperatur na

powierzchni ściany wynika jednoznacznie jej niejednorodność, tzn. ułożona izolacja jest różnej grubości lub nie ma ciągłości w jej ułożeniu lub nie ma jej wcale.

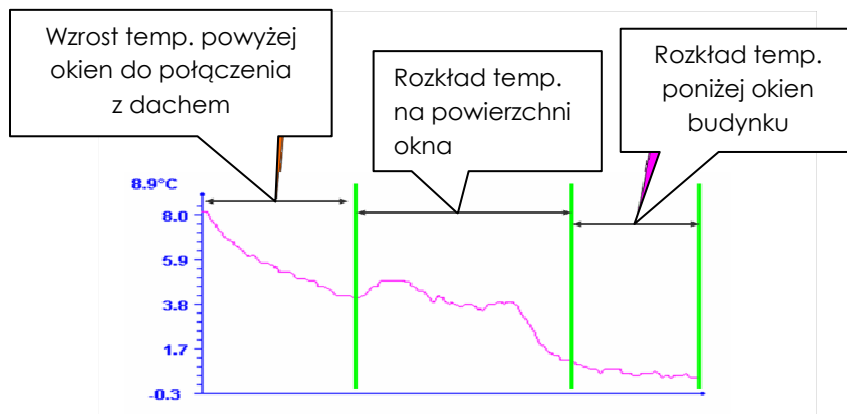


Fot. 4. Zdjęcie termowizyjne i rzeczywiste ściany zewnętrznej hipermarketu
Fig. 4. Infrared and real images of wall surface of hypermarket



Rys.4. Histogramy temperatury dla obszarów R1 i R2 na Fot. 3
Fig. 4. Temperature histogram corresponding in area R1 and R2 in Fig. 3

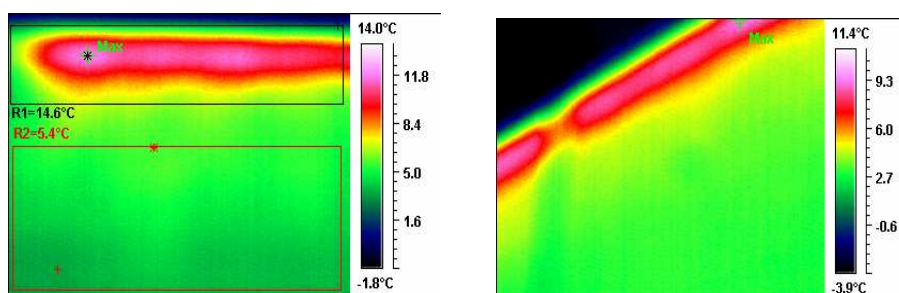
Analiza rozkładu temperatury wzdłuż linii L1 pozwala wykazać olbrzymią dysproporcję w rozkładzie pionowym na przegrodzie. Termogramy potwierdzają efekt „obsunięcia” się izolacji w dolne partie przegrody. Na wysokości ściany różnica temperatur dochodzi do 8 stopni Rys.5.



Rys. 5. Pionowy rozkład temperatury wzdłuż linii L1 Fot.3.

Fig.5. Temperature distribution along line L1 in Fig.3.

Wysokie temperatury na powierzchni przegrody (Fot.5). $T_{\max} + 14.6^{\circ}\text{C}$ (przy temperaturze zewnętrznej równej -1.8°C) Fot.4. mogą świadczyć o wadzie technologicznej tej ściany. Prawdopodobnie nastąpiło „obsypanie” się wełny mineralnej, lub wada technologiczna przy połączeniu dachu ze ścianą zewnętrzną.



Fot. 5. Zdjęcie termowizyjne ścian zewnętrznych hipermarketu

Fig. 5. Infrared image of external walls surface of hypermarket

3. PODSUMOWANIE

Na podstawie wykonanych badań termowizyjnych kilku obiektów konstrukcji stalowej, stwierdzono występowanie wad wykonawczych lub technologicznych, które powtarzają się prawie we wszystkich obiektach poddanych analizie w ramach prowadzonego Projektu. Na tej podstawie można by je uznać za „typowe”. Należy tu wymienić:

- „obsypanie” się wełny mineralnej w dolne części przegrody,
- „nieszczelności technologiczne” na połączeniach stropów ze ścianami zewnętrznymi oraz połączeniach (narożach) ścian zewnętrznych,
- niejednorodność przegród ujawniająca się zmienną grubością ułożonej izolacji,
- brak ciągłości w ułożeniu izolacji.

W wielu przypadkach analiza histogramów powierzchni ścian zewnętrznych wykazuje jednorodność grubości izolacji, jednakże temperatury na jej powierzchni pozwalają przypuszczać, że został przyjęty niewłaściwy współczynnik przenikania ciepła U . Jest to mało prawdopodobne gdyż budynek jest nowy. Należałoby wskazać na wady wykonawstwa tzn. ułożenie izolacji jednakowej grubości, ale nie zgodnej z projektem.

4. LITERATURA

- [1] Badania własne w ramach Europejskiego Projektu ROBUST
- [2] Projekt modernizacji budynku „L” Politechniki Rzeszowskiej

THERMOVISION RESEARCH OF STEEL CONSTRUCTION BUILDINGS

SUMMARY

The thermovision analysis of selected buildings has been presented, taking special attention to thermomodernization feature. In domain of European program research has been thermal investigation of selected steel construction buildings. The public buildings, big cubatured building (hypermarket) and also the small semidetached houses have been taken under consideration. Analyzed infrared images were very helpful at evaluating of thermal properties before thermomodernization. Using by investors suggestions on thermal insulation have been allowed to receive expected effect of modernization, it means, significant increasing of thermal state of analysed buildings. Infrared images made after invest process proofs of proper thermomodernization.

Dorota A. CHWIEDUK, dr hab. inż., prof. PW

Politechnika Warszawska
Instytut Techniki Ciepłej, MEiL
ul. Nowowiejska 21/25, 00665 Warszawa
e-mail: dchwied@itc.pw.edu.pl

WYBRANE ZAGADNIENIA MODELOWANIA MATEMATYCZNEGO TRANSPORTU CIEPŁA PRZEZ PRZEGRODY NIEPRZEZROCZyste

STRESZCZENIE

W referacie przedstawiono wybrane zagadnienia modelowania matematycznego transportu ciepła w stanie nieustalonym przez przegrody budowlane nieprzezroczyste z uwzględnieniem promieniowania słonecznego. Sformułowano zagadnienie początkowo – brzegowe wymiany ciepła w przegrodzie i jej otoczeniu. Przedstawiono zależności opisujące wymianę ciepła wskutek konwekcji i promieniowania z bliższym i dalszym otoczeniem wewnętrznym i otoczeniem zewnętrznym, w tym nieboskłonem pozornym. Uwzględniono oddziaływanie promieniowania słonecznego.

1. WPROWADZENIE

Dowolny budynek znajdując się w środowisku atmosferycznym ulega oddziaływaniu promieniowania słonecznego, w mniejszym lub większym stopniu w zależności od tego jak został zaprojektowany i wykonany. Oddziaływanie promieniowania słonecznego występuje dla całej obudowy, ale szczególnie istotne jest dla przegród przezroczystych. W przypadku przegród nieprzezroczystych zależy ono od absorpcyjności dla promieniowania słonecznego powierzchni zewnętrznej przegrody, a następnie od izolacyjności cieplnej przegrody, opisującej zdolność do przekazania pozyskanego ciepła do wnętrza. Straty lub zyski ciepła przez przegrody nieprzezroczyste są wynikiem procesów wymiany ciepła zachodzących w przegrodach i ich otoczeniu.

2. NIEUSTALONY PRZEPŁYW CIEPŁA PRZEZ PRZEGRODĘ

2.1. Pole temperatury w przegrodzie

Rozważono i sformułowano zagadnienie wymiany ciepła przez nieprzezroczyste elementy obudowy budynku, koncentrując się na oddziaływaniu energii promieniowania

słonecznego. Pominie to przepływ (infiltrację) powietrza i wilgoci przez przegrodę. Przyjęto, że przepływ ciepła przez przegrodę odbywa się przez przewodzenie. Pole temperatury T w czasie t można wtedy opisać równaniem przewodnictwa o postaci:

$$(\rho c_p) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + q_v \quad (1)$$

λ – przewodność cieplna, ρ – gęstość, c_p – ciepło właściwe, q_v – wewnętrzne źródło ciepła.

W pewnym uproszczeniu można przyjąć, że przepływ ciepła odbywa się jedynie wzdłuż grubości przegrody, a przegroda jest ciałem stałym jedno lub kilkuwarstwowym, w której każda warstwa jest jednorodna i izotropowa, w związku z tym parametry fizyczne, w tym przewodność cieplna danej warstwy przegrody, są stałe. W uproszczonych rozważaniach przegrodę można odnieść do nieskończonej długiej płyty, bez wewnętrznych źródeł ciepła. Pole temperatury można wtedy zapisać w układzie jednowymiarowym. W celu rozwiązania zagadnienia należy sformułować warunek początkowy i warunki wymiany ciepła na powierzchniach granicznych przegrody, w tym warstw przegrody.

Zewnętrzna przegroda budowlana kontaktuje się od wewnątrz z pomieszczeniem o temperaturze T_w , i od zewnątrz z bezpośrednim otoczeniem o temperaturze T_a . Na budynek oddziałuje także dalsze otoczenie, tj. nieboskłon pozorny o temperaturze T_{nieb} , która jest funkcją temperatury otoczenia zewnętrznego. Istnienie i oddziaływanie nieboskłonu należy uwzględniać w modelu matematycznym zjawisk zachodzących w otoczeniu budynku [1]. Wymiana ciepła przez promieniowanie z nieboskłonem jest szczególnie istotna w przypadku przegród poziomych i o niewielkim pochyleniu („widzą” one głównie pozorny nieboskłon, który otacza je całkowicie). Formułując warunek początkowy w chwili $t_0=0$ wymianę ciepła z nieboskłonem można pominąć i założyć, że rozkład temperatury w przegrodzie zależy tylko od temperatur bezpośredniego otoczenia.

Wymianę ciepła na brzegach obszaru przegrody od strony pomieszczenia w układzie jednowymiarowym można opisać warunkiem granicznym o postaci:

$$-\lambda_p \frac{\partial T_p(t)}{\partial x_p} \Big|_w = h_w(t) [T_p(t) \Big|_w - T_w(t)] \quad (2)$$

Warunek ten wynika z wymiany ciepła wskutek konwekcji swobodnej i promieniowania.

2.2. Wymiana ciepła z otoczeniem wewnętrznym

W przypadku konwekcji swobodnej w pomieszczeniach można stosować zależności kryterialne dla powierzchni pionowych, Baylea Churchilla i Chu, Holmana [2]. Przy tworzeniu modelu zjawisk zachodzących w rozważanym pomieszczeniu można też skorzystać z zależności Curcija i Gossa [3]. W zależnościach kryterialnych Curcija i Gossa w liczbie Nusselta Nu i liczbie Rayleigha Ra wymiar charakterystyczny odnosi się do wysokości przegrody. Liczbę Ra wyznacza się dla własności warstwy przyściennej powietrza od strony wewnętrznej przegrody, przy uśrednionej temperaturze tej warstwy, którą w układzie jednowymiarowym można wyznaczyć z zależności:

$$\bar{T}_{pi,wp}(x,t) = 0,75 \cdot T_w(t) + 0,25 \cdot T_{pi}(x_w,t) \quad (3)$$

Przyjmuje się, że własności powietrza w warstwie przyściennej zmieniają się w sposób liniowy w funkcji wspomnianej temperatury warstwy, przy czym współczynniki a i b równania liniowego są wyznaczone dla skrajnych temperatur przegrody, co np. w odniesieniu do lepkości dynamicznej powietrza opisuje równanie o postaci:

$$\mu(t) = a + b \cdot \bar{T}_{pi,wp}(t)$$

Współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła od wewnątrz, dla danej przewodności cieplnej λ_{wp} i wymiaru charakterystycznego L warstwy przyściennej przegrody, w sposób ogólny opisuje zależność tego współczynnika od liczby kryterialnej Nusselta o postaci:

$$h_{k,we} = Nu(t) \frac{\lambda_{wp}}{L}$$

Z reguły korzysta się z zależności kryterialnych opisujących liczbę Nu w funkcji liczby kryterialnej Rayleigha, przy czym liczba Ra to:

$$Ra(t) = \frac{g \beta \rho^2 c_p L^3}{\lambda \mu} \Delta T(t)$$

gdzie: g - stała grawitacji; β - kąt pochylenia względem poziomu; ρ - gęstość.

Zależności liczby Nu w funkcji Ra mają postać zależną od pochylenia rozważanej powierzchni i kierunku przepływu ciepła. Dla powierzchni poziomych i pochyłych pod niewielkim kątem, tj. pod kątem β w zakresie: $0^\circ \leq \beta < 15^\circ$, gdy przepływ ciepła następuje z wewnątrz budynku do zewnątrz, Curcij i Goss [3] zalecają korzystanie z zależności:

$$Nu = 0,13 (Ra_H)^{1/3} \quad (4)$$

Dla pochyłych powierzchni $15^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ i przepływu ciepła z wewnątrz na zewnątrz liczbę Nu wyznacza się w zależności od wielkości liczby Ra zgodnie z:

$$Nu = 0,56 (Ra_H \cdot \sin \beta)^{1/4} \quad \text{dla } Ra_H \leq Ra_{cv} \quad (5)$$

$$Nu = 0,13 (Ra_H^{1/3} - Ra_{cv}^{1/3}) + 0,56 (Ra_{cv} \cdot \sin \beta)^{1/4} \quad \text{dla } Ra_H > Ra_{cv} \quad (6)$$

$$Ra_{cv} = 2,5 \cdot 10^5 \left(\frac{e^{0,72\beta}}{\sin \beta} \right)^{1/5} \quad (7)$$

Jeżeli natomiast przepływ ciepła następuje z zewnątrz do wewnątrz wtedy zaleca się [4] stosowanie dla powierzchni poziomych następującej zależności:

$$Nu = 0,58 (Ra_H)^{1/5} \quad \text{dla } Ra_H \leq 10^{11} \quad (8)$$

Dla powierzchni pochyłych, przy przepływie ciepła z zewnątrz do wewnątrz zaleca się korzystać z zależności (5), przy warunku dla liczby Rayleigha:

$$Nu = 0,56 (Ra_H \cdot \sin \beta)^{1/4} \quad \text{dla } 10^5 \leq Ra_H \sin \beta \leq 10^{11} \quad (9)$$

W pomieszczeniu zachodzi także wymiana ciepła przez promieniowanie pomiędzy wnętrzem a powierzchnią wewnętrzną przegrody. Wnętrze można traktować jako ciało doskonale czarne, które całkowicie otacza przegrodę. Radiacyjny współczynnik wymiany ciepła dla tej powierzchni wyznacza się z ogólnej zależności:

$$h_{r,w}(x,t) = \varepsilon_o \sigma (T_{p,w}(x,t)^2 + T_w(t)^2)(T_{p,w}(x,t) + T_w(t)) \quad (10)$$

2.3. Wymiana ciepła z otoczeniem zewnętrznym

Wymiana ciepła na zewnętrznej powierzchni granicznej przegrody kontaktującej się z otoczeniem zewnętrznym jest złożona i składa się na nią:

- wymiana ciepła z najbliższym otoczeniem poprzez promieniowanie ciepłe;
- wymiana ciepła z najbliższym otoczeniem wskutek konwekcji, z reguły wymuszonej;
- wymiana ciepła z dalszym otoczeniem, nieboskłonem poprzez promieniowanie;
- napromieniowanie promieniowaniem słonecznym o natężeniu G_s .

Ciepło jest przekazywane przez przewodzenie. Warunek brzegowy dla zewnętrznej powierzchni granicznej przegrody kontaktującej się z otoczeniem zewnętrznym, przyjmując układ jednowymiarowy przepływu ciepła, można zapisać w postaci:

$$-\lambda_p \frac{\partial T_p(t)}{\partial x_p} \Big|_z = h_z(t) [T_a(t) - T_p(t) \Big|_z] + \dot{q}_{nieb,ściana}(t) + \dot{q}_{s,ściana}(t) \quad (11)$$

Wymiana ciepła z najbliższym otoczeniem o temperaturze T_a jest zapisana w równaniu (11) w sposób sumaryczny, w odniesieniu do promieniowania ciepłego i konwekcji łącznie, poprzez współczynnik h_z . W przypadku konwekcyjnej wymiany ciepła z otoczeniem zewnętrznym rozważa się zagadnienie konwekcji wymuszonej działaniem wiatru. Rzadko warunki otoczenia zewnętrznego są takie, aby rozważać jedynie konwekcję swobodną. W analizach energetycznych budynków zaleca się (ISO 2003, [4]) korzystanie z uproszczonej zależności na współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję wymuszoną, która uwzględnia uśrednione warunki otoczenia zewnętrznego w następujący sposób:

$$\text{zimą: } h_{kon} = 20 \text{ [W/(m}^2\text{K)]} \quad (12)$$

$$\text{latem: } h_{kon} = 8 \text{ [W/(m}^2\text{K)]} \quad (12')$$

Wydaje się celowe wprowadzenie okresu przejściowego wiosennego i jesiennego, w którym rozważany współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła może odpowiadać wartościom pośrednim:

$$\text{okres przejściowy: } h_{kon} = 12 \text{ [W/(m}^2\text{K)]} \quad (12'')$$

Wymianę ciepła przez promieniowanie pomiędzy zewnętrzną obudową budynku a bezpośrednim otoczeniem zewnętrznym (grunt i obiekty w sąsiedztwie) można rozważyć traktując otoczenie jako ciało doskonale czarne ograniczające całkowicie rozważany budynek. Ściany zewnętrzne mają powierzchnie pokryte w różny sposób, które charakteryzują się określonymi współczynnikami emisyjności [5]. Powierzchnie elementów obudowy budynku mają różne temperatury zmienne w czasie i zróżnicowane na powierzchni. Współczynnik radiacyjnej wymiany ciepła rozważanych powierzchni z bezpo-

średnim otoczeniem, przy przyjęciu układu jednowymiarowego, (cała powierzchnia przegrody ma taką samą temperaturę), można wyznaczyć z zależności o postaci ogólnej:

$$h_{i,r,za}(x,t) = \varepsilon_{i,o} \sigma \left((T_{i,z}(x,t)^2 + T_a(t)^2)(T_{i,z}(x,t) + T_a(t)) \right) R_o \quad (13)$$

Indeks i oznacza odpowiedni element obudowy. Współczynnik konfiguracji R_o jest stały dla danej lokalizacji przegrody i można go zapisać w zależności od pochylenia β przegrody w następujący sposób:

$$R_o = \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (14)$$

W literaturze z zakresu energetyki słonecznej [6] można znaleźć uśrednione wartości współczynnika radiacyjnej wymiany ciepła z otoczeniem zewnętrznym traktowanym łącznie jako otoczenie bezpośrednie i dalsze, tj. nieboskłon. Uśrednione wartości tego współczynnika odnoszą się do warunków bezchmurnego nieba i wahają się w granicach: $h_{r,z} = 5-6$ [W/(m²K)].

2.4. Wyznaczenie temperatury otoczenia zewnętrznego i nieboskłonu

W równaniu (11) i (13) występuje temperatura T_a otoczenia atmosferycznego. Temperaturę tę można wyznaczać stosując rzeczywiste wartości, wartości uśrednione podawane przez stacje meteorologiczne lub z bazy danych pogodowych różnych instytucji. Można też zastosować własne aproksymacje rzeczywistych danych pogodowych. Poniżej zaproponowano metodę aproksymacji dziennych przebiegów temperatury otoczenia zewnętrznego przy wykorzystaniu uśrednionych danych dobowych i miesięcznych [1].

Można wykorzystać średnie dzienne wartości temperatury dla poszczególnych miesięcy roku $T_{sred}(t_m)$, średnie dzienne amplitudy $A_{mp}(t_m)$, na podstawie, których formułuje się zmienność temperatury w ciągu dnia w postaci niesymetrycznej sinusoidy. Zgodnie z obserwacjami pogodowymi [7], [8] przyjęto, że maksymalna temperatura w ciągu doby występuje około godziny 14³⁰, natomiast minimalna przed wschodem słońca. Do wyznaczania temperatury powietrza atmosferycznego T_a w kolejnych godzinach dnia (t_h) dla danego miesiąca (t_m) roku sformułowano następującą zależność:

$$T_a(t_h, t_m) = T_{sred}(t_m) + [A_{mp}(t_m) \cdot \sin(\pi \cdot (F(t_h, t_m)))] \quad (15)$$

$T_{sred}(t_m)$ średnia temperatura powietrza atmosferycznego w danym miesiącu roku,

$A_{mp}(t_m)$ średnia amplituda temperatury powietrza zewnętrznego w m -tym miesiącu roku

$F(t_h, t_m)$ poprawka temperatury powietrza atmosferycznego w m -tym miesiącu roku, będąca również zmienną godzinową.

Poprawka temperatury dla poszczególnych pór dnia została sformułowana jak poniżej:

$$F(t_h, t_m) = \frac{0,5 + t_h - t_{\min us}(t_m)}{(t_{wsch}(t_m) - 1) - t_{\min us}(t_m)} \quad \text{dla } t_h < t_{wsch}(t_m) \quad (16a)$$

$$F(t_h, t_m) = \frac{-0,5 + t_h - (t_{wsch}(t_m) - 1)}{t_{\max} - (t_{wsch}(t_m) - 1)} \quad \text{dla } t_{wsch}(t_m) \leq t_h < t_{\max} \quad (16b)$$

$$F(t_h, t_m) = \frac{0,5 + t_h - t_{\max}}{t_{\text{plus}}(t_m) - t_{\max}} \quad \text{dla } t_h \geq t_{\max} \quad (16c)$$

Do obliczeń poprawki temperatury $F(t_h, t_m)$ powietrza atmosferycznego wykorzystuje się godzinę wschodu $t_{\text{wsch}}(t_m)$, która jest zależna od długości dnia słonecznego $T_d(t_m)$. Długość dnia słonecznego T_d , jest czasem zawartym między godziną wschodu i zachodu słońca. Parametr ten oblicza się uwzględniając kąt godzinny wschodu (lub zachodu) Słońca. Biorąc pod uwagę, że godziny wschodu i zachodu słońca są symetryczne względem południa astronomicznego, długość dnia słonecznego T_d wynosi:

$$T_d = \frac{2}{15} \arccos[-\tan(\phi)\tan(\delta)] \quad (17)$$

Godzinę wschodu $t_{\text{wsch}}(t_m)$ wyznacza się z następującej zależności:

$$t_{\text{wsch}}(t_m) = 12 - T_d(t_m) / 2 \quad (18)$$

Przyjęto także inne następujące wielkości:

$$t_{\max} = 14,5 \quad \text{odpowiada godzinie } 14^{30}, \text{ o której zwykle występują maksymalne} \quad (19)$$

dzienne temperatury;

$$t_{\min us}(t_m) = t_{\max} - 24 \quad \text{odpowiada czasowi (godzinie) występowania maksymalnej} \quad (19')$$

dziennej temperatury jeden dzień wcześniej;

$$t_{\text{plus}}(t_m) = \quad \text{odpowiada czasowi (godzinie) występowania minimalnej} \quad (19'')$$

dziennej temperatury jeden dzień później.

W równaniu (11) w sposób pośredni występuje temperatura nieboskłonu pozornego. Temperatura nieboskłonu jest wyznaczana w funkcji temperatury powietrza atmosferycznego, określonej równaniami (15) – (19’’’). Nieboskłon można rozważać jako ciało doskonale czarne o temperaturze $T_{\text{nieb}}(t)$ [K], które emituje promieniowanie cieplne o gęstości strumienia L_{nieb} [W/m²] [9], czyli:

$$L_{\text{nieb}}(t) = \sigma(T_{\text{nieb}}(t))^4 \quad (20)$$

Strumień promieniowania nieboskłonu zależy od stanu zachmurzenia atmosfery. Gęstość strumienia promieniowania nieboskłonu L_{czyst} [Wm⁻²] dla warunków czystego nieba (bezchmurnego) można wyznaczyć w funkcji temperatury otoczenia zewnętrznego $T_a(t)$ [K] z formuły Swinbanka [10] o postaci:

$$L_{\text{czyst}}(t) = 5,31 \cdot 10^{-13} (T_a(t))^6 \quad (21)$$

W modelu Swinbanka przyjmuje się, że chmury mają temperaturę o pięć stopni niższą od temperatury otoczenia zewnętrznego i ich emisyjność dla promieniowania długofalowego wynosi $\varepsilon_c = 0,96$. Gęstość strumienia promieniowania nieboskłonu L_{chm} [W/m²] dla nieba zachmurzonego wyznacza się z zależności:

$$L_{\text{chm}}(t) = \varepsilon_c \cdot \sigma(T_a(t) - 5)^4 \quad (22)$$

Rzeczywisty stan nieba jest stanem pośrednim pomiędzy niebem czystym a zachmurzonym. Strumień promieniowania nieboskłonu zbliżonego do stanu rzeczywistego jest aproksymowany [9] zależnością o postaci:

$$L_{nieb}(t) = (1 - c(t)) \cdot L_{czyst}(t) + c(t) \cdot L_{chm}(t) \quad (23)$$

Współczynnik c określa stan atmosfery, a przede wszystkim stopień pokrycia nieba chmurami i jest określany w funkcji współczynnika K_d opisującego udział promieniowania dyfuzyjnego w promieniowaniu całkowitym. Współczynnik K_d jest określany na podstawie zależności aproksymacyjnych lub pomiarów w funkcji indeksu przejrzystości nieba K_T , jego uśrednione wartości dla różnych szerokości geograficznych można też znaleźć w literaturze [5]. W formule Swinbanka przy czystym niebie udział promieniowania dyfuzyjnego jest określany na poziomie 16,5% ($K_d=0,165$) i współczynnik c w funkcji K_d jest wyznaczany jako:

$$c(t) = (K_d(t) - 0,165) / 0,835 \quad (24)$$

Po przekształceniach, wykorzystując równania (21) – (24), temperaturę pozorną nieboskłonu otrzymuje się z równania (20), w postaci:

$$T_{nieb}(t) = \sqrt[4]{\frac{\left(1 - \frac{K_d(t) - 0,165}{0,835}\right) (5,31 \cdot 10^{-13} \cdot T_a(t)^6) + \frac{K_d(t) - 0,165}{0,835} (\epsilon_c \sigma (T_a(t) - 5)^4)}{\sigma}} \quad (25)$$

W literaturze z zakresu energetyki słonecznej [11] można spotkać uproszczoną formułę Swinbanka (T_{nieb} i T_a [K]) o postaci: $T_{nieb}(t) = 0,0552 \cdot (T_a(t))^{1,5}$.

2.5. Oddziaływanie promieniowania słonecznego

Oddziaływanie promieniowania słonecznego na powierzchnię zewnętrzną przegrody nieprzezroczystej należy wyznaczyć uwzględniając jego natężenie $G_s(t, \beta, \gamma)$ docierające w danym czasie do powierzchni zewnętrznej przegrody o określonym usytuowaniu, opisanym przez kąt pochylenia β i kąt azymutalny γ . Promieniowanie słoneczne jest pochłaniane na powierzchni przegrody o określonej absorpcyjności $\alpha_{s,sciana}$. Transmisyjność przegrody nieprzezroczystej dla promieniowania słonecznego jest równa zero, ale w wyniku pochłonięcia promieniowania ma miejsce wzrost energii wewnętrznej cząsteczek powierzchni i w konsekwencji wzrost ich temperatury. Część ciepła jest oddawana do otoczenia (poprzez konwekcję i promieniowanie), część przenika do wnętrza. Gęstość strumienia promieniowania pochłanianego przez zewnętrzną warstwę powierzchni przegrody można zapisać jako:

$$\dot{q}_s(t) = G_s(t, \beta, \gamma) \cdot \alpha_{s,sciana} \quad (26)$$

Odrębnym zagadnieniem jest wyznaczenie zmiennego w czasie natężenia promieniowania słonecznego padającego na daną powierzchnię w zależności od jej usytuowania, co opisano w literaturze [1], [12], [13]. Można podkreślić, że w analizach energetyki budynku należy korzystać z modelu anizotropowego promieniowania.

2.6. Przepływ ciepła przez przegrodę

W przypadku przegrody wielowarstwowej poza warunkami granicznymi na powierzchniach zewnętrznych przegrody należy sformułować warunki brzegowe dla powierzchni wewnętrznych na granicy obszaru oddzielającej kolejne warstwy przegrody. Przy założeniu o izotropowości i jednorodności każdej z warstw, przy wymianie ciepła przez przewodzenie, warunek brzegowy opisuje równość temperatury powierzchni na granicy warstw i równość strumienia ciepła wymienianego na granicy obszaru warstw i jest szczególnym warunkiem brzegowym i w układzie jednowymiarowym przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} T_{p,w-1}(t) \Big|_{x_{gr}} &= T_{p,w}(t) \Big|_{x_{gr}} \\ -\lambda_{p,w-1} \frac{\partial T_{p,w-1}}{\partial x} \Big|_{x_{gr}} &= -\lambda_{p,w} \frac{\partial T_{p,w}}{\partial x} \Big|_{x_{gr}} \end{aligned} \quad (27)$$

Indeks w odnosi się do danej warstwy, a indeks $w-1$ do warstwy leżącej przed warstwą w .

