

Spis treści

Vadim NIKITSIN, Beata BACKIEL–BRZOZOWSKA, Marta KOSIOR–KAZBERUK

Ocena mrozoodporności betonu na podstawie krytycznego poziomu skumulowanych uszkodzeń

Evaluation of concrete frost resistance on the basis of critical level of cumulated damages..... 79

Barbara SADOWSKA-BURACZEWSKA, Magdalena PAZIK

Beton wysokiej wytrzymałości w elementach żelbetowych zespolonych

The high strength concrete in the hybrid reinforced concrete members 85

Aneta SIENKIEWICZ

Zawartość wybranych metali ciężkich w glebach autogenicznych nadleśnictwa Supraśl

i Dojlidy w Puszczy Knyszyńskiej

Content of selected heavy metals in autogenic soils in the Supraśl and Dojlidy forest division

in the Knyszyńska Forest..... 91

Justyna SIERGIEJUK, Andrzej GAJEWSKI

Wybór źródła zasilania pomiędzy kotłownią na biopaliwo a pompą ciepła dla obiektów w zabudowie szeregowej

Choice of power source of heat between biofuel-fired boiler room and heat pump for terrace houses..... 95

Robert STACHNIEWICZ

Metody oceny efektywnej grubości docieplania ścian zewnętrznych

Methods of estimation of the effective thickness of insulating outer walls 103

Tomasz Janusz TELESZEWSKI, Sławomir Adam SORKO

Implementacja metody różnic skończonych z optymalizacją metody Liebmana w modelowaniu laminarnych

przepływów w przewodach prostoosiowych o dowolnym kształcie przekroju przewodu

Implementation of the finite difference method with the Liebmann method for the solution of laminar flow

through straight pipes..... 109

Abstracts Vol. 3 No. 2

Vadim NIKITSIN, Beata BACKIEL–BRZOZOWSKA, Marta KOSIOR–KAZBERUK

Evaluation of concrete frost resistance on the basis of critical level of cumulated damages

Frost resistance of building materials is considered to be the main indicator of their durability. The analysis of degradation process of building materials subjected to cyclic freezing and thawing showed that the damages development in time runs according to two stages. The first stage is characterised by a slower damages accumulation process and a longer duration in comparison with the second stage. It was shown the time of passage the material degradation process from the first stage to the other one assigns the critical level of damages accumulation, which can be assumed for evaluation of material frost resistance. The methods to determine this criterion were proposed.

Barbara SADOWSKA-BURACZEWSKA, Magdalena PAZIK

The high strength concrete in the hybrid reinforced concrete members

The paper summaries the experimental of flexural capacity and deformability of structural concrete beams prepared as composite members consisting of two concrete layers made of reinforced normal concrete and high-strength concrete (HSC). The reinforced concrete composite beams used in the tests were prepared in modelling scale with the rectangular-section of 80 × 120 mm and the effective span of 1100 mm. The basic samples were composed in two layers consisting of high strength concrete as the top layer (C60/75 and C100/115), and normal strength concrete.

Aneta SIENKIEWICZ

Content of selected heavy metals in autogenic soils in the Supraśl and Dojlidy forest division in the Knyszyńska Forest

The paper presents the results of research concerning contents of the selected heavy metals (Cu, Co, Ni, Pb, Cr, Cd) in autogenic soils in the Supraśl and Dojlidy Forest Division in the Knyszyńska Forest. The aim of the studies was to determine the degree of soil pollution with heavy metals from communication. The research results show that the contents of the examined trace elements do not exceed the concentration limits for the soils of areas protected by law. The highest concentration in surface soil layer was found for copper, and the lowest for cadmium. Vegetation has a significant effect on reducing the heavy metal concentration, through increased assimilation by plants in a strongly acidic forest soils.

Justyna SIERGIEJUK, Andrzej GAJEWSKI

Choice of power source of heat between biofuel-fired boiler room and heat pump for terrace houses

In paper choice between biofuel and heat pumps as heat sources for terrace house was made. Calculations for heat demand equaling 148,97 kW were made. Geothermal heat pumps were matched and pellets were chosen as a biofuel. Afterward capital and working costs for analyzed heat sources were calculated. Results showed which of both heat sources is more cost-effective investment.

Robert STACHNIEWICZ

Methods of estimation of the effective thickness of insulating outer walls

The applied method of the judgement plays a vital role in case of the determination of effective thickness of thermal isolation. Simple methods (such as *SPBT - Simple Pay Back Time*) point at other effective thicknesses than the methods making use of the discount technique (for example *NPV – Net Present Value*). The effective thickness of thermal isolation calculated with the simple method (*SPBT*) will be different from the second one, calculated with the method *NPV*. It results from the fact that the calculations making use of the *SPBT* method include solely the period of the expenses refund. On the other hand the calculations making use of the discount technique involve the whole period of the investment duration. Additionally in the report the influence of five kinds of fuel on effective thickness of thermal insulation in the hypothetical cottage has been analysed. The effective thickness of thermal insulation was determined applying the criterion simple payback time *SPBT* and net present value *NPV*.

Tomasz Janusz TELESZEWSKI, Sławomir Adam SORKO

Implementation of the finite difference method with the Liebmann method for the solution of laminar flow through straight pipes

The work contains the implementation of the Finite Difference Method with the Liebmann Method for the solution of laminar flow through straight pipes using a two-dimensional grid. This method is the reduction of the three-dimensional grid to two-dimensional in the cross-section of duct. The algorithm were verified by numerical tests and compared with analytical solution. A numerical examples are presented.

OCENA MROZODPORNOŚCI BETONU NA PODSTAWIE KRYTYCZNEGO POZIOMU SKUMULOWANYCH USZKODZEŃ

Vadim NIKITSIN^a, Beata BACKIEL-BRZOZOWSKA^{b*},
Marta KOSIOR-KAZBERUK^b

^a Instytut Budownictwa, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej,
ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska

^b Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W pracy przeprowadzono analizę danych literaturowych oraz wyników badań własnych, dotyczących zmian wybranych właściwości lub wskaźników destrukcji próbek kapilarno-porowatych materiałów budowlanych w procesie zamrażania-rozmrażania do całkowitego zniszczenia. Potwierdzono, że w procesie destrukcji betonów można wyróżnić dwa etapy o zdecydowanie różnej dynamice. Stwierdzono, że przejście procesu destrukcji materiału z pierwszego do drugiego etapu wyznacza krytyczny poziom kumulowania uszkodzeń, który może być miarą mrozoodporności materiałów. Zaproponowano sposoby wyznaczenia tego kryterium. Do oceny mrozoodporności betonu zaproponowano metodę zamrażania-rozmrażania, w której rejestruje się jedynie moment „pełnego” zniszczenia próbek betonowych.

Słowa kluczowe: beton, mrozoodporność, metody badań.

1. Wprowadzenie

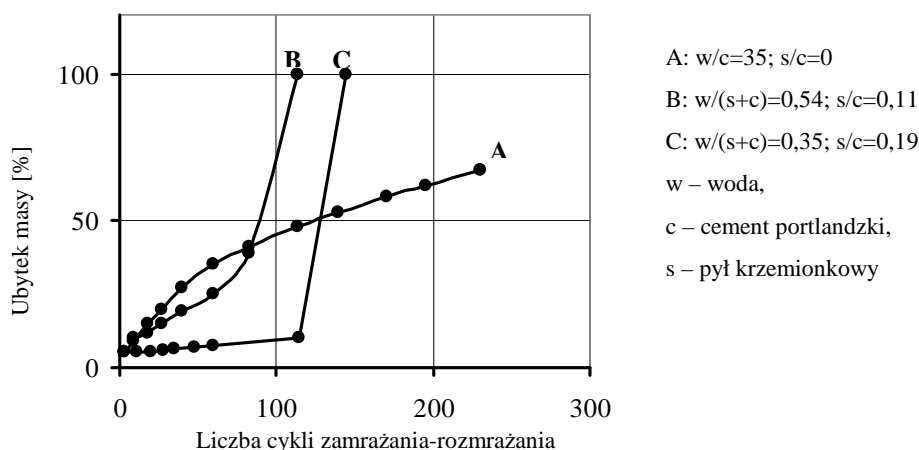
Mrozoodporność wyrobów budowlanych narażonych na działanie niesprzyjających warunków klimatycznych jest jednym z głównych mierników ich trwałości. Wiele prac badawczych poświęcono wyjaśnieniu mechanizmów degradacji zawilgoconych materiałów pod wpływem cyklicznego zamrażania-rozmrażania oraz opracowywaniu metod i kryteriów oceny ich mrozoodporności, jednakże analiza wyników tych prac prowadzi do niejednoznacznych, często nawet sprzecznych wniosków. W krajach Unii Europejskiej, do chwili obecnej, nie ukończono pracy nad wyborem jednolitej, powszechnie przyjętej normowej metody oceny mrozoodporności wyrobów budowlanych. Zdaniem autorów niniejszej pracy, na podstawie licznych badań prezentowanych w literaturze, można zaproponować prostą metodę oceny mrozoodporności betonów, ceramiki oraz innych materiałów. Procedura oceny zakłada monitorowanie procesu degradacji wyrobów podczas cyklicznego zamrażania-rozmrażania aż do pełnego zniszczenia próbek, w celu ustalenia krytycznego poziomu skumulowanych uszkodzeń, który następnie wykorzystuje się przy ocenie mrozoodporności.

2. Wstępna analiza danych doświadczalnych

Analizując dane prezentowane w literaturze oraz wyniki badań własnych zmiany niektórych właściwości lub wskaźników destrukcji (takich jak wytrzymałość mechaniczna, porowatość lub ubytek masy, itp.) próbek kapilarno-porowatych materiałów budowlanych w procesie zamrażania-rozmrażania do całkowitego zniszczenia, potwierdzono, że w przebiegu procesu destrukcji próbek można wyróżnić dwa etapy o zdecydowanie różnej dynamice. Etap początkowy charakteryzuje się wyraźnie mniejszą szybkością procesu destrukcji materiału i trwa dłużej niż etap drugi. Dwuetapowy przebieg procesu destrukcji obserwuje się bez względu na wymiar i kształt próbek oraz warunki cyklicznego zamrażania-rozmrażania (zamrażanie jednostronne lub objętościowe, w powietrzu, w wodzie lub wodnych roztworach soli o zróżnicowanym stężeniu).

Aby zilustrować dwuetapowość procesu destrukcji, na rysunku 1 zaprezentowano dane zaczerpnięte z pracy Fagerlunda (1997), przedstawiające kinetykę ubytku masy próbek betonu zwykłego oraz betonu z dodatkiem pyłu krzemionkowego pod wpływem cyklicznego zamrażania-rozmrażania. Z zależności pokazanych na rysunku 1 wynika, że próbki betonu bez dodatku pyłu

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: b.backiel@pb.edu.pl

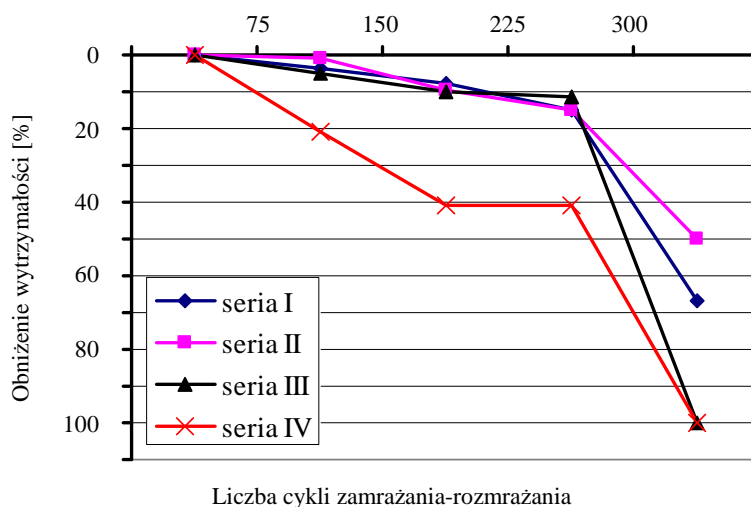


Rys. 1. Badania Petersona przedstawione przez Fagerlunda (1997) nad mrozoodpornością próbek betonu w kontakcie z roztworem soli NaCl, z dodatkiem i bez dodatku pyłu krzemionkowego

krzemionkowego nie uległy pełnemu zniszczeniu nawet po 230 cyklach zamrażania-rozmrażania (krzywa A). Natomiast próbki betonów zawierających dodatek pyłu krzemionkowego zostały całkowicie zniszczone jeszcze przed 130 cyklem (krzywe B i C). Czas trwania pierwszego etapu kumulowania uszkodzeń przekracza okres drugiego, szybkiego etapu kumulowania uszkodzeń w przybliżeniu 2,5 razy w przypadku B i 5 razy w przypadku C. Fagerlund (1997) przedstawił w postaci graficznej dużą liczbę danych dotyczących ubytku masy próbek betonowych w wyniku złączania podczas jednostronnego zamrażania-rozmrażania pod warstwą wody lub warstwą 3% roztworu NaCl. Próbki betonu zawierały różne dodatki mineralne i domieszki napowietrzające. Analizując wyniki badań prowadzonych aż do całkowitego zniszczenia próbek stwierdzono, że we wszystkich przypadkach zależność skumulowanej masy złączeń od liczby cykli zamrażania-rozmrażania ma postać krzywych B i C (rys. 1).