3. ROZWIĄZANIE SFORMULOWANEGO ZAGADNIENIA BRZEGOWEGO

Do rozwiązania przedstawionego powyżej zagadnienia brzegowego dla każdej warstwy i odpowiednich warunków brzegowych należy zastosować odpowiednią metodę obliczeniową (numeryczną). Otrzymuje się pole temperatury w przegrodzie, w kolejnych jej warstwach, a także na powierzchniach granicznych od zewnątrz i wewnątrz. Między innymi oblicza się współczynnik wymiany ciepła h_w od wewnątrz, będący sumą współczynnika konwekcyjnego wyznaczonego z liczby kryterialnej Nusselta z odpowiedniego równania (4)–(9), w zależności od pochylenia powierzchni przegrody i kierunku przepływu ciepła, oraz radiacyjnego współczynnika wymiany ciepła wyznaczonego z równania (10). Znając zmienność rozkładu temperatury na powierzchni wewnętrznej $T_{p,w}(t)$ (w układzie jednowymiarowym $T_p(x,t)_{x=w}$), oraz korzystając z obliczonego współczynnika wymiany ciepła $h_w(t)$ od wewnątrz można wyznaczyć strumień ciepła doprowadzony do wnętrza pomieszczenia o temperaturze $T_w(t)$ lub odprowadzany z niego przez przegrody nieprzezroczyste stanowiące obudowę budynku:

$$\dot{Q}_{sciana}(t) = h_w(t) (T_p(x,t) \Big|_{x=w} - T_w(t)) A_{sciana,w} \quad (27)$$

Oddziaływanie promieniowania słonecznego nie jest oczywiście ujęte wprost w rozważanym równaniu, ale jest jednym z czynników wpływających na rozkład temperatury w przegrodzie, a w konsekwencji na temperaturę powierzchni przegrody od wewnątrz.

4. LITERATURA

1. Chwieduk D. *Modelowanie i analiza pozyskiwania oraz konwersji termicznej energii promieniowania słonecznego w budynku*. PRACE IPPT IFTR REPORTS. pp. 1-264. 11/2006. Warszawa 2006
2. Holman J.P.: *Heat Transfer*, McGraw-Hill Higher Education 2002
3. Curcija D., Goss W.P.: *New Correlations for Convective Heat Transfer Coefficient on Indoor Fenestration Surfaces—Compilation of More Recent Work*,

- ASHRAE/DOE/BTECC Conference, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VI, Clearwater, FL, 1995
4. ISO 15099, *Thermal performance of windows, doors and shading devices – Detailed calculations*, 2003
 5. Duffie J. A., Beckman W. A.: *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991
 6. Gordon J.: *Solar energy the state of the art.*, ISES position papers, UK 2001
 7. *Atlas klimatyczny Polski. Część tabelaryczna. Zeszyty*. PIHM, 1970
 8. Bogdańska B. Podogrodzki J.: *Zmienność całkowitego promieniowania słonecznego na obszarze Polski w okresie 1961-1995*. Materiały Badawcze IMGW, seria: Meteorologia, z. 30, Warszawa, 2000
 9. *Clean energy Project analysis: RETScreen® Engineering & Cases Textbook, Solar water heating project analysis*, Minister of Natural Resources Canada, 2001–2004
 10. Swinbank W.C.: *Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 89, 1963, 339–348
 11. Smolec W.: *Fototermiczna konwersja energii słonecznej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000
 12. Chwieduk D. *Some aspects of modeling the energy balance of a room in regard to the impact of solar energy*. *Solar Energy*. Elsevier Science, 82, pp. 870 – 884, 2008
 13. Chwieduk D. *Recommendation on modeling of solar energy incident on a building envelope*. *Renewable Energy*. Elsevier Science, 34, pp. 736 - 741. Elsevier, 2009

Prace wykonywane są w ramach realizacji projektu badawczego Nr N N512 459936 „Badania akumulacji ciepła z wykorzystaniem materiałów ulegających przemianom fazowej w zastosowaniu do budownictwa energooszczędnego”.

SOME ASPECTS OF MODELING HEAT TRANSFER THROUGH OPAQUE ELEMENTS OF A BUILDING ENVELOPE

SUMMARY

The paper presents some aspects of modeling heat transfer through opaque elements of a building envelope including solar energy impact. The initial – boundary problem of heat transfer in the building envelope and its surrounding has been developed. Mathematical model of heat transfer through conduction in the envelope, convection and thermal radiation with the indoor and outdoor environment, including heat exchange via radiation with hemisphere, is presented. Solar influence is described by the irradiation of a surface depending on its slope and orientation.

Michał CHWIEDUK, inż. ¹⁾

Dorota A. CHWIEDUK, prof. nzw. dr hab. inż. ²⁾

Politechnika Warszawska, MEiL

²⁾Instytut Techniki Ciepłej

ul. Nowowiejska 21/25, 02-666 Warszawa

¹⁾ e-mail: mchwieduk@poczta.onet.pl

²⁾ e-mail: dchwied@itc.pw.edu.pl

CHŁODZENIE SŁONECZNE

STRESZCZENIE

Na wstępie przedstawiono rolę, jaką chłodzenie słoneczne może w przyszłości odgrywać w Polsce i na świecie. Opisano różne możliwości wykorzystania energii promieniowania słonecznego do chłodzenia. Przedstawiono systemy chłodzenia oparte na współdziałaniu kolektorów słonecznych oraz chłodziarek absorpcyjnych, adsorpcyjnych i chłodziarek wyparno-natryskowych. Następnie opisano polskie warunki klimatyczne na podstawie, których dokonano wyboru technologii najbardziej do nich dopasowanych. Zaproponowano system chłodzenia słonecznego przeznaczony do domu jednorodzinnego znajdującego się na terenie Polski. Przeprowadzono obliczenia dla zaproponowanego systemu, na podstawie, których możliwa była ocena opłacalności stosowania chłodzenia słonecznego w budownictwie jednorodzinnym w polskich warunkach klimatycznych.

1. WPROWADZENIE

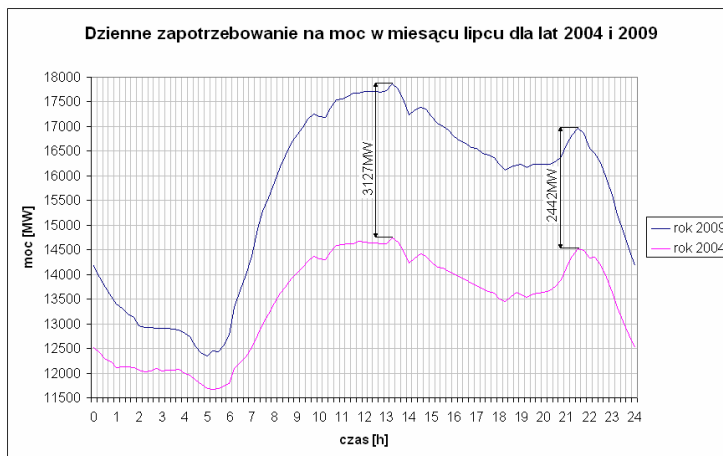
Idea zastosowania chłodzenia słonecznego polega na wykorzystaniu energii promieniowania słonecznego do chłodzenia lub klimatyzacji. Najważniejszą zaletą systemów chłodzenia słonecznego jest równoczesne występowanie największego zapotrzebowania na moc chłodniczą i największego natężenia promieniowania słonecznego, czyli koherentność źródła z obciążeniem. Dzięki temu istnieją duże możliwości rozwoju tej technologii w przyszłości. Wadą wielu odnawialnych źródeł energii jest nie jednoczesne występowanie w czasie zapotrzebowania na energię i mocy maksymalnej danego urządzenia. Konieczne jest wtedy magazynowania energii i/lub wspomagania odnawialnego źródła energii źródłem konwencjonalnym. Przy zastosowaniu chłodzenia słonecznego tego typu rozwiązania nie są konieczne.

Obecnie stosowane słoneczne systemy chłodnicze służą głównie do zabezpieczania leków przed wysoką temperaturą w rejonach tropikalnych oraz żywności. Wykorzystywane są również jako urządzenia szczytowe wspomagające instalacje podstawowe w najcieplejszych okresach. Szersze zastosowanie znaleźć mogą systemy klimatyzacyjne,

zarówno w klimacie tropikalnym, jak i w strefach klimatu umiarkowanego. Dla rejonów klimatu umiarkowanego kolektory słoneczne stosowane w instalacjach klimatyzacyjnych mogą zapewnić latem chłód, a zimą ciepło do ogrzania budynku.

W krajach wysoko rozwiniętych, w których w okresach letnich występuje duże zapotrzebowanie na chłód, jak USA czy Japonia, duże problemy sprawia znaczny wzrost poboru energii w godzinach popołudniowych. Klimatyzacja w tych krajach działa nie tylko w miejscach pracy, ale także w domach i mieszkaniach. W krajach europejskich, jak i na Bliskim Wschodzie, problemy takie dopiero zaczynają się pojawiać, lub pojawią się w najbliższych latach. Wskazuje na to zwiększające się zapotrzebowanie na moc chłodniczą.

Na rys. 1 przedstawiono średnie dzienne zapotrzebowanie na moc w miesiącu lipcu w roku 2004 i 2009 w Polsce. Dodatkowo na wykresie zaznaczono w dwóch punktach różnicę pomiędzy zapotrzebowaniem w roku 2004 i 2009. Wykres powstał na podstawie danych udostępniane przez operatora polskich sieci elektroenergetycznych [11].



Rys. 1. Dzielne zapotrzebowanie na moc w lipcu w 2004 i 2009 roku w Polsce [11]

Fig. 1 Daily demand for the power in July 2004 and 2009 in Poland

Jak wynika z powyższego wykresu największe zapotrzebowanie na moc w lipcu występuje około godziny 13:15, jest to szczyt dzienny. Zapotrzebowanie na moc w ciągu 5 lat wzrosło znacznie, krzywa rozkładu mocy przesunęła się w górę. W roku 2004 różnica pomiędzy szczytem wieczornym a dziennym była niewielka około 200MW, w roku 2009 różnica ta wyniosła już prawie 700MW. Zaznaczone na wykresie wartości to różnica w zapotrzebowaniu między rokiem 2004 i 2009. Pokazują one, w którym szczycie (dziennym/nocnym) nastąpił większy wzrost. Szczyt dzienny związany jest między innymi z użyciem chłodzenia/klimatyzacji, jego znaczny wzrost może powodować problemy w systemie energetycznym lub zmusi do inwestowania w moce szczytowe. W Polsce nie stanowi to na razie problemu, ponieważ zapotrzebowanie na moc w okresie zimowym jest znacznie wyższe niż w okresie letnim [10]. Jednak okres letni w Polsce jest okresem

remontów i napraw w elektrowniach, z tego powodu moc, jaką dysponuje system w tym okresie jest mniejsza niż zimą.

W miarę rozpowszechniania się urządzeń chłodniczych/klimatyzacyjnych zmniejszać będzie się spadek poboru mocy w miesiącach letnich. Wzrost zapotrzebowania na moc w miesiącach letnich następuje szybciej niż w zimowych. W polskich warunkach klimatycznych wyrównywanie się zapotrzebowania na energię elektryczną zimą i latem będzie następowało powoli. Stanie się to na skutek zastosowania energooszczędnych urządzeń i oświetlenia, co spowoduje większy spadek zapotrzebowania na energię zimą niż latem. Natomiast rozwój instalacji chłodzących/klimatyzacyjnych spowoduje wzrost zapotrzebowania na energię latem. Krzywa zapotrzebowania będzie wtedy ulegać spłaszczeniu w perspektywie rocznej.

W referacie opisano dostępne rodzaje chłodzenia słonecznego, wybrano system odpowiadający polskim warunkom klimatycznym oraz przeprowadzono obliczenia wymaganej powierzchni kolektorów instalacji działającej w domu jednorodzinnym. Na tej podstawie możliwa była ocena opłacalności zastosowania chłodzenia słonecznego w budownictwie jednorodzinnym.

2. URZĄDZENIA SORPCYJNE

Chłodziarki sorpcyjne dzielimy na absorpcyjne i adsorpcyjne, ogólna zasada działania obydwu jest podobna, odbieramy ciepło ze źródła o niskiej temperaturze i oddajemy do źródła o wyższej temperaturze kosztem energii napędowej dostarczonej w postaci ciepła. W chłodnictwie przyjęto nazywać absorpcją zjawisko, w którym pochłanianie czynnika chłodniczego następuje w cieczy, natomiast adsorpcją, jeśli w ciele stałym. W chemii zjawisko absorpcji definiujemy się jako pochłanianie adsorbentu w całej objętości adsorbentu, zaś adsorpcji jako gromadzenie adsorbentu na powierzchni adsorbentu.

Działanie urządzenia chłodniczego zapewniają procesy absorpcji (adsorpcji) czynnika chłodniczego przez adsorbent (adsorbent) przy niewielkim ciśnieniu i niskiej temperaturze oraz proces odwrotny – desorpcja roztworu bogatego (wzbogaconego adsorbentu) przy wysokiej temperaturze. W ten sposób realizowane jest proces sprężania, w efekcie, którego otrzymujemy sprężony gaz czynnika chłodniczego. Urządzenia absorpcyjne mogą działać w trybie ciągłym, natomiast adsorpcyjne w trybie cyklicznym.

2.1. Chłodziarki adsorpcyjne

W najprostszych instalacjach adsorpcyjnych rolę absorbera oraz desorbera pełnią kolektory słoneczne wypełnione adsorbentem [9]. W ciągu dnia kolektory pełnią rolę desorbera. Kolektory słoneczne pochłaniając promieniowanie słoneczne nagrzewają się, czynnik chłodniczy odparowuje z adsorbentu. Następnie trafia do skraplacza i w postaci płynnej przepływa do zbiornika. W czasie obniżania się temperatury kolektora, w nocy lub w ciągu dnia, gdy zmieniają się warunki nasłonecznienia, ciśnienie w kolektorach spada, w momencie, gdy będzie ono niższe od ciśnienia w parowniku zawór dławiący, sterowany różnicą ciśnień wpuści do parownika czynnik chłodniczy. Czynnik ten odparowując odbiera ciepło, chłodzi pomieszczenie, w którym się znajduje lub czynnik transportujący chłód, i trafia z powrotem do kolektorów słonecznych, które pełnią teraz rolę absorbera.



Rys. 2. Schemat adsorpcyjnej chłodziarki słonecznej [9]
 Fig. 2. The diagram of the adsorption solar refrigerator [9]

Okres procesu intensywnego chłodzenia rozważanej instalacji przypada na godziny nocne (wtedy następuje odparowanie czynnika w parowniku). Ze względu na brak zapotrzebowania na chłód w czasie godzin nocnych występuje potrzeba magazynowania chłodu. Chłód magazynowany jest w blokach lodu, stąd nazwa urządzeń: wytwornice lodu.

Inną możliwością jest budowa chłodni kominowej, która umożliwia wykonanie większej liczby cykli w ciągu doby. W takim rozwiązaniu adsorber oraz desorber nie znajdują się w kolektorze. Ciepło z kolektorów dostarczane jest do chłodziarki adsorpcyjnej poprzez wymiennik. Kiedy wydzieli się większość czynnika chłodniczego z adsorbentu dopływ ciepła jest odcinany. Woda chłodząca pochodząca z chłodni kominowej obniża temperaturę w komorze, w której znajduje się adsorbat, umożliwiając wpuszczenie z powrotem do komory czynnika chłodniczego wracającego z parownika. Wtedy urządzenie może wykonywać więcej cykli w ciągu dnia. W przypadku urządzeń małych mocy zamiast chłodni kominowej możliwe jest zastosowanie zwykłych wymienników oddających ciepło do otoczenia (powietrza, gruntu).

W celu zapewnienia ciągłości chłodzenia, możliwe jest zastosowanie dwóch połączonych chłodziarek pracujących na zmianę. Rozwiązanie jest najlepsze dla systemów chłodzących/klimatyzacyjnych. Konieczna jest wtedy budowa chłodni kominowej.

2.2. Chłodziarki absorpcyjne

Chłodziarka absorpcyjna wykorzystuje te same zjawiska sorpcyjne, co adsorpcyjna. Jednak dzięki temu, że sorbent jest w postaci ciekłej możliwa jest praca ciągła instalacji. Dlatego też systemy te używane są częściej do klimatyzacji pomieszczeń.

W chłodziarkach absorpcyjnych wyróżnić możemy dwa obiegi, obieg czynnika chłodniczego oraz połączony z nim obieg absorbentu. Najbardziej popularnymi czynnikami stosowanymi w chłodziarkach absorpcyjnych jest bromek litu jako absorbent oraz woda jako czynnik chłodniczy. Mniej rozpowszechnione są urządzenia, w których wykorzystywany jest roztwór amoniaku z wodą. Woda jest w tym przypadku absorbentem. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość uzyskania ujemnych temperatur w parowniku. Jest to nie możliwe, jeśli czynnikiem chłodniczym jest woda. W rozwiązaniach wykorzystujących amoniak musi być stosowany rektyfikator, jest to urządzenie separujące pary

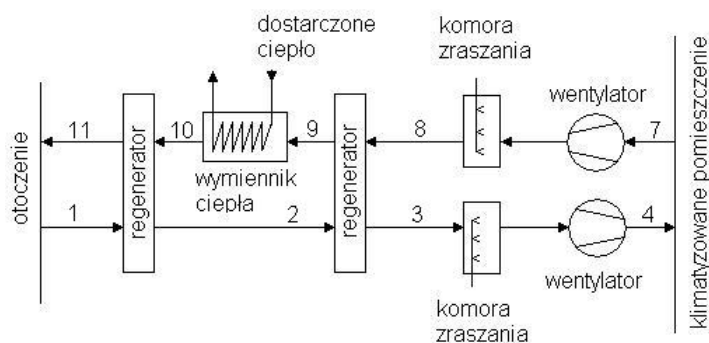
wody od par amoniaku, które powstają w desorberze [6]. Problem taki nie występuje w przypadku instalacji wykorzystujących bromek litu oraz wodę.

W celu zwiększenia współczynnika COP instalacji możliwe jest zastosowanie wymiennika regeneracyjnego. Ciepło odebrane od roztworu ubogiego dostarczane jest do roztworu bogatego. Oznacza to, że pomiędzy absorberem i desorberem znajduje się wymiennik ciepła, nazywany jest on ekonomizerem.

W nowoczesnych rozwiązaniach stosowane są również podwójne obiegi chłodnicze. Ciepło odebrane ze skraplacza służy do desorpcji dodatkowej ilości czynnika chłodniczego. Jednak, aby ciepło odebrane ze skraplacza było użyteczne temperatura w desorberze musi być wyższa (ponad 120°C). W ten sposób temperatura w drugim desorberze jest na poziomie 90°C , a COP możliwe do uzyskania przekracza 1. Urządzenia takie nazywane są chłodziarkami absorpcyjnymi dwustopniowymi.

3. CHŁODZENIE WYPARNO-NATRYSKOWE (DEC)

Systemy chłodzenia wyparno-natryskowego, w dalszej części nazywane w skrócie DEC (dessicative and evaporative cooling), służą do klimatyzacji pomieszczeń, ich działanie polega na wykorzystaniu efektu odparowania wody w powietrzu. Uproszczony schemat takiej instalacji pokazano na rys. 3 [1]. Punkt 1 odpowiada parametrom powietrza pobieranego z otoczenia. Instalacja składa się z regeneratora, w którym powietrze wylotowe ogrzewa wlotowe. Osuszenie powietrza wlotowego (1-2) następuje dzięki adsorbentom pochłaniającym wilgoć zawartych w regeneratorze. Regenerator, nazywany również rotorem, ma postać obracających się powoli wymienników. Adsorbent nasycony wilgocią obraca się wraz z rotorem, trafia do kanału powietrza wylotowego (10-11), gdzie następuje jego regeneracja. Przepływające gorące powietrze uwalnia z niego wilgoć. Powietrze wlotowe trafia następnie do drugiego regeneratora (2-3), jest tam wstępnie chłodzone. Powietrze trafia dalej do komory zraszania, jest w niej nawilżane oraz chłodzone na skutek odparowania wody (3-4). Po tym procesie jest doprowadzone do pomieszczenia. Strumień powietrza wylotowego przechodzi najpierw przez komorę zraszania (7-8). Ochłodzone oraz nawilżone nagrzewa się najpierw w regeneratorze (8-9), a później w wymienniku ciepła (9-10). Następnie oddaje ciepło w ostatnim regeneratorze (10-11) i zostaje wypuszczone do otoczenia.



Rys. 3. Schemat instalacji DEC [1]

Fig. 3. The diagram of the installation DEC[1]

Jedynym nakładem energetycznym w tym procesie jest ogrzewanie powietrza w wymienniku. Dzięki temu możliwe są istotne oszczędności energii. Dodatkowo ciepło potrzebne w wymienniku może być ciepłem średnotemperaturowym (około 50°C). Daje to możliwość zasilania systemu z kolektorów słonecznych. Wadą takiego systemu jest duże zużycie wody oraz trudności w utrzymaniu stałej temperatury powietrza wlatującego do pomieszczenia. Zaletą jest łatwość utrzymania odpowiedniej wilgotności powietrza.

W rejonach gdzie wilgotność powietrza jest wysoka, czynnik osuszający może nie odebrać wystarczającej ilości wilgoci od powietrza zewnętrznego, co spowoduje mniejszą ilość odparowanej wody w komorze zraszającej. Efektem tego może być nie osiągnięcie oczekiwanej temperatury powietrza trafiającego do pomieszczeń. Rozwiązaniem jest podwyższanie temperatury powietrza regenerującego rotor.

4. WYBÓR TECHNOLOGII ODPOWIEDNIEJ DO POLSKICH WARUNKÓW KLIMATYCZNYCH

Dokonując wyboru technologii, należy uwzględnić charakterystykę promieniowania słonecznego. Najważniejszymi wielkościami charakteryzującymi dany obszar i promieniowanie słoneczne na tym obszarze są: gęstość strumienia promieniowania słonecznego [W/m^2], napromieniowanie słoneczne [kWh/m^2], usłonecznienie [h].

W klimatyzacji słonecznej największe znaczenie ma gęstość strumienia energii oraz napromieniowanie dzienne lub godzinowe. Dla instalacji z kolektorami skupiającymi ważną wielkością jest również usłonecznienie, ponieważ tylko w czasie, gdy widoczna jest tarcza słoneczna kolektory te działają wydajnie. Dzięki znajomości napromieniowania lub gęstości strumienia promieniowania słonecznego możliwe jest oszacowanie mocy zaprojektowanego systemu oraz energii, jaką w danym okresie wytworzy.

Dla systemów chłodniczych, które mają za zadanie działać jak najdłużej ważne jest usłonecznienie. W warunkach polskich w ciągu roku mamy około 1600 godzin operacji słonecznej, jest to zaledwie 18% całego roku. Dodatkowo napromieniowanie również nie jest duże, waha się w granicach $3400\text{MJ/m}^2 - 3600\text{MJ/m}^2$ rocznie [3]. Biorąc pod uwagę te wartości jedynym realnym zastosowaniem dla chłodzenia słonecznego jest praca szczytowa, czyli wspomaganie konwencjonalnych instalacji chłodzenia w czasie występowania najwyższych temperatur lub do zastosowań w klimatyzacji.

Polska leży pomiędzy 49° a $54,5^\circ$ szerokości geograficznej północnej, z tego względu jej warunki słoneczne nie są najkorzystniejsze. Ponad 50% promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni jest to promieniowanie rozproszone [3].

Kolektory płaskie są najprostszym rodzajem kolektorów, przez co ich cena jest najniższa. Uzyskują one jednak najniższe temperatury z powodu największy strat ciepła do otoczenia. Zaletą wykorzystania tego rodzaju kolektorów jest to, że wykorzystują one nie tylko promieniowanie słoneczne bezpośrednie, ale także rozproszone oraz odbite. W warunkach polskich ma to duże znaczenie.

Podobnymi zaletami charakteryzują się kolektory próżniowe, one także wykorzystują promieniowanie rozproszone oraz odbite. Dodatkowo dzięki stosowaniu próżni w przestrzeni pomiędzy osłoną a absorberem ograniczona jest konwekcyjna wymiana ciepła, czyli straty ciepła. Z tego powodu mogą one uzyskiwać wyższe temperatury od kolektorów płaskich. Ze względu na bardziej skomplikowaną budowę koszt ich jest większy.

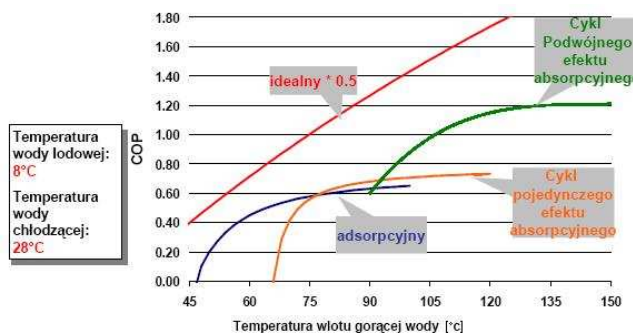
Kolejnym typem kolektorów są kolektory skupiające, dzięki nim możliwe jest uzyskiwanie najwyższych temperatur. Koncentracja promieni słonecznych na małej powierzchni ogranicza straty ciepła od absorbera do otoczenia. Wadą tego rodzaju kolektorów jest wykorzystywanie głównie promieniowania słonecznego bezpośredniego. Wysoka cena oraz niewielkie napromieniowanie bezpośrednie na terenie Polski powodują, że kolektory skupiające o dużej koncentracji promieni słonecznych nie znajdują szerszego zastosowania.

Tabela 1. Zakres temperatury pracy różnych rodzajów kolektorów wykorzystywanych do chłodzenia/klimatyzacji [4]

Table 1. The range of the temperature work of the different kinds of the collectors utilizing for cooling and air conditioning

| Rodzaj kolektora słonecznego: | Zakres temperaturowy pracy: |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Kolektory płaskie | 55°C÷85°C |
| Kolektory próżniowe | 75°C÷150°C |
| Kolektory skupiające jednoosiowe | 120°C÷250°C |

Rodzaj kolektorów słonecznych ogranicza w pewnym stopniu wybór chłodziarki. Chłodziarka absorpcyjna dwustopniowa pracuje przy najwyższych temperaturach (około 120°C), kolektorami, które z nią najlepiej współpracują są kolektory skupiające. Ze względu na nieopłacalność stosowania kolektorów skupiających w Polsce, nie można stosować chłodziarki absorpcyjnej dwustopniowej. Na rysunku 3 przedstawiono zależność współczynnika COP od temperatury zasilania w systemach adsorpcyjnych oraz absorpcyjnych, oraz zakresy temperatur pracy danych systemów.

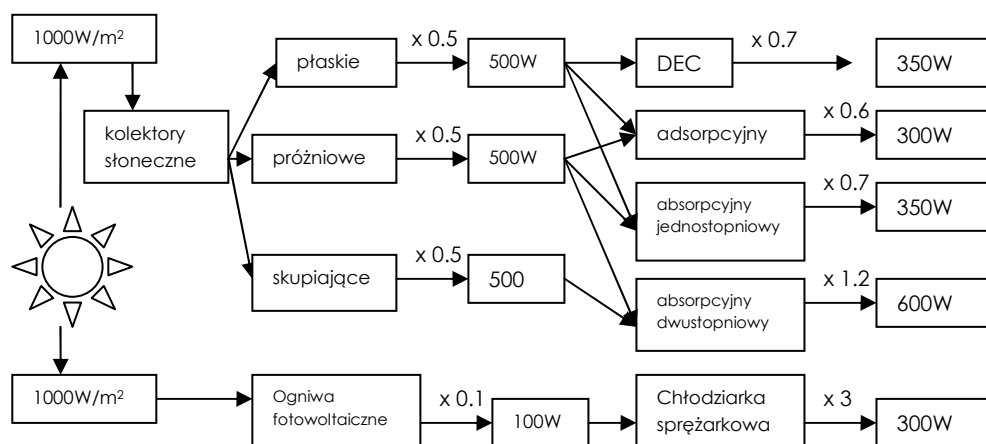


Rys. 4. Wykres zależności współczynnika COP od temperatury wlotu [2]

Fig. 4. The diagram of the dependence of the coefficient COP from the temperature of the inflow [2]

W celu porównania wszystkich rodzajów chłodzenia słonecznego zamieszczono schemat (rys. 4), przedstawiający kolejne etapy przetwarzania energii oraz ich sprawności w zależności od technologii. Moce obrazują możliwości danej instalacji do wytwarzania chłodu z 1m² odbiornika energii słonecznej. Na schemacie uwzględniona jest również klimatyzacja/chłodzenie wykorzystujące ogniwa fotowoltaiczne. Sprawność wszystkich rodzajów kolektorów przyjęto jako 50% [7].

Na podstawie schematu można również wyznaczyć całkowitą efektywność konwersji energii słonecznej w chłód. Jest to stosunek mocy końcowej instalacji chłodniczej do natężenia promieniowania słonecznego. Największą wydajność rzędu 0,6 ma system absorpcyjny dwustopniowy. Najmniejszą mają system adsorpcyjny oraz system ogniw fotowoltaicznych zasilających chłodziarkę sprężarkową. Na podstawie wydajności całego systemu oszacować można również powierzchnię odbiornika energii promieniowania słonecznego (kolektory/ogniwa fotowoltaiczne). W przypadku chłodzenia/klimatyzacji słonecznej największy problem stanowi wymagana powierzchnia odbiornika oraz związany z nią koszt.