Drugi przykład – pokazany na rysunku 2, zaczerpnięty z pracy Jasiczaka i Kucz (2007) – przedstawia spadek

wytrzymałości na ściskanie w wyniku objętościowego zamrażania-rozmrażania czterech serii próbek, o wymiarach $0,1 \times 0,1 \times 0,1$ m, betonu cementowego przeznaczonego do wbudowania w górną warstwę nawierzchni drogowej. Próbki w poszczególnych seriach różniły się stopniem zagęszczenia mieszanki betonowej. Jak wynika z wykresów na rysunku 2 po 225 cyklach zamrażania-rozmrażania nastąpił gwałtowny spadek wytrzymałości. Po 300 cyklach próbki serii III i IV rozpadły się w komorze zamrażającej, a uszkodzenia próbek pozostałych serii były tak duże, że uległy one zniszczeniu przy nieznacznej sile ściskającej, co wskazywało na objętościowy charakter uszkodzeń mikrostruktury betonu. O kumulacji uszkodzeń wewnętrznych warstw betonu mogą świadczyć wyniki analizy mikroskopowej przedstawione przez Lelusz (2003), pokazujące proces pojawiania się coraz to nowych mikropęknięć po kolejnych cyklach zamrażania-rozmrażania próbek betonowych. W pewnym momencie zmiany porowatości stają się tak duże, że następuje zniszczenie betonu.



Rys. 2. Średnie obniżenie wytrzymałości na ściskanie betonu drenażowego poddanego badaniu mrozoodporności metodą zwykłą (Jasiczak i Kucz, 2007)

Jasiczak i Kucz (2007) wykazali, że ubytek masy próbek tych samych czterech serii do 225 cyklu zamrażania-rozmrażania był nieznaczny i nie przekraczał założonej wartości granicznej, jednak po kolejnych 75 cyklach znacząco ją przekroczył. Przejście procesu destrukcji próbek betonu z pierwszego, powolnego etapu do drugiego, szybkiego etapu kumulowania uszkodzeń na podstawie dwóch różnych wskaźników (spadek wytrzymałości na ściskanie oraz ubytek masy) zachodzi przy jednakowej liczbie cykli. Okazało się, że w danym przypadku pierwszy etap przebiegał trzykrotnie dłużej niż drugi.

Opisany proces kumulowania uszkodzeń jest charakterystyczny również dla innych materiałów budowlanych. Dwuetapowy proces narastania uszkodzeń w postaci złuszczeń zaobserwowano również w badaniach własnych oceny mrozoodporności ceramiki ściennej z uwzględnieniem składu masy oraz warunków wypalania (Nikitsin i in., 2003). Obecność dwóch etapów kumulowania uszkodzeń potwierdzają wyniki badania kinetyki pojawiania się defektów w próbkach materiału ceramicznego o zróżnicowanych wymiarach, przygotowanych z różnych glin podczas cyklicznego zamrażania-rozmrażania do całkowitego zniszczenia próbek (Zelikin i in., 1975). Hlevčuk i Artyknaev (1979) przedstawili dane dotyczące dwuetapowej zmiany współczynnika przewodzenia ciepła niektórych polimerowych materiałów termoizolacyjnych pod wpływem cyklicznego zamrażania-rozmrażania.

Na podstawie rozpatrywanych przykładów można stwierdzić, że pierwszy etap odpowiada procesowi starzenia i kumulowania uszkodzeń w materiale, w którym liczba mikrorys w jednostce objętości nie osiągnęła jeszcze wartości krytycznej, po osiągnięciu której rozpoczyna się drugi etap szybko postępującego, nieodwracalnego niszczenia betonów i innych materiałów budowlanych. W takim przypadku można założyć, że liczba cykli zamrażania-rozmrażania, przy której rozpoczyna się przejście z pierwszego do drugiego etapu kumulowania uszkodzeń może być przyjęta, jako miara mrozoodporności betonu. Pozostaje jedynie opracować procedurę wyznaczania takiej oceny.

W dalszej części pracy przedstawiono jedną z możliwych procedur, opracowaną na podstawie analizy kinetyki ubytku masy próbek betonu w warunkach jednokierunkowego zamrażania-rozmrażania.

3. Analiza wyników badań własnych i dyskusja

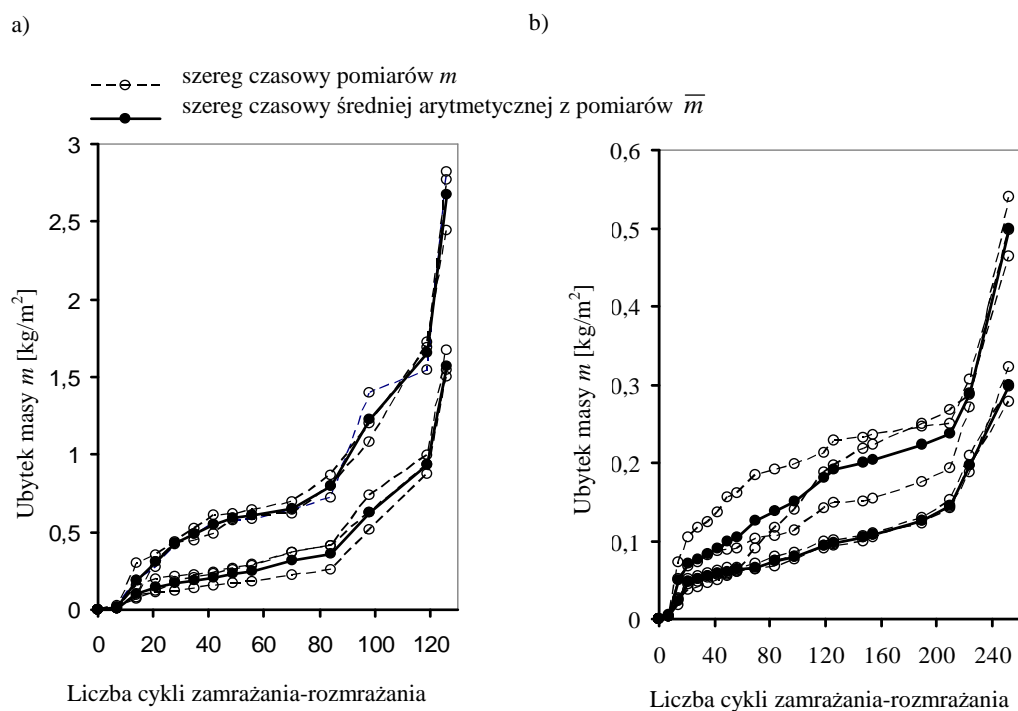
Badania nad mrozoodpornością betonu prowadzono przy wykorzystaniu metody bezpośredniego zamrażania, z uwzględnieniem zaleceń szwedzkiej normy SS137244 (metoda Boraas). Jako wskaźnik stopnia destrukcji betonu w wyniku cyklicznego zamrażania-rozmrażania zastosowano masę cząsteczek materiału, które utraciły kohezję na jednostkę powierzchni próbek betonowych. W skrócie ten wskaźnik nazwano ubytkiem masy m wyrażonym w kg/m^2 . Próbki betonu, w postaci płytek o wymiarach $15 \times 15 \times 5$ cm, nasycano wstępnie wodą.

Podczas badania powierzchnia górna (15×15 cm) znajdowała się pod warstwą 3% roztworu wodnego NaCl, a pozostałe powierzchnie zabezpieczono warstwą hydro- i termoizolacji. Do przygotowania próbek zastosowano dwa rodzaje cementu portlandzkiego, które warunkowo oznaczono C_1 i C_2 . Część próbek zawierała dodatek w postaci pasty bitumicznej będącej roztworem asfaltu w rozpuszczalniku organicznym (nafcie technicznej), który w istotny sposób ograniczał podatność betonu na łuszczenie. Dokładny opis receptur betonów, technologię przygotowania próbek do badań i warunki termiczne procesu zamrażania-rozmrażania można znaleźć w pracy Kosior-Kazberuk i Jezierskiego (2004).

Dla każdej z próbek wyznaczono szereg wartości ubytku masy w procesie cyklicznego zamrażania-rozmrażania do momentu zniszczenia m_1, m_2, \dots, m_n zarejestrowanych po czasie t_1, t_2, \dots, t_n , którym odpowiadają liczby cykli N_1, N_2, \dots, N_n . Interpretację graficzną obserwacji dla czterech serii próbek o różnym składzie przedstawiono na rysunku 3a i 3b. Wszystkie próbki przeszły dwa charakterystyczne etapy kumulowania uszkodzeń aż do ich zniszczenia. Każda seria składała się z 3 próbek o jednakowym składzie, których nie można jednak rozpatrywać jako powtarzalne jednostki doświadczalne trójelementowej próby losowej populacji generalnej z uwagi na fakt, że próbki zostały przygotowane z jednego zarobu mieszanki betonowej. Takie próbki połączone w serię należy traktować jako próbki bliźniacze, które nie mogą w pełni scharakteryzować zmiennej losowej m , niezależnie od ich liczebności.

Po uśrednieniu szeregów wyników badań m na podstawie próbek bliźniaczych wyznaczono nowy szereg, opisujący zmiany średniej arytmetycznej wartości analizowanej zmiennej m w zależności od numeru cyklu jej obserwacji $\bar{m}_1, \bar{m}_2, \dots, \bar{m}_n$. Obserwacje w postaci m lub \bar{m} przyjęto nazywać szeregiem czasowym. Szereg czasowy podlega pewnym prawidłowościom, a jego elementy nie spełniają podstawowych założeń przyjętych w klasycznym modelu analizy regresji lub analizy wariancji. Elementy szeregu czasowego, rozpatrywane jako zmienne losowe, nie są ani statystycznie niezależne, ani jednakowo rozłożone. W szczególności wartość zmiennej m , którą wyznaczono w dowolnej chwili czasu t może istotnie zależeć od tego, jaka wartość była zarejestrowana wcześniej. Zależność można wyjaśnić na drodze analizy fizycznej istoty procesu lub też na drodze formalnej, stosując różne metody statystyczne.

Dla zbadania szeregu m lub \bar{m} można zastosować analizę szeregów czasowych, której celem jest wykazanie i opisanie prawidłowości charakteryzujących stabilne, systematyczne zmiany wartości analizowanej zmiennej w dużym przedziale czasowym (trend szeregu czasowego), wahania periodyczne (sezonowe) oraz wahania losowe. Obraz takich prawidłowości można ustalić na podstawie analizy wykresów. Na przykład, na rysunku 3a i 3b widoczna jest stabilna tendencja dwuetapowego procesu ubytku masy w czasie $m(N)$ (funkcja trendu), na którą nakładają się wahania losowe.



Rys. 3. Ubytek masy próbek betonowych w zależności od liczby cykli zamrażania-rozmrażania: a) beton zwykły, b) beton z dodatkiem pasty bitumicznej

Aby wydzielić funkcję trendu $m(N)$, należy eliminować z szeregu czasowego wahania losowe. Rozwiązując opisane zagadnienie zgodnie z teorią analizy szeregów czasowych można zastosować kilka metod statystycznych, począwszy od prostych metod wyrównywania do dowolnie skomplikowanej analizy spektralnej (Jóźwiak i Podgórski, 2001). W analizowanym przypadku (rys. 3a i 3b) sformułowanie szeregu czasowego średnich wartości zmiennej \bar{m} , na podstawie trzech próbek bliźniaczych, umożliwia rozwiązanie zagadnienia eliminacji wahań losowych z szeregu czasowego. W celu pełniejszej eliminacji wahań losowych z szeregu czasowego, dane \bar{m} można aproksymować określoną funkcją, interpretując funkcję trendu jak regresję badanej zmiennej względem czasu. Przy wyborze postaci analitycznej zależności regresji należy przede wszystkim bazować na doświadczeniu badawczym i wiedzy naukowej.

Z analizy krzywych (rys. 3a i 3b), zbudowanych na podstawie danych \bar{m} , wynika, że dobór funkcji aproksymującej jest trudny. Można zauważyć, że w trakcie początkowych siedmiu cykli zamrażania-rozmrażania zarejestrowano nieznaczny ubytek masy. W tym przypadku, ukryty (latentny) okres kumulowania pionowych i poziomych mikrorys, które tworzą się w wyniku działania statycznego i dynamicznego mechanizmu niszczonego wywołanego zamrażaniem wilgoci, nie powoduje utraty kohezji cząstek betonu. Pojawianie się i kumulacja poziomych mikroszczelin świadczy o początku procesu rozwarstwienia betonu. Przy kolejnych cyklach zamrażania-rozmrażania (od 7 do 30 cyklu) kumulacja mikrorys w zaprawie powoduje wyraźne rozwarstwienie betonu.

Podobne zjawisko opisali także Korenfok i Dumanova (1992). Kohezja pomiędzy warstwami słabnie i rozpoczyna się ich złuszczenie. Takie zjawisko jest potwierdzone szybką utratą masy w rozważanym okresie. Intensywność łuszczenia warstw betonu potęguje warstwa lodu zamarzająca na powierzchni próbki, która podczas obniżania temperatury redukuje swoje wymiary bardziej niż beton. W rezultacie następuje złuszczenie cząstek betonu. Taki mechanizm niszczonego działania lodu (*Frost Salt Scaling Mechanism*) opisali Valenza i Scherer (2006). Po 30 cyklach zamrażania-rozmrażania zachodzą zmiany fizyko-mechanicznych właściwości warstwy powierzchniowej betonu powodujące wyhamowanie niszczonego działania opisanego mechanizmu i na krzywych przedstawiających ubytek masy obserwuje się odcinek niemal prostoliniowy (rys. 3a i 3b). Jednocześnie wzrasta liczba szczelin, które wnikają coraz głębiej. Rozpoczyna się proces odspajania ziaren kruszywa grubego, co oznacza przejście procesu niszczenia próbek betonu z pierwszego etapu do następnego, który szybko kończy się całkowitą destrukcją próbek.

Jak już wspomniano, krytyczną liczbę cykli, której odpowiada moment zakończenia pierwszego etapu procesu destrukcji betonu, należy przyjąć jako ocenę mrozoodporności badanego materiału. Dysponując danymi \bar{m} oraz ich graficzną interpretacją (jaką przedstawiono na rys. 3a i 3b) krytyczną liczbę cykli N_{kr} można wyznaczyć za pomocą funkcji aproksymującej lub metodą graficzną. Na przykład, można aproksymować odpowiednią funkcją dane uzyskane w pierwszym etapie procesu destrukcji, a następnie wyznaczyć różnicę pomiędzy danymi z drugiego etapu i wartościami

obliczonymi za pomocą aproksymującej zależności regresyjnej. Liczbę cykli, przy których pierwsza z kolejnych różnic wyjdzie poza obszar wahań losowych, przyjmuje się jako wartość krytyczną N_{kr} .

Do wyznaczenia N_{kr} można także zastosować modele autoregresji uwzględniające statystyczną zależność (autokorelację) elementów szeregu czasowego. W związku z powyższym, hipotezę o istnieniu autokorelacji po aproksymacji danych pierwszego etapu kumulowania uszkodzeń potwierdzono za pomocą testu Durбина-Watsona (Jóźwiak i Podgórski 2001). Ponadto, jeśli istnieje potrzeba aproksymowania danych pełnego szeregu czasowego, wówczas można stosować funkcję sklejaną (ang. *spline function*), która jest bardzo skuteczną funkcją aproksymującą (Ajvazian i in., 1985). Inne znane metody wymagają dostatecznie dużej liczby elementów \bar{m} szeregu czasowego, co czyni je bardzo pracochłonnymi przy praktycznym rozwiązywaniu przedstawionego zagadnienia.

Wyniki badania mrozoodporności próbek betonu cementowego bez dodatków modyfikujących, uzyskane zarówno przez autorów niniejszej pracy, jak i przez innych badaczy pokazują, że okres pierwszego etapu kumulowania uszkodzeń, oznaczony jako k_I , zamyka się w zakresie 0,67-0,75. Na przykład, dla danych przedstawionych na rysunku 3a krytyczna liczba cykli zamrażania-rozmrażania $N_{kr} = 88$. Całkowita liczba cykli zamrażania-rozmrażania do zniszczenia $N_z = 126$. Stąd wynika, że współczynnik $k_I = 88 / 126 = 0,698$.

W związku z powyższym krytyczną liczbę cykli można określić ze wzoru:

$$N_{kr} = k_I N_z. \quad (1)$$

Wzór (1) może być podstawą bardzo prostej metody oceny mrozoodporności betonu. W metodzie wystarczy zarejestrować jedynie chwilę zniszczenia próbek, którą charakteryzuje liczba cykli N_z oraz przyjąć wartość współczynnika k_I , na przykład na poziomie 0,7. Takie podejście daje możliwość oceny ilościowej wpływu czynników związanych ze składem lub technologią na mrozoodporność materiału.

Rozwiązanie tych zagadnień pokazano przykładowo na rysunku 3a i 3b. Zastosowane dwa poziomy zawartości dodatku pasty bitumicznej w stosunku do masy cementu nie wpływają na mrozoodporność betonu, gdyż mrozoodporność w obu przypadkach wynosi $N_{kr} = 210$ cykli (rys. 3b). Włączenie dodatku modyfikującego do składu mieszanki betonowej w rozpatrywanych ilościach poprawia mrozoodporność próbek $210 / 88 = 2,38$ razy.

Jak wynika z przeprowadzonej analizy, zaproponowane podejście do oceny mrozoodporności betonu na podstawie krytycznego poziomu skumulowanych uszkodzeń jest bardzo proste w realizacji i może być rozpatrzone jako metoda standardowa oceny mrozoodporności betonu, po odpowiednim dopracowaniu. Przy opracowywaniu metody należy ustalić jednolite warunki procesu zamrażania-rozmrażania próbek oraz ich rozmiar. Aby zminimalizować czas badania próbek do ich zniszczenia, należy stworzyć warunki testu

wystarczająco surowe i przyspieszone, a wymiary próbek w kierunku przenoszenia ciepła i masy możliwie jak najmniejsze, na przykład 5 cm. Jak wynika ze wzoru (1) dokładność oceny ilościowego wskaźnika mrozoodporności N_{kr} w głównej mierze zależy od wartości współczynnika k_I , a ponieważ przy wyznaczeniu liczby cykli powodujących całkowite zniszczenie próbek N_z nie można pomylić się znacząco, dlatego głównym zadaniem jest zgromadzenie danych o wartości współczynnika k_I , przy ustalonych warunkach badania i wymiarach próbek. Wydaje się, że wartości tego współczynnika będą rosły wraz ze wzrostem liczby cykli N_z .

Ocena mrozoodporności N_{kr} w warunkach przyspieszonego oddziaływania może być zastosowana do oceny tego samego materiału eksponowanego w warunkach naturalnych oddziaływań środowiska w rozpatrywanym regionie N'_{kr} . Po uwzględnieniu podobieństwa procesów destrukcji tego samego materiału w warunkach przyspieszonego i normalnego oddziaływania mrozu, a także teorii badań przyspieszonych (Kartaszov, 1980) można zapisać:

$$N'_{kr} = N_{kr} \frac{b}{b'}, \quad (2)$$

gdzie b i b' są szybkościami kumulowania uszkodzeń w warunkach przyspieszonego i normalnego oddziaływania mrozu. Jeżeli znana jest liczba cykli zamrażania-rozmrażania betonu w warunkach naturalnych przez 1 rok (wyznaczona na podstawie wieloletnich obserwacji liczby przejścia temperatury powietrza przez 0°C w danym regionie) wówczas można wyznaczyć trwałość betonu.

4. Podsumowanie

Na podstawie analizy wyników badania odporności próbek betonu na cykliczne zamrażanie-odmrażanie wyjaśniono, że zmiana w czasie wskaźników destrukcji, takich jak ubytek masy, obniżenie wytrzymałości następuje w dwóch etapach. Pierwszy etap charakteryzuje się mniejszą szybkością kumulowania uszkodzeń i dłuższym czasem trwania w stosunku do drugiego.

Stwierdzono, że moment przejścia procesu destrukcji materiału z pierwszego do drugiego etapu wyznacza krytyczny poziom kumulowania uszkodzeń, który może być przyjęty jako ocena mrozoodporności materiałów. Wskazano sposoby wyznaczenia tego kryterium. Zaproponowano metodę oceny mrozoodporności, w której rejestruje się jedynie moment pełnego zniszczenia próbek betonowych. Przyjęcie tej metody jako metody standardowej wymaga dopracowania, polegającego na określeniu przyspieszonych warunków zamrażania-rozmrażania próbek betonu oraz ich wymiaru, a także na ustaleniu wartości współczynnika uwzględniającego stosunek momentu pełnego zniszczenia próbki do momentu osiągnięcia krytycznego poziomu skumulowanych uszkodzeń betonu.

Literatura

- Ajvazian S. A., Enfkov I. S., Mešalkin L. D. (1985). Prikladnaja statistika: Issledovanie zavisimostej. *Finansy i Statistika*, Moskwa.
- Fagerlund G. (1997). Trwałość konstrukcji betonowych. *Arkady*, Warszawa.
- Hlevčuk V. R., Artyknaev E. T. (1979). Teplotehničeskije i zvukoizoljacionnye kačestva ogranedeniji domov povyszennoj etažnosti. *Stroizdat*, Moskwa.
- Jasiczak J., Kucz M. (2007). Aspekt mrozoodporności w betonach drenażowych. *Materiały 57 Konferencji Naukowej „Krynica 2007”*, Krynica-Zdrój 2007, T. 3, 77-84.
- Jóźwiak J., Podgórski J. (2001). Statystyka do podstaw. *PWE*, Warszawa.
- Kartaszov G. D. (1980). Predvaritel'nye issledovanija v teorii forsirovannyh ispytanij. V *zb. seminara po nadežnosti i progressivnym metodom kontrolia kačestva promyszlennyh izdelij*. Moskwa 1980, 62-104.
- Korenok A. G., Dumanova L. S. (1992). Oteičitelnaja osobennost' morozosolevoj korrozii. *Izv, udob. Stroitel'stvo*, 4/1992, 57-60.
- Kosior-Kazberuk M., Jezierski W. (2004). Surface scaling resistance of concrete modified with bituminous addition. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. X, No. 1/2004, 25-30.
- Lelusz M. (2003). Identyfikacja zjawisk zachodzących w strukturze porowatości betonów cementowych w procesie ich cyklicznego zamrażania i rozmrażania. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budownictwo*, Białystok, Z. 23, 145-155.
- Nikitsin V., Bołtryk M., Backiel-Brzozowska B. (2003). Prognozowanie mrozoodporności ceramiki ściennej z uwzględnieniem składu masy ceramicznej oraz warunków wypału. *Ceramika/Ceramics*, Vol. 80, 593-589.
- Valenza J., Scherer G. W. (2006) Mechanism for salt scaling. *Journal of American Ceramic Society*, 89(4)/2006, 1161-1179.
- Zelikin S. I., Zemljanskij W. N., Ciwilew R. P. (1975). Issledovanie kinetyki razruszenija materialov rentgenografičeskim metodom. *Steklo i ceramika*, Nr 6, 23-24

EVALUATION OF CONCRETE FROST RESISTANCE ON THE BASIS OF CRITICAL LEVEL OF CUMULATED DAMAGES

Abstract: Frost resistance of building materials is considered to be the main indicator of their durability. The analysis of degradation process of building materials subjected to cyclic freezing and thawing showed that the damages development in time runs according to two stages. The first stage is characterised by a slower damages accumulation process and a longer duration in comparison with the second stage. It was shown the time of passage the material degradation process from the first stage to the other one assigns the critical level of damages accumulation, which can be assumed for evaluation of material frost resistance. The methods to determine this criterion were proposed.