Rys. 5. Schemat pokazujący sprawności / wydajności kolejnych procesów przetwarzania energii dla różnych technologii [7]

Fig. 5. Schematic diagram showing the efficiency and the output of the following processes of the energy transformation for different technologies [7]

Czas pracy instalacji w ciągu roku jest względnie krótki, więc najlepszym rozwiązaniem wydaje się wybór najtańszej technologii. Takim rozwiązaniem będzie połączenie kolektorów płaskich z chłodziarką absorpcyjną. W obliczeniach przedstawionych w następnym punkcie uwzględniono również kolektory próżniowe jako źródło zasilania chłodziarki. W Polsce działać może również chłodziarka adsorpcyjna z kolektorami płaskimi, uzyskuje ona lepsze współczynniki COP przy niższych temperaturach zasilania. Wadą takiego rozwiązania jest wysoka cena chłodziarki. Nieuwzględniono w rozważaniach technologię DEC, która dopiero w przyszłości może być bardzo dobrą alternatywą dla wyżej wymienionych technologii. Połączenie ogniw fotowoltaicznych z chłodziarką sprężarkową również zostało wzięte pod uwagę. Całkowita wydajność takiej instalacji może wynieść ponad 30%. Do układu (ogniwa, chłodziarka sprężarkowa) należy dołączyć akumulator, ogranicza to wielkość i moc takiej instalacji. Dodatkową przeszkodą jest wysoka cena ogniw fotowoltaicznych oraz akumulatorów.

5. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY INSTALACJI CHŁODZENIA SŁONECZNEGO W DOMU JEDNORODZINNYM W WARUNKACH POLSKICH

Obliczenia przeprowadzono dla dwóch wariantów instalacji chłodzenia słonecznego, w obu przypadkach urządzeniem chłodniczym jest chłodziarka absorpcyjna bromowo-litowa zasilana w pierwszym wariantcie kolektorami płaskimi, w drugim kolektorami próżniowymi. Przeprowadzono obliczenia zapotrzebowania na moc chłodniczą dla przykładowego domu jednorodzinnego. Zapotrzebowanie na moc chłodniczą obliczone na podstawie średnich danych meteorologicznych (temperatura, promieniowanie słoneczne) w miesiącu czerwcu wynosi 3,5kW[5]. Jest to średnie obciążenie w godzinach intensywnej operacji słonecznej. Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń największy udział w zapotrzebowaniu na moc chłodniczą (klimatyzacyjną) budynku mają zyski słoneczne, w obliczeniach nie uwzględniono rozwiązań obudowy budynku, które mogą ograniczyć te zyski (rolety, zasłony, zadaszenia i inne elementy zacieniające).

Następnie oszacowano parametry pracy obiegu chłodziarki absorpcyjnej. Przyjęto następujące założenia obiegu chłodniczego:

- temperatura w skraplaczu 35°C,
- temperatura w parowniku 6°C,
- stężenie masowe bromku litu w roztworze opuszczającym absorber: 57,5%,
- stężenie masowe bromku litu w roztworze opuszczającym desorber: 60%.

Obliczona temperatura w absorberze wynosi ponad 40°C, co jest prawidłowe, ponieważ temperatura ta musi być większa od temperatury otoczenia, absorber, jak i skraplacz oddają ciepło do otoczenia, poprzez wymiennik. Założone urządzenie jest wyposażone w typowy wymienniki ciepła oddający ciepło do powietrza zewnętrznego. Obliczona temperatura w desorberze wyniosła prawie 80°C, na podstawie tej informacji oraz wymaganej mocy urządzenia obliczona została wymagana powierzchnia kolektorów słonecznych. Dla zadanych parametrów powierzchnia ta wyniosła: dla kolektorów płaskich 54,5m²; dla kolektorów próżniowych: 14,4m².

Obliczenia kolektorów słonecznych przeprowadzono wykorzystując równanie Hottela-Whillera-Bliska [9]. Natężenie promieniowania słonecznego przyjęto jako 750W/m² [3]. Zmieniając zadane parametry początkowe obiegu chłodziarki (w granicach możliwych do uzyskania) obliczono najmniejszą możliwą do zastosowania powierzchnię kolektorów. Najmniejsza powierzchnia kolektorów słonecznych próżniowych przy uwzględnieniu założonych warunków zewnętrznych wyniosła 11 m². Wynik ten uzyskano dla temperatury desorbera równej 85°C, absorbera 35°C oraz temperatury w parowniku 10°C. Przy takich temperaturach chłodziarka uzyska współczynnik wydajności chłodniczej równy 0,68. Najmniejsza powierzchnia kolektorów słonecznych płaskich wyniosła 32,5m² przy następujących temperaturach: desorber 69°C, absorber 35°C oraz parownik 10°C. Przy takich temperaturach współczynnik wydajności chłodniczej odpowiada 0,55.

Zaprezentowany przykład obliczeniowy daje przybliżone wartości i wielkości parametrów instalacji chłodzenia słonecznego wykorzystującej absorpcyjną chłodziarkę bromowo litową oraz kolektory słoneczne w warunkach krajowych.

6. PODSUMOWANIE

Przedstawione systemy wykorzystujące innowacyjne technologie słoneczne mogą być zasilane również z konwencjonalnych źródeł energii. Jednak dzięki temperaturowemu zakresowi pracy odpowiadającemu zakresowi pracy kolektorów słonecznych, systemy chłodzenia słonecznego mogą bardzo dobrze uzupełniać lub zastępować konwencjonalne systemy chłodnicze. Obecnie większość proponowanych systemów przeznaczona jest do większych obiektów (budynki biurowe, hale fabryk czy magazyny). W Polsce chłodzenie słoneczne może znaleźć zastosowanie do zapewnianie mocy szczytowej latem w chłodniach czy magazynach, lub jako chłodzenie w budynkach o przeznaczeniu biurowym. Chłodzenie słoneczne w budownictwie jednorodzinnym jest jeszcze sprawą przyszłości.

Obecne koszty instalacji chłodzenia słonecznego są znaczne, jednak przy coraz większym rozpowszechnieniu tej technologii będą się one zmniejszać. Najważniejszymi argumentami przemawiającymi za technologiami słonecznymi jest redukcja szczytowego obciążenia sieci elektro-energetycznej oraz redukcja emisji CO₂. Dzięki zastosowaniu chłodzenia/klimatyzacji słonecznej możliwe jest wyrównanie dziennego zapotrzebowania na moc. W polskich warunkach klimatycznych zapotrzebowanie na moce chłodnicze i klimatyzacyjne nie będzie dominującym czynnikiem warunkującym maksymalne zapotrzebowanie na moc w systemie elektroenergetycznym. Może mieć jednak swój znaczny udział w zapotrzebowaniu na moc latem, dlatego też zastosowanie instalacji słonecznych chłodzenia może istotnie obniżyć spodziewany wzrost obciążeń w tym czasie.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Badyda K.: Współczesne technologie chłodnicze a wykorzystanie energii słonecznej, Polska Energetyka Słoneczna, Nr 2/2005.
- [2] Cameron A., Keeping cool: Solar air-conditioning, Renewable Energy World, Vol 9 Issue 5 September / October 2006.
- [3] Chwieduk D.: Modelowanie i analiza pozyskiwania oraz konwersji termicznej energii promieniowania słonecznego w budynku, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa 2006.
- [4] Chwieduk D.: Wykłady przeznaczone dla studentów wydziału MEiL Politechniki Warszawskiej – Pompy Ciepła, 2009.
- [5] Chwieduk M.: Chłodzenie słoneczne – praca inżynierska, Warszawa 2010.
- [6] Fan Y., Luo L., Souyri B., Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews 11 (2007) 1758–1775, January 2006.
- [7] Kima D.S., Infante Ferreira C.A., Solar refrigeration options – a state-of-the-art review, International journal of refrigeration 31 (2008) 3 – 15, November 2006.
- [8] Pluta Z.: Podstawy teoretyczne fototermicznej konwersji energii słonecznej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2000.
- [9] Pluta Z.: Słoneczne instalacje energetyczne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2003.
- [10] Polskie Sieci Elektroenergetyczne Operator S.A. raport za rok 2008.
- [11] <http://www.pse-operator.pl/> - Polskie Sieci Elektroenergetyczne Operator S.A.

SOLAR COOLING

SUMMARY

At the beginning of the paper the future importance of solar cooling in Poland and in the world is explained. Factors that show the importance of this technology are presented. Different ways of cooling powered by solar energy are shown and analysed. Systems in which solar collectors supply heat to adsorption chillers, absorption chillers or DEC (desiccative and evaporative cooling) chillers are described. Afterwards Polish climate and solar conditions are presented and based on these conditions the most appropriate solar cooling system is selected. Calculations of absorption solar cooling system for a single family house are described. General and detailed conclusions based on calculations and analyses performed are presented. Also opinion about the future development of solar cooling market is expressed.

Krystian CIEŚLAK*, mgr;
Jan M. OLCHOWIK**, prof. dr hab. inż.;
Sławomir GUŁKOWSKI*, mgr

*Politechnika Lubelska
Instytut Fizyki
ul. Nadbystrzycka 38, 20-618 Lublin
e-mail: k.cieslak@pollub.pl

**PWSZ im. Papieża Jana Pawła II, Biała Podlaska
ul. Sidorska 95/97, 21-500

OPTIMALIZACJA PROCESU EPITAKSJI Z FAZY CIEKŁEJ DO ZASTOSOWAN FOTOWOLTAICZNYCH

STRESZCZENIE

W pracy zaprezentowano technologię wytwarzania cienkich warstw krzemowych do zastosowań fotowoltaicznych. Proces oparty jest o technologię epitaksji z fazy ciekłej. Analiza rezultatów przedstawiająca gęstość prądu zawarcia w zależności od parametrów epitaksji z fazy ciekłej pozwala na znalezienie optymalnych warunków technologicznych dla procesu.

1. WPROWADZENIE

W dzisiejszym Świecie zapotrzebowanie na energię stale rośnie, a złoża paliw kopalnych, które stanowią podstawę przemysłu energetycznego powoli są wyczerpywane. Fakt ten powoduje, że rozwój nowych technologii pozyskiwania energii jest bardzo dynamiczny, szczególnie nacisk jest kładziony na źródła odnawialne takie jak wiatr, woda czy Słońce. Fotowoltaika jest dziedziną nauki zajmującą się przetwarzaniem promieniowania słonecznego bezpośrednio na prąd elektryczny w procesie bezemisyjnym. Stabilność Słońca jako źródła energii, rosnące koszty wydobycia paliw kopalnych oraz malejące koszty produkcji ogniw słonecznych pozwalają sądzić, że udział ogniw słonecznych w produkcji energii na świecie będzie stale rósł.

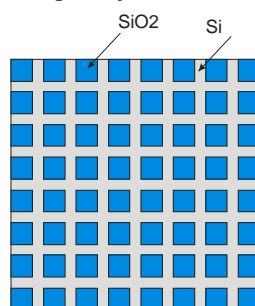
Można wyróżnić dwa główne trendy w rozwoju fotowoltaiki, pierwszy z nich ma na celu zwiększenie wydajności ogniw słonecznych natomiast drugi zmniejszenie ceny za ogniwo. Dla konsumenta oba te trendy sprowadzają się do jednego: obniżenia ceny za jednostkę energii elektrycznej.

Wytwarzanie ogniw słonecznych za pomocą epitaksji z fazy ciekłej (Liquid Phase Epitaxy LPE) wpisuje się w drugi trend – obniżenia kosztów produkcji ogniw. Epitaksja z fazy ciekłej jest procesem stosunkowo tanim i prostym, nie wymaga dużych ilości

krzemu, a materiały użyte w trakcie wzrostu mogą być używane ponownie. Wszystkie te cechy powodują, że stosowanie LPE do wytwarzania podłoży pod ogniwa słoneczne wydaje się być dobrym rozwiązaniem.

2. EKSPERYMENT

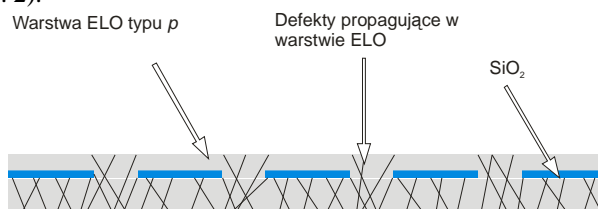
Jako podłoże wzrostowe została wykorzystana płytka krzemowa typu $p+$ domieszkowana borem. Na powierzchni krzemu został naniesiony w temperaturze 920°C w czasie 4 godzin termiczny ditlenek krzemu (SiO_2) o grubości 120nm . Kolejnym etapem procesu tworzenia podłoża wzrostowego była fotolitografia. Używając specjalnie zaprojektowanej maski w warstwie SiO_2 zostały otwarte okna (Rys. 1) pozwalające na wzrost warstwy krzemu w późniejszym procesie epitaksji.



Rys. 1. Schemat powierzchni podłoża wzrostowego z otwartymi oknami krzemowymi. Rozmiary okien dla trzech różnych użytych masek: $5\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, rozmiary „wysp” z SiO_2 – $80\times 80\mu\text{m}$, $50\times 50\mu\text{m}$, $70\times 70\mu\text{m}$.

Fig. 1. Schematically shown surface of the silicon growing substrate. Dimensions of the silicon windows in samples used in the experiment - $5\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$. Dimensions of the SiO_2 “islands” – $80\times 80\mu\text{m}$, $50\times 50\mu\text{m}$, $70\times 70\mu\text{m}$.

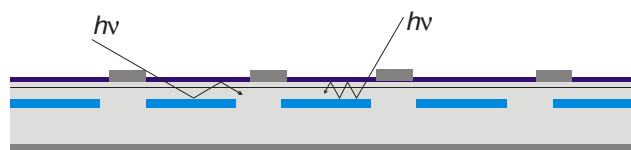
Struktura opisana powyżej ma dwie zasadnicze role: ditlenek krzemu tworzy jako dielektryk warstwę buforową i ogranicza wzrost krzemu jedynie do otwartych okien w kierunku lateralnym oraz wertykalnym. W rezultacie otrzymuje się jednolitą warstwę krzemową, która powstaje na powierzchni próbki. W ten sposób uzyskana warstwa ma od kilku do kilkudziesięciu razy mniejszą gęstość defektów strukturalnych [1] niż podłoże wzrostowe, ponieważ warstwa ditlenku krzemu zatrzymuje propagację defektów do warstwy epitaksjalnej (Rys. 2).



Rys. 2. Schemat propagacji defektów strukturalnych z podłoża wzrostowego do warstwy epitaksjalnej.

Fig. 2. Propagation of structural defects from a growing substrate to an epitaxial layer.

Druga funkcja związana jest z efektem odbicia wewnątrz materiału, zwiększająca efektywność konwersji baterii słonecznych wytworzonych z powyższych struktur. Współczynnik załamania światła o długości odpowiadającej maksymalnemu natężeniu promieniowania na powierzchni Ziemi ($\lambda=500\text{ nm}$) w krzemie wynosi 3,42, natomiast w ditlenku krzemu 1,46. Z elementarnych zależności [2] można obliczyć kąt graniczny powyżej którego następuje zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia od granicy ośrodków Si-SiO₂. Wnosi on $\alpha_{gr}=25,46^\circ$. Powoduje to zwielokrotnienie drogi optycznej wewnątrz struktury ogniwa (Rys. 3).



Rys. 3. Efekt całkowitego wewnętrznego odbicia zwiększający drogę optyczną promienia świetlnego o energii $h\nu$ zachodzący wewnątrz materiału.
Fig. 3. Total internal reflection inside a meterial.

Kolejnym etapem wytwarzania krzemowych warstw jest proces epitaksji z fazy ciekłej. Jako roztwór metaliczny użyta została cyna z dodatkiem aluminium. Stężenie aluminium w cynie nie przekraczało 0,13%, co pozwoliło na domieszkowanie warstw krzemowych (IV grupa w układzie okresowym) pierwiastkiem z III grupy uzyskując w ten sposób materiał o przewodnictwie typu p .

Do epitaksji z fazy ciekłej została wykorzystana grafitowa łódka [3] ze „ślajderem”, pozwalającym na wymianę podłoża pod roztworem w czasie trwania procesu. Argon spełniał rolę gazu roboczego.

W pierwszym etapie wzrostu metaliczny roztwór został nasycony krzemem w temperaturze 920°C . Następnym krokiem było umieszczenie podłoża wzrostowego pod nasyconym roztworem. Schładzanie całego układu w ściśle kontrolowany sposób ze stałym stopniem przechłodzenia (*cooling rate* – c.r.) powoduje przesylenie roztworu i krystalizację nadmiarowego krzemu na podłożu wzrostowym. Różnica temperatur ΔT wynosiła 60°C i była wystarczająca do uzyskania ciągłej krzemowej warstwy.

W eksperymencie zostały wykorzystane trzy różne maski pozwalające na uzyskanie podłoża wzrostowych o stopniu przekrycia przez SiO₂: 60%, 70%, 85%. Szybkość przechłodzenia roztworu wynosiła $0,75^\circ\text{C/min}$.

Struktury uzyskane w tym procesie zostały wykorzystane do produkcji ogniw słonecznych. Standardowa procedura: dyfuzja fosforu na górnej powierzchni pozwoliła na utworzenie złącza p - n , warstwa antyrefleksyjna została uzyskana przez naniesienie warstwy azotku krzemu na górną powierzchnię. Poprzez proces fotolitografii zostały wytrawione w SiN_x okna pod kontakty metaliczne. Jako przednia elektroda została użyta mieszanka metali Ag-Tn-Pl, tylna elektroda została wykonana z aluminium.

W ten sposób uzyskane baterie (Rys. 4) zostały poddane analizie pod kątem charakterystyki I - V oraz gęstości prądu zwarcia.



Rys. 4. Struktura ogniwa słonecznego wytworzonego z krzemowych lateralnych warstw epitaksjalnych.

Fig. 4. Structure of a solar cell obtained from silicon epitaxial lateral layers.

3. REZULTATY

Na podstawie charakterystyki I - V dla każdego ogniwa został określony prąd zwarcia (I_{SC}) – prąd dla którego napięcie na ogniwie jest równe zero. Wielkość ta informuje o ilości nośników prądu wygenerowanych przez światło, które zostały rozseparowane na złączu p - n . Żeby porównać prądy zwarcia dla poszczególnych baterii trzeba uniezależnić tę wielkość od powierzchni czynnej ogniwa, dlatego zwykle stosuje się wielkość zwaną gęstością prądu zwarcia J_{sc} zdefiniowaną jako:

$$J_{sc} = \frac{I_{sc}}{S}, \quad (1)$$

gdzie S jest powierzchnią górnej części ogniwa pomniejszona o powierzchnię przednich kontaktów.

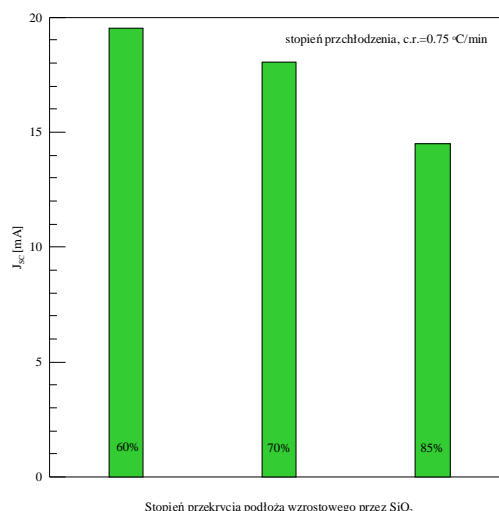
Wyniki są przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Gęstość prądu zwarcia w zależności od stopnia przekrycia przez ditlenek krzemu podłoża wzrostowego, stopień przechłodzenia podczas epitaksjalnego wzrostu $0,75^\circ\text{C}/\text{min}$.

Table 1. Current density dependence on SiO_2 coverage on the growing substrate. Cooling rate during epitaxial growth – $0,75^\circ\text{C}/\text{min}$.

| Stopień przekrycia podłoża wzrostowego przez SiO_2 | J_{sc} [mA] |
|--|---------------|
| 60% | 19,50 |
| 70% | 18,06 |
| 85% | 14,49 |

Na podstawie powyższych wyników został sporządzony diagram (Rys. 5).



Rys. 5. Diagram zależności gęstości prądu zwarcia od stopnia przekrycia podłoża wzrostowego przez SiO₂

Fig. 5. Dependence of the current density on SiO₂ coverage on the growing sample.

Na powyższym diagramie można zaobserwować pewną korelację stopnia przekrycia przez SiO₂ podłoża wzrostowego z gęstością prądu zwarcia - wraz ze wzrostem stopnia przekrycia gęstość prądu zwarcia maleje. Różnica pomiędzy próbką ze stopniem przekrycia 60%, a 85% sięga 25%.

Należy również podkreślić, że struktury wykorzystane do wytworzenia badanych fotoogniw zostały otrzymane w procesie epitaksji z fazy ciekłej przy stopniu przechłodzenia $c.r.=0,75\text{ }^{\circ}\text{C/min}$.

4. PODSUMOWANIE

Według teoretycznych założeń, gęstość prądu zwarcia powinna rosnąć wraz ze wzrostem stopnia przekrycia przez SiO₂ - ze względu na dłuższą drogę optyczną światła. Decydującym czynnikiem przy tej analizie okazuje się być również stopień i szybkość przechładzania roztworu podczas wzrostu epitaksjalnego. Zbyt duży *cooling rate* powoduje szybszy wzrost warstwy, a co za tym idzie większą gęstość defektów. Szybki wzrost może mieć też wpływ na powstanie kilku-nanometrowej luki pomiędzy warstwą dielektryka, a warstwą epitaksjalną [4, 5], co skutkuje złą pasywacją powierzchni tylnej i wysokim stopniem rekombinacji wygenerowanych nośników.

Na podstawie powyższych wyników można stwierdzić, że w celu optymalizacji struktur w procesie epitaksji oprócz odpowiedniego projektu maski należy również zwrócić uwagę na sposób przechładzania roztworu wzrostowego podczas wzrostu warstwy ELO.

Szybkość wzrostu (*cooling rate*) $0,75^{\circ}\text{C}/\text{min}$ wydaje się być nieodpowiednia do zastosowań fotowoltaicznych.

5. LITERATURA

- [1] J. Kraiem, A. Fave, A. Kaminski, M. Lemiti, I. Jozwik, J.M. Ochowik, *18th European Photovoltaic Solar Energy Conference*; Paris, May 2004, 1158-1161.
- [2] D. Holiday, R. Resnic, J. Walker; *Podstawy Fizyki*, tom 4; Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2003.
- [3] S. Kasap, P. Capper, *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*, chap. 14; Springer 2006
- [4] H. Raidt, R. Kohler, F. Banhart, B. Jenichen, A. Gutjahr, M. Konuma, I. Silier, E. Bauser; *Journal of Applied Physics* 80(7) (1996) 4101.
- [5] K. Cieslak, A. Fave, S. Gulkowski, J. M. Olchowik, I. Józwik, M. Lemiti, K. Kutsukake, W. Pan, N. Usami; *Proceedings of the 23th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 1-5 September 2008, Valencia, Spain, (CD) p. 2258

OPTIMALIZATION OF THE LIQUID PHASE EPITAXY PROCESS FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS

SUMMARY

This work presents a technology of producing thin film silicon layers for photovoltaic applications which is based on a liquid phase epitaxy. Analysis of the results obtained in the experiment enables to establish a short circuit current density dependence on the liquid phase epitaxy parameters. This can be used to find optimal conditions for the process.

Dariusz CZEKAŁSKI, dr inż.,
Paweł OBSTAWSKI, dr inż.,
Rafał KORUPCZYŃSKI, dr inż.

SGGW w Warszawie
Katedra Podstaw Inżynierii
ul. Nowoursynowska 164, 02-787 Warszawa
e-mail: dariusz_czekalski@sggw.pl

MIKROELEKTROWNIA WODNA JAKO PRODUCENT ENERGII NA POTRZEBY WŁASNE - STUDIUM PRZYPADKU

STRESZCZENIE

W referacie zaprezentowano przykład mikroelektrowni wodnej produkującej energię na potrzeby gospodarstwa domowego i rolnego. Scharakteryzowano przebieg produkcji w ciągu roku z podziałem na zużycie własne i transfer do sieci dystrybucyjnej. Obliczono sumaryczne efekty ekonomiczne analizowanego przypadku.

1. SYSTEM WSPARCIA PRODUKCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ ZE ŹRÓDEŁ ODNAWIALNYCH

Fundamentem dla systemu wsparcia produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych jest rozróżnienie pochodzenia wyprodukowanej i sprzedawanej energii, gdyż energia z różnych typów elektrowni fizycznie niczym się nie różni. Dowodem na wyprodukowanie energii elektrycznej ze źródła odnawialnego (elektrowni wodnych, wiatrowych, biogazowych, biomasowych lub tylko z udziałem biomasy stałej oraz ze słonecznych ogniw fotowoltaicznych) jest wydawane przez Urząd Regulacji Energetyki *świadcstwo pochodzenia* koloru zielonego. Rozwiązanie takie zostało wprowadzone w UE na podstawie dyrektywy 2001/77/EC i wdrożone w Polsce ustawową nowelizacją *Prawa energetycznego* z dniem 1 października 2005 roku [1]. Posiadanie nie umorzonych *Świadcstw* daje *prawa majątkowe* realizowane na Towarowej Giełdzie Energii. Zasady obrotu energią elektryczną pochodzącą ze źródeł odnawialnych i jej *świadcstwami pochodzenia* zawarte w Ustawie i właściwych Rozporządzeniach Ministra Gospodarki praktycznie gwarantują określony poziom przychodów producentom. W zakresie obrotu samą energią elektryczną Ustawa stanowi, że *sprzedawca z urzędu* jest obowiązany do zakupu energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnych źródłach energii przyłączonych

do sieci znajdujących się w obszarze działania *sprzedawcy*, oferowanej przez przedsiębiorstwa, które uzyskały koncesje na jej wytwarzanie. Zakup ten odbywa się po średniej cenie sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym w poprzednim roku kalendarzowym (na 2009 rok - 155,44 zł/MWh). Mechanizm promowania produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych zawiera zarówno komponent stałej ilości jak też stałej ceny. Ustawa *Prawo energetyczne* nakłada na przedsiębiorstwa energetyczne, zajmujące się sprzedażą energii elektrycznej odbiorcom końcowym, obowiązek uzyskania i przedstawienia do umorzenia Prezesowi Urzędu Regulacji Energetyki *świadcstw pochodzenia*. Zakres ilościowy obowiązku wyznacza Minister Gospodarki w Rozporządzeniu okresowo nowelizowanym, tak aby z jednej strony realizować cele *Polityki energetycznej* Polski, a z drugiej zapewniać trwałą rentowność inwestycji w obszarze energetyki odnawialnej – oba cele są zbieżne. Na każdy rok wyznaczony jest procentowy udział energii na jaki mają opiewać *świadcstwa pochodzenia* w sprzedaży przedsiębiorstwa (na 2010 rok – 10,4%). Stała cena w tym mechanizmie występuje w postaci *opłaty zastępczej*, którą musi uiścić przedsiębiorstwo zobowiązane jeśli nie spełni wymogów ilościowych. Pierwotnie *opłatę* ustalono na poziomie 240 PLN za każdą brakującą MWh. Zasady rewaloryzacji tej opłaty doprowadziły ją do prawie 268 PLN w roku 2010. Przy utrzymującej się wyraźnej przewadze popytu nad podażą [2] kurs *świadcstw pochodzenia* może osiągać poziom *opłaty zastępczej*. W rzeczywistości na Towarowej Giełdzie Energii dominują transakcje pozasesyjne, w których drobni producenci akceptują poziom 230 – 250 PLN za MWh.

Szczególnym przypadkiem produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych jest jej wykorzystanie na potrzeby przedsiębiorstwa, czy też gospodarstwa należącego do producenta, czyli potocznie: na potrzeby własne. Ustawa przewiduje, że po wyposażeniu w odpowiedni układ pomiarowo-rozliczeniowy, dla energii zużytej na potrzeby własne także jest wydawane *świadcstwo pochodzenia*, co ma bardzo istotne znaczenie dla opłacalności tego rozwiązania. Jednocześnie energia tak wykorzystana obciążana jest podatkiem akcyzowym według stawki 20 PLN za MWh.

Sprzedaż samej energii elektrycznej opodatkowana jest ryczałtowo w wysokości 5,5%, natomiast jeśli chodzi o zbycie *praw majątkowych* to do 2010 roku opodatkowanie przychodu wynosiło 19% i dopiero nowelizacja Ustawy *O zryczałtowanym podatku dochodowym od niektórych przychodów osiąganych przez osoby fizyczne* wprowadziła stawkę ryczałtową 5,5%.

2. CHARAKTERYSTYKA PRZYKŁADOWEJ MIKROELEKTROWNI WODNEJ

Rozpatrywana mikroelektrownia wodna zlokalizowana jest na mazowieckiej rzece o następujących przepływach charakterystycznych w przekroju obiektu:

- przepływ średni niski: $SNQ = 2,63 \text{ m}^3/\text{s}$,
- przepływ średni roczny: $SSQ = 5,72 \text{ m}^3/\text{s}$,
- przepływ średni maksymalny: $SWQ = 27,41 \text{ m}^3/\text{s}$,
- przepływ maksymalny (najwyższy): $WWQ = 100,29 \text{ m}^3/\text{s}$,
- przepływ o prawdopodobieństwie wystąpienia raz na 100 lat: $Q_{1\%} = 112,21 \text{ m}^3/\text{s}$,
- przepływ najdłużej trwający w okresie wegetacji: $QN_{\text{weg}} = 3,66 \text{ m}^3/\text{s}$,
- przepływ nienaruszalny wg kryterium hydrobiologicznego: $Q_n = 1,53 \text{ m}^3/\text{s}$.