BETON WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI W ELEMENTACH ŻELBETOWYCH ZESPOLONYCH

Barbara SADOWSKA-BURACZEWSKA*, Magdalena PAZIK

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

Streszczenie: Projektowanie betonów wysokowartościowych (BWW) o wymaganych właściwościach i założonej wytrzymałości jest zadaniem nietrywialnym i odbiegającym od metod stosowanych dla betonów zwykłych. Stosowanie w jednym elemencie (konstrukcji) betonów o znacznie różniących się właściwościach, również jest zadaniem nietypowym. W pracy przedstawiono wyniki badań żelbetowych belek zespolonych wykonanych warstwowo z betonu zwykłego i BWW oraz jednorodnych belek typu kontrolnego. Analizowane były belki modelowe o rozpiętości 1100 mm i prostokątnym przekroju poprzecznym $b \times h = 80 \times 120$ mm, badane pod obciążeniem doraźnym. Badano belki zespolone z betonu zwykłego z warstwą BWW klasy C60/75 w strefie ściskanej o grubości 4 cm oraz belki zespolone z warstwą BWW w strefie ściskanej C100/115 o grubości 4 cm. Elementami kontrolnymi były belki jednorodne z betonu zwykłego.

Słowa kluczowe: żelbetowe belki zespolone typu beton-beton, BWW, krzywizna, rysy.

1. Wprowadzenie

Wiele prac poświęconych betonom wysokowartościowym (BWW) skupia się wyłącznie na ich właściwościach (Jasiczak i in., 2008) i zastosowaniu w całym elemencie. Nieliczne publikacje z zakresu częściowego zastosowania BWW na całej długości belki w strefie ściskanej (Yamada i in., 1999) oraz w górnej strefie na odcinku czystego zginania w konstrukcji opisują zachowanie się elementów belkowych pod obciążeniem doraźnym (Łapko i Grygo, 2010). Odrębną grupę problemów rozwiązano w pracach badawczych dotyczących zastosowania betonu ekspansyjnego jako nadbetonu (Król, 1995; Król i in., 1997). Sygnalne badania opisane w pracy (Yamada i in., 1999) stanowiły przesłankę do podjęcia badań belek zespolonych typu beton-beton z użyciem częściowym BWW (Sadowska-Buraczewska i Łapko, 2007; Sadowska-Buraczewska, 2011).

W pracy przedstawiono użycie betonu wysokowartościowego w części elementu belkowego: w jego górnej ściskanej strefie z dolną warstwą wykonaną z betonu zwykłego. Celem pracy jest wyjaśnienie poprzez badania eksperymentalne zachowania się zginanych elementów nośnych, zespolonych z warstw BWW i betonu zwykłego.

2. Materiały wykorzystane w elementach badawczych

Receptury betonów zwykłych przygotowano zgodnie z zaleceniami (PN-EN 206-1:2003 *Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*, PN-EN 934-2:2002 *Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Domieszki do betonu. Definicje i wymagania*), natomiast receptury BWW według pracy (Jasiczak i in., 2008). Do wykonania mieszanki betonu zwykłego użyto komponentów wymienionych w tabeli 1. Natomiast do wykonania mieszanek BWW użyto następujących składników: dla klasy C60/75 według tabeli 2 i dla klasy C100/115 według tabeli 3.

Tab. 1. Skład mieszanki betonowej C20/25 w belkach modelowych zbrojonych

Składnik	Ilość składników w kg na m ³
Cement I 42.5R	260
Kruszywo – piasek 0 - 2	660
Kruszywo – żwir 2 - 8	1150
Dodatek typu II: popiół lotny	60
Woda	178

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: bsadowska@pb.edu.pl

Tab. 2. Skład mieszanki betonowej C60/75 w belkach modelowych zbrojonych

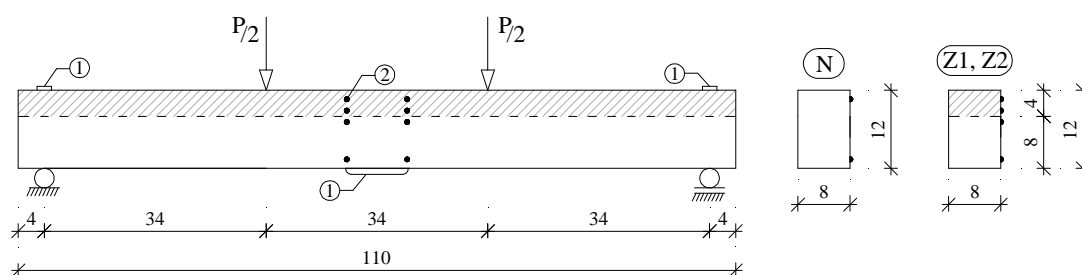
Składnik	Ilość składników w kg na m ³
Cement I 52.5 Aalborg White Polska	340
Kruszywo – piasek 0 - 2	640
Kruszywo – żwir 2 - 8	1290
Popiół lotny	80
Pył krzemionkowy	30
Superplastyfikator	1,5% masy cementy
Woda	123

Tab. 3. Skład mieszanki betonowej C100/115 w belkach modelowych zbrojonych

Składnik	Ilość składników w kg na m ³
Cement I 52.5 Aalborg White Polska	450
Kruszywo – piasek 0 - 2	630
Kruszywo – grys bazaltowy 2 - 8	1070
Popiół lotny	100
Pył krzemionkowy	45
Superplastyfikator	8,1
Woda	119

3. Badania doświadczalne

Elementy badawcze wykonano jako żelbetowe belki zespolone o wymiarach 80 × 120 × 1100 mm. Dolna warstwa o grubości 80 mm wykonana została z betonu zwykłego klasy C 20/25. Bezpośrednio na nią ułożono warstwę z betonu wysokowartościowego o grubości 40 mm (metodą mokre na mokre). Belki kontrolne wykonano w całości z betonu zwykłego klasy C 20/25. Zbrojenie podłużne wszystkich belek stanowiły 2 pręty $\varnothing 8$ i strzemiona $\varnothing 3$. Zastosowane zbrojenie poprzeczne przenikało warstwę BWW. Po 28 dniach dojrzewania element badany umieszczony był na stanowisku badawczym i poddany obciążeniu doraźnemu w formie 2 sił skupionych P przyłożonych w 1/3 rozpiętości belki. Elementy badano w zakresie ugięć i odkształceń betonu po wysokości elementu. Ponadto obserwowano rysy w strefie czystego zginania. Podczas badań rejestrowano siłę za pomocą systemu komputerowego DaqView



Rys. 1. Schemat elementów badanych i punkty pomiarowe: 1 – pomiar ugięcia, 2 – pomiar odkształceń betonu

będącego na wyposażeniu Katedry Konstrukcji Budowlanych na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej. Siłę zwiększano aż do zniszczenia belek. Na rysunku 1 pokazano schemat obciążenia i punkty pomiarowe. Wykonano następujące serie belek: Z1 – 3 sztuki belek zespolonych z warstwą BWW grubości 40 mm klasy C 60/75, Z2 – 3 sztuki belek zespolonych z warstwą BWW grubości 40 mm klasy C 100/115 oraz N – 3 sztuki belek kontrolnych wykonanych w całości z betonu klasy C 20/25.

Zakres badań wytrzymałościowych obejmował określenie wytrzymałości betonów na ściskanie na próbkach kostkowych o boku 150 mm po 7, 14 i 28 dniach oraz określenie modułów sprężystości dla BWW stosując tak zwane kapsle piaskowe (Boulay i de Larrard, 1993a i b) i betonu zwykłego. W tabeli 4 przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych.

Tab. 4. Cechy wytrzymałościowe badanych betonów

Projektowana klasa betonu	Średnie wartości wytrzymałości betonów na ściskanie [MPa]			Średnie wartości modułu sprężystości E_{cm} [GPa]
	po 7 dniach	po 14 dniach	po 28 dniach	
C20/25	-	-	31,00	31,45
C60/75	-	56,30	63,10	36,40
C100/115	97,20	101,60	104,70	45,20

3.1. Wpływ warstwy BWW na krzywiznę belek

Pomiaru ugięć dokonywano za pomocą czujników zegarowych o dokładności pomiaru 0,001 mm (punkt 1 na rysunku 1). Czujniki umieszczone były w trzech miejscach, na podporze lewej, prawej oraz w środku rozpiętości belki. Pomiary ugięć następowały po każdorazowym zwiększeniu poziomu siły. Na podstawie pomierzonych wartości ugięć obliczono krzywiznę elementów badanych. Zastosowano wzór na krzywiznę χ belki:

$$\chi = \frac{a_{eksp}}{l^2 \alpha_k} \quad (1)$$

gdzie: a_{eksp} jest wartością ugięcia dla wybranego poziomu siły, l jest rozpiętością efektywną elementu, a α_k jest współczynnikiem przyjętym według pracy (Łapko i Jensen, 2005) i wynosi $\alpha_k = 5/48$.

Wykres zależności siła-krzywizna przedstawiono na rysunku 2.

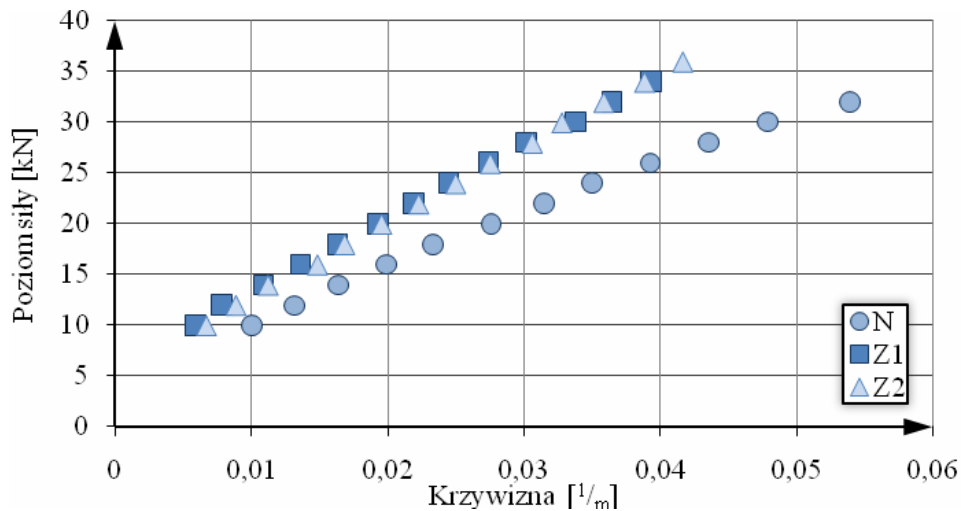
Analizując wykres zależności siła-krzywizna badanych elementów zauważamy, że krzywizna belek zespolonych wykonanych z warstwą BWW klasy C 60/75 i z warstwą BWW klasy C 100/115 jest mniejsza w porównaniu z krzywizną belek kontrolnych wykonanych w całości z betonu zwykłego klasy C 20/25.

3.2. Wpływ warstwy BWW na odkształcenia betonu

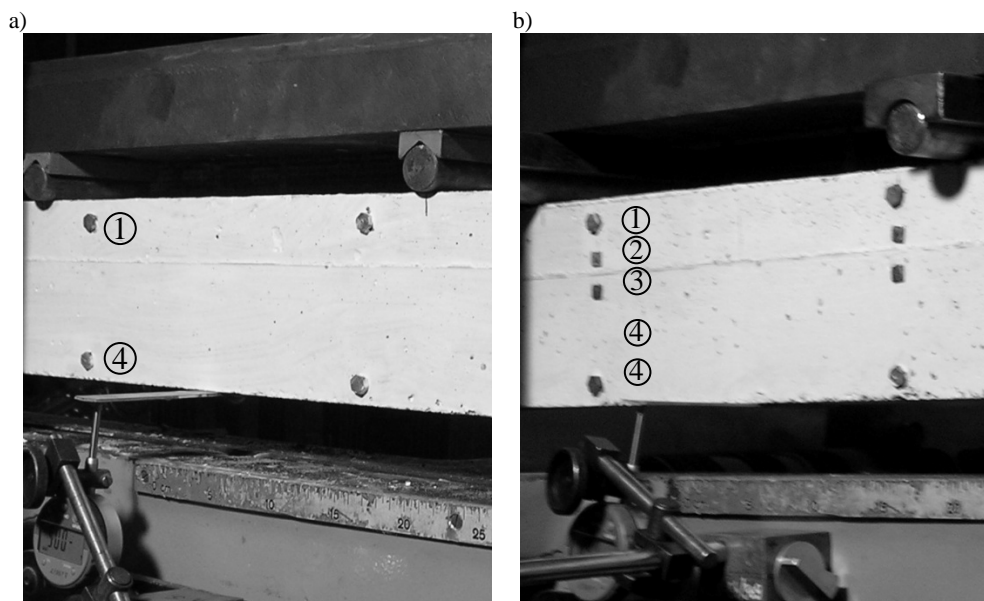
Odształcenia betonu na wysokości belek mierzono za pomocą ekstensometru DEMEC o bazie 15 mm (w punktach pokazanych na rysunkach 1 i 3). Wartości odkształceń odczytywano zgodnie z planem obciążania belek po każdorazowym zwiększaniu poziomu siły. Średnie wartości z trzech pomiarów odkształceń każdej belki w górnej strefie przekroju przedstawiono

na wykresie zależności siła-odkształcenie (rys. 4) oraz na wykresie odkształceń betonu na wysokości belki dla wybranych poziomów siły serii N, Z1 i Z2 (rys. 5).

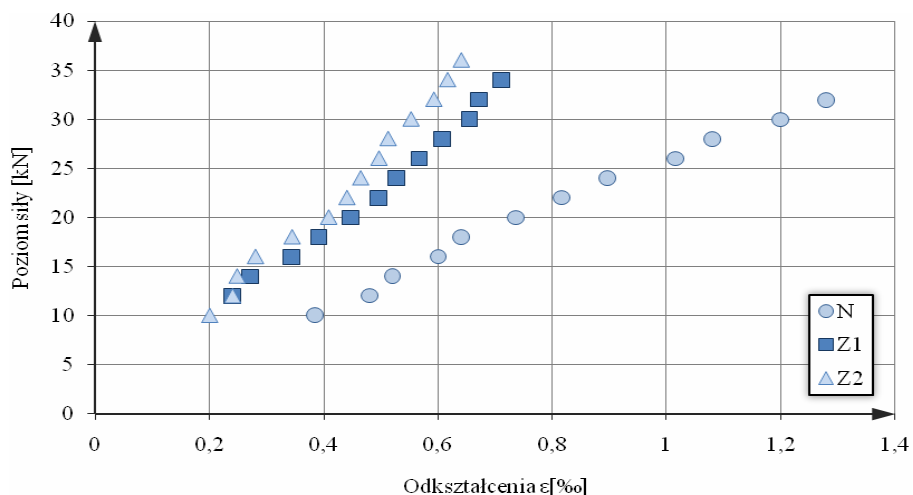
Analizując pomierzone odkształcenia na wysokości przekroju w poszczególnych belkach dla danego poziomu siły, można zauważyć zmniejszenie wartości odkształceń betonu w strefie ściskanej belek zespolonych w porównaniu do odkształceń belek jednorodnych wykonanych z betonu zwykłego. Zauważamy również wyraźne różnice pomiędzy wartościami odkształceń betonu w strefie ściskanej w belkach zespolonych przy zastosowaniu betonów wysokiej wytrzymałości o różnych klasach: dla belek Z2 z warstwą BWW klasy C100/115 wartości odkształceń betonu są mniejsze niż wartości odkształceń betonu belek Z1 wykonanych z BWW klasy C60/75. Potwierdzają to wyniki badań doraźnych w zakresie maksymalnych odkształceń krawędziowych w strefie ściskanej.



Rys. 2. Wykres zależności siła P - krzywizna c belek zespolonych serii Z1, Z2 i kontrolnych serii N

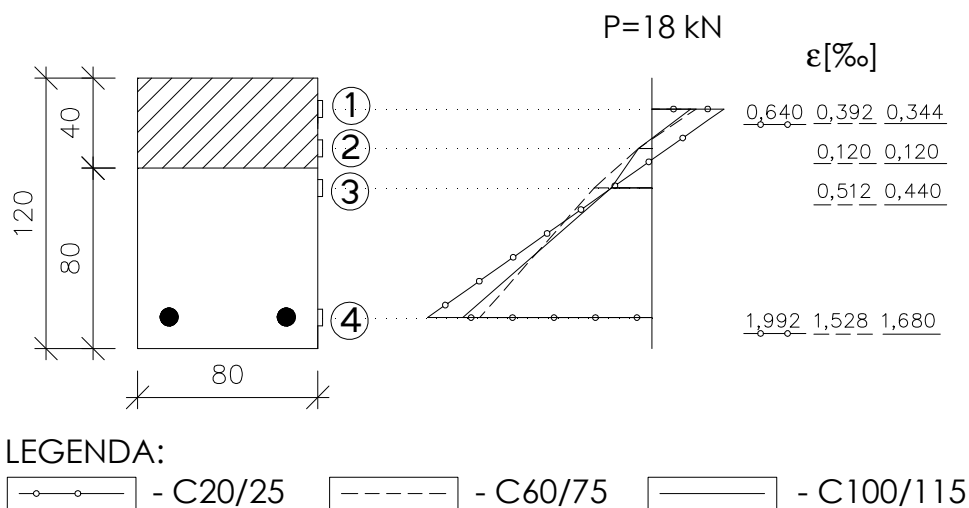


Rys. 3. Rozstaw punktów pomiarowych podczas badań odkształceń: a) w belce kontrolnej, b) w belce zespolonej

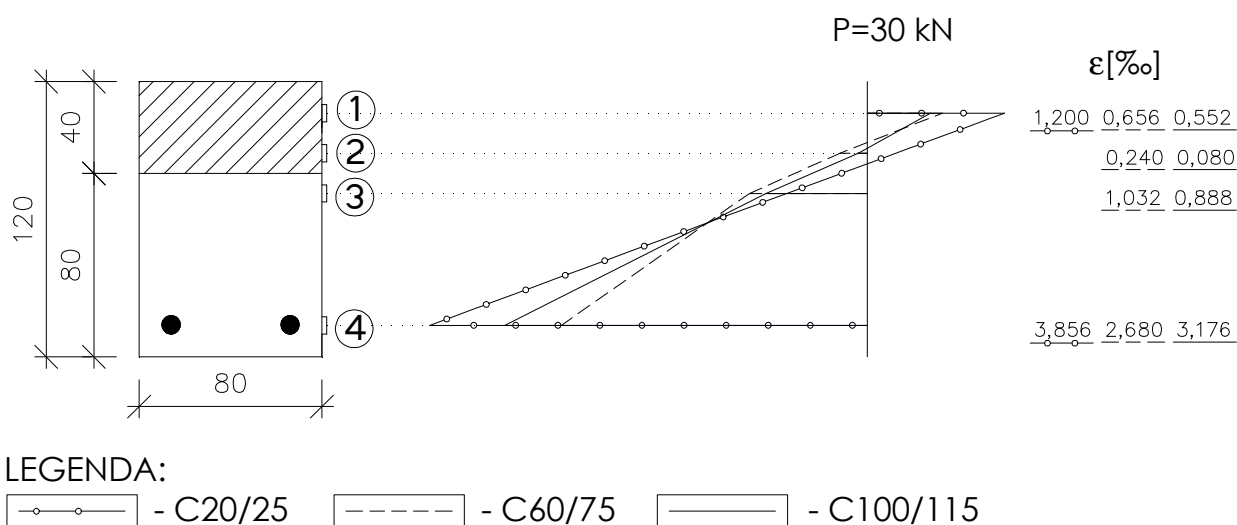


Rys. 4. Wykres zależności siła P - odkształcenie ϵ w strefie ściskanej belek kontrolnych serii N i zespolonych serii Z1 i Z2

a)



b)



Rys. 5. Obraz odkształceń betonu ϵ_c na wysokości belki: a) dla siły 18 kN, b) dla siły 30 kN

3.2. Analiza propagacji rys w belkach zespolonych i kontrolnych

Zarysowanie zespolonych konstrukcji żelbetonowych jest zjawiskiem bardzo złożonym z uwagi na występowanie tu wielu czynników. Zarysowanie elementów, zwłaszcza w zaawansowanym stadium obciążenia, może być sygnałem wyczerpania nośności ustroju. Zasięg i szerokość rys pozwalają w dużym stopniu kontrolować

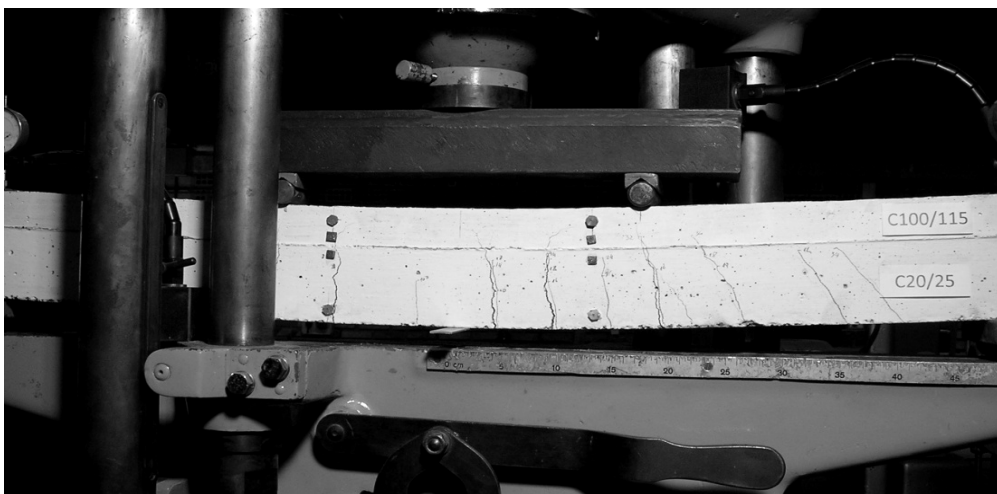
stopień wyężenia elementu. Pomiar szerokości rys i obraz zarysowania jest ważnym elementem oceny eksploatowanej konstrukcji pod względem bezpieczeństwa. W trakcie badania elementów zaznaczano przebieg i zakres penetracji rys, zapisując u wierzchołka rysy wielkość obciążenia. Na rysunkach 6, 7 i 8 przedstawiono widok rys w badanych belkach serii N, Z1 i Z2 po zniszczeniu.