Przepływy maksymalne występują po długim okresie zimowym, połączonym z obfitymi opadami śniegu. Przy gwałtownym wzroście temperatury śnieg i lód zaczynają intensywnie topnieć i dochodzi do powodzi, którym często towarzyszy pochód kry lodowej. Również letnie opady mogą wpłynąć na kilkukrotne powiększenie się przepływu w rzece. Najniższy poziom wód występuje najczęściej w lecie (lipiec, sierpień), a także podczas długotrwałych mrozów w grudniu i styczniu [3].

Głównymi składowymi mikroelektrowni wodnej, która powstała na miejscu dawnego młyna, są jaz główny oraz budynek elektrowni wraz z wyposażeniem. Jaz główny (rys. 1) jest obiektem o konstrukcji żelbetowej, monolitycznej i posiada następujące parametry:

- o wysokość piętrzenia – $H = 2,1$ m,
- o światło jazu dla turbin – $4 \times 1,75$ m = 7,0 m,
- o światło główne jazu – $2 \times 2,50$ m = 5,0 m,
- o most o szerokości 2,70 m, przystosowany do ruchu pojazdów o masie 2,5 tony.



Rys. 1. Jaz z wlotami do turbin
Fig. 1. The weir and inlets to turbines



Rys. 2. Budynek mikroelektrowni
Fig. 2. The micro-hydro power station

Budynek mikroelektrowni (rys. 2) został zbudowany z konstrukcji żelbetowej, jako obiekt zblokowany z jazem głównym. Zlokalizowany jest on po lewej stronie rzeki. Charakterystyka techniczna mikroelektrowni jest następująca:

- szerokość wlotów na turbiny – 2 wloty podzielone są na 2 części, czyli $4 \times 1,75$ m = 7,0 m),
- wymiary budynku – 5,0 m na 8,0 m, posadowiony na konstrukcji komory turbinowej,
- spad użyteczny – 2,10 m.

W środku elektrowni znajdują się dwie turbiny Francisa, pionowe, pracujące w komorze otwartej, napędzające dwa generatory indukcyjne (rys. 3). Parametry turbiny I są następujące:

- średnica wirnika – $\Phi = 1300$ mm,
- przepływ nominalny – $2,40$ m³/s,
- obroty – 88 obr/min,
- moc nominalna – 40 kW.

Turbina II jest mniejsza i ma następujące parametry:

- średnica wirnika – $\Phi = 700$ mm,
- przepływ nominalny – $1,50 \text{ m}^3/\text{s}$,
- obroty – 115 obr/min,
- moc nominalna – 18 kW.

Właściciel mikroelektrowni posiada koncesję na produkcję energii elektrycznej. Elektrownia podłączona jest publicznej sieci dystrybucyjnej. Jednak w pierwszej kolejności zaspakajane są potrzeby własne gospodarstwa rolnego i domowego.



Rys. 3. Przekładnie i generatory w budynku mikroelektrowni

Fig. 3. Transmissions and generators in building of micro-power station

3. ODBIORNIKI W GOSPODARSTWIE ROLNYM I DOMOWYM

Budynek mieszkalny (rys. 4) zlokalizowany jest w bezpośrednim sąsiedztwie elektrowni. W gospodarstwie rolnym uprawia się i przechowuje ziemniaki oraz cykorię. Chłodnia (rys. 5) oraz cała infrastruktura techniczna również znajduje się w pobliżu elektrowni.



Rys. 4. Gospodarstwo domowe (mieszkanie)

Fig. 4. The household (habitable house)



Rys. 5. Gospodarstwo rolne (chłodnie)

Fig. 5. Agricultural farm (cold stores)

Zdecydowanie największa ilość energii na potrzeby gospodarstwa rolnego, wykorzystywana jest przez chłodnię. Składa się ona z trzech oddzielonych od siebie pomieszczeń. W każdym z nich znajduje się jeden agregat chłodniczy firmy BITZER wyposażony w sprężarkę półhermetyczną o mocy silnika elektrycznego 3 kW. Chłodnia w której przechowywane są ziemniaki i cykorja, wykorzystywana jest w pełni w okresie zimowym, oraz wiosennym. Prowadzona działalność rolnicza, wymaga od właściciela posiadania wielu urządzeń agrotechnicznych wymagających w razie potrzeby natychmiastowej naprawy. Naprawy odbywają się w warsztacie, w którym zgromadzone są urządzenia elektryczne takie jak: spawarka, szlifierka, wiertarka, pilarka itp. Narzędzia te wykorzystywane są okresowo, jednak również zaliczane są jako znaczące odbiorniki energii elektrycznej. Budynek mieszkalny także posiada energochłonne urządzenia, które wpływają w znacznym stopniu na wykorzystanie energii na potrzeby własne. Urządzeniem, które służy do ogrzewania budynku jest pompa ciepła o mocy silnika 6 kW. Pompa ciepła wykorzystywana jest przede wszystkim w okresie jesienno-zimowym, ale również włączana jest czasowo w okresie wiosennym. Do ogrzewania ciepłej wody użytkowej w budynku służą trzy termy. Są one wyposażone w grzałki elektryczne o mocy 1,5 kW. Urządzenia te wykorzystywane są w budynku mieszkalnym przez cały rok. W rezerwie wyposażenia pozostaje kocioł węglowy, który w przypadku awarii elektrowni służy do ogrzewania budynku oraz ciepłej wody użytkowej. W budynku mieszkalnym znajdują się również mniej energochłonne urządzenia takie jak: radio, telewizor czy komputer oraz sprzęt gospodarstwa domowego typu pralka, lodówka itp.

4. PRZEBIEG PRODUKCJI ENERGII W MIKROELEKTROWNI

W mikroelektrowni wodnej produkowana jest energia, która wykorzystywana jest w dwóch kierunkach:

- sprzedaż do Zakładu Energetycznego,
- wykorzystanie na potrzeby własne.

Do lutego 2007 roku liczniki znajdujące się w budynku elektrowni ewidencjonowały tylko energię sprzedawaną do zakładu energetycznego. Energia, którą gospodarstwo wykorzystywało na własne potrzeby nie była rejestrowana na oddzielnym liczniku. W związku z tym właściciel uzyskiwał przychody tylko ze sprzedaży energii oraz za sprzedaż *praw majątkowych do świadectw pochodzenia*. Oczywiście nie płacił za energię, którą wykorzystywał na własne potrzeby, ale i nie otrzymywał do niej *świadectw pochodzenia*. W marcu 2007 roku został założony licznik energii, która jest zużywana na potrzeby gospodarstwa, dzięki czemu właściciel może otrzymywać *świadectwa pochodzenia* dla całości produkowanej energii elektrycznej.

Produkcja energii elektrycznej uzależniona jest w największym stopniu od przepływu rzeki. Największe przepływy występują zazwyczaj w okresie wiosennym. W czasie łagodnej zimy, gdy na rzece nie zalega kora lodowa, przepływy również mogą osiągnąć poziom odpowiedni do pracy dwóch turbin jednocześnie. Najniższy poziom wody w rzekach notowany jest z reguły w miesiącach letnich, zwłaszcza w latach suchych.

W tabeli 1 zestawiono miesięczne wielkości całkowitej produkcji mikroelektrowni oraz część przypadającą na zużycie własne w dwóch latach liczonych od kwietnia do marca. W badanym okresie, ale i w latach poprzednich najwyższy poziom produkcji

notowano w kwietniu – sięgający 33 MWh. Zwykle od października do maja produkcja miesięczna przekracza 25 MWh. W okresie letnim produkcja wyraźnie spada, w latach suchych do 10 ÷ 15 MWh. Wskaźnik zmienności, czyli stosunek odchylenia standardowego do średniej produkcji miesięcznej wynosi w tej mikroelektrowni 0,19 ÷ 0,35. Łączna roczna produkcja energii w badanych okresach była na poziomie 286 MWh (maksymalnie w ostatniej dekadzie zanotowano 340 MWh).

Produkowana w elektrowni wodnej energia elektryczna wykorzystywana jest w znacznym stopniu do zaspokojenia potrzeb energetycznych budynku mieszkalnego oraz gospodarstwa rolnego. Najniższe zapotrzebowanie występuje od maja do września i wynosi wówczas 2 ÷ 3 MWh miesięcznie. Okres zimowy wiąże się z dużo większym zapotrzebowaniem na energię dochodzącym do 13 ÷ 15 MWh. Wynika to z wykorzystywania wszystkich agregatów chłodniczych, które utrzymują stałą temperaturę w chłodniach oraz z pracy pompy ciepła. W niektórych miesiącach zimowych blisko 54% energii produkowanej pochłaniają potrzeby własne. W obu sezonach po ok. 33% produkcji przypadło na ten cel (~95 MWh). Ilość produkowanej energii przez mikroelektrownię w pełni zaspakaja potrzeby własne w każdym okresie roku. Spadek wydajności mikroelektrowni latem pokrywa się z niewielkimi potrzebami. Szczyt zużycia energii w gospodarstwie z kolei przypada na okres wzmózonych możliwości produkcyjnych mikroelektrowni.

Tabela 1. Produkcja energii w mikroelektrowni w poszczególnych miesiącach

Table 1. The energy production in micro-hydro power station, individually in months

| Rok/miesiąc | 2007/2008 | | | 2008/2009 | | |
|-------------|---------------------|--------------------------|--------------|---------------------|--------------------------|--------------|
| | produkcja całkowita | w tym na potrzeby własne | udział | produkcja całkowita | w tym na potrzeby własne | udział |
| | MWh | | % | MWh | | % |
| Kwiecień | 29,408 | 6,396 | 21,75 | 32,860 | 11,806 | 35,93 |
| Maj | 29,206 | 3,641 | 12,47 | 26,141 | 4,232 | 16,19 |
| Czerwiec | 21,808 | 2,372 | 10,87 | 14,261 | 2,241 | 15,71 |
| Lipiec | 14,876 | 1,914 | 12,87 | 11,403 | 2,055 | 18,02 |
| Sierpień | 14,028 | 2,354 | 16,78 | 12,247 | 2,271 | 18,54 |
| Wrzesień | 15,221 | 2,837 | 18,64 | 16,999 | 3,196 | 18,80 |
| Październik | 24,383 | 6,666 | 27,34 | 25,987 | 6,420 | 24,70 |
| Listopad | 27,050 | 14,589 | 53,93 | 21,717 | 8,164 | 37,59 |
| Grudzień | 27,136 | 13,657 | 50,33 | 31,547 | 13,365 | 42,37 |
| Styczeń | 27,946 | 14,485 | 51,83 | 28,965 | 15,605 | 53,88 |
| Luty | 28,007 | 13,619 | 48,63 | 32,383 | 13,893 | 42,90 |
| Marzec | 27,470 | 11,436 | 41,63 | 31,259 | 12,229 | 39,12 |
| SUMA | 286,539 | 93,966 | 32,79 | 285,769 | 95,479 | 33,41 |
| Miesiąc max | 29,408 | 14,589 | 53,93 | 32,860 | 15605 | 53,88 |
| Miesiąc min | 14,028 | 1,914 | 10,87 | 11,403 | 2,055 | 15,71 |

5. OPŁACALNOŚĆ PRODUKCJI ENERGII NA POTRZEBY WŁASNE

Pojęcie opłacalności opiera się na porównaniu możliwych rozwiązań alternatywnych. W rozpatrywanym przypadku energia elektryczna produkowana przez mikroelektrownię może być, w pierwszym wariancie, w całości sprzedawana do sieci dystrybucyjnej; wtedy energię na własne potrzeby należy kupić od lokalnego dostawcy. W drugim wariancie, realizowanym w praktyce, energia produkowana przez mikroelektrownię w pierwszej kolejności zasila gospodarstwo rolne i domowe, a nadwyżki sprzedawane są do sieci. Porównania wariantów dokonano dla realiów cenowych z 2009 roku.

W pierwszym wariancie zestawienie przychodów i wydatków jest następujące:

- przychody za energię fizyczną sprzedaną do sieci wg stawek z 2009:

285,769 MWh x 155,44 zł/MWh = 44 420 zł

- podatek ryczałtowy za energię fizyczną:

5,5% x 44 420 zł = 2 443 zł

- przychody za sprzedaż praw majątkowych do świadectw pochodzenia:

285,769 MWh x 240 zł/MWh = 68 585 zł

- podatek od świadectw pochodzenia:

19% (od 2010: 5,5%) x 68 585 zł = 13 031 zł

- koszt **95 478 kWh** energii pobranej z sieci zakładu energetycznego (zakład „terenowy”) – taryfa **C21**:

Dystrybucja: **16 230 zł netto**

Obrót: **25 397 zł netto**

Razem: **50 785 zł brutto**

Bilans przychodów i kosztów w wariancie sprzedaży całości energii do sieci dystrybucyjnej zamyka się roczną sumą **+ 46 746 zł**.

W drugim wariancie zestawienie przychodów i wydatków jest następujące:

- przychody za energię fizyczną sprzedaną do sieci wg stawek z 2009:

191,290 MWh x 155,44 zł/MWh = 29 734 zł

- podatek ryczałtowy za energię fizyczną:

5,5% x 29 734 zł = 1 635 zł

- przychody za sprzedaż praw majątkowych do świadectw pochodzenia:

285,769 MWh x 240 zł/MWh = 68 585 zł

- podatek od świadectw pochodzenia:

19% x 68 585 zł = 13 031 zł

- akcyza:

95,478 MWh x 20 zł/MWh = 1 910 zł

- koszt energii pobranej z sieci wg rachunków: **3 600 zł**

Bilans przychodów i kosztów w wariancie z priorytetem zaspokojenia potrzeb własnych wykazuje roczny zysk **+ 78 143 zł**

6. PODSUMOWANIE

Zasilanie elektroenergetyczne z własnego odnawialnego źródła wytwarzania jest w Polsce zagadnieniem o stosunkowo wąskim obszarze zastosowań. Realizacja niezawodnego układu autonomicznego jest z jednej strony bardzo kosztowne, a z drugiej strony obiekty wyspowe, czyli pozbawione możliwości doprowadzenia sieci publicznej należą do

rzadkości. Realnie występuje równoległe zasilanie z własnego źródła współpracującego z siecią, co zapewnia niezawodność dostawy energii elektrycznej do odbiorników. W tym właśnie wariancie pracują układy funkcjonalnie różniące w zależności od typu źródła odnawialnego. Małe elektrownie wodne i kogeneratory biometanowe, jako źródła o względnie stabilnej pracy, mogą w pełni zaspokajać potrzeby odbiorcy bez silnego przerostu mocy zainstalowanej w stosunku do mocy odbiorników. Moduły fotowoltaiczne z kolei mogą jedynie wspomagać zasilanie sieciowe i w dodatku praktycznie bez żadnych efektów od listopada do lutego. Elektrownie wiatrowe o mocach kilkuset kW i wyższych pracują wyłącznie oddając energię do sieci dystrybucyjnej. Natomiast przy mocach do 30 kW są to raczej źródła zasilające bezpośrednio odbiorniki, chociaż chodzi raczej o wydzielone urządzenia grzewcze z akumulacją energii cieplnej.

W analizowanym w artykule przypadku ma miejsce udana synchronizacja możliwości produkcyjnych mikroelektrowni wodnej z zapotrzebowaniem właściciela. W efekcie w każdym okresie roku mikroelektrownia zaspakaja w pełni potrzeby własne gospodarstwa domowego i rolnego. Ok. 1/3 energii produkowanej w skali roku przypada na potrzeby własne, a 2/3 sprzedawane jest do sieci dystrybucyjnej. Łączny efekt ekonomiczny, osiągany przy obowiązujących regulacjach obrotu energią elektryczną produkowaną ze źródeł odnawialnych i przy taryfowych kosztach zakupu energii elektrycznej, to zysk na poziomie 78 tys. PLN rocznie.

7. LITERATURA

- [1] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r - Prawo energetyczne, Dz. U. Nr 54, poz. 348 z późniejszymi zmianami.
- [2] Brodziński K.: Kolorowa energia na TGE – podsumowanie roku 2008 i kilka słów o zmianach na rynku, Czysta Energia nr 10 (98), 2009.
- [3] Brodzik A.: Analiza kierunków wykorzystania energii produkowanej w małej elektrowni wodnej, Praca magisterska, SGGW 2009.

THE MICRO-HYDRO POWER STATION AS MANUFACTURER OF ENERGY ON OWN NEEDS - THE STUDY OF CASE

SUMMARY

The paper presents the example of the micro-hydro power station producing on own needs energy (household and agricultural farm). The yearly distribution of energy production was described. For analysed case general economic effects were counted.

Ilona DARDZIŃSKA, dr inż. arch.

Wyższa Szkoła Gospodarki
Instytut Architektury i Urbanistyki
ul. Garbary 2, 35-959 Bydgoszcz
e-mail: ilona.dardzinska@byd.pl

ARCHITEKTURA ORGANICZNA – EWOLUCJA FORMY W DĄŻENIU DO ROZWIĄZAŃ PROEKOLOGICZNYCH

STRESZCZENIE

W referacie przedstawiono dwa najpopularniejsze współczesne nurty architektury organicznej. Podjęto próbę analizy ewolucji motywów organicznych. Zaprezentowano najnowsze przykłady projektów łączących nową stylistykę z rozwiązaniami proekologicznymi.

1. WPROWADZENIE

Ewolucja w architekturze jest procesem bazującym przede wszystkim na modyfikacji stylowej, która postępuje na przestrzeni wieków. Każdy kolejny styl architektoniczny składa się z nowatorskich – dominujących elementów i detali architektonicznych oraz elementów znanych i wykorzystywanych wcześniej, ale przeobrażonych przez architekta w taki sposób, aby nadać obiektowi nową jakość formalną i estetyczną. Niemal wszystkie formy architektoniczne, takie jak kolumny, belkowania czy portale ewoluowały w ujęciach fasad oraz w aranżacjach wnętrz w kolejnych stuleciach. Do najczęściej wykorzystywanych elementów architektonicznych począwszy od starożytności, poprzez renesans, barok, XVIII – wieczny klasycyzm, niemal do końca XIX wieku, należał portyk kolumnowy. Współcześnie kreatorzy rozwiązań architektonicznych często korzystają z motywów architektury organicznej. Jej definicję sformułował Frank Lloyd Wright, który podkreślał, że jego domy wyrastają jak rośliny i stanowią żywe organizmy, w których wszystkie elementy są ze sobą powiązane i przeniknięte duchem poezji [1].

Zainteresowanie budowniczych motywami organicznymi można zauważyć w dekoracji architektonicznej już w starożytności – liście akantu w głowicach kolumn, w średniowieczu – motywy roślinne i zoomorficzne kapiteli kolumn, w renesansie i baroku – alegoryczne motywy zdobiące belkowania. Jednak dopiero secesja była stylem, w którym

cała bryła obiektu poprzez zastosowanie organicznych form i struktur wydawała się stanowić żywy organizm. Do najwybitniejszych przykładów tego kierunku niewątpliwie należy kamienica Casa Batllò Antonia Gaudiego z lat 1904-1906. Ma ona elewację pokrytą płytkami nadającymi pozory rybich łusek, jej balkony wykonano w taki sposób, że sprawiają wrażenie gniazd przy ścianie skalnej, a zwieńczenie stanowi dach o profilu przypominającym grzbiet smoka [2]. W latach 30-tych i 40-tych XX wieku pojęcie architektury organicznej rozwijał Frank Lloyd Wright, którego celem, w odróżnieniu od A. Gaudiego, było idealne zintegrowanie projektowanego obiektu z otaczającym krajobrazem. Ponownie w latach 60-tych XX wieku architekci powrócili do form organicznych. Ich zastosowanie należy także do popularnych rozwiązań współcześnie, ale przy jednoczesnej, zauważalnej dbałości o inwestowanie w systemy oszczędzania energii.

2. TENDENCJE W ROZWOJU PROEKOLOGICZNEJ ARCHITEKTURY ORGANICZNEJ

Analizując projekty z ostatnich kilku lat można zauważyć pewne tendencje w kreowaniu rozwiązań proekologicznych. Jeśli analizę zawęzić jedynie do motywów wykorzystywanych w architekturze organicznej, to najbardziej czytelne wydają się dwa nurty: obiekty o charakterze modularnym wykonane z przewagą wykorzystania naturalnych materiałów, takich jak kamień czy drewno oraz obiekty o elewacjach w postaci struktury komórkowej lub sieci naczyń organizmów żywych.

2.1. Obiekty modułowe

Modułowy charakter projektowanych obiektów można było zaobserwować w realizacjach architektonicznych w ciągu dziesięcioleci XX wieku. Philip Johnson w latach 40-tych projektował przeszklone obiekty o szkieletie konstrukcyjnym w postaci ramy stalowej zredukowanej do niezbędnego minimum. Tadao Ando w latach 80-tych zrealizował projekty betonowych domów z dużymi płaszczyznami okien o konstrukcji szkieletowej i modułowym podziałem przestrzeni, co dawało możliwość dowolnego kształtowania wnętrza zarówno na etapie projektu, jak i podczas późniejszego użytkowania domu. Zwykle były to projekty prostopadłościennych brył, znakomicie wpisujące się w otaczający krajobraz. Dzisiejsze modułowe realizacje także wydają się harmonizować z naturalnym otoczeniem. Ponadto ich elewacje wykonuje się z miejscowego gatunku drewna (rys. 1), a połącze dachowe pokrywa się często panelami słonecznymi (rys. 2). Dyskusyjne bywają koszty tego typu inwestycji zważywszy na uzyskany efekt estetyczny (rys. 3), zwłaszcza, jeśli stosuje się formy bardzo uproszczone. Cały zestaw proekologicznych zalet w postaci walorów budynku niskoenergetycznego, tj. zapotrzebowanie w granicach 40-45 kWh/m², odzysk ciepła (rekuperacja) czy wykorzystanie energii słonecznej jest niewątpliwie godny uznania. Natomiast zastosowanie w całej elewacji np. cedru kanadyjskiego (rys. 4), którego cena waha się w granicach 240-300 zł/m² przy uzyskaniu prostej formy w postaci ściętego walca, może budzić pewne wątpliwości: czy w takim kierunku ma zmierzać nowoczesna, proekologiczna architektura?



Rys. 1. Oberża "La Colline du Colombier", Iguerande, Francja, arch. Patrick Bouchain, 2008 [3]

Fig. 1. Auberge "La Colline du Colombier", Iguerande, France, arch. Patrick Bouchain, 2008 [3]



Rys. 2. Dom w Putney Mountain, arch. Kyu Sung Woo, Vermont, USA, 2008 [4]

Fig. 2. Putney Mountain Residence, arch. Kyu Sung Woo, Vermont, USA, 2008 [4]



Rys. 3. Motel Fox Lodge, Moskwa, arch. X.Y.Z. architects, 2005-2008 [5]

Fig. 3. Fox Lodge motel, Moscov, arch. X.Y.Z. architects, 2005-2008 [5]



Rys. 4. Indywidualny Dom Typowy, Pszczyna, arch. Robert Konieczny, 2008-2009 [6]

Fig. 4. Individual Typical House, Pszczyna, arch. Robert Konieczny, 2008-2009 [6]

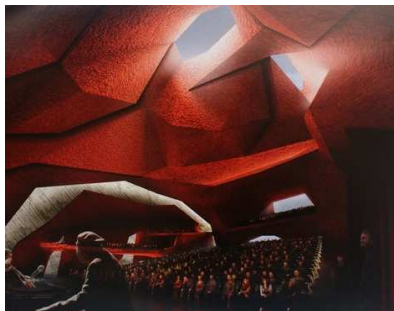
2.2. Obiekty strukturalne

Współczesne rozwiązania architektoniczne o motywach strukturalnych to najczęściej architektura wyrafinowania estetycznego, stanowiąca poszukiwanie rozwiązań łączących kontekst kulturowy z awangardą i nowatorskim high-tech, co w połączeniu z wysublimowanym wyczuciem kompozycyjnym projektanta, tworzy rozwiązania o wyrazistej strukturze formalnej i niepowtarzalnym profilu estetycznym. W tego rodzaju realizacjach najbardziej zauważalne jest zróżnicowanie w opracowanych fasadach – skomponowanych zależnie od lokalnych warunków morfologicznych, czego przykład może stanowić elewacja Centrum Sztuki TEA w Santa Cruz z 2008 r. (rys. 5). Wykonano ją z betonu z perforacjami w liczbie ponad 1200 okien o różnych wymiarach i kształtach. Całość struktury ma przypominać zastygłą lawę lokalnego krajobrazu [8]. Nawet jeśli obiekt nie jest osadzony w rdzennym pejzażu kulturowo-morfologicznym, można nadać mu cechy organizmu żywego, co doskonale udało się m. in. architektom Sali Koncertowej na Jordankach w Toruniu (rys. 6). Niekiedy projektanci stosują okładzinę elewacyjną o szczególnych właściwościach, np. w Hotelu de Boulevard (rys. 7) zaproponowano wykonanie elewacji z ekologicznego szkła w technologii Chromatic RS [7], które się nie odkształca, nie traci na intensywności barw pod wpływem czynników zewnętrznych i jest w 100% poddające się recyklingowi. Ponadto do jego wytworzenia potrzeba o ok. 40% mniej energii w porównaniu z klasycznym szkłem, a co więcej, nie zawiera związków kadmu i ołowiu. Niezmiernie ważną cechą skomplikowanego projektu budowlanego jest także dokładne obliczenie ilości potrzebnych materiałów budowlanych, tak aby nie przewymiarować konstrukcji. Przykład może stanowić Centrum Sztuki HIMALAYAS Zendai zaprojektowane w konstrukcji opartej na technologii ESO (Evolution structure optimization), która działa w oparciu o koncepcję usuwania zbędnego materiału nieefektywnej struktury (rys. 8).



Rys. 5. Centrum Sztuki TEA w Santa Cruz, Teneryfa, Hiszpania, arch. Herzog & de Meuron, 2008 [8]

Fig. 5. Espacio de las Artes TEA at Santa Cruz, Tenerife, Spain, arch. Herzog & de Meuron, 2008 [8]



Rys. 6. Sala Koncertowa na Jordankach, Toruń, arch. Menis Arquitectos, 2009-2011 [9]
Fig. 6. Jordanek Music Hall, Torun, arch. Menis Arquitectos, 2009-2011 [9]



Rys. 7. Hotel Boulevard, arch. Mustafa Musić, Belgrad, Serbia, 2009-2011 [10]
Fig. 7. Hotel Boulevard, arch. Mustafa Musić, Belgrade, Serbia, 2009-2011 [10]



Rys. 8. Centrum sztuki HIMALAYAS Zenda, Szanghaj, Chiny, arch. Zendai Group, 2009-2010 [11]
Fig. 8. Himalayas Center, Shanghai, China, Zendai Group, 2009-2010 [11]

3. PODSUMOWANIE

Formy, które ewoluują w architekturze organicznej stanowią połączenie wcześniejszych kierunków, takich jak: minimalizm i strukturalizm z formami abstrakcyjnymi – estetycznie nieodległymi od kontekstu morfologii otoczenia, a w projektach, w ujęciu całościowym widać szczególną dbałość twórców o rozwiązania energooszczędne, możliwe do uzyskania poprzez chociażby wykorzystanie energii słonecznej czy zastosowanie materiałów poddających się recyklingowi.

Architektura powinna pozostać sztuką umiejętnej kompensacji programu użytkowego z symboliką przystającą do lokalnych uwarunkowań kulturowo – geomorfologicznych. Osobną kwestię stanowi tzw. „trwałość upodobań” – pojęcie należące do kluczowych w teorii architektury [12]. Niektóre formy wzbudzają trwały zachwyt, pozostając ikoną określonego stylu, inne cieszą się co najwyżej akceptacją, część budzi kontrowersje. Emocje, jakie wywołują w nas ewolucje stylowe dzieł architektury zależą od indywidualnego sposobu postrzegania, który także ewoluuje. Znakomicie ujął to W. Welsch: „Paleta form odbioru estetycznego, jest z samej zasady wieloraka, rozległa i nie do ograniczenia. Nowe dzieło sztuki może wprowadzić nową formę percepcji” [13].

4. LITERATURA

- [1] Trzeciak P.; Pochwała różnorodności. Architektura po roku 1960, Sztuka Świata T.10, Arkady 1996,
- [2] Zerbst R.; Antoni Gaudi. Wszystkie budowle, Taschen 2004,
- [3] http://www.cotemaison.fr/maison-reve/boheme-decale/diaporama/les-bonnes-idees-d-une-maison-fantastique_4031.html
- [4] <http://www.kswa.com/work/putney/>
- [5] Silva A. E.; Motel, Moscov, A10 sep/oct 2008,
- [6] http://www.architektura.info/index.php/architektura_w_polsce2/robert_konieczny
- [7] <http://www.claddingsolutions.com/news/107/>
- [8] Haduch B., Haduch M.; TEAtr różnaitości, Architektura&Biznes 9/2009,
- [9] Oleksak J.; Beton Menis, Architektura&Biznes 10/2009,
- [10] Vučnić V.; Hotel, Belgrade, A10 sep/oct 2008,
- [11] http://www.worldarchitecturenews.com/index.php?fuseaction=wanappln.projectview&upload_id=10717
- [12] Sławińska J.; Ekspresja sił w nowoczesnej architekturze, Arkady 1997,
- [13] Welsch W.; Estetyka poza estetyką, Universitas 2005.

ORGANIC ARCHITECTURE – EVOLUTION OF MOTIFS TOWARDS THE PRO-ECOLOGICAL SOLUTIONS

SUMMARY

This paper contains the two most common types of contemporary organic architecture. Also, it presents an attempt at analysis of the organic motifs such as evolution. The article presents a new approach to design connecting the new organic architecture with pro-ecological solutions.

Jarosław DĄBROWSKI, dr inż.

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Instytut Budownictwa
pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław
e-mail: jaroslaw.dabrowski@up.wroc.pl

ANALIZA PORÓWNAWCZA WYDAJNOŚCI DOLNYCH ŹRÓDEŁ POMPY CIEPŁA TYPU GLIKOL – WODA

STRESZCZENIE

W artykule zaprezentowano wyniki, badań uzyskane na stanowisku badawczym, dla siedmiu miesięcy sezonu grzewczego 2008/2009. Na podstawie pozyskanych wyników badań wyznaczono wskaźniki efektywności (COP_{INS}) dla poszczególnych miesięcy pracującej instalacji z pompą ciepła, wyposażonej w kolektor poziomy i grzejniki konwektorowe. Otrzymane wskaźniki efektywności porównano z instalacją wyposażoną w sondy pionowe i podłogowe ogrzewanie pomieszczeń. Instalacja z sondami pionowymi osiągnęła większą efektywność niż instalacja z kolektorem poziomym. Jednak biorąc pod uwagę większe nakłady finansowe na wykonanie sond pionowych, instalacja z kolektorem poziomym może okazać się bardziej opłacalna, nawet przy niższej efektywności.

1. WPROWADZENIE

Pompa ciepła jest urządzeniem, które w wyniku zachodzących przemian termodynamicznych w układzie sprężarkowym podnosi temperaturę górnego źródła ciepła, dzięki wykorzystaniu ciepła niskotemperaturowego pozyskanego z dolnego źródła ciepła. Dolnym źródłem może być ciepło niskotemperaturowe zawarte w powietrzu, wodzie i gruncie.

Pozyskiwanie ciepła z powietrza jest najtańsze, jeżeli chodzi o wykonanie dolnego źródła, ponieważ nakłady inwestycyjne są najmniejsze. Dostępność powietrza jest nieograniczona i w dużych ilościach. Wadą tego typu układu jest zmniejszenie mocy pompy i jej efektywności wraz ze spadkiem temperatury powietrza (pompa ciepła najwydajniej pracuje, kiedy różnica temperatur pomiędzy dolnym a górnym źródłem ciepła jest najmniejsza). Dlatego musimy przewidzieć dodatkowe źródło energii cieplnej, które

ogrzeje nam budynek do wymaganej temperatury, przy najniższych temperaturach powietrza.

Kolejnym źródłem ciepła może być woda pobierana ze studni czerpalnej. Przy tego typu rozwiązaniach mogą się pojawić problemy z zapewnieniem dużej wydajności studni czerpalnej i chłonnej. Muszą także zostać spełnione odpowiednie wymagania odnośnie składu chemicznego wody. Zły skład chemiczny wody może doprowadzić do korozji wymiennika ciepła i zamulenia studni chłonnej.

Najbardziej rozpowszechnione i stosowane są pompy ciepła, gdzie dolnym źródłem jest ciepło pozyskane z gruntu przez kolektory poziome i sondy pionowe. Przez kolektor i sondę przepływa solanka (mieszanina wody i glikolu o temperaturze zamarzania -15°C), która odbiera ciepło z gruntu i transportuje je do parownika pompy ciepła. Grunt jest dobrym akumulatorem ciepła, ponieważ przez cały rok zachowuje stosunkowo równomierne temperatury rzędu 8°C , na głębokości powyżej 10 m [1], co równa się średniorocznej temperaturze powietrza.

Podział rynku pomp ciepła w Polsce ze względu na rodzaj dolnego źródła ciepła (stan na rok 2007) przedstawia się następująco [2]:

- solanka – woda (sondy pionowe) – 48%,
- powietrze – woda – 32%,
- solanka – woda (kolektor poziomy) – 17%,
- woda – woda – 3%.

2. CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem badań było określenie i porównanie efektywności działających instalacji z pompą ciepła, dla sezonu grzewczego 2008/2009, przy różnym sposobie wykonania dolnego źródła. W pierwszej instalacji, jako dolne źródło ciepła wykorzystano kolektor poziomy, a w drugiej sondy pionowe.

W zakres pracy wchodziło przeprowadzenie rocznych badań (1 sezon grzewczy) na stanowisku badawczym, gdzie ze specjalnie zaprojektowanej aparatury pomiarowej odczytywano dane cyklicznie co 24 godzinny. Na podstawie pozyskanych danych obliczono współczynniki efektywności (COP_{INS}) dla pracującej na stanowisku badawczym instalacji z pompą ciepła. Otrzymane wyniki badań zostały porównane z danymi otrzymanymi z instalacji wyposażonej w pionowe sondy ziemne.

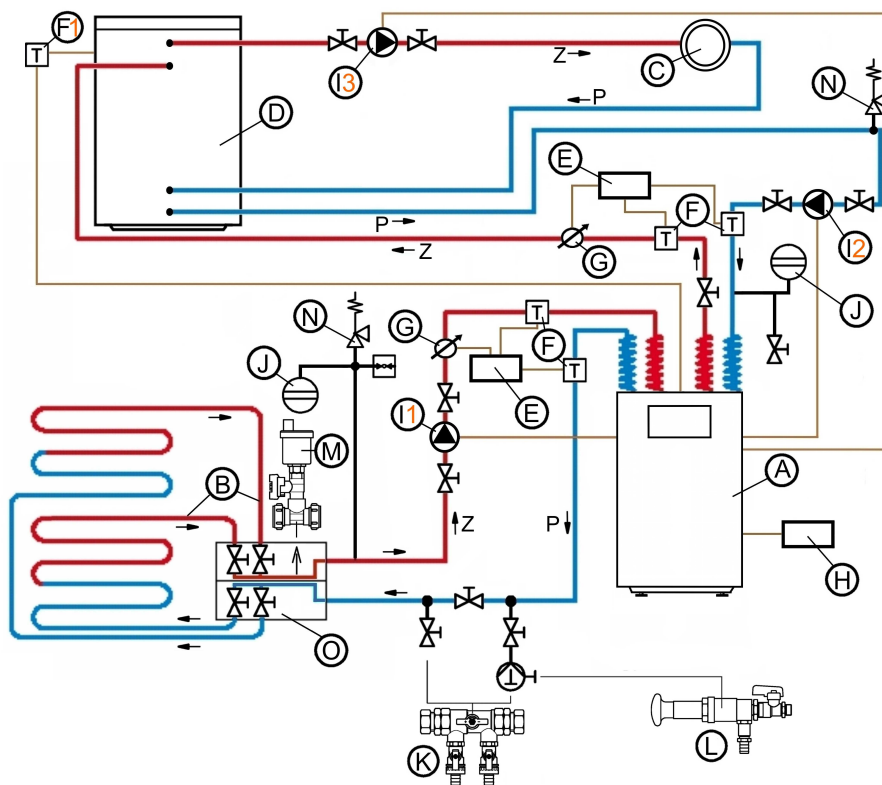
3. STANOWISKO BADAWCZE

Stanowisko badawcze wykonano w budynku jednorodzinnym o powierzchni użytkowej 172 m^2 (154 m^2 – powierzchnia ogrzewana), który znajduje się w miejscowości położonej w pobliżu Wrocławia. Do ogrzewania budynku wykorzystano pompę ciepła solanka – woda o mocy cieplnej 7,7 kW i mocy chłodniczej 5,9 kW. Ciepło niskotemperaturowe pobierane było z gruntu za pomocą kolektora poziomego o powierzchni 300 m^2 (8 pętli rur PE $\phi 20$ po 100 m każda) ułożonego pod powierzchnią terenu w warstwie piasków średnich na głębokości 1,1 m.

Pompa ciepła pracowała jako jedyne źródło energii cieplnej, potrzebnej do ogrzania budynku i wytwarzała zawsze energię w tej samej ilości na daną jednostkę czasu, natomiast odbiór energii w pomieszczeniach ulegał różnym zakłóceniom. W celu

zwiększenia żywotności eksploatacyjnej sprężarki pompy ciepła, zaprojektowano także zbiornik buforowy o pojemności 400 l, którego zadaniem było wysprężanie pracującej pompy ciepła. Bufor przejmował ewentualne nadwyżki energii zapewniając długie przebiegi pracy pompy ciepła. Energia cieplna przekazywana była do pomieszczeń mieszkalnych za pomocą grzejników konwektorowych o zwiększonej wydajności (zaprojektowane na temperaturę pracy $45^{\circ}\text{C}/35^{\circ}\text{C}$).

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: A - pompa ciepła, B - dolne źródło ciepła, C - obieg grzewczy grzejników konwektorowych, D - bufor o $V=400$ l, E - licznik ciepła, F - czujnik temperatury, G - przepływomierz, H - licznik energii elektrycznej, I - pompa obiegowa, J - naczynie wzbiornicze, K - armatura do napełniania, L - pompa ręczna do napełniania układu, M - odpowietrznik, N - zawór bezpieczeństwa, O - rozdzielacz solanki.

Fig. 1. Research station diagram: A - heat pump, B - lower source of heat, C - heating cycle of unit heaters, D - buffer with $V=400$ l, E - heat meter, F - temperature sensor, G - flowmeter, H - electric power meter, I - circulation pump, J - rising vessel, K - fittings for filling, L - hand-operated pump for filling the system, M - vent, N - safety valve, O - brine distributor.

4. METODYKA BADAŃ

Badania przeprowadzono dla jednego sezonu grzewczego 2008/2009, od 1 października 2008 r. do 30 kwietnia 2009 r.

Główne elementy pomiarowe to: licznik energii elektrycznej 685-382-OK-64 do pomiaru ilości energii zużytej przez pompę ciepła, pompy obiegowe i regulator, ciepłomierz LQM-III/JS-90-1.5-NE do pomiaru ilości energii cieplnej z układu pompa ciepła – dolne źródło ciepła, ciepłomierz LQM-III-K/JS-90-1.5-NE do pomiaru ilości energii cieplnej z układu pompa ciepła – bufor. Odczyty z licznika energii i ciepłomierzy przeprowadzano codziennie o godzinie 24⁰⁰, po zakończeniu dobowego ogrzewania budynku.

Temperatura zładu centralnego ogrzewania zmieniała się w przedziale od 35°C do 45°C – ładowanie bufora rozpoczynało się, gdy czujnik zmierzył temperaturę 35°C, a kończyło po osiągnięciu 45°C. Ponieważ zaprojektowano grzejniki o zwiększonej powierzchni oddawania ciepła, ten zakres temperatur pracy instalacji był wystarczający do ogrzania budynku, przy najniższych zanotowanych zewnętrznych temperaturach powietrza.

Otrzymane wyniki efektywności instalacji z poziomym kolektorem porównane zostaną z danymi dla instalacji z pionowymi sondami, która pracuje w domu jednorodzinnym zlokalizowanym pod Opolem. Opis rozwiązań poszczególnych instalacji opisano w tabeli 1.

Tabela 1. Opis instalacji z pompą ciepła.

Table 1. Description of a heat pump installation.

| Parametr | Instalacja z pompą ciepła | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| | Nr 1 (pod Wrocławiem) | Nr 2 (pod Opolem) |
| Powierzchnia ogrzewana budynku | 154 m ² | 200 m ² |
| Wymagana moc cieplna | 8,1 kW | 11,3 kW |
| Rodzaj pompy ciepła | solanka – woda | solanka – woda |
| Typ pompy ciepła | Vitocal 200G | Vitocal 300BW 110 |
| Moc grzewcza* | 7,7 kW | 10,8 kW |
| Moc chłodnicza* | 5,9 kW | 8,4 kW |
| Elektryczny pobór mocy* | 1,8 kW | 2,4 kW |
| Współczynnik efektywności (COP)* | 4,3 | 4,5 |
| Czynnik roboczy w obiegu chłodniczym | R 410 A | R 407 C |
| Rodzaj ogrzewania | Grzejniki konwektorowe | Podłogowe |
| Zbiornik buforowy | Vitocell 050-400 litrów | Vitocell 050-600 litrów |
| Podgrzewanie wody użytkowej | Nie | Tak |
| Dolne źródło | Kolektor poziomy 300 m ² | Sondy pionowe 2 · 91 m = 182 m |

* W punkcie pracy B0/W35 wg DIN EN 255: B0 = temperatura solanki na wejściu 0°C/W35 = temperatura wody grzewczej na zasilaniu instalacji 35°C.

5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

W tabeli 2 przedstawione zostały wyniki badań uzyskane na stanowisku badawczym dla instalacji nr 1 (kolektor poziomy) i dla instalacji nr 2 (sondy pionowe).

Tabela 2. Wyniki badań otrzymane z instalacji nr 1 i 2 dla poszczególnych miesięcy sezonu grzewczego 2008/2009.

Table 2. The research results obtained from Installation 1 and 2 for the particular months of the heating season 2008/2009.

| Miesiąc | Pobór energii elektrycznej przez instalację z pompą ciepła | | Energia cieplna wytworzona przez pompę ciepła | |
|-------------|--|-------------------|---|-------------------|
| | Instalacja nr 1 | Instalacja nr 2 * | Instalacja nr 1 | Instalacja nr 2 * |
| | E _{EL} , kWh (MJ) | | Q, MJ | |
| Październik | 270,1 (972) | 359,1 (1293) | 3400 | 4823 |
| Listopad | 406,0 (1461) | 510,5 (1838) | 4874 | 6635 |
| Grudzień | 601,9 (2167) | 669,2 (2409) | 6755 | 8710 |
| Styczeń | 727,8 (2620) | 860,6 (3098) | 7700 | 10527 |
| Luty | 629,8 (2267) | 674,3 (2427) | 6679 | 8427 |
| Marzec | 565,1 (2034) | 670,4 (2413) | 6052 | 8298 |
| Kwiecień | 197,4 (711) | 272,0 (979) | 2209 | 3412 |
| Σ | 3398,1 (12233) | 4016,1 (14458) | 37669 | 50832 |

* www.kotly.pl.

Wskaźnik efektywności COP (Coefficient of Performance) pompy ciepła jest ilorazem energii cieplnej wytworzonej przez sprężarkę pompy ciepła do ilości pobranej energii elektrycznej potrzebnej do napędu sprężarki i można go opisać następującym wzorem:

$$COP = \frac{Q}{E_{SPR}} \quad (1)$$

gdzie:

Q – energia cieplna wytworzona przez pompę ciepła, MJ,

E_{SPR} – energia elektryczna zużyta do napędu sprężarki, kWh (MJ).

Oprócz zużytej energii przez sprężarkę, instalacja pobiera także energię elektryczną do napędu trzech pomp obiegowych i regulatora sterującego pracą pompy ciepła. Rzeczywisty końcowy wskaźnik efektywności COP_{INS} dla całej instalacji można policzyć z następującego wzoru:

$$COP_{INS} = \frac{Q}{E_{SPR} + E_{DOD}} \quad (2)$$

gdzie:

Q – energia cieplna wytworzona przez pompę ciepła, MJ,

E_{SPR} – energia elektryczna zużyta do napędu sprężarki, kWh (MJ),

E_{DOD} – energia elektryczna zużyta przez pompy obiegowe i regulator, kWh (MJ).

Wykorzystując powyższy wzór nr 2 w tabeli 3 policzono wskaźniki efektywności COP_{INS} dla poszczególnych miesięcy sezonu grzewczego 2008/2009.

Tabela 3. Wskaźniki efektywności otrzymane dla instalacji nr 1 i 2 w poszczególnych miesiącach sezonu grzewczego 2008/2009.

Table 3. Coefficients of performance obtained for Installation 1 and 2 for the particular months of the heating season 2008/2009.

| Miesiąc | Wskaźnik efektywności całej instalacji (COP_{INS}) | | Udział procentowy energii elektrycznej przy COP_{INS} | |
|-------------|--|------------------|---|------------------|
| | Instalacja nr 1 | Instalacja nr 2* | Instalacja nr 1 | Instalacja nr 2* |
| Październik | 3,50 | 3,73 | 28,59 | 26,81 |
| Listopad | 3,34 | 3,61 | 29,98 | 27,70 |
| Grudzień | 3,12 | 3,62 | 32,08 | 27,66 |
| Styczeń | 2,94 | 3,40 | 34,03 | 29,43 |
| Luty | 2,95 | 3,47 | 33,94 | 28,80 |
| Marzec | 2,98 | 3,44 | 33,61 | 29,08 |
| Kwiecień | 3,11 | 3,49 | 32,19 | 28,69 |
| Cały sezon | 3,08 | 3,52 | 32,47 | 28,44 |

*www.kotly.pl.

Wskaźnik efektywności (COP_{INS}) dla pracującej instalacji nr 1 z pompą ciepła, w sezonie grzewczym 2008/2009 wyniósł 3,08 co oznacza, że z 1 kWh zużytej do napędu sprężarki otrzymano 3,08 kWh energii cieplnej (2,08 kWh darmowej energii pozyskanej w wyniku przemian termodynamicznych). Dla instalacji nr 2 wskaźnik efektywności był nieco wyższy i wyniósł 3,52, czyli z 1 kWh otrzymaliśmy 3,52 kWh energii cieplnej (2,52 kWh energii darmowej pozyskanej w wyniku przemian termodynamicznych).

Uwzględniając większą efektywność pompy ciepła nr 2 (COP 4,5 B0/W35) w stosunku do pompy ciepła nr 1 (COP 4,3 B0/W35) można założyć, że przy kolektorze poziomym wskaźnik efektywności całej instalacji wyniósłby $3,08 + 4,5 - 4,3 = 3,28$. Różnica wskaźnika efektywności dla instalacji nr 2 względem instalacji nr 1 wyniesie $3,52 - 3,28 = 0,24$. Przy wytworzeniu energii cieplnej przez instalację nr 1 z kolektorem poziomym 37669 MJ/sezon (tab. 2), dla tego samego typu instalacji, ale z sondami pionowymi, zużyłaby ona 217,5 kWh/sezon grzewczy mniej energii elektrycznej. Dla pompy Vitocal 200G został założony zysk energetyczny z gruntu 20 W/m^2 dla kolektora poziomego. Podzielenie mocy chłodniczej przez zysk energetyczny daje nam potrzebną powierzchnię kolektora poziomego $5900 \text{ W} : 20 \text{ W/m}^2 = 295 \approx 300 \text{ m}^2$. Jeżeli dla tej samej pompy chcielibyśmy wykonać sondy pionowe, to ich długość powinna wynosić $5900 : 40 \text{ W/m} = 147,5 \text{ m} \approx 150 \text{ m}$ (przyjęto dwie sondy pionowe o długości każdej 75 m).

Wskaźnik efektywności instalacji z sondami pionowymi jest większy niż z kolektorem poziomym, ale koszty związane z wykonaniem dolnych źródeł dla tych instalacji są odwrotnie proporcjonalne do ich efektywności. Koszt wykonania odwiertów pionowych szacuje się na 100 zł/mb. Przy dwóch sondach pionowych ($2 \cdot 75 \text{ m}$) wyniesie

on 15.000 zł. Natomiast koszt wykonania kolektora poziomego (300 m²) wyniósł 5.000 zł (3 dni pracy). Przy założeniu ceny energii elektrycznej na poziomie 0,51 zł/kWh koszty związane z ogrzaniem budynku będą większe o $217,5 \text{ kWh/sezon} \cdot 0,51 \text{ zł/kWh} = 110,93 \text{ zł/sezon}$ grzewczy dla pompy ciepła z kolektorem poziomym. Jednak bilansując większe wydatki związane z wykonaniem sond pionowymi, czas zwrotu poniesionych kosztów przy tego typu dolnym źródle ciepła wyniósłby $10.000 \text{ zł} : 110,93 \text{ zł/sezon} = 90,1$ sezonów grzewczych.

6. PODSUMOWANIE

Instalacja z pompą ciepła i grzejnikami radiatorowymi może osiągać wysokie wskaźniki efektywności ($\text{COP}_{\text{INS}} = 3,08$), porównywalne jak dla ogrzewania podłogowego, przy odpowiednim przewymiarowaniu powierzchni grzejników tak, aby instalacja pracowała na parametrach 45°C /35°C.

Z przeprowadzonych badań i analiz wynika, że pomimo uzyskiwania większej efektywności dla instalacji z sondami pionowymi, przy porównaniu kosztów poniesionych na wykonanie dolnego źródła ciepła, instalacja z kolektorem poziomym będzie mniej efektywna, ale bardziej opłacalna. Poniesione koszty na wykonanie sond pionowych dla instalacji nr 1 zwróciłyby się dopiero po 90 latach eksploatacji w stosunku do istniejącego rozwiązania dolnego źródła (kolektor poziomy).

Koszt wytworzenia 1 kWh energii cieplnej przez całą instalację pompy ciepła z kolektorem poziomym (sprężarka, regulator i trzy pompy obiegowe) wyniósł zaledwie 0,17 zł/kWh przy cenie 1 kWh energii elektrycznej w taryfie G-11 równej 0,51 zł/kWh (cena na dzień 1 marca 2010 r.). Koszty ogrzania budynku jednorodzinnego przez 7 miesięcy sezonu grzewczego 2008/2009 w taryfie stałej (G-11) wyniosły zaledwie 1733,03 zł (średnio 247,58 zł/miesiąc).

7. LITERATURA

- [1] Pasierb S. i inni: Odnawialne źródła energii. Fundacja na rzecz Efektywnego Wykorzystania Energii, Katowice 2006.
- [2] Budujemy dom, AVT – Korporacja Sp z o.o., Warszawa 3/2009.

COMPARATIVE ANALYSIS OF PERFORMANCE OF THE LOWER SOURCES OF THE GLYCOL – WATER HEAT PUMP

SUMMARY

The article presents the research results obtained at a test stand for seven months of the heating season 2008/2009. On the basis of the research results obtained, the coefficients of performance (COP_{INS}) have been determined for the running heat pump installation equipped with a horizontal collector and unit heaters for the particular months. The obtained coefficients of performance were compared to an installation equipped with vertical sondes and floor room heating. The vertical sonde installation achieved greater efficiency than the one with the horizontal collector. However, taking into account higher costs of execution of the vertical sondes, the horizontal collector installation may prove to be more profitable even at a lower efficiency.

Jarosław DĄBROWSKI, dr inż.
Edward HUTNIK, prof. dr hab. inż.

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Instytut Budownictwa
pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław
e-mail: jaroslaw.dabrowski@up.wroc.pl

EFFICIENCY OF A TYPICAL SOLAR COLLECTOR INSTALLATION

ABSTRACT

The article presents the research results which have been obtained at a special (purpose-prepared) Research Station and the measuring data of the meteorological conditions obtained from the Observatory of the Wrocław University of Environmental and Life Science. A typical solar installation with flat liquid collectors was installed in a detached house in Kamieniec Wrocławski (located in the area of Wrocław). The obtained results sum up the eight-year research and measurements carried out in the years 2002 – 2009. As a result of the analyses, the installation efficiency was calculated for the particular months as well as a yearly average efficiency of the solar installation, which oscillates at a level of more than 69%, which proves justifiability of the application of solar collectors in the temperate climate as well.

1. INTRODUCTION

On the basis of the fundamental theory within the field of utilization of the solar radiation energy put forward by Beckman and Duffy [4], one is able to calculate how much energy that reaches the ground may be acquired and used to make the most of it.

Apart from the research on the quantity of solar radiation which gets to the surface of the ground and the equipment which transforms this energy, the analytical-numerical research of the simulation models and the solar installation utilization is also carried out.

In his work, Hollands presented a method of empirical simulation of the whole installation operation [5], whereas Howells presented a simulation analysis of the installation and devoted most of attention to a numerical solution to this issue [6].

The analytical-numerical research into the simulation models of the solar installation utilization are merely an approximation of those effects which can be obtained for the simulated system of the running solar installation. However, the most credible results of the

envisaged effects of the operating and newly-designed solar installations can be obtained solely from an experimental analysis conducted at a properly prepared research station for the whole solar installation utilization period and with the results repeated for the research cycle examined.

The work on the above-mentioned issue that has been carried out so far is fragmentary, short term and covers some other fields of the solar installation issues and other equipment examined in the other local conditions.

2. OBJECTIVE AND SCOPE OF THE RESEARCH

The research into the solar installation was carried out in Kamieniec Wrocławski and started on 31 December 2001. The Research Station was constructed on the basis of a system solution. Two plate liquid solar collectors with the total surface area of the absorber of 5 m² were the equipment that received solar energy. In a two-system hot domestic water heater, thermal energy obtained from the solar collectors was stored. In the case of deficiency in the thermal energy required for ensuring an appropriate water temperature, a single-function boiler turned on to make up for the deficiency. For heating of water, both unconventional energy – solar radiation and conventional energy – liquefied gas propane were used. The presented installation includes two systems which provide thermal energy. The first one is the collectors – heater system and the second one – the boiler – heater system. Both on the first and second system, heat meters were installed intended for measuring an amount of thermal energy obtained by the solar collectors and supplemented by the boiler. On a system that supplied cold water to the heater, a water meter was installed that measured distribution of water from the heater. Indication reading of the heater meters and water meter in the Research Station was carried out every day at 10 p.m., after full day's distribution of hot water.

On the basis of the results obtained from the above-mentioned measuring apparatus, effectiveness of the utilization of the solar installation in the housing construction for Wrocław and its environs was determined.

The results received from the Agrometeorological and Hydrometeorological Observatory of the University of Environmental and Life Science located in Swojec, Wrocław, were used to perform a comparative analysis of an impact of solarization, total radiation and temperature on acquiring of thermal energy by the solar collectors. The Observatory is located on the outskirts of the city, in its agricultural part, outside the area of the so-called urban heat island, at a distance of approximately 4200 m (as the crow flies) from the Research Station in a northwesterly direction. The exact geographical position of the Research Station is at a longitude of 17° 10' 17" degrees east and at a latitude of 51° 05' 02" degrees north.

3. RESEARCH STATION

The Research Station was located in a detached house in the village Kamieniec Wrocławski. Two plate liquid solar collectors with the total surface area of 5 m² were installed on the south roof slope of the building with a 42° slope to the ground surface (Fig. 1). The building is turned by 11,5° degrees to the east in relation to the south. On the basis of the literature of the subject, this location of the collectors was optimum for

acquiring energy in a twelve-month cycle. The test installation comprised a typical complete solar system, a gas boiler, and the special instrumentation and measuring apparatus. The main measuring components were as follows: a heat meter CQM-II/WS-15-1 intended for measuring of the amount of thermal energy from the collectors – heater system, a heat meter energy CQM-II-K/JS-15-1.5 for measuring of the amount of thermal from the boiler – heater, and a water meter for measuring of hot domestic water distribution.



Fig. 1. View of the test stand with the installed solar energy collectors on the south roof slope.

Rys. 1. Widok stanowiska badawczego z zainstalowanymi kolektorami słonecznymi na południowej połaci dachu.

4. ANALYSIS OF THE RESEARCH RESULTS

A low density of the radiant flux and a different supply of solar energy at different times of the day and year are the main problem of the reception of solar energy by the collectors. An amount of solar radiation energy that gets to the surface of the Earth depends on many factors. The main factors which have a decisive impact on the amount of solar radiation that gets to the surface of the Earth are: the state of the atmosphere and astronomical conditions.

Energy that gets to the collector when the sky is cloudless in June and the Sun is at its highest altitude above the horizon ($62,4^\circ$), is the greatest, whereas in December, when the Sun is at its lowest altitude above the horizon ($15,5^\circ$), the value of the energy is the lowest. The difference in the amount of solar energy that gets to the surface of the Earth between the two above mentioned periods is just contrastive. At the analyzed latitude, approximately 6 times less energy gets to the upper boundary of the atmosphere in December than in June [7]. At the surface of the Earth this contrast is even greater, and, in the Observatory in Swojec, it has been be even 12 – 15 times greater reaching its summer maximum between May and July (or sometimes August) in the particular years [3]. What decides about the contrast is not only the seasonal changes to the angle of sunshine ray incidence but also the length of the day, cloud cover, and air humidity and fogging (i.e. the

presence of steam and aerosols in the air, which shape its transparency and absorbent properties).

The main meteorological factors which have an impact on acquiring the solar energy by the solar collectors are as follows: solarization, total radiation and an ambient air temperature. The following meteorological data: solarization (measured by Campbell – Stokes's heliograph at a height of 1,5 m), total solar radiation intensity (irradiation at a height of 1,5 m measured by Janiszewski's pyranometer), and an air temperature (from a height of 2 m) in the form of the twenty-four-hour sums or average values were received from the Agrometeorological and Hydrometeorological Observatory of UP in Wrocław – Swojec.

The Research Station was located in a region classified by agroclimatology as moderately humid, warm and moderately sunny. According to Romer's climatic map of Poland, a relatively mild climate prevails here, in particular on the river Odra (the longest summer and the shortest winter in the country). The spring-summer period on the Silesian Lowland corresponds to the average conditions in Poland, whereas the autumn-winter period is mostly dry [1]. According to the agricultural-climatic regionalization [8], the Research Station is located in the 'Wrocław District', covering the Silesian Lowland, which is the warmest region in Poland. An average of many years (1961 – 1995) i.e. an average yearly air temperature for the Observatory in Wrocław – Swojec amounts to 8,54 °C [2], whereas an average of many years (1961 – 1995) i.e. a yearly solarization sum is running at a level of 1418,2 h [2]. A yearly total radiation sum for the average of many years (1961 – 1995) reaches a value of 3719,9 MJ/m² [2]. The average means (1961 – 1995) of precipitation sums in the lowland region of Lower Silesia amount to 550 – 600 mm.

Table 1. Research results obtained from the Wrocław – Swojec Observatory for the particular years (from 2002 to 2009).