Rys. 6. Dokumentacja zarysowania po zniszczeniu belek jednorodnych wykonanych całkowicie z betonu zwykłego – seria N



Rys. 7. Dokumentacja zarysowania po zniszczeniu belek zespolonych z warstwą BWW betonu klasy C60/75 – seria Z1



Rys. 8. Dokumentacja zarysowania po zniszczeniu belek zespolonych z warstwą BWW betonu klasy C100/115 – seria Z2

Propagacja rys w belkach serii Z2 jest zdecydowanie mniejsza niż w belkach kontrolnych serii N, a także mniejsza niż w belkach zespolonych serii Z1. Analiza dokumentacji z obserwacji rys (ich liczby, szerokości, przebiegu) w poszczególnych belkach jest kolejnym potwierdzeniem większej efektywności belek zespolonych z udziałem betonu wysokowartościowego (przy klasie C 100/115) w zakresie odkształcalności, w porównaniu z belkami jednorodnymi z betonu zwykłego.

4. Podsumowanie

Badania doświadczalne belek zespolonych z udziałem betonów BWW potwierdziły, że zastosowanie betonów wysokowartościowych w strefie ściskanej może być korzystnym sposobem poprawy parametrów wytrzymałościowych ustrojów zginanych w zakresie ich nośności, odporności na rysy, redukcji ugięcia, przy jednoczesnym obniżeniu kosztów materiałowych w zakresie zużycia BWW.

Krzywizna belek zespolonych Z1 i Z2 jest mniejsza w porównaniu z krzywizną belek kontrolnych N wykonanych w całości z betonu zwykłego.

Odształcenia ściskanej strefy przekroju belek zespolonych były mniejsze w belkach zespolonych z BWW klasy C 60/75 i C 100/115 w porównaniu z odształceniami belki jednorodnej wykonanej całkowicie z betonu zwykłego klasy C 20/25. Stwierdzono korzystny efekt redystrybucji stanu odształceń i naprężeń w ściskanej strefie przekroju zespolonego, który nie występuje w belkach jednorodnych.

Literatura

- Boulay C., de Larrard F. (1993a). The Sand – Box; A New Capping System for Testing HPC Cylinders. *Concrete International* (ACI), 63-66.
- Boulay C., de Larrard F. (1993b). Capacity High – Performance Concrete Cylinders with the “Sand – Box”. W: *Proceedings of the Symposium High – Strength Concrete*, Lillehammer, Norway.
- Jasiczak J., Wdowska A., Rudnicki T. (2008). Betony ultrawysokowartościowe. Właściwości, technologie, zastosowania. *Polski Cement*, Kraków.
- Król M. (1995). Zaczyny i betony ekspansywne do napraw i wzmocnień konstrukcji z betonu. W: *Materiały Konferencji Naukowej „Aktualne problemy ochrony budowli przed korozją”*. Kraków.
- Król M., Halicka A., Tur W. (1997). Konstrukcje zespolone z udziałem betonu zwykłego i ekspansywnego. *Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej*.
- Łapko A., Grygo R. (2010). Zastosowanie BWW do odcinkowego wzmocniania elementów żelbetowych. W: M. Kamiński, J. Jasiczak, W. Buczkowski, T. Błaszczński (red.). *Trwałe rozwiązania naprawcze w obiektach budowlanych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne*, Warszawa, 46-52.
- Łapko A., Jensen B. Ch. (2005). Podstawy projektowania i algorytmy obliczeń konstrukcji żelbetowych. *Wydawnictwo Arkady*, Warszawa.
- Sadowska-Buraczewska B. (2011). Zginane belki żelbetowe wzmocniane betonami nowej generacji, W: *Konstrukcje zespolone*. T. Biliński (red.). *Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego*, 267-274.
- Sadowska-Buraczewska B., Łapko A. (2007). The concept of strengthening of compressive zone in rc beams using HPC-HSC. W: *Proceedings of 9th International Conference: Modern building materials, structures and techniques*, Vilnius, Lithuania, 752-757.
- Yamada M., Matsuura H., Kumai H. (1999). Hybrid reinforced concrete beams by high-strength and normal-strength concrete. W: *Proceedings of 5th Symposium on High Performance and High-Strength Concrete*, Sundefjord, Norway, 925-934.

THE HIGH STRENGTH CONCRETE IN THE HYBRID REINFORCED CONCRETE MEMBERS

Abstract: The paper summaries the experimental of flexural capacity and deformability of structural concrete beams prepared as composite members consisting of two concrete layers made of reinforced normal concrete and high-strength concrete (HSC). The reinforced concrete composite beams used in the tests were prepared in modelling scale with the rectangular-section of 80 × 120 mm and the effective span of 1100 mm. The basic samples were composed in two layers consisting of high strength concrete as the top layer (C60/75 and C100/115), and normal strength concrete.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach pracy statutowej S/WBiŚ/2/2008.

ZAWARTOŚĆ WYBRANYCH METALI CIĘŻKICH W GLEBACH AUTOGENICZNYCH NADLEŚNICTWA SUPRAŚL I DOJLIDY W PUSZCZY KNYSZYŃSKIEJ

Aneta SIENKIEWICZ*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań zawartości wybranych metali ciężkich (Cu, Co, Ni, Pb, Cr, Cd) w glebach autogenicznych na terenie Nadleśnictwa Supraśl i Dojlidy w Puszczy Knyszyńskiej. Celem badań było określenie stopnia zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi pochodzącymi z komunikacji. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że zawartości analizowanych pierwiastków śladowych nie przekraczają stężeń dopuszczalnych dla gleb obszarów objętych ochroną prawną. Najwyższą zawartość spośród analizowanych metali ciężkich w przypowierzchniowej warstwie gleb stwierdzono dla miedzi, natomiast najniższą dla kadmu. Roślinność wywiera znaczący wpływ na obniżenie zawartości metali ciężkich, poprzez zwiększoną fitoprzyswajalność w warunkach silnie kwaśnego odczynu analizowanych gleb leśnych.

Słowa kluczowe: metale ciężkie, gleby Puszczy Knyszyńskiej, roślinność leśna, zanieczyszczenia komunikacyjne.

1. Wprowadzenie

Zawartość metali ciężkich jest jednym z podstawowych parametrów określających stan zanieczyszczenia i stopień degradacji gleb (Kabata-Pendias, 1995; Urban i Michalska, 2000; Okołowicz, 2000; Niemyska-Łukaszuk i in., 2000). Metale ciężkie ze względu na swój charakter oraz ilości wprowadzane przez człowieka do środowiska wywierają szczególną rolę na stan jakości poszczególnych ekosystemów lądowych i wodnych (Skorbiłowicz, 2010). Jest to bardzo ważne w przypadku obszarów objętych ochroną prawną, dla których podwyższona zawartość pierwiastków śladowych wpływa niekorzystnie na utrzymanie procesów ekologicznych i stabilność ekosystemów oraz zachowanie różnorodności biologicznej.

Głównym działaniem realizowanym na rzecz ochrony przyrody jest wyznaczenie cennych, naturalnych lub półnaturalnych obszarów i ich ochrona przy założeniu, że chronione są jednocześnie gatunki i zbiorowiska tam występujące. Wydaje się uzasadnione, że jedynym skutecznym sposobem zachowania różnorodności biologicznej w dłuższej skali czasowej jest ochrona nietkniętych ekosystemów (Pullin, 2007).

Puszcza Knyszyńska usytuowana jest w północno-wschodniej Polsce na obszarze województwa podlaskiego. Jest to Specjalny Obszar Ochrony Siedlisk

(SOO) „Ostoja Knyszyńska” PLH200006, na którym występuje wiele gatunków roślin cennych dla ochrony przyrody w Europie. Jest to także Obszar Specjalnej Ochrony Ptaków (OSO) „Puszcza Knyszyńska” PLB200003 o randze europejskiej (Łaska, 2009). Istotnym problemem dla Puszczy Knyszyńskiej jako obszaru „Natura 2000” jest nasilenie ruchu drogowego, co sprawia, że na zanieczyszczenia pochodzące z komunikacji narażone są także gleby. Środki transportu emitują wiele szkodliwych substancji, takich jak tlenki węgla, tlenki azotu, dwutlenek siarki, sadza, metale ciężkie będące składnikami spalin i pyłów oraz węglowodory (Curzydło, 1995; Indeka i Karczun, 1999; Jasiewicz i Buczek, 2000).

W pracy zaprezentowano wyniki badań dotyczące zawartości miedzi (Cu), kobaltu (Co), niklu (Ni), ołowiu (Pb), chromu (Cr) i kadmu (Cd) w wybranych glebach leśnych na terenie Puszczy Knyszyńskiej, co stanowi podstawę do określenia stopnia zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi pochodzącymi z komunikacji.

2. Obiekt i metody badań

Badania gleboznawcze przeprowadzono w 2011 roku na terenie Nadleśnictwa Supraśl i Dojlidy w Puszczy Knyszyńskiej. Do badań zawartości metali ciężkich

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: a.sienkiewicz@pb.edu.pl

pobrano łącznie 22 próbki glebowe w następujących punktach pomiarowych:

- a) Nadleśnictwo Supraśl, obręb Sokółka:
- 262b, 250ab, 249c, 261c, 250c przy drodze wojewódzkiej nr 676 Supraśl – Krynki w miejscowości Kopna Góra,
 - 294c przy drodze powiatowej nr 1276 B Podsokołda – Lipowy Most,
 - 220c przy drodze powiatowej nr 1291 B Łażnisko – Woronicze,
 - 314c, 302b, 302c, 186b, 218a, 217g, 2 próbki w 306a przy leśnych drogach oddziałowych i dojazdowych;
- b) Nadleśnictwo Supraśl, obręb Supraśl:
- 157f przy drodze powiatowej nr 1435 B Podsupraśl – Surążkowo,
 - 2 próbki w 113a przy leśnych drogach oddziałowych i dojazdowych;
- c) Nadleśnictwo Dojlidy, obręb Katryńka:
- 241g, 240l/241g, 240l, 240g przy leśnych drogach oddziałowych i dojazdowych.

Badaniami objęto 10 cm warstwę poziomu mineralno-organicznego gleb rdzawych i bielcowo-rdzawych subkontynentalnego boru świeżego *Peucedano-Pinetum*, gleb rdzawych boru iglastego wysokiego *Carici digitatae-Piceetum* oraz gleb brunatnych i rdzawych boru mieszanego wielogatunkowego *Serratulo-Piceetum* (Czerwiński, 1995; Łaska, 2006). Próbki glebowe do badań pobrano z odległości około 10 m od krawędzi drogi.

W próbkach glebowych oznaczono ogólną zawartość metali ciężkich (Cu, Co, Ni, Pb, Cr, Cd) techniką AAS

po mineralizacji gleby w mieszaninie stężonych kwasów azotowego i nadchlorowego. Ze względu na interpretację uzyskanych wyników badań dodatkowo określono skład granulometryczny metodą areometryczną Casagrande'a modyfikacji Prószyńskiego oraz odczyn gleby w 1M KCl – metodą potencjometryczną (Ostrowska i in., 2001).

Wyniki oznaczeń zawartości metali w glebach i składu granulometrycznego gleb poddano analizie statystycznej, wykorzystując do tego program Statistica 9.0.

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Skład granulometryczny badanych gleb

Powierzchniowe poziomy badanych gleb zbudowane są w przeważającej części z utworów piaszczystych (tab. 1). Według normy BN-78/9180-11 *Gleby i utwory mineralne. Podział na frakcje i grupy granulometryczne* należą one do następujących grup granulometrycznych piaski luźne (pl) – 15 próbek, piaski luźne pylaste (plp) – 1 próbka, piaski słabo gliniaste (psg) – 6 próbek. Cechą charakterystyczną analizowanych gleb jest stosunkowo mała domieszka frakcji pylastych, których zawartość prawie we wszystkich badanych próbkach nie przekroczyła 25%. Spośród frakcji pylastych dominował pył gruby (0,1-0,05), którego zawartość wahała się od 2 do 16%. Na niższym poziomie kształtował się udział frakcji spławialnych (poniżej 10%), spośród których wyraźnie dominował il pyłowy gruby (0,02-0,005).

Tab. 1. Skład granulometryczny gleb na terenie Puszczy Knyszyńskiej

Numer próbki	Zawartość frakcji [%]					Ogółem [%]		
	0,1-0,05	0,05-0,02	0,02-0,005	0,005-0,002	<0,002	1-0,1	0,1-0,02	<0,02
1	6	4	3	1	3	83	10	7
2	4	1	3	1	1	90	5	5
3	6	3	1	0	3	87	9	4
4	13	5	4	0	2	76	18	6
5	9	4	5	1	0	81	13	6
6	8	3	1	3	0	85	11	4
7	9	4	2	1	1	83	13	4
8	6	4	3	0	3	84	10	6
9	9	3	3	0	2	83	12	5
10	7	6	2	0	2	83	13	4
11	7	1	1	2	2	87	8	5
12	2	1	0	2	1	94	3	3
13	5	3	0	2	0	90	8	2
14	6	2	2	1	1	88	8	4
15	9	6	1	2	3	79	15	6
16	11	5	0	3	2	79	16	5
17	9	5	2	1	1	82	14	4
18	7	5	3	2	2	81	12	7
19	16	5	3	0	1	75	21	4
20	16	10	2	1	0	71	26	3
21	10	6	2	2	0	80	16	4
22	5	3	1	1	3	87	8	5

3.2. Odczyn

Wartości pH zmierzone w 1M KCl dla wszystkich badanych próbek mieściły się w przedziale wartości 3,4-4,5, co wskazało na bardzo kwaśny odczyn wykształconych tam gleb. Istotny udział w zakwaszaniu gleb leśnych mają procesy fizyczne i chemiczne uczestniczące w wietrzeniu minerałów oraz procesy biologiczne, związane z cyklami krążenia C i N (Kurek, 2002; Marcinek i in., 2008).

Czynnikiem znacząco wpływającym na odczyn badanych gleb leśnych jest pokrywa roślinna siedlisk borowych. Podczas pobierania składników mineralnych przez korzenie drzew uwalniane są do środowiska jony wodoru zwiększające zakwaszenie. Silne zakwaszenie w badanych warunkach siedliskowych wynika również z aktywności kwasów humusowych, powstających z rozkładu igieł sosnowych. Dodatkowym czynnikiem jest obecność gęstej warstwy zielnej (*Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea*) i mchów (*Pleurozium schreberi*), których produktem rozkładu są kwasy organiczne. Nieznacznie wyższe wartości pH są prawdopodobnie związane z mniejszym stopniem pokrycia przez roślinność leśną.

3.3. Zanieczyszczenie gleb metalami ciężkimi (Cu, Co, Ni, Pb, Cr, Cd)

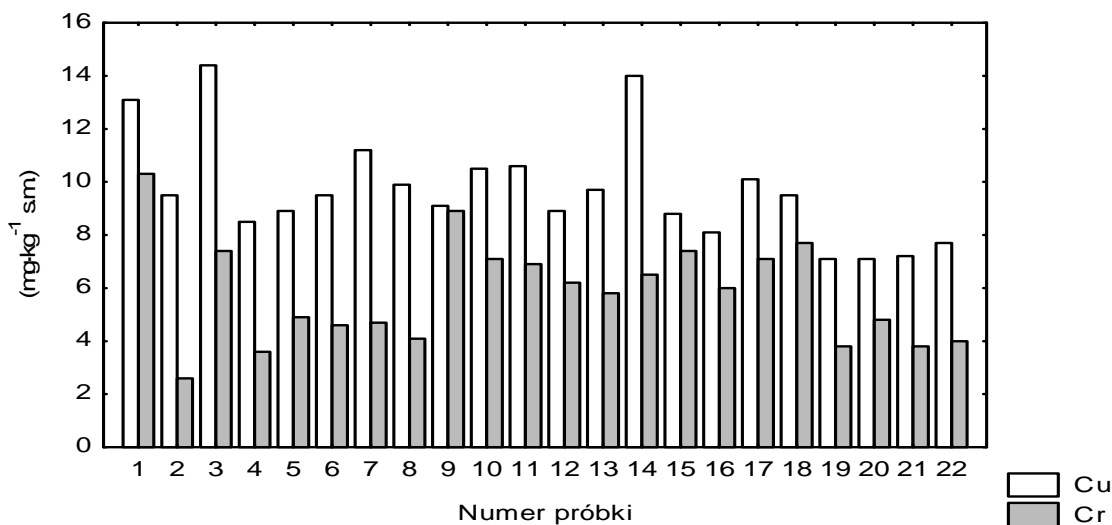
Całkowita zawartość miedzi (Cu) w analizowanych glebach występuje w ilościach naturalnych i zawiera się w granicach 7,1-14,4 mg·kg⁻¹ s.m. (rys. 1). Zawartość ta nie przekracza wartości dopuszczalnej dla terenów grupy A, która wynosi 30 mg·kg⁻¹ s.m. Zawartość chromu (Cr) we wszystkich analizowanych glebach jest zbliżona, kształtuje się na poziomie od 2,6 do 10,3 mg·kg⁻¹ s.m. (rys. 1) i nie przekracza wartości dopuszczalnej dla terenów grupy A - 50 mg·kg⁻¹ s.m.

Kadm (Cd) jest jednym z bardziej niebezpiecznych metali ciężkich dla środowiska przyrodniczego. We wszystkich badanych próbkach glebowych występuje on

w niewielkich ilościach, a jego zawartość poniżej 1 mg·kg⁻¹ s.m. świadczy o naturalnym pochodzeniu. Zawartość ołowiu (Pb) w badanych próbkach glebowych należy uznać także za dopuszczalną (<20 mg·kg⁻¹ s.m.). Jak podano w literaturze (Kabata-Pendias i Pendias, 1999), dla większości gleb naturalna zawartość tego metalu nie powinna przekraczać 20 mg·kg⁻¹ s.m. Zawartość niklu (Ni) ogólnego w badanych glebach nie przekroczyła jego ilości naturalnej (20 mg·kg⁻¹ s.m.). Uzyskane wartości kobaltu (Co) są także typowe dla niezanieczyszczonych gleb leśnych Polski, którego zawartość nie przekroczyła 10 mg·kg⁻¹ s.m.

Znaczący wpływ na zawartość pierwiastków śladowych w analizowanych glebach miał odczyn gleb, który wpływa na ruchliwość metali, a więc także na przyswajalność dla roślin (Kabata-Pendias i Pendias, 1999; Mikiciuk i Banaszek, 2001). W warunkach silnie kwaśnego odczynu następuje wzrost stężenia w roztworze glebowym, dostępnych dla roślin ruchomych form metali ciężkich, a tym samym podwyższenie wskaźnika ich akumulacji w roślinach. Przyczynia się to w dużym stopniu do zmniejszenia rzeczywistej zawartości pierwiastków śladowych w analizowanych glebach.

Oceniając zanieczyszczenie gleb Nadleśnictwa Supraśl i Dojlidy w Puszczy Knyszyńskiej metalami ciężkimi (Cu, Co, Ni, Pb, Cr, Cd) można uznać, że jest ono niewielkie i mieści się w stosunkowo wąskich zakresach najczęściej spotykanych w glebach Polski (Ostrowska i in., 1991; Dudka, 1992). Zgodnie z Czarnowską (1996) zawartość metali: Co, Ni, Pb, Cr, Cd odpowiada wartościom tła geochemicznego w skałach macierzystych gleb północno-wschodniej Polski. Jedynie zawartość miedzi jest powyżej wartości (7,1 mg·kg⁻¹), przyjętej przez Czarnowską (1996), jako tła geochemiczne. Całkowita zawartość badanych metali mieści się także w granicach dopuszczalnych wartości podawanych przez Kabatę-Pendias i Pendiasa (1999) i w żadnym z analizowanych przypadków nie przekracza dopuszczalnych norm określonych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska (Dz. U. nr 165 z 2002 r., poz. 1359)



Rys. 1. Zawartość miedzi (Cu) i chromu (Cr) w badanych glebach Puszczy Knyszyńskiej

dla chronionych obszarów leśnych. Niewielkie zróżnicowanie w stężeniach analizowanych pierwiastków śladowych wynika prawdopodobnie z różnic w składzie granulometrycznym analizowanych gleb (Czarnowska, 1996). Analiza korelacji pomiędzy zawartością poszczególnych metali ciężkich a składem granulometrycznym gleb wykazała, że jest to zależność statystycznie nieistotna.

4. Wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- zawartość metali ciężkich (Cu, Co, Ni, Pb, Cr, Cd) w glebach autogenicznych Nadleśnictwa Supraśl i Dojlidy nie przekracza stężeń dopuszczalnych dla objętych ochroną obszarów leśnych i, z wyjątkiem miedzi, odpowiada wartościom tła geochemicznego w skałach macierzystych gleb północno-wschodniej Polski;
- najwyższą zawartość spośród analizowanych metali ciężkich w przypowierzchniowej warstwie gleb wykazuje miedź, a najniższą kadm;
- niskie zawartości pierwiastków śladowych mogą być spowodowane wzrostem ich rozpuszczalności, a tym samym przyswajalności przez rośliny w warunkach silnie kwaśnego odczynu gleb leśnych.

Literatura

- Curzydło J. (1995). Skażenie motoryzacyjne wzdłuż dróg i autostrad oraz sposoby przeciwdziałania ujemnym skutkom motoryzacji w środowisku. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, No. 418, 265-270.
- Czarnowska K. (1996). Ogólna zawartość metali ciężkich w skałach macierzystych jako tło geochemiczne gleb. *Roczniki Gleboznawcze*, No. 47, 43-50.
- Czerwiński A. (1995). Szata roślinna i pokrywa glebowa. W: Puszcza Knyszyńska. Monografia przyrodnicza. Czerwiński A. (Red.). *Zespół Parków Krajobrazowych w Supraślu*, Supraśl, 203-238.
- Dudka S. (1992). Ocena całkowitej zawartości pierwiastków głównych i śladowych w powierzchniowej warstwie gleb Polski. *Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa*, Puławy.
- Indeka L., Karczun Z. (1999). Kumulacja wybranych metali ciężkich w glebach przy ruchliwych trasach komunikacyjnych. *Ekologia i Technika*, 6/1999, 174-180.
- Jasiewicz C., Buczek J. (2000). Zawartość metali ciężkich w glebie i pszenicy narażonej na wpływ zanieczyszczeń komunikacyjnych. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, No. 472, 341-347.
- Kabata-Pendias A. (1995). Heavy metals in soils – issues in Central and Eastern Europe. W: *Heavy metals in the environment*, Hamburg, No. 1, 20-27.
- Kabata-Pendias A., Pendias H. (1999). Biogeochemia pierwiastków śladowych. *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa.
- Kurek E. (2002). Związki przyczynowo-skutkowe aktywności mikrobiologicznej i zakwaszenia gleb. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, No. 482, 307-316.
- Łaska G. (2006). Tendencje dynamiczne zbiorowisk zastępczych w Puszczy Knyszyńskiej. *Bogucki Wydawnictwo Naukowe*, Białystok-Poznań.
- Łaska G. (2009). Europejska sieć ekologiczna Natura 2000 a ocena oddziaływania na środowisko przyrodnicze. W: *Ochrona środowiska. Perspektywy i strategie rozwoju gospodarczego Puszczy Knyszyńskiej oraz ochrona przyrody na Litwie*. Łaska G. (Red.). *Stowarzyszenie Uroczysko*, Białystok, 51-68.
- Marcinek J., Bednarek R., Komisarz J., Mocek A., Piaścik H., Skiba S. (2008). Systematyka gleb Polski. *Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego*, Poznań.
- Mikiciuk G., Banaszek I. (2001). Zawartość metali ciężkich oraz siarki w glebach i roślinach na terenie stacji doświadczalnej w Dołujach. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, No. 476, 219-227.
- Niemyska-Łukaszuk J., Gąsiorek M., Miechówka A. (2000). Kadm, nikiel, ołów i cynk w glebach i roślinach pól pasterskich Tatrzańskiego Parku Narodowego. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, No. 472, 543-550.
- Okołowicz M. (2000). Zawartość metali ciężkich w glebach organicznych Puszczy Kampinoskiej. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, No. 471, 1075-1080.
- Ostrowska A., Gawliński S., Szczubiałka Z. (1991). Metody analizy i oceny właściwości gleb i roślin. *Instytut Ochrony Środowiska*, Warszawa.
- Ostrowska A., Porębska G., Borzyszkowski J., Król H., Gawliński S. (2001). Właściwości gleb leśnych i metody ich oznaczania. *Instytut Ochrony Środowiska*, Warszawa.
- Pullin A. S. (2007). Biologiczne podstawy ochrony przyrody. *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa.
- Skorbiłowicz E. (2010). Studia nad rozmieszczeniem niektórych metali w środowisku wodnym zlewni górnej Narwi. *Politechnika Białostocka*, Białystok.
- Urban D., Michalska R. (2000). Zawartość pierwiastków śladowych w glebach i roślinach łąkowych wybranych obiektów torfowiskowych Poleskiego Parku Narodowego. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, No. 471, 835-840.