Tabela 1. Wyniki badań otrzymane z Obserwatorium Wrocław – Swojec dla poszczególnych lat (od 2002 do 2009).

| Year | Average temperature | Solarization | Total radiation onto a horizontal surface |
|-------------------|---------------------|--------------|---|
| | T (°C) | U (h) | IT (MJ/m ²) |
| 2002 | 10,2 | 1649,1 | 3868,3 |
| 2003 | 9,4 | 1951,8 | 4258,8 |
| 2004 | 9,4 | 1747,0 | 3874,0 |
| 2005 | 9,2 | 1992,0 | 4287,0 |
| 2006 | 9,5 | 1749,6 | 4230,1 |
| 2007 | 10,2 | 1758,7 | 3781,6 |
| 2008 | 10,3 | 1720,0 | 3908,2 |
| 2009 | 9,3 | 1667,6 | 3743,8 |
| Average 2002 – 09 | 9,7 | 1779,5 | 3994,0 |
| Average 1961 – 95 | 8,5 | 1418,2 | 3719,9 |

The results obtained from the Observatory for the years 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008 and 2009 have been presented in Table 1. The yearly average air temperature for the years 2002 – 2009 amounted to 9,7°C, exceeding the value of many years (1961 – 95) by 1,2°C. For all the years 2002 – 2009, the yearly average air temperatures exceeded the values of many years. The greatest deviation occurred in 2008 and amounted to 1,8°C, whereas the smallest deviation amounted to 0,7°C for 2005. The yearly solarization sum (the average for the years 2002 – 2009) amounted to 1779,5 hours, exceeding the value of many years (1961 – 1995) by 361,3 hours. The greatest deviation of the yearly total solarization sum from the average of many years amounted to 573,8 hours and took place in 2005, whereas the smallest deviation amounted to 230,9 hours and was noted for 2002. The yearly total radiation average sum for the years 2002 – 2009 amounted to 3994,0 MJ/m² and exceeded the value of many years (1961 – 1995) by 274,1 MJ/m². From 2002 to 2009, the yearly total solarization sums exceeded the yearly value of many years (1961 – 1995) by 23,9 MJ/m² (2009) – 567,1 MJ/m² (2005).

The results obtained from the Research Station for the years 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008 and 2009 have been presented in Table 2.

Table 2. The research results obtained from the Research Station for the particular years (from 2002 to 2009).

Tabela 2. Wyniki badań otrzymane ze stanowiska badawczego dla poszczególnych lat (od 2002 do 2009).

| Year | Collectors – heater energy | Boiler – heater energy | Distribution of hot domestic water |
|------|-------------------------------|---------------------------|--|
| | E _{collectors} (GJ) | E _{boiler} (GJ) | V _{water} (m ³) |
| 2002 | 8,846 | 3,341 | 70,088 |
| 2003 | 10,061 | 3,169 | 70,385 |
| 2004 | 8,958 | 3,733 | 73,078 |
| 2005 | 9,810 | 4,651 | 84,435 |
| 2006 | 9,380 | 5,157 | 84,988 |
| 2007 | 8,390 | 4,316 | 75,433 |
| 2008 | 7,937 | 3,303 | 66,291 |
| 2009 | 8,063 | 4,165 | 71,186 |
| Σ | 71,445 | 31,835 | 595,884 |

An amount of thermal energy supplied by the solar collectors to the heater amounted to 71,45 GJ during the above-mentioned eight years, whereas an amount of thermal energy supplemented by the boiler amounted to 31,84 GJ. In total, 103,28 GJ of thermal energy were used to heat up the water in the heater. Flow of the medium that conveys thermal energy in the collectors – heater system amounted to 2756,28 m³ during eight years, whereas flow of the medium that conveys thermal energy in the boiler – heater system amounted to 771,07 m³ during the same period. An amount of hot domestic water heated up in the heater amounted to 595,88 m³ during the years 2002 – 2009. On average, 203,9 l of hot domestic water from the heater were drawn throughout twenty four hours.

Efficiency of the solar installation can be calculated by means of equation No. 1 by dividing the energy acquired by the collectors ($E_{\text{collectors}}$) by the amount of total energy used for heating of domestic water (E_{total}).

$$\eta = \frac{E_{\text{collectors}}}{E_{\text{total}}} \cdot 100 \quad (1)$$

Calculations of the efficiency have been performed for each month of the particular years of the research (2002 – 2009). Figure 2 shows a graphic dependency of the installation efficiency on a month (the years 2002 – 2009). The dependency can be described by a second-degree polynomial:

$$y = -2,6245x^2 + 33,514x - 7,2959 \quad (2)$$

By substitution of the particular months to equation No. 2, efficiency of the solar installation operation has been obtained, including eight years (Table 3).

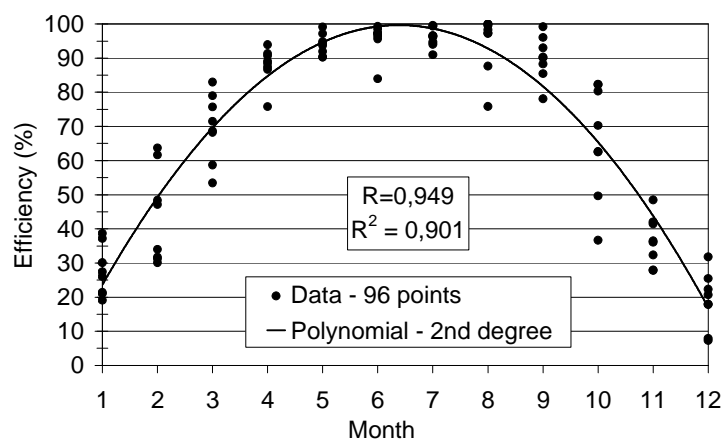


Fig. 2. Dependency of the solar installation efficiency on a month of the years for the years 2002 – 2009.

Rys. 2. Zależność pomiędzy efektywnością instalacji słonecznej a miesiącem roku dla lat 2002 – 2009.

Table 3. Efficiency of the solar collector installation for the particular months.

Tabela 3. Efektywność instalacji kolektorów słonecznych dla kolejnych miesięcy.

| | | | | |
|----------------|-----------|----------|----------|----------|
| Month | January | February | March | April |
| Efficiency (%) | 23,59 | 49,23 | 69,63 | 84,77 |
| Month | May | June | July | August |
| Efficiency (%) | 94,66 | 99,31 | 98,70 | 92,85 |
| Month | September | October | November | December |
| Efficiency (%) | 81,75 | 65,39 | 43,79 | 16,94 |

In January, the efficiency of the solar installation was running at a low level of less than 24% of the demand cover. However, the reception of thermal energy in February and March was already running at a level of more than 49% of the demand. January was characterized by a small number of solarization hours and the lowest air temperatures. However, quite good solar conditions in February and March were accompanied by low winter air temperatures and the highest wind velocities throughout the whole year. Snow lying on the collectors and their frosted surface also disrupted the reception of thermal energy in the above-mentioned winter months. Starting April, the air temperatures were considerably higher than the temperatures for the first quarter of the year. The climatic conditions in this period favoured the intensive acquiring of solar energy by the collectors. For May, June, July and August, quite a substantial excess of solar energy occurred, which could have been taken over by the collectors (the efficiency of more than 92%). On a yearly scale, December was a month of the lowest efficiency in acquiring of solar energy. The month was characterized by low air temperatures and the smallest number of solarization hours during the whole year. October and November were characterized by higher air temperatures compared to the months of the first quarter of the year, yet a smaller number of solarization hours. The small number of solarization hours for these two months and high wind velocity had an adverse effect on acquiring of solar energy by the collector

5. CONCLUSIONS

The meteorological conditions favour the effective acquiring of thermal energy by the solar collectors in Wrocław and its environs. The meteorological data such as temperature, solarization and total radiation from the eight recent years (2002-2009) show a growing tendency compared to the data from the years 1961-1995. A higher ambient air temperature during the day, a greater number of direct radiation hours (solarization) as well as big doses of total radiation have a favourable influence on even more effective operation of the whole system (of the solar installation).

The solar collectors, as an alternative source of pure energy, can be effectively used in order to obtain hot domestic water for the living and household purposes in the residential sector of the temperate climatic zone. For a year, one can save 8,931 GJ of the conventional thermal energy on average for a detached house at an average yearly efficiency of the solar installation amounting up to 69,17%.

6. REFERENCES

- [1] Bac. S., Rojek M.; Meteorology and climatology. PWN, Warsaw, 1979.
- [2] Brys K.; The role of a radiation factor in evapotranspiration. Doctoral dissertation, IKiOŚ AR, Wrocław, 1977.
- [3] Brys K., Brys T.; Fluctuation of solar radiation intensity in the 55-year old Wrocław series (1946 – 2000). WGSiR Warsaw University, Warsaw, 29, 161-171, 2001.
- [4] Duffie J.A., Beckman J.A.; Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley and Sons, New Yourk, 1991.
- [5] Hollands K.G.T., Fraser K.F., Brunger A.P.; An empirical model for natural convection heat exchangers in SDHW systems. Solar Energy, 55, 75-84, 1995.

- [6] Howells P.B.; Simulation of system control strategies for solar thermal applications. PhD Thesis, University of Wales College of Cardiff, 1984.
- [7] Podgrocki J.; Solar tables for use by the observers of actinometrical stations. Wyd. Kom. i Lacz., Warsaw, 1976.
- [8] Schmuck A.; Outline of natural-agricultural regionalization in the Wroclaw Province. WRiL, Wroclaw, 1959.

EFEKTYWNOŚĆ TYPOWEJ INSTALACJI KOLEKTORÓW SŁONECZNEJ

STRESZCZENIE

W artykule zaprezentowano wyniki badań, które uzyskano na specjalnie przygotowanym stanowisku badawczym oraz dane pomiarowe warunków meteorologicznych z Obserwatorium Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Typową instalację słoneczną z płaskimi kolektorami cieczowymi zainstalowano w budynku mieszkalnym jednorodinnym, w miejscowości Kamieniec Wrocławski (okolice Wrocławia). Otrzymane wyniki są podsumowaniem ośmioletnich badań i pomiarów przeprowadzonych w latach 2002-2009. W wyniku przeprowadzonych analiz obliczono efektywność instalacji dla poszczególnych miesięcy i średnioroczną efektywność instalacji słonecznej, która kształtujące się na poziomie ponad aż 69%, co wskazuje na zasadność stosowania kolektorów słonecznych.

Bernardeta DĘBSKA, mgr inż.

Politechnika Rzeszowska
Zakład Budownictwa Ogólnego
Al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów
e-mail: bdebska@prz.edu.pl

Lech LICHOLAI, dr hab. inż., prof. PRz

Politechnika Rzeszowska
Zakład Budownictwa Ogólnego
Al. Powstańców Warszawy 6
35-959 Rzeszów
e-mail: Lech.Licholai@prz.edu.pl

WPŁYW DODATKU ODPADOWEGO PET NA WYTRZYMAŁOŚĆ ZAPRAW ŻYWICZNYCH

STRESZCZENIE

W pracy opisano sposób otrzymywania i wybrane właściwości zapraw epoksydowych modyfikowanych glikolizatami odpadowego PET. Badania przeprowadzono w oparciu o plan eksperymentu wygenerowany za pomocą modułu Planowanie Doświadczeń programu STATISTICA. Dodatek modyfikatora spowodował poprawę wytrzymałości na zginanie i ściskanie wszystkich wykonanych próbek zapraw i obniżył koszt ich produkcji.

1. WPROWADZENIE

Jednym z podstawowych problemów sektora budowlanego, który powinien zostać rozwiązany ze względu na zagrożenie dla gospodarki i społeczeństwa, jest problem degradacji środowiska poprzez nieumiejętne i nieoszczędne wykorzystywanie zasobów naturalnych (energia, surowce naturalne, lasy, powietrze, etc.). Możliwość ekologicznego zagospodarowania odpadów materiałów z tworzyw sztucznych, a także postęp w rozwiązaniach konstrukcyjnych, architektonicznych i technologicznych, zwiększenie wyma-

gań w zakresie właściwości użytkowych, energooszczędności, powodują, że poszukuje się nowych materiałów lub modyfikuje już istniejące.

Jednymi z materiałów spełniających powyższe kryteria są zaprawy i betony żywiczne. Zaletą ich jest połączenie wytrzymałości mechanicznej z dobrą chemoodpornością, czego brak jest betonom zwykłym. Niewątpliwą wadą betonów polimerowych jest cena - polimery są droższe niż cement. Produkcja kompozytów polimerowych jest droższa niż zwykłych betonów przede wszystkim ze względu na koszty stosowanych żywic polimerowych. Bardzo istotną sprawą jest więc możliwość zastosowania odpadów polimerowych (głównie odpadów z tworzyw sztucznych) do modyfikacji betonów i zapraw.

Wielu badaczy prowadzi prace związane z możliwością wykorzystania odpadów tworzyw sztucznych do produkcji zapraw. Pozytywne rezultaty modyfikacji zapraw udało się uzyskać m.in. dla takich odpadów jak: tworzywa ABS (kopolimer akrylonitryl-butadien-styren) [1], pianka poliuretanowa [2], polistyren ekspandowany i polistyren [3-6], wykładziny dywanowe zawierające poliamid i polipropylen [7], polietylen o małej i dużej gęstości oraz poli(chlorek winylu) [8], opony, włókna z opon, proszek ze zmieszanych kabli elektrycznych i sproszkowanej gumy [9, 10], a także żywice melaminowo-formaldehydowe [11, 12]. Szczególną uwagę warto poświęcić zaprawom modyfikowanym odpadami poli(tereftalanu etylenu) (PET). Ten materiał odpadowy jest bardzo popularnym tworzywem stosowanym do produkcji opakowań, które bardzo szybko stają się odpadem charakteryzującym się dużą objętością. Przeprowadzone dotychczas badania pokazały, że częściowe zastąpienie żywicy epoksydowej w zaprawach żywicznych przez glikolizat poli(tereftalanu etylenu) skutkuje istotnym polepszeniem wybranych właściwości fizykomechanicznych oraz odporności chemicznej tych zapraw w porównaniu do zapraw niemodyfikowanych [13, 14]. Pozytywne rezultaty przeprowadzonych badań, skłoniły do podjęcia dalszej pracy związanej z tego typu modyfikacją zapraw polimerowych.

W przeprowadzonych badaniach posłużono się modulem Planowanie Doświadczeń zawartym w programie *STATISTICA*. Wykorzystano również oferowane przez ten program narzędzia potrzebne do analizy wyników uzyskanych w trakcie realizacji zaplanowanego doświadczenia. Dokładny opis doboru planu eksperymentu oraz etapy analizy otrzymanych wyników zawarte zostały w innej publikacji [15].

2. PLAN EKSPERYMENTU

Aby ograniczyć ilość koniecznych eksperymentów posłużono się algorytmem statystycznym pozwalającym na znaczną redukcję liczby próbek zapraw, które należy przebadać.

2.1. Użyte surowce

Zaprawy żywiczne wykonano z zastosowaniem żywicy epoksydowej Epidian 5, utwardzacza Z-1, piasku normowego o uziarnieniu 0 - 2 mm oraz glikolizatu poli(tereftalanu etylenu). Zastosowano pięć różnych rodzajów glikolizatów, które oznaczono jako: S1, S2, S3, S4, S5.

2.2. Przygotowanie próbek

Proces otrzymywania zapraw przebiegał w trzech etapach:

Etap 1. Otrzymywanie kompozycji epoksydowych modyfikowanych glikolizatem PET

Odpowiednie ilości żywicy epoksydowej i modyfikatora odważono w zlewce przy użyciu wagi technicznej z dokładnością $\pm 0,01$ g i wymieszano bagietką w celu ujednolicenia. Po wymieszaniu składniki wygrzewano przez 60 minut w temperaturze 353 K w celu umożliwienia reakcji grup funkcyjnych obu składników.

Etap 2. Utwardzanie kompozycji epoksydowych

Po osiągnięciu temperatury pokojowej przez przygotowaną kompozycję epoksydową modyfikowaną glikolizatem PET, zmieszano ją z odpowiednią ilością utwardzacza Z-1 (10 cz.w./100 g żywicy).

Etap 3. Wykonanie zapraw epoksydowych

Do misy mieszarki laboratoryjnej przeniesiono przygotowane wcześniej kompozycje żywiczne i wymieszano z piaskiem normowym zachowując jednakowy czas mieszania i obroty mieszarki. Gotową zaprawę umieszczono w formach stalowych o wymiarach 40x40x160 mm. Tak przygotowane próbki pozostawiono w celu utwardzenia przez 7 dni w temperaturze pokojowej.

2.3. Opis przeprowadzonych badań

Dla utwardzonych zapraw epoksydowych wykonano następujące oznaczenia wytrzymałości mechanicznej:

- **Wytrzymałość na zginanie R_z**
- **Wytrzymałość na ściskanie R_s**

Badania te przeprowadzono zgodnie z normą PN-B-04500: 1985.

2.4. Analiza wyników

Skład zaprawy zaprojektowano w oparciu o dane literaturowe oraz doświadczenie wynikające z przeprowadzonych badań wstępnych. Dzięki odpowiednim modułom programu STATISTICA możliwe było wyznaczenie aproksymującej funkcji obiektu badań, która przybliży zależność między wielkością wyjściową z (wytrzymałość na zginanie lub ściskanie), a wielkościami wejściowymi x_1 i x_2 (procentowa zawartość glikolizatu PET i stosunek żywica/kruszywo (Z/K)). Dla funkcji aproksymującej założono postać będącą wielomianem drugiego stopnia z interakcjami:

$$z = A_0 + A_1x_1 + A_2x_2 + A_3x_1^2 + A_4x_2^2 + A_5x_1x_2 \quad (1)$$

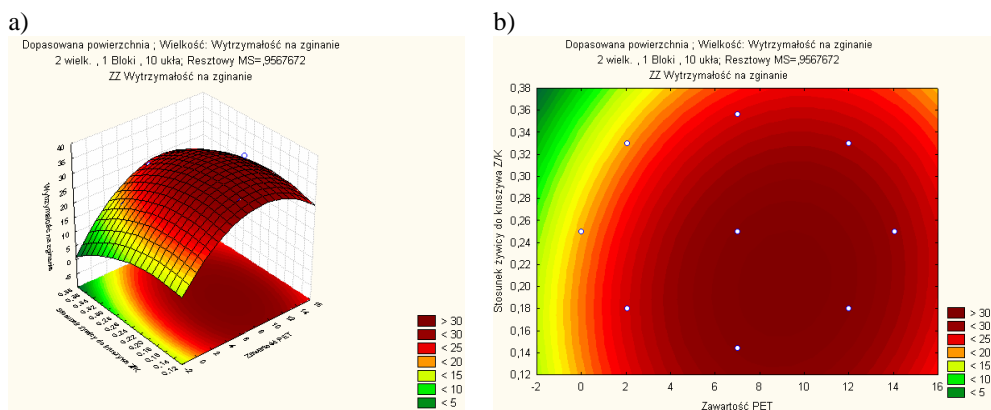
Poniżej przedstawiono odpowiednie równania, opisujące zmiany wytrzymałości na zginanie i ściskanie otrzymane dla zaprawy oznaczonej jako S3:

$$z_{R_z} = 10,94 + 2,62x_1 + 107,39x_2 - 0,16x_1^2 - 302,37x_2^2 + 1,63x_1x_2 \quad (2)$$

$$z_{R_s} = 38,02 + 3,01x_1 + 421,94x_2 - 0,25x_1^2 - 1029,44x_2^2 + 6,67x_1x_2 \quad (3)$$

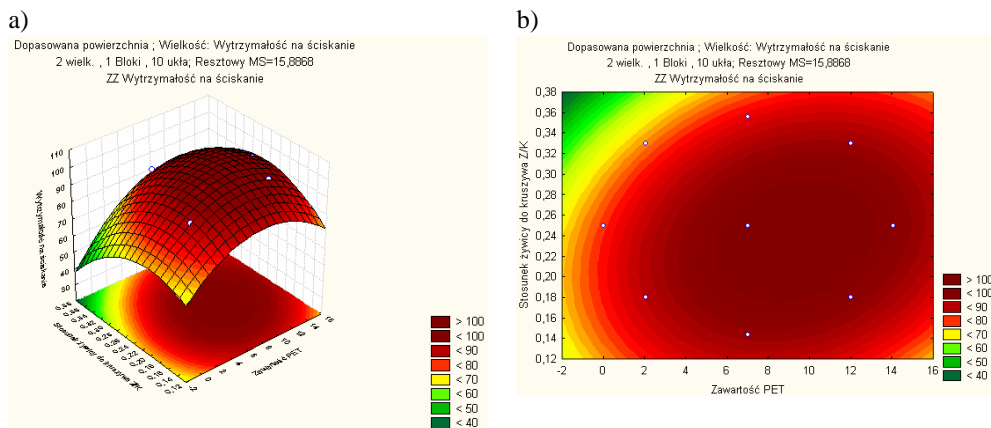
Uzyskane przestrzenne i warstwiczne wykresy powierzchni odpowiedzi (zgodnie z równaniami 2 i 3) przedstawiono na rys. 1 i 2.

Maksimum wytrzymałości na zginanie na wykresie (rys.1) występuje dla wartości zmiennych wejściowych równych odpowiednio: zawartość PET $x_1 = 9,12\%$ i stosunek Z/K $x_2 = 0,20$. W punkcie tym wartość wytrzymałości na zginanie jest maksymalna i wynosi 33,73 MPa. Współrzędne punktu, w którym wartość wytrzymałości na ściskanie w badanym zakresie jest maksymalna i wynosi 101,56 MPa, to zawartość PET równa $x_1 = 9,28\%$, a stosunek Z/K $x_2 = 0,23$ (rys. 2).



Rys.1. Przestrzenny (a) i warstwiczny (b) wykres powierzchni odpowiedzi dla wytrzymałości na zginanie seria S3

Fig.1. Spatial (a) and contour (b) the response surface plot for the bending strength S3 series



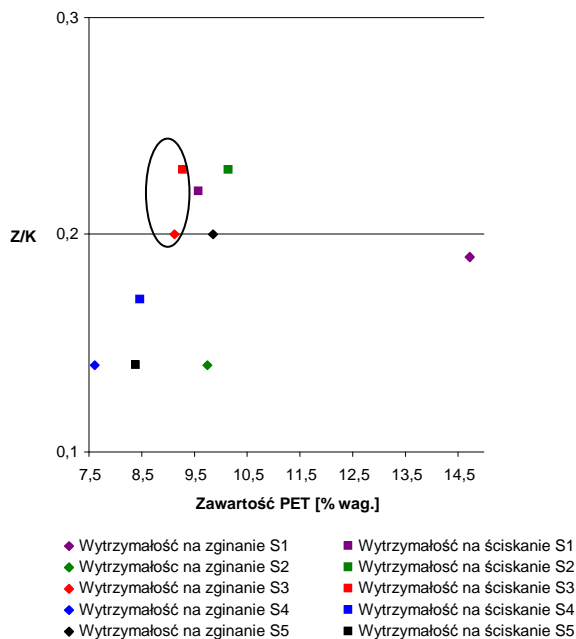
Rys.2. Przestrzenny (a) i warstwiczny (b) wykres powierzchni odpowiedzi dla wytrzymałości na ściskanie seria S3

Fig.2. Spatial (a) and contour (b) the response surface plot for the compressive strength S3 series

Obydwa punkty (9.12, 0.20) i (9.28, 0.23), definiujące krytyczne wartości właściwości: wytrzymałość na zginanie i wytrzymałość na ściskanie, leżą blisko siebie na planie eksperymentu co pozwala stwierdzić, że został znaleziony niewielki przedział zmienności cech, w którym obie w/w właściwości próbek zapraw osiągną wartości ekstremalne.

Podobną analizę przeprowadzono także dla pozostałych rodzajów glikolizatów. Częściowe zastąpienie żywicy glikolizatem okazało się korzystne w przypadku wytrzymałości na zginanie i ściskanie wszystkich modyfikowanych próbek zapraw, jednak zdecydowanie najlepsze wyniki otrzymano dla zaprawy modyfikowanej glikolizatem S3. Właśnie dla tej zaprawy uzyskano najbliższe położenie punktów krytycznych, opisujących taki jej skład, który charakteryzuje się najwyższymi wartościami zarówno wytrzymałości na zginanie, jak i wytrzymałości na ściskanie.

Na rys. 3 przedstawiono lokalizację punktów opisujących skład wszystkich badanych zapraw dla wartości ekstremalnych wytrzymałości na zginanie i ściskanie.



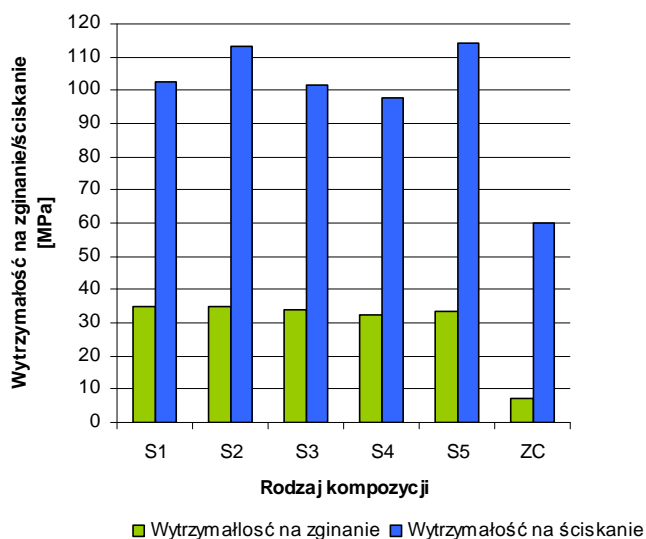
Rys.3. Lokalizacja punktów opisujących skład zapraw dla wartości ekstremalnych wytrzymałości na zginanie i ściskanie

Fig.3. Describing the location of the composition of mortar for the extreme values of bending strength and compressive strength

Na podstawie otrzymanych wyników badań można wnioskować, że zastąpienie żywicy glikolizatem poli(tereftalanu etylenu) jest możliwe w dużym stopniu, tj. od 7,6% do nawet 14,72%. Najlepsze efekty można jednak osiągnąć dla zawartości glikolizatu PET od

8% do 10% (w tym to zakresie zaobserwowano najwięcej punktów ekstremalnych). Zakres zmian stosunku Z/K dla wszystkich punktów ekstremalnych wynosi 0,14-0,23. Oznacza to, że zawartość kruszywa w zaprawie mieści się w granicach 87-81%, a zatem otrzymano stosunkowo niewielki udział żywicy w kompozycie. Jest to ważne stwierdzenie, gdyż żywica stanowi najdroższy składnik badanych zapraw. Obwiednią na wykresie (Rys. 3) otoczono punkty dla zaprawy modyfikowanej glikolizatem S3, którą uznano za najbardziej optymalną ze względu na to, że punkty dla obydwu wartości wyjściowych znajdują się blisko siebie i próbki te zawierają około 9 [% wag.] glikolizatu PET.

Podsumowanie wyników badań dla pięciu serii zapraw S1, S2, S3, S4 i S5 przedstawiono na rysunku 4. Ostatnie dwa słupki wykresu obrazującego ekstremalne wartości wytrzymałości na zginanie i ściskanie, przedstawiają wyniki otrzymane dla zapraw cementowych (ZC) według danych literaturowych [16]. Wartości maksymalne wytrzymałości na zginanie dla wszystkich serii wykonanych zapraw żywicznych, przedstawiają się bardzo podobnie i mieszczą się w granicach od 31,97 MPa do 34,83 MPa. Także wartości wytrzymałości na ściskanie dla wszystkich serii modyfikowanych zapraw nieznacznie się różnią i wynoszą od 100,08 MPa do 113,49 MPa. Należy zaznaczyć, że są to wartości znacznie wyższe od wartości charakteryzujących wytrzymałość na zginanie i ściskanie zapraw cementowych, dla których te parametry są odpowiednio równe: 7 MPa dla zginania i 60 MPa dla ściskania.



Rys.4. Wykres umożliwiający porównanie wartości ekstremalnych dla badanych cech: wytrzymałości na zginanie i ściskanie

Fig.4. The graph allows comparison of extreme values for the studies traits: resistance to bending and compression

3. PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki badań potwierdzają, że zastosowanie odpadowych tworzyw sztucznych pozwala otrzymać zaprawy polimerowe o bardzo dobrych właściwościach wytrzymałościowych, obniżając jednocześnie koszt ich produkcji w stosunku do zapraw polimerowych otrzymanych bez dodatku glikolizatu PET. Zaproponowana metoda umożliwia wykorzystanie materiałów, które stanowią zazwyczaj duży problem środowiskowy, co jest szczególnie ważne w kontekście zrównoważonego rozwoju.

4. LITERATURA

1. Palos A., D'Souza N.A., Snively C.T., Reidy III R.F.; „Modification of cement mortar with recycled ABS”, „Cement and Concrete Research”, nr 31/2001, s. 1003-1007.
2. Mounanga P., Gbongbon W., Poullain P., Turcry P.; „Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes”, „Cement and Concrete Composites”, nr 30/2008, s. 806-814.
3. De Assuncao R.M.N., Foyer B., Oliveira J.S., Filho G.R., De Castro Motta L.A.; „Synthesis, characterization and application of the sodium poly(styrenesulfonate) produced from waste polystyrene cups as an admixture in concrete”, „Journal of Applied Polymer Science”, nr 96/2005, 1534-1538.
4. Kołtuńczyk E., Nowicka G.; „Effect of poly(sodium-4-styrenesulphonate) additives on properties of cement suspensions”, Proceedings of International Scientific Conference „Surfactants and Dispersed Systems in Theory and Practice”, Ed: K.A. Wilk, PALMAPress, Wrocław, 2007, s. 533-536.
5. Choi N.W., Ohama Y.; „Development and testing of polystyrene mortars using waste EPS solution-based binders”, „Construction and Building Materials”, nr 18/2004, s. 235-241.
6. Amianti M., Botaro V.R.; „Recycling of EPS: A new methodology for production of concrete impregnated with polystyrene (CIP)”, „Cement and Concrete Composites”, nr 30/2008, s. 806-814.
7. Schmidt H., Cieślak M.; „Concrete with carpet recycles: Suitability assesment by surface energy evaluation”, „Waste Management”, nr 28/2008, s. 1182-1187.
8. Fowler D.W., Sander D., Carrasquillo R.L.; „The behavior of Portland cement concrete with the incorporation of waste plastic fillers”, „Disposal and Recycling of Organic and Polymeric Construction Materials”, nr 1/1995, s. 61-74.
9. Bignozzi M.C., Saccani A., Sandrolini F.; „New polymer mortars containing polymeric wastes. Part 1. Microstructure and mechanical properties”, „Composites Part A: Applied Science and Manufacturing”, nr 31/2000, s. 97-106.
10. Bignozzi M.C., Saccani A., Sandrolini F.; „New polymer mortars containing polymeric wastes. Part 2. Dynamic mechanical and dielectric behaviour”, „Composites Part A: Applied Science and Manufacturing”, nr 33/2002, s. 205-211.
11. Panyakapo P., Panyakapo M.; „Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete”, „Waste Management”, nr 28/2008, s. 1581-1588.
12. Dweik H.S., Ziara M.M., Hadidoun M.S.; „Enhancing concrete strength and thermal insulation using thermoset plastic waste”, „International Journal of Polymeric Materials”, nr 57/2008, s. 635-656.

13. Dębska B., Żmihorska-Gotfryd A.; „Wpływ recyklatu PET na wybrane właściwości zapraw na podstawie żywic epoksydowych”, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Seria: Budownictwo i Inżynieria Środowiska, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2008, s. 89-98.
14. Dębska B., Żmihorska-Gotfryd A.; „Analiza porównawcza właściwości zapraw na podstawie nienasyconych żywic poliestrowych i epoksydowych modyfikowanych recyklatem PET”, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Seria: Budownictwo i Inżynieria Środowiska, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2008, s. 79-88.
15. Dębska B.; Otrzymywanie wybranych materiałów budowlanych z wykorzystaniem materiałów odpadowych. Cz.2: Studium przypadku, „Izolacje”, w druku
16. Czarnecki L.; Betony polimerowe, XVII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń, 20-23 lutego 2002

INFLUENCE OF PET RECYCLATE ON THE STRENGTH OF POLYMER MORTARS

SUMMARY

The thesis presents methods of obtaining, as well and selected properties of epoxy mortars. The study was conducted on the basis of the plan of the experiment generated by the module of STATISTICA Design of Experiments. Modifier additive improvements resulted in bending strength and compressive strength of all samples made mortars and lowered their cost of production.

Badania opisane w pracy były współfinansowane z grantu promotorskiego, numer umowy: 1943/B/T02/2010/38.

Jurij DOBRIAŃSKI, dr hab. inż.

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
Wydział Nauk Technicznych
ul. Oczapowskiego 11, 10-719 Olsztyn
e-mail: dobr@uwm.edu.pl

SZCZYT ŚWIATOWEGO WYDOBYCIA ROPY A WYZWANIA SPOŁECZEŃSTWA

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono krótki przegląd informacji na temat wydobycia ropy oraz problemów w związku z przyszłym deficytem tego surowca. Jest to autorskie rozumienie tego zagadnienia na podstawie referatów wygłoszonych na 29 Kongresie ISES (International Solar Energy Society), przede wszystkim prac Francisa de Wintera i Ronalda B. Swensona oraz publikacji innych prelegentów kongresu.

1. WPROWADZENIE

Wyczerpanie zasobów paliw kopalnych w niedalekiej przyszłości jest tematem szeroko poruszonym w publikacjach naukowych i mediach publicznych. Mało informacji poświęca się natomiast czasowi i charakterowi spadku ich wydobycia. Z intensywnym spalaniem paliw kopalnych z reguły kojarzy się ocieplenie klimatu. Jest ono odnotowane empirycznie, chociaż jego związek z wykorzystaniem paliw kopalnych nie jest uznawany przez wszystkich naukowców. Ekstrapolacja przyszłego przebiegu procesu ocieplenia klimatu na podstawie danych z ostatnich 50-100 lat jest sprawą niepewną, ale z samym faktem tego zjawiska w przyszłości należy się liczyć. Zmniejszenie dostaw paliwa, na którym opiera się cała współczesna gospodarka oraz zmiany klimatyczne spowodują powstanie problemów nie tylko gospodarczych, ale również społecznych, które – jak świadczy przykłady historii – często prowadzą do konfliktów lub wojen. Przed przyszłymi pokoleniami ludności staje wyzwanie niedopuszczenia zrealizowania się takich prognoz społecznych.

Przyszłe zmiany klimatu pozostają tematem otwartym, natomiast spadek wydobycia ropy określono dość precyzyjnie. Kilka lat temu osiągnięto światowy szczyt wydobycia tego surowca. Stało się dokładnie tak, jak zapowiedział 40 lat temu wybitny amerykański geolog Marion King Hubbert.

Ropa jest tanim, czystym i wygodnym w stosowaniu paliwem oraz substratem do produkcji wielu produktów chemicznych. Jest wykorzystywana na dużą skalę – 5 mld ton rocznie ale jej zasoby są ograniczone – około 180 mld ton. Oznacza to, że, jeżeli dotychczasowe tempo wydobywania i wykorzystania tego minerału zostanie utrzymane, starczy go tylko na 36 lat.

2. POCHODZENIE ROPY

Czas powstania większości złóż ropy datowany jest na dwa klimatyczne okresy Ziemi – 70 i 150 mln lat temu, gdy panowały podwyższone temperatury i zachodziło rozdzielanie kontynentów. Na dnach mórz tropikalnych osiadały wtedy duże masy sinice (cyjanobakterie), które zostały następnie pokryte warstwą osadów. Gdy grubość ostatniej przewyższała 3 km, powodowało to podwyższenie temperatury i ciśnienia. W tych warunkach resztki biologiczne przetwarzają się w kerosen, z którego z czasem powstała ropa i gaz ziemny. Cały proces trwał setki tysięcy lat. Utworzona ropa ma tendencję do unoszenia się do góry w osadowych skałach porowatych. Jeżeli wznoszące się potoki ropy i towarzyszącego jej gazu spotykały na swojej drodze hermetyczną kopułę, to pod kopułą powstawały ich złoża. Natomiast ropa, która przedostała się blisko powierzchni, ulegała parowaniu i biologicznemu rozkładowi, przekształcając w bitum i tworząc w niektórych miejscach piaski bitumiczne. Ropa, która dostała się do samej powierzchni, zginęła miliony lat temu.

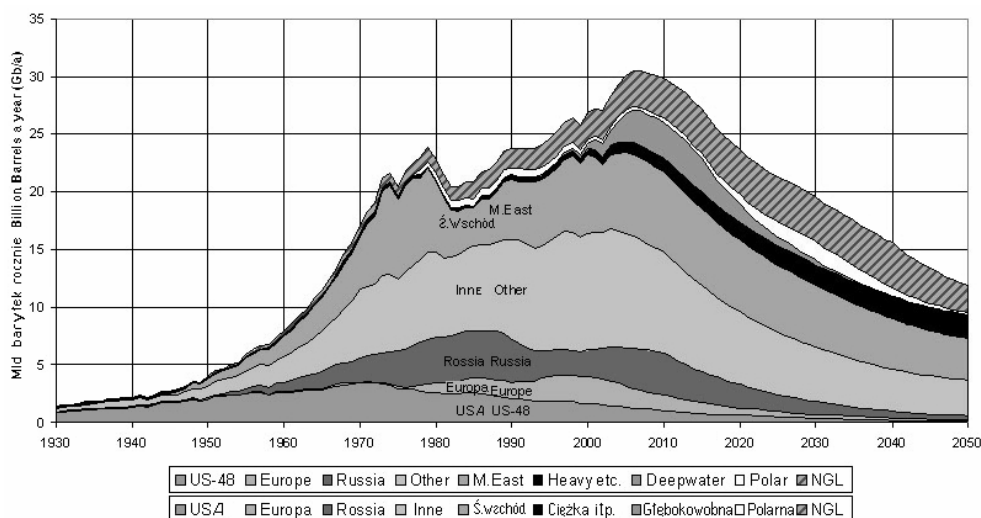
3. WYKORZYSTANIE ROPY

W odróżnieniu od węgla ropa jest surowcem łatwiejszym w wydobywaniu, transporcie i wykorzystaniu. Stała się więc podstawowym surowcem energetycznym. Przez 140 lat ludzie wykorzystywali ją w taki sposób, jakby jej pokłady były niewyczerpalne. Niski koszt wydobywania ropy pozwalał na jej sprzedaż w korzystnej dla konsumenta cenie. Powstawały więc nowe produkty, które były z niej produkowane (plastiki, guma itp.). Ropa stała się surowcem powszechnie wykorzystywanym w transporcie i innych urządzeniach energetycznych (samochody, samoloty, statki, agregaty prądotwórcze), które są podstawą infrastruktury naszej cywilizacji. Rekordzistą w jej zużyciu są Stany Zjednoczone, które wykorzystują ponad 20 mln baryłek (2,8 mln ton) tego surowca dziennie, czyli w ciągu tygodnia zużywają tyle ropy, ile wynosi masa całej ludności USA. W bilansie tym nie uwzględniano wykorzystania gazu, węgla i innych źródeł energii. Dużo energii pochłania produkcja artykułów spożywczych. Stanowi ta energia ponad dziesięciokrotną ilość w porównaniu z ilością energii zawartej w samych produktach. Jest to skutkiem wykonywania takich zabiegów jak orka, kultywacja, nawożenie, obróbka herbicydami, zbiory plonów, oczyszczanie, sortowanie, przetwórstwo, opakowanie, transport i inne działania, które są wykonywane przed dotarciem tych produktów do sklepów. W tym sensie można więc mówić o konsumpcji paliwa kopalnego. Wykorzystanie ropy wyraźnie wpłynęło na wzrost ludności z 1 mld w 1860 r. do 7 mld obecnie. Wykorzystanie ropy nie zlikwidowało jednak problemu głodu na świecie, lecz zachęciło do jej prawie nieograniczonego wykorzystania.

4. WYDOBYCIE ROPY

W ciągu dziesięcioleci najlepsi geolodzy poszukując nowych pokładów ropy dysponowali prawie nieograniczonymi budżetami. Bogaty przemysł ropowy przyciągał do siebie najzdolniejsze osoby. Geolodzy dobrze znają genezę złóż ropowych, im można ufać w sprawie określenia ile ropy pozostało na zbadanych regionach, jak również, ile pokładów ropy można jeszcze odkryć. Oni uważają, że z dostępnych pokładów ropy, których szacuje się na około 300 mld ton, wydobyto już połowę.

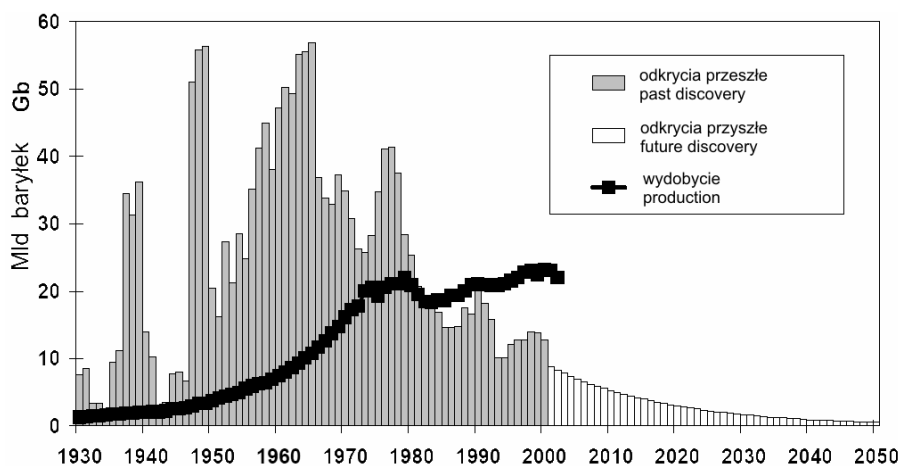
Doktor Marion King Hubbert – jeden z najwybitniejszych geologów zajmujących się ropą naftową – około 1948 roku zaczął badać, jak wyczerpują się zasoby tego surowca w złożach. Eksploatacje złoża prowadzi przez kilka odwiertów. Ponieważ wydobycie ropy przez początkowo wykonane odwierty stopniowo zanika, to do złoża wprowadzają nowe odwierty. Takie złożo w ostateczności osiąga stan, przy którym spadek wydobycia z istniejących odwiertów już nie zostaje uzupełniony wydobyciem z nowych odwiertów. Wydobycie z całego złoża osiąga szczyt (szczyt Hubberta) i zaczyna się zmniejszać. Podobne szczyty charakteryzują poszczególne prowincje naftowe, poszczególne kraje, jak i wydobycie ropy ze złóż całego świata. W następnych swoich pracach Hubbert wskazywał, że Stany Zjednoczone osiągną swój szczyt wydobycia ropy około 1970 roku, a cały świat – około 2000 roku (rys. 1) [1, 3]. Prognozy te w momencie ich powstania w Stanach Zjednoczonych nie były traktowane poważnie, ale się sprawdziły. Choć światowy szczyt Hubberta został nieco opóźniony wskutek oszczędzania ropy w czasie kryzysu lat 70, to jednak nastąpił.



Rys. 1. Scenariusz z 2004 r. wydobycia ropy i gazu płynnego [1, 3]

Fig. 1. Oil and gas liquids 2004 scenario

Niektórzy ekonomiści uważają, że zgodnie z prawem popytu i podaży nadwyżka popytu nad podażą spowoduje wzrost ceny a to z kolei przyczyni się do wzrostu wydobycia ropy. Kryzys energetyczny w latach 70 oraz ogromne wahania cen ropy ostatnich lat przekonująco wskazują, że nawet podwójny wzrost ceny nie wpływa znacznie na wydobycie ropy. Po dziesięciokrotnym wzroście w latach 1940-70 wydobycie ropy w następnych latach (1970-2000) praktycznie zatrzymało się na poziomie 22 mld baryłek (3 mld ton) bez względu na wzrost zapotrzebowania (rys.2) [2, 4].



Rys. 2. Trend odkrycia pokładów ropy i ekstrapolacja na przyszłe odkrycia [2, 4]

Fig. 2. Discovery with past production and extrapolated future discovery

Piaski bitumiczne, ropa głębokowodna, polarna i inne rodzaje niekonwencjonalnej ropy nie mogą istotnie pomóc, ponieważ jest to tylko mała część ropy konwencjonalnej, wydobywanej dla szybkiego zaspokojenia popytu.

5. STYL ŻYCIA

Właśnie popyt na energię wytwarzanej z ropy naftowej, który osiągnął bardzo wysoki poziom, będzie tworzył trudności w okresie nieuchronnego spadku wydobycia ropy. Z powstaniem deficytu wzrośnie i cena ropy. Kiedy naprawdę należy nam dużo zapłacić za energię, to my możemy obejść się znacznie mniejszą jej ilością. Świat już pogodził się z ideą stworzenia budynków o zerowym zapotrzebowaniu na energię, co jeszcze czterdzieści lat temu wydawało się niemożliwe. Oszczędności będą również dotyczyły innych branż, wykorzystujących paliwo kopalne, np. przewozów samolotami i statkami morskimi, dla których paliwo staje się zbyt drogie. W handlu międzynarodowym i w globalizującej się gospodarce także konieczna jest redukcja wykorzystania paliw. Będzie to miało wpływ na styl życia całych społeczeństw.

6. INNE PALIWA

W kontekście szczytu Hubberta pojawia się pytanie perspektywy wydobycia innych paliw kopalnych – węgla i gazu. Wielu fachowców dochodzi do wniosku, że również zasoby i intensywność wydobycia węgla były ocenione zbyt optymistycznie. Kolejną kwestią jest wydobycie gazu ziemnego. W ciągu wielu dziesięcioleci był on niepożądanym produktem pobocznym w czasie wydobycia ropy i był spalany. Zdjęcia satelitarne pokazują wiele miejsc, gdzie odbywa się to do tej pory. Wcześniej wydobycie gazu pokrywało popyt, ale teraz powstaje deficyt tego surowca. W związku z tym zwrócono uwagę na tak zwane nietradycyjne źródła gazu metanu z głębokich pokładów węgla i ze złóż łupku bitumicznego. Takie wydobycie jest trudniejsze i kosztowniejsze, a zasoby też są ograniczone. Sam łupek bitumiczny nie stanie się podstawą do produkcji ropy, chociaż jego pokłady są duże. Gaz będzie natomiast dostępny jeszcze nieco dłużej niż ropa, ale jego pokłady także są ograniczone.

7. WYZWANIE SPOŁECZNE

W związku ze zbliżającym się spadkiem wydobycia paliw kopalnych powstaje pytanie, dla ilu ludzi będzie można zapewnić zadowalające warunki życia, gdy ropa i inne paliwa kopalne się wyczerpią.

Na warunki życia wpłynie nie tylko deficyt paliwa i wytwarzanej z niego energii, ale również oczekiwane w bliskiej przyszłości zmiany klimatu. Nie można jeszcze stwierdzić, że jego ocieplenie już wpłynęło na życie ludzkie, ale już zostało ono odnotowane przez klimatologów. W ciągu ostatniego półwiecza temperatura na Ziemi wzrosła o 0,8°C [6]. Wzrost jej o 2°C grozi skutkami katastrofalnymi, m.in. suszami, spadkiem plonu, burzami, wzrostem poziomu mórz. Z tymi zmianami klimatycznymi wiążą się problemy społeczne: pojawienie się uchodźców, konflikty z powodu podziału zasobów życia i wiele innych.

Powstaje pytanie ilu ludzi może wyżywić Ziemia w warunkach braku paliw kopalnych? Jak uda się wyjść z tych wszystkich kłopotów: czy rozsądnie i pokojowo, czy poprzez konflikty i wojny jak np. „wojna Busha i Cheney’a mająca na celu dostęp do ropy w Iraku dla ich przyjaciół z przemysłu petrochemicznego”[3]?

8. PODSUMOWANIE

Niezbędne jest opracowanie i wdrożenie nowych technologii wykorzystania odnawialnych źródeł energii, w tym głównie energii promieniowania słonecznego. Wyzwaniem społeczeństwa i w pierwszej kolejności wspólnoty naukowej i instytucji zarządzających jest uświadomienie tego problemu i odnalezienie pokojowych sposobów do jego rozwiązania.

6. LITERATURA

- [1] Campbell C.J. <http://www.hubbertypeak.com/campbell/>
- [2] Campbell C.J. *Oil depletion -the heart of the matter*,
<http://www.hubbertypeak.com/campbell/TheHeartOfTheMatter.pdf>
- [3] de Winter F., Swenson R.B. *The recent hubbert peak of world oil production, its likely impacts on population, lifestyles, conflicts, globalization, and the environment; and the*

- challenge and opportunity it offers ISES*. Proceedings of the ISES Solar World Congress 2009: Renewable Energy Shaping Our Future, Johannesburg Oct. 11-14, 2009.
- [4] Longwell, H. *The future of the oil and gas industry: Past approaches, new challenges*, world energy, 5:3 2002: 100-104.
- [5] Schubert R., Schellnhuber H.J., etc. *Climate change as a security risk*. Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen, German Advisory Council On Global Change. Factsheet no 3/2009. http://www.wbgu.de/wbgu_jg2007_engl.pdf
- [6] Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen, German Advisory Council On Global Change. *Climate change: Why 2°C?*. Factsheet no 2/2009. http://www.wbgu.de/wbgu_factsheet_2_en.pdf.

PEAK WORLD OIL PRODUCTION AND SOCIAL CHALLENGES

SUMMARY

This article is a short review of the trends in oil production and the problems to be faced in connection with future oil shortages.

Aleksandra DRYGAŁA, dr inż.;
Leszek A. DOBRZAŃSKI, m. dr h.c. prof. dr hab. inż.

Politechnika Śląska
Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów
Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie
ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice
e-mail: aleksandra.drygala@polsl.pl, leszek.dobrzanski@polsl.pl

OGNIWA FOTOWOLTAICZNE Z LASEROWO TEKSTUROWANĄ POWIERZCHNIĄ

STRESZCZENIE

Większość chemicznych metod teksturowania powierzchni, opartych na trawieniu w wodnych roztworach wodorotlenków, stosowanych dla krzemu monokrystalicznego jest nieefektywna w przypadku krzemu polikrystalicznego z uwagi na chaotyczny rozkład orientacji ziarn. W ramach niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań własności elektryczne i optyczne ogniw fotowoltaicznych wykonanych z płytek krzemu polikrystalicznego o laserowo teksturowanej powierzchni.

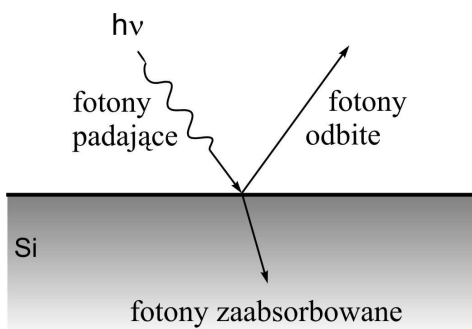
1. WPROWADZENIE

Jednym ze sposobów pozyskiwania tzw. „czystej” energii jest zastosowanie ogniw fotowoltaicznych, które umożliwiają bezpośrednie przetwarzanie promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Początkowo, ze względu na zbyt wysokie koszty, ogniwa słoneczne wykorzystywano tylko w technice kosmicznej. Gwałtowny wzrost sprawności i systematyczny spadek kosztów produkcji zwiększyły ich zastosowanie [1,2].

Dynamiczny rozwój fotowoltaiki stwarza konieczność zwiększenia wymagań stawianych technologii ogniw słonecznych, a w szczególności poprawy ich sprawności. Obecnie krzem ma największy udział w rynku, a konieczność zmniejszania kosztów produkcji spowodowała zainteresowanie krzemem polikrystalicznym. Zastosowanie krzemu polikrystalicznego pozwala na wytwarzanie ogniw fotowoltaicznych o relatywnie wysokich sprawnościach przetwarzania promieniowania słonecznego, sięgających ponad 20%, oraz dobrej stabilności pracy przy niższych kosztach produkcji w porównaniu z ogniwami na bazie krzemu monokrystalicznego [2,3].

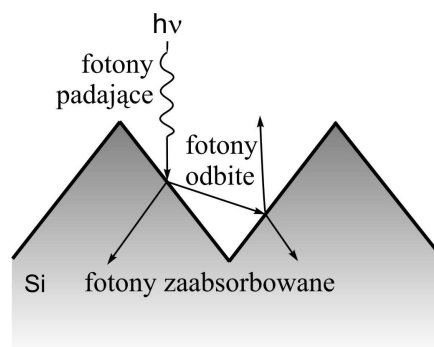
W efekcie fotowoltaicznym mogą brać udział tylko fotony, które są zaabsorbowane przez materiał. Część padającego na ogniwo fotowoltaiczne promieniowania słonecznego zostaje stracona wskutek odbicia przez przednią jego powierzchnią, co jest

spowodowane różnicą współczynników załamania światła w powietrzu i półprzewodniku. Współczynnik odbicia promieniowania słonecznego dla powierzchni płytek krzemowych poddanych trawieniu w celu usunięcia uszkodzeń wprowadzonych w wyniku cięcia mieści się w zakresie 34-50 % dla długości fali w granicach 400-1100 nm. W celu jego redukcji wykonuje się teksturowanie powierzchni ogniwa słonecznego dzięki czemu odbity od powierzchni foton ma szansę po raz drugi być zaabsorbowany (Rys.1, 2) [1,2].



Rys. 1. Schemat oddziaływania fotonów z krzemem [1,2]

Fig. 1. Interaction between the incident sunlight and planar surface [1,2]



Rys. 2. Wpływ teksturowania powierzchni na odbicie i absorpcję promieniowania [1,2]

Fig. 2. The influence of surface texture on light absorption [1,2]

Większość chemicznych metod teksturowania powierzchni, opartych na trawieniu w wodnych roztworach wodorotlenków, stosowanych dla krzemu monokrystalicznego jest nieefektywna w przypadku krzemu polikrystalicznego z uwagi na chaotyczny rozkład orientacji ziarn [2,4,5]. W związku z tym poszukuje się innych, alternatywnych metod teksturowania [5,6]. W ramach niniejszej pracy przedstawiono laserową metodę kształtowania powierzchni krzemu polikrystalicznego.

2. METODYKA BADAŃ

Badania wykonano na płytkach z krzemu polikrystalicznego domieszkowanego borem o powierzchni 50 x 50 mm, grubości ~330 μm firmy Bayer. Laserowe teksturowanie powierzchni krzemu zrealizowano przy użyciu systemu laserowego Allprint DN 50A firmy Alltec, w którym źródłem promieniowania jest laser ze stałym ośrodkiem czynnym - kryształem granatu itrowo-aluminiowego domieszkowanego jonami neodymu (Nd:YAG). Wykonano laserową teksturę odpowiadającą siatce rowków z odstępami między nimi 50 μm i prędkością skanowania wiązki laserowej 80 mm/s.

Badanie topografii powierzchni krzemu po obróbce laserowej wykonano w skaningowym mikroskopie elektronowym ZEISS SUPRA 25. Pomiar współczynnika odbicia promieniowania elektromagnetycznego wykonano na spektrofotometrze Perkin-Elmer Lambda 9 wyposażonym w sferę całkującą dla długości fal λ od 300 nm do 1300 nm. Otrzymane z pomiaru wartości współczynnika odbicia $R(\lambda)$ przeliczono na wartość współczynnika odbicia efektywnego R_{eff} według zależności:

$$R_{eff} = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} R(\lambda) N_{ph}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} N_{ph}(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

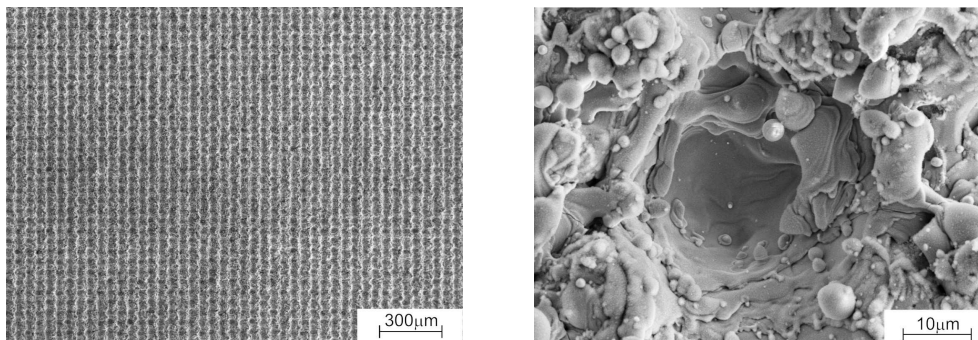
gdzie: $N_{ph}(\lambda)$ – liczba fotonów padających na jednostkę powierzchni dla danej długości fali w czasie 1 sekundy w warunkach AM1,5.

Badania własności elektrycznych ogniw fotowoltaicznych wytworzonych z płytek teksturowanych laserowo wykonano na skomputeryzowanym stanowisku SOLAR-LAB do pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych (I-V) ogniw słonecznych dla standardowego widma promieniowania AM 1,5 o natężeniu promieniowania 1000 W/m^2 i temperaturze ogniw fotowoltaicznych 25°C .

3. WYNIKI BADAŃ

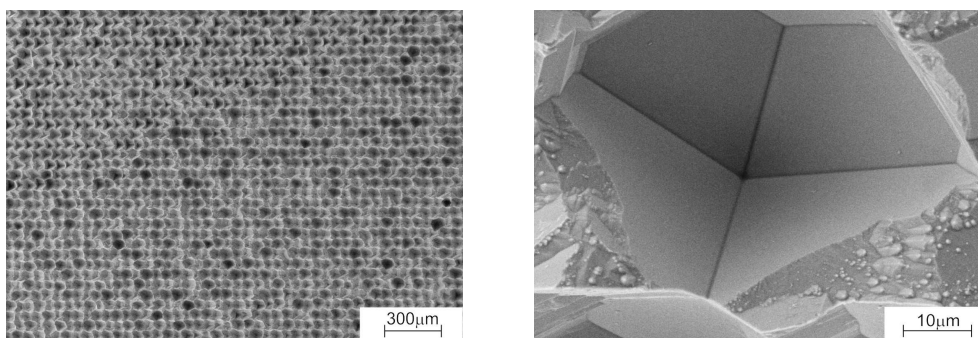
Na rysunku 3 przedstawiono topografię powierzchni płytki z wytworzoną laserowo teksturą odpowiadającą siatce rowków wykonaną przy odstępach między rowkami $0,05 \text{ mm}$. W miejscu przecięcia się rowków powstają charakterystyczne zagłębienia o zwiększonej głębokości, których kształt jest nieregularny z wypływkami na brzegach. Wytworzone zagłębienia są niejednokrotnie wtórnie zalane stopionym i nie w pełni odparowanym materiałem. Z tego względu dno i ściany boczne wytworzonych zagłębień pokryte są warstwą przetopionego, niecałkowicie usuniętego i wtórnie zakrzepłego materiału. Na powierzchni, w obrębie rowków, zagłębień i wypływek występują zniekształcone wykrystalizowane krople krzemu. Ich wymiary są zróżnicowane (średnica do kilku mikrometrów).

Badania wykazują znaczne obniżenie własności elektrycznych ogniw słonecznych wytworzonych z płytek laserowo teksturowanych (rys. 6). W celu usunięcia wierzchniej warstwy krzemu uszkodzonej w wyniku obróbki laserowej wprowadzono dodatkowy etap polegający na trawieniu teksturowanej powierzchni w roztworze 20% KOH w temperaturze 80°C . Usuwanie wierzchnią warstwę materiału o grubości w zakresie $20\div 60 \text{ }\mu\text{m}$. Topografię powierzchni krzemu polikrystalicznego po obróbce laserowej i trawieniu przedstawiono na rysunku 4. W czasie trawienia całkowicie usuwane są wypłyvky oraz powstają zagłębienia powtarzalne na całej teksturowanej powierzchni o regularnym wielościennym kształcie zależnym od orientacji krystalograficznej podłoża. W miarę wydłużania czasu trawienia następuje spłaszczenie wytworzonych zagłębień.



Rys. 3. Topografia powierzchni krzemowej płytki z wytworzoną laserowo teksturą odpowiadającą siatce rowków (SEM)

Fig. 3. SEM micrograph of laser textured surface corresponding to grid of grooves

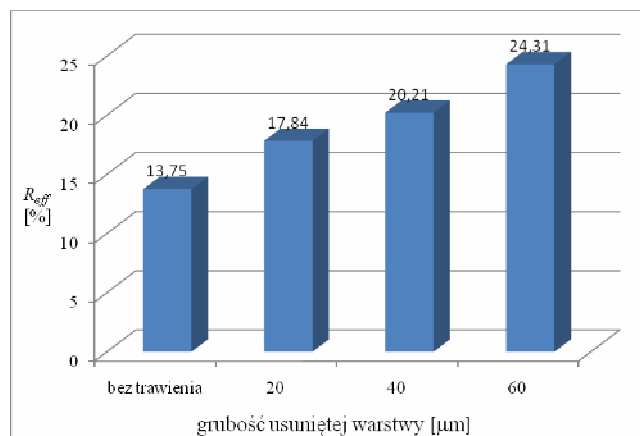


Rys. 4. Topografia powierzchni krzemu polikrystalicznego po obróbce laserowej i usunięciu warstwy uszkodzonej w wyniku obróbki laserowej (SEM)

Fig. 4. SEM micrograph of texture corresponding to grid of grooves after removal of distorted layer

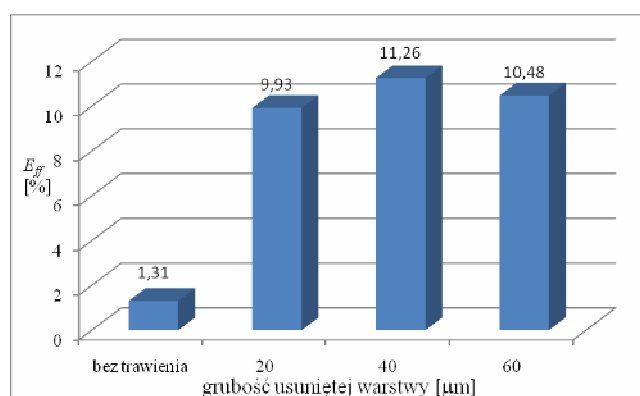
Efektywny współczynnik odbicia światła dla płytki po usunięciu uszkodzeń warstwy wierzchniej powstałych w wyniku cięcia bloku krzemowego wynosi 34,08%. Własności optyczne powierzchni płytek teksturowanych laserowo zależą istotnie od warunków obróbki laserowej i trawienia (rys.5). Najmniejszą wartość efektywnego współczynnika odbicia światła R_{eff} otrzymano dla powierzchni krzemu laserowo teksturowanej nietrawionej. Wraz ze wzrostem grubości usuwanej warstwy współczynnik R_{eff} rośnie.

Sprawność ogniw słonecznych wykonanych z płytek nieteksturowanych wynosi 10,21%. Laserowe teksturowanie powierzchni krzemu polikrystalicznego pogarsza własności elektryczne ogniw fotowoltaicznych wykonanych z przygotowanych w ten sposób płytek (rys. 6). W przypadku ogniw słonecznych wytworzonych z płytek teksturowanych i trawionych sprawność ogniw fotowoltaicznych zwiększa się i uzyskuje największą wartość, gdy usunięta jest przez trawienie warstwa wierzchnia o grubości 40 μm uszkodzona w wyniku obróbki laserowej.



Rys. 5. Zależność efektywnego współczynnika odbicia światła dla powierzchni krzemowej płytki z laserową teksturą od grubości warstwy usuniętej w wyniku trawienia

Fig. 5. Effective reflectance for textured wafers after removal of laser induced damage layer of different thickness



Rys. 6. Zależność sprawności ogniw fotowoltaicznych wykonanych z płytek laserowo teksturowanych od grubości warstwy usuniętej w wyniku trawienia

Fig. 6. Efficiency of solar cells manufactured from laser textured wafers after removal of damage induced layer of various thickness

4. WNIOSKI

W ramach niniejszej pracy zbadano możliwość zastosowania niestandardowej metody teksturowania powierzchni krzemu polikrystalicznego bazującej na obróbce laserowej w grubowarstwowej technologii wytwarzania krzemowych ogniw fotowoltaicznych.

Laserowe teksturowanie powierzchni krzemu polikrystalicznego poprawia jego własności optyczne. W miarę postępu trawienia stopniowo zwiększa się współczynnik odbicia światła od teksturowanej powierzchni poddanej trawieniu. Własności elektryczne

ogniw fotowoltaicznych wykonanych z płytek krzemu polikrystalicznego o laserowo teksturowanej powierzchni są gorsze niż własności elektryczne ogniw słonecznych wytworzonych z płytek o nieteksturowanej powierzchni po usunięciu uszkodzeń powstałych w wyniku cięcia. Trawienie laserowo steksturowanej powierzchni krzemu polikrystalicznego powoduje zwiększenie sprawności ogniw fotowoltaicznych wykonanych z przygotowanych w ten sposób płytek. Największa sprawność uzyskano po usunięciu przez trawienie warstwy wierzchniej o grubości 40 μm .

5. PODZIĘKOWANIA

Praca częściowo realizowana jest w ramach projektu NN 508 444 136 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Autorzy pragną podziękować pracownikom Laboratorium Fotowoltaicznego w Kozach za wykonanie ogniw słonecznych.

6. LITERATURA

- [1] Green M.A., Photovoltaics: technology overview, *Energy Policy*, 28 (2000) 989-998.
- [2] Goetzberger A., Hoffmann V.U., Photovoltaic solar energy generation, Springer, Berlin, 2005.
- [3] Green M.A., Emery K., King D.L., Hisikawa Y., Warta W.: Solar cell efficiency tables (version 27)., *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, (2006) 45-51
- [4] Nijs J., Sivoththaman S., Szlufcik J., De Clercq K., Duerinckx F., Van Kerschaever E., Einhaus R., Poortmans J., Vermeulen T., Mertens R., "Overview of solar cell technologies and results on high efficiency multicrystalline silicon substrates", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 48 (1997) 199-217.
- [5] Dobrzański L.A., Drygała A., Panek P., Lipiński M., Zięba P., Development of the laser method of multicrystalline silicon surface texturization, *Archives of Materials Science and Engineering* 38/1 (2009) 5-11.
- [6] Duerinckx F., Szlufcik J., Nijs J., Mertens R., Gerhard C., Markmann C., Gath P., Willeke G., High efficiency, mechanically V-textured, screen printed multicrystalline silicon solar cells with silicon nitride passivation, *Proceedings of the 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, Leuven Belgium, 1998, 1248-1253.

SOLAR CELLS WITH LASER TEXTURED SURFACE

SUMMARY

Texturing of polycrystalline silicon surface using Nd:YAG laser makes it possible to increase absorption of the incident solar radiation. However, solar cells produced from laser-textured polycrystalline silicon wafers demonstrate worse electrical performance than cells manufactured from the untextured wafers after saw damage removal. Etching of textured surface introduced into technology of the photovoltaic cells manufactured from laser textured wafers allows for significant improvement in their electrical performance compared to cells produced from the untextured wafers after saw damage removal.

Michał DUDA, mgr,
Daniel CHLUDZIŃSKI, mgr

Uniwersytet Warmińsko Mazurski
Katedra Elektrotechniki i Energetyki
ul. Oczapowskiego 11, 10-7367 Olsztyn
e-mail: duda_michal@o2.pl

WYKORZYSTANIE BIOMASY DO PRODUKCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ NA PRZYKŁADZIE BIOGAZOWNI W PAUßNITZ W POŁUDNIOWYCH NIEMCZACH

STRESZCZENIE

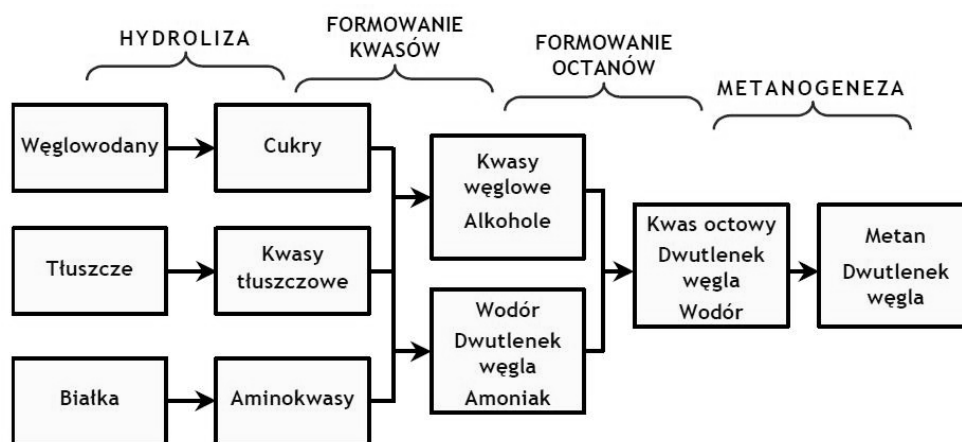
W referacie przedstawiono wykorzystanie biomasy do produkcji energii elektrycznej na przykładzie biogazowni w Paußnitz w południowych Niemczech. Energia elektryczna wytwarzana jest w wyniku spalania biogazu pochodzącego z biomasy rolniczej, w silnikach spalinowych. Nadwyżka ciepła wytwarzanego w procesie technologicznym wykorzystana jest sezonowo w suszarni nasion kukurydzy oraz do ogrzewania uprawy szparagów.

1. WPROWADZENIE

Główne zasoby polskiej energetyki odnawialnej tkwią w biomasie. Decyduje o tym fakt, że wyprodukowanie jednostki energii z biomasy wymaga kilkokrotnie mniejszych nakładów inwestycyjnych niż wyprodukowanie jej z innych źródeł [1]. Biomasa w zależności od jej składu może być przeznaczona do bezpośredniego spalania, wykorzystana do produkcji biogazu lub przetwarzana na ciekłe paliwa silnikowe (biodizel lub bioetanol) [2]. W kontekście ekonomicznym jak i ekologicznym pozyskiwanie energii w fermentacji beztlenowej okazuje się najbardziej efektywnym procesem [3].

Biologiczna degradacja substancji organicznej w warunkach beztlenowych nosi nazwę fermentacji anaerobowej (beztlenowej). Produktem fermentacji jest biogaz oraz przefermentowany osad o wysokim stopniu zmineralizowania [4]. Fizycznie biogaz stanowi roztwór gazowy składający się głównie z metanu i dwutlenku węgla oraz śladowych ilości zanieczyszczeń takich jak siarkowodór i amoniak [5]. Skład jakościowy i udział poszczególnych składników zależą od rodzaju surowca poddawanego biodegradacji oraz od sposobu realizacji tego procesu. Zawartość metanu w biogazie wynosi od 42 do 85%.

Średnio przyjmuje się 65% metanu i 35% dwutlenku węgla. Na rys. 1 przedstawiono schematycznie główne etapy biodegradacji anaerobowej. Proces rozpoczyna się od hydrolizy wielkocząsteczkowych związków organicznych do rozpuszczalnych związków prostych a następnie zachodzą dalsze przemiany produktów przejściowych do kwasu octowego, wodoru i dwutlenku węgla. Ostatnim etapem jest metanogeneza [5, 6]. Proces metanogenezy może być realizowany przez różne szczepy bakterii w zależności od temperatury złoża w zakresie (10-70°C). W zasadniczy sposób od temperatury procesu zależy intensywność jego zachodzenia oraz dominanta poszczególnych szczepów mikroorganizmów go wywołujących.



Rys. 1 Schemat ważniejszych etapów procesu fermentacji anaerobowej [5]

Fig. 1. A scheme of prior stages in anaerobic fermentation process

Należy podkreślić, że fermentacja anaerobowa jako proces biologiczny zachodzi wszędzie tam gdzie są spełnione warunki dla rozwoju bakterii metanogennych – ograniczony dostęp tlenu i odpowiedni zakres temperatur. Fakt ten jest przyczyną znacznej niekontrolowanej emisji metanu i dwutlenku węgla do atmosfery wynikającej np.: z nawożenia pól uprawnych obornikiem bądź ze składowania odpadów organicznych. Zważywszy na wysoki potencjał „cieplarniany” metanu (ok. 21 razy większy niż CO₂) celowym jest przeprowadzenie procesu biodegradacji bardziej efektywnie i w sposób kontrolowany, w instalacjach technicznych z zagospodarowaniem wytworzonego nośnika energii [6]. Zasadniczo można wyróżnić trzy różne typy instalacji wykorzystujących proces fermentacji beztlenowej produkcji biogazu: biogazownie rolnicze, fermentacje osadów ściekowych oraz ujęcia biogazu na wysypiskach śmieci.

Pojęcie biogazowania rolnicza może dotyczyć zarówno skali instalacji do produkcji i utylizacji biogazu jak i typu oraz pochodzenia surowca poddawanego fermentacji. Biogazownie rolnicze są na świecie bardzo popularne, zwłaszcza w Azji (Chiny, Indie), gdzie dominują działające periodycznie bardzo proste i tanie, wykonane sposobem gospodarskim podziemne niezaizolowane komory fermentacyjne. Wytworzony

i zmagazynowany biogaz jest wykorzystywany na potrzeby kuchenne oraz do oświetlenia. W niektórych częściach świata (np. na Bliskim Wschodzie) instalacje biogazowe służą nie tyle do zaspokajania potrzeb energetycznych, co do rozwiązania problemu odorów towarzyszących omawianym odpadom oraz do uzyskiwania wysokiej jakości humusu do użyźniania gleby. Najbardziej zaawansowane technologicznie są instalacje europejskie [4].

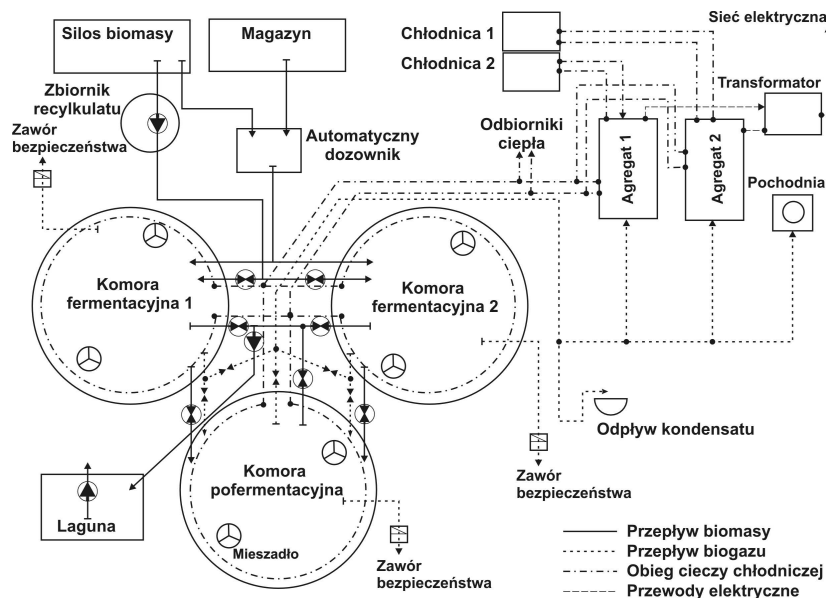
W artykule, na przykładzie biogazowni rolniczej w południowych Niemczech, przedstawiono proces technologiczny wytwarzania biogazu oraz jego utylizacji w procesie spalania w silnikach kogeneracyjnych CHP (ang. combined heat and power), generujących równocześnie energię elektryczną i ciepłą. Opisano zastosowany w biogazowni sposób zagospodarowania wytworzonej energii oraz systemowe rozwiązania prawne wspierające tego typu działalność.

2. OPIS OBIEKTU

Biogazownia zlokalizowana jest około 10 km od miasteczka Strahla w południowych Niemczech w gospodarstwie rolnym o powierzchni 1000 ha. Uruchomiona została w 2007 roku. W skład biogazowni wchodzi: dwie komory fermentacyjne o pojemnościach 1300 m³, komora pofermentacyjna 1300 m³, zbiornik recyrkulatu oraz laguna. Widok biogazowni został przedstawiony na rysunku 2. Produkowany biogaz, po oczyszczeniu jest bezpośrednio spalany w dwóch silnikach układu kogeneracyjnego o łącznej mocy elektrycznej 590 kW. Wyprodukowana w ten sposób energia elektryczna w całości sprzedawana jest do sieci natomiast ciepło z chłodzenia silników wykorzystywane jest do ogrzewania pobliskich budynków gospodarczych, sezonowo w suszarni nasion kukurydzy, uprawy szparagów oraz przeznaczone jest na utrzymanie stałej temperatury fermentacji w komorach. Schemat biogazowni przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 2 Biogazownia rolnicza w Paußnitz
Fig. 2. Agricultural biogas plant in Paußnitz



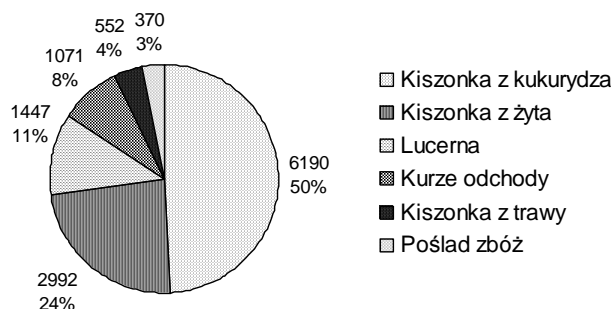
Rys. 3 Schemat biogazowni
Fig. 3. The scheme of biogas plant

2.1. Proces technologiczny

Proces technologiczny produkcji biogazu rozpoczyna się od dostarczenia do komór fermentacyjnych rozdrobnionej biomasy. Ilość dostarczanej biomasy oraz jej skład zależy od jej rodzaju, ilości wytwarzanego w danej chwili biogazu a także efektywności tego procesu. Równocześnie do komór fermentacyjnych wpompowuje się recykulat (ciekła pozostałość z poprzedniej fermentacji) w ilości, która umożliwia utrzymanie 10% zawartości suchej masy we wsadzie fermentora. Wsad okresowo jest mieszany. Nadmiar wsadu z komór fermentacyjnych przepływa do komory pofermentacyjnej, skąd podawany jest do separatora w celu usunięcia cieczy z wsadu pofermentacyjnego. Odseparowana ciecz stanowi recykulat, gromadzony w specjalnym zbiorniku w celu ponownego jego wykorzystania. Nadmiar recykulatu magazynowany jest w lagunie. Średni czas przebywania wsadu w komorach fermentacyjnych wynosi 40 dni. Powstały biogaz zbiera się w górnej części komory fermentacyjnej pod wypukłą membraną utrzymującą stałe jego ciśnienie. W komorach utrzymywana jest temperatura 40 °C, co zapewnia optymalne warunki dla wzrostu bakterii metanowych przy relatywnie wysokim uzysku gazu oraz przy zachowaniu dobrej stabilności procesu. Po usunięciu siarki z biogazu przez bakterie siarkowe, biogaz schładza się w wymienniku gruntowym w celu usunięcia z niego pary wodnej, po czym spręża do ciśnienia 70 mbar i spala w silnikach napędzających generatory. Załączenie silników generatorów oraz stopień ich obciążenia sterowane są automatycznie w zależności od ciśnienia biogazu w komorach fermentacyjnych. Nadmiar biogazu, w przypadku awarii silników lub zbyt dużego uzysku, spalany jest w pochodni.

3. BIOMASA I BIOGAZ

W biogazowni jako główny substrat stosowana jest kiszonka z kukurydzy 50% oraz z żyta 24%. Dodatkowo wykorzystywane są kurze odchody, poślad zbożowy, lucerna oraz kiszonka z trawy. Dziennie biogazownia przerabia około 30 t biomasy pozyskując od 5 000 do 6 500 Nm³ biogazu. Łącznie, w roku 2009, biogazownia przerobiła 12 tys. ton biomasy produkując 2196500 Nm³ biogazu o średniej zawartości metanu 53%. Na wykresie Rys. 4 przedstawiono ilość oraz udział poszczególnych substratów zużytych w produkcji biogazu w roku 2009.

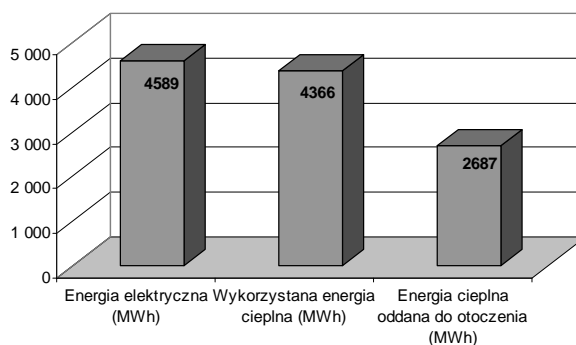


Rys. 4 Zużycie biomasy w biogazowni w tonach (dane za rok 2009)

Fig. 4. Usage of biomass in biogas plant in tonnes (data for 2009)

4. PRODUKCJA ENERGII ELEKTRYCZNEJ I CIEPLNEJ

Biogazownia wytwarza energię elektryczną w układzie kogeneracyjnym. W roku 2009 wygenerowała 4589 MWh energii elektrycznej oraz 7052 MWh energii cieplnej, przy czym 4366 MWh energii cieplnej zostało zagospodarowane, co przedstawiono na Rys. 5. Sprawność kogeneracyjnego przetworzenia energii chemicznej biogazu wyniosła 78% przy średniej uzyskanej mocy generowania energii elektrycznej 525 kW.



Rys. 5 Produkcja energii elektrycznej oraz cieplnej (dane za rok 2009)

Fig. 5. Electricity and thermal energy production (data for 2009)

5. ASPEKTY EKONOMICZNE FUNKCJONOWANIA BIOGAZOWNI

Biogazownia posiada podpisaną umowę kontrakcyjną na zakup wyprodukowanej energii elektrycznej. Umowa obejmuje okres 20 lat i przez ten czas zapewnia stałą cenę podstawową zakupu zakontraktowanej energii. Dodatkowo do ceny podstawowej doliczane są bonusy, których wartość określa ustawa EEG 2009. Wysokość stawki podstawowej za jednostkę energii elektrycznej oraz stawki naliczonych bonusów dla biogazowni przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Stawka za energię elektryczną wyprodukowaną z odnawialnych źródeł energii

Table 1. A rate for electricity produced from renewable energy sources

| Stawka | Wysokość stawki cent/kWh |
|---|---------------------------------|
| Stawka podstawowa dla mocy poniżej 500 kW | 9,18 |
| Bonus (surowce odnawialne) | 7 |
| Bonus technologia | 2 |
| Bonus za wykorzystanie ciepła | 1,7 |
| Razem | 19,88 |

W okresie od stycznia do września ciepło wytwarzane w biogazowni wykorzystywane jest do ogrzewania gruntu o powierzchni 1,5 ha, na którym uprawiane są szparagi. W pozostałej części roku ciepło jest wykorzystywane w suszarni nasion kukurydzy oraz do ogrzewania garaży. Za ciepło doprowadzone do uprawy szparagów właściciel biogazowni nie otrzymuje zapłaty, a jedynie zwrot kosztów jego dystrybucji. Zysk właściciela biogazowni to premia określona w ustawie za wykorzystanie ciepła, która w tym przypadku wynosi 1,7 eurocenta do każdej wyprodukowanej kWh energii elektrycznej. Przychód z tego tytułu w roku 2009 wyniósł 78 000 euro. W okresie letnim ogrzewanie gruntu jest kontynuowane ze względu na to, iż ilość energii elektrycznej pobieranej przez pompy cyrkulacyjne jest mniejsza od energii pobieranej przez chłodnice powietrzne silników.

Rocznie w suszarni, do której doprowadzane jest ciepło z biogazowni, dosuszane jest około 5 000 t ziarna kukurydzy. Obecnie biogazownia w 75% procentach zaspokaja potrzeby suszarni. Pozwoliło to obniżyć koszt suszenia ziarna o 75 000 euro rocznie.

Biogazownia jako produkt uboczny z 12 000 t przerobionej biomasy w roku 2009, wytworzyła 8 500 m³ płynnego nawozu naturalnego (gnojowicy), który wykorzystany został do nawiezienia 150 ha pola uprawnego. Koszt wywozu gnojowicy to 180 euro/ha, co przy koszcie 310 euro/ha w przypadku nawożenia nawozami sztucznymi pozwoliło zaoszczędzić 19 500 euro.

Po uwzględnieniu bonusów za stosowanie surowców odnawialnych, technologię a także wykorzystane ciepło, właściciel za każdą wyprodukowaną kWh energii elektrycznej otrzymuje 19,88 eurocenta. W roku 2009 przychód brutto ze sprzedaży energii elektrycznej wyniósł około 0,9 mln euro, a przychód netto około 110 000 euro. W tabeli 2 przedstawiono zestawienie kosztów i przychodów funkcjonowania biogazowni w roku 2009. Jednocześnie należy zauważyć, iż w przypadku, gdyby biogazownia została pozbawiona

wszystkich bonusów i otrzymała jedynie stawkę podstawową za jednostkę wyprodukowanej energii, przyniosłaby straty około 382 000 euro.

Wartość inwestycji to 1,6 mln euro, przy czym inwestor otrzymał wsparcie od państwa w wysokości 25% całkowitego kosztu – 400 tys. euro, pozostałą kwotę sfinansował zaciągając niskooprocentowany kredyt. Przewidziany czas spłaty kredytu wynosi 8 lat.

Tabela 2. Roczne zestawie kosztów oraz przychodów funkcjonowania biogazowni (dane rok 2009)

Table 2. The annual statement of costs and revenue of biogas plant working (data for 2009)

| | |
|---|-----------------|
| Wytworzona energia elektryczna | 4589000 kWh |
| Cena za 1 kWh sprzedanej energii elektrycznej | 0,1988 € |
| Przychód brutto | 912293 € |
| Koszt eksploatacji | 802793 € |
| - uprawa zakup biomasy | 328500 € |
| - inne (obsługa biogazowi, zakupiona energia elektryczna, amortyzacja, obsługa kredytu) | 474293 € |
| Przychód netto działalności | 109500 € |

6. PODSUMOWANIE

Biogazownie wytwarzające energię elektryczną w układach kogeneracyjnych doskonale wpisują się w ideę rolnictwa zrównoważonego stwarzając możliwość zaspokojenia własnych potrzeb energetycznych, uzyskania przychodu poprzez odsprzedaż nadwyżki energii do sieci, przy okazji utylizacji własnych odpadów oraz wykorzystania przefermentowanej biomasy do uzupełnienia składników mineralnych w uprawianej glebie. W opisaniej biogazowni sprawność generowania energii elektrycznej wyniosła 39%. Ogólna sprawność zależy jednak od wykorzystania ciepła wydzielanego w dużej ilości w procesie spalania biogazu w silnikach.

Równocześnie przytoczony przykład biogazowi pokazuje, że wdrożenie nowych, wydajnych równocześnie drogiej technologii może nastąpić jedynie przy zastosowaniu przez państwo rozwiązań systemowych o podłożu ekonomicznym.

7. LITERATURA

- [1] Kuś J., Możliwości produkcji i wykorzystania biomasy na cele energetyczne, *Prob. Ekol.* 2006, vol. 10 nr 1, s 29-34,
- [2] Mikołajczak J., Wróbel B., Jurkowski A., Możliwości i bariery produkcji biogazu z biomasy trwałych użytków zielonych w Polsce, *Woda – Środowisko – Obszary wiejskie* 2009, t. 9 z. 2(26), s 139-155,
- [3] Braun R. Biogas and bioenergy system developments towards bio-refineries Trends in a central European context, *Baltic Biorefinery Symposium 26–28 May, 2005, Aalborg University Esbjerg*,
- [4] Piątek R., Nowoczesne technologie energetycznego wykorzystania odpadów pochodzenia zwierzęcego, *XIX Zjazd Termodynamików, Sopot 2005*

- [5] Togisch S., Baaske W.E., Biogas powered fuel cells. Case studies for their implementation, Publisher Trauner Verlag, Linz 2004,
- [6] Al Seadi T., Good practice in quality management of AD residues from biogas production, IEA Bioenergy, Task 24 – Energy from biological of organic waste, 2001, Kalin J., Skorek J., Paliwa gazowe dla układów kogeneracyjnych, Materiały Seminarium „Generacja Rozproszona”, cykl „Elektroenergetyka w procesie przemian”, Gliwice 2002,

USE OF BIOMASS FOR ELECTRICITY PRODUCTION FOR EXAMPLE OF BIOGAS PLANT IN PAUßNITZ IN SOUTHERN GERMANY

SUMMARY

In the paper has been presented a use of biomass for electricity production for example of biogas plant in Paußnitz in southern Germany. The electricity is produced as a result of biogas combustion coming from agricultural biomass, in internal-combustion engines. An excess of heat generated in technological process is seasonally used in maize seeds drying chamber as well as for heating the asparagus growing.