CONTENT OF SELECTED HEAVY METALS IN AUTOGENIC SOILS IN THE SUPRAŚL AND DOJLIDY FOREST DIVISION IN THE KNYSZYŃSKA FOREST

Abstract: The paper presents the results of research concerning contents of the selected heavy metals (Cu, Co, Ni, Pb, Cr, Cd) in autogenic soils in the Supraśl and Dojlidy Forest Division in the Knyszyńska Forest. The aim of the studies was to determine the degree of soil pollution with heavy metals from communication. The research results show that the contents of the examined trace elements do not exceed the concentration limits for the soils of areas protected by law. The highest concentration in surface soil layer was found for copper, and the lowest for cadmium. Vegetation has a significant effect on reducing the heavy metal concentration, through increased assimilation by plants in a strongly acidic forest soils.

Badania przeprowadzono w Politechnice Białostockiej w ramach pracy własnej W/WBiŚ/6/2011.

WYBÓR ŹRÓDŁA ZASILANIA POMIĘDZY KOTŁOWNIĄ NA BIOPALIWO A POMPĄ CIEPŁA DLA OBIEKTÓW W ZABUDOWIE SZEREGOWEJ

Justyna SIERGIEJUK*, Andrzej GAJEWSKI

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W artykule dokonano wyboru źródła zasilania w ciepło pomiędzy kotłownią na biopaliwo a pompą ciepła dla obiektów w zabudowie szeregowej o zapotrzebowaniu na moc cieplną równą 148,97 kW. Dobrano pompy ciepła z sondami gruntowymi, natomiast jako biopaliwo przyjęto pelety. Po dokonaniu doboru urządzeń oszacowano koszty inwestycyjne i roczne koszty eksploatacyjne analizowanych źródeł zasilania w ciepło. Uzyskane koszty obu inwestycji pozwoliły na wybór źródła bardziej opłacalnego pod względem ekonomicznym.

Słowa kluczowe: pelety, pompy ciepła, koszty inwestycyjne, koszty eksploatacyjne.

1. Wprowadzenie

W dzisiejszych czasach istnieje wiele możliwości ogrzewania budynków i przygotowania ciepłej wody użytkowej. Najczęściej wybierane są rozwiązania najtańsze, chociaż decydujący wpływ ma tu dostępność użytkowników do poszczególnych paliw.

Przy wyborze źródła ciepła zauważa się także tendencję do dbałości o środowisko. Związane jest to z wprowadzaniem zaostrzonych przepisów dotyczących emisji spalin do atmosfery, która powoduje szereg konsekwencji takich jak: wzrost efektu cieplarnianego, niepożądany wpływ na zdrowie ludzi, kwaśne deszcze negatywnie wpływające na wody, roślinność, a także obiekty budowlane (Zalewski, 2001). Istotnym problemem jest również fakt wyczerpywania się zasobów paliw kopalnych. Z tego powodu popularne stają się niekonwencjonalne źródła energii. W ciepłownictwie najpopularniejsze z nich są biopaliwa oraz urządzenia takie jak kolektory słoneczne korzystające z energii słonecznej, a także pompy ciepła czerpiące energię między innymi z gruntu, wody czy powietrza. Zainteresowanie biopaliwem ciągle rośnie ze względu na możliwość wykorzystania odpadowej biomasy powstającej głównie w rolnictwie. Instalacje z pompą ciepła przedstawiane są przez producentów jako inwestycje proekologiczne oraz opłacalne w eksploatacji, ponieważ nie korzystają z paliw konwencjonalnych, ale z energii otoczenia.

Z powodu wzrastającej popularności biopaliw oraz pomp ciepła artykuł został poświęcony właśnie tym

źródłom zasilania budynków w ciepło. Celem artykułu jest dokonanie wyboru pomiędzy wspomnianymi źródłami ciepła na podstawie kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych.

2. Charakterystyka pomp ciepła oraz biopaliw

Początek opracowania podstaw teoretycznych sprężarkowej pompy ciepła to rok 1834. Inicjatorem był Pelletan, który zauważył możliwość wykorzystania ciepła powstającego w wyniku odparowania soli. Idea wykorzystania pomp ciepła do ogrzewania została wymyślona przez Thomsona w roku 1852. Pierwsza instalacja wykorzystująca to urządzenie do ogrzewania domu powstała w 1928 roku. Jej twórcą był Haldane (Zalewski, 2001). Pompy ciepła dzielą się na sprężarkowe, sorpcyjne, termoelektryczne oraz strumienicowe, chemiczne, magnetyczne, wykorzystujące efekt wirowy czy efekt elektrodyfuzji.

Sprężarkowa pompa ciepła zbudowana jest z wymienników ciepła, sprężarki oraz elementów dławiących i regulujących. Wymiennikami ciepła są parownik i skraplacz. Praca tych urządzeń polega na poborze energii niskotemperaturowej w dolnym źródle przez nośnik ciepła, który następnie trafia do pompy ciepła. Czynnik roboczy znajdujący się w parowniku pompy ulega odparowaniu na skutek ogrzania przez ciepło pochodzące z dolnego źródła. Sprężarka, do której dostarczana jest energia wykonuje pracę sprężania powodując wzrost temperatury i ciśnienia pary czynnika

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: j.siergiejuk@gmail.com

od ciśnienia parowania do ciśnienia kondensacji. Następnie para dostaje się do skraplacza, w którym oddawane jest ciepło do źródła górnego i zachodzi kondensacja czynnika. Skroplony czynnik przepływa przez zawór rozprężny, dzięki czemu spada jego temperatura oraz ciśnienie od ciśnienia skraplania do ciśnienia parowania, a następnie trafia do parownika i obieg się powtarza.

W celu uzyskania energii niskotemperaturowej, niezbędnej do pracy pompy ciepła, potrzebne są tak zwane źródła dolne, czyli miejsca, z których pobierane jest ciepło i następnie dostarczane do parownika. Dzielą się one na naturalne, takie jak: grunt, wody powierzchniowe, podziemne, powietrze atmosferyczne, promieniowanie słoneczne oraz na sztuczne, czyli gazy, spaliny, ścieki, woda powrotna w systemach ciepłowniczych (Lewandowski, 2006). Dolne źródła energii powinny posiadać następujące cechy (Zalewski, 2001; Rubik, 2006):

- w miarę wysoką i niezmienną temperaturę (wydajność źródła powinna być najwyższa w okresie największego zapotrzebowania na energię),
- dużą pojemność cieplną,
- nie powinny powodować korozji,
- nietrudny dostęp,
- koszty związane z budową instalacji oraz pozyskiwaniem energii z tych źródeł powinny być jak najniższe.

Sprężarkowe pompy ciepła mogą pracować w układzie monowalentnym. Jest to tak zwana eksploatacja jednosystemowa polegająca na zastosowaniu pompy ciepła jako jedynego źródła ciepła dla instalacji. Drugim układem jest układ biwalentny (eksploatacja dwusystemowa), w którym pompa ciepła współpracuje z innymi urządzeniami grzewczymi np. z kotłem na olej czy gaz. Układ ten może funkcjonować jako system rozdzielony (alternatywny). W tym przypadku przy niższym zapotrzebowaniu na ciepło pracuje sama pompa ciepła. Na podstawie punktu biwalentnego wyznaczana jest temperatura powietrza zewnętrznego, przy której następuje wyłączenie pracy pompy ciepła i włączenie dodatkowego źródła ciepła. Oba urządzenia mogą pracować równocześnie w momencie, gdy pompa ciepła nie jest w stanie sama pokryć wymaganego zapotrzebowania na ciepło. Dodatkowe źródło ciepła dogrzewa wodę wcześniej podgrzaną przez pompę ciepła. Jest to system równoległy. Istnieje również system mieszany, w którym pompa ciepła początkowo pracuje sama. Następnie przy odpowiednio ustalonej temperaturze włączane jest dodatkowe szczytowe źródło ciepła. Gdy temperatura zewnętrzna spada poniżej ustalonej temperatury, następuje wyłączenie pompy ciepła i kocioł pracuje sam (Rubik, 2006; Recknagel i in. 2008).

Biopaliwo jest to paliwo otrzymywane z biomasy. Według Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 14 sierpnia 2008 roku (Dz. U. nr 156 z 2008 r., poz. 969) „biomasa są to stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz leśnej, a także

przemysłu przetwarzającego ich produkty, a także części pozostałych odpadów, które ulegają biodegradacji”. Biomasa składa się z substancji pokarmowych (węglowodany i skrobie) oraz energetycznych (lignina, celuloza, hemiceluloza), dlatego wykorzystywana jest zarówno jako pokarm dla ludzi i zwierząt, a także produkt do pozyskiwania energii (Lewandowski, 2006; www.pelet.com.pl).

Biomasę pozyskuje się głównie z rolnictwa i można podzielić ją na:

- biomasę stanowiącą produkt odpadowy (słoma, niewykorzystane zboże),
- biomasę pochodzących z celowych upraw roślin energetycznych.

Oprócz rolnictwa źródłem biomasy jest także (Szecówka, 2009):

- leśnictwo,
- sadownictwo,
- przemysł drzewny,
- przemysł spożywczy,
- oczyszczalnie ścieków.

Energia zawarta w biomacie powstaje dzięki magazynowaniu energii słonecznej w wyniku procesu fotosyntezy. Biomasa pochłania zaledwie 1% energii, która dociera do Ziemi. W celu wykorzystania zakumulowanej energii można przeprowadzać (Lewandowski, 2006; Juliszewski, 2009):

- spalanie bezpośrednie biomasy (na przykład w kotłach spalających słomę),
- współspalanie biomasy z węglem, gazem, olejem opałowym,
- przetwarzanie biomasy i spalanie powstałych produktów.

Najniższa wartość opałowa biomasy nadającej się do spalania bezpośredniego wynosi 6,8 MJ/kg (Lewandowski, 2006).

Przed każdym procesem przetwarzania biomasy stosuje się wstępne zabiegi takie jak suszenie i rozdrabnianie (Szecówka, 2009). Do procesów przetwarzania biomasy należy kondycjonowanie, fermentacja, rozkład termiczny oraz estryfikacja (Lewandowski, 2006; Szecówka, 2009).

Biopaliwa dostępne są w zarówno w stanie stałym jak i ciekłym oraz gazowym. Do celów ogrzewania stosuje się przede wszystkim biopaliwa stałe. Te w stanie ciekłym używane są głównie jako paliwa do pojazdów. Forma gazowa paliw stosowana jest w ciepłownictwie oraz do wytwarzania energii elektrycznej. Wśród biopaliw stałych wyróżnia się:

- materiały z naturalnego drewna (pelety, zrębki, brykiety, ścinki, trociny, wióry, pył drzewny),
- modyfikowane rośliny energetyczne (wierzba energetyczna, trzciny, trawy),
- pochodzenia rolnego (ziarna roślin, słomy zbożowe, rzepakowe, kukurydzy, łodygi, trawy),
- odpady organiczne (zageszczony i osuszone osady ściekowe, gnojowica, makulatura).

Ciekłe biopaliwa to:

- paliwa z ekstrakcji roślin oleistych („biodiesel”),

- paliwa z fermentacji alkoholowej (metanol, etanol),
- płynne z drewna (żywice, oleje, benzyny).

Natomiast gazowe biopaliwa można podzielić na:

- gaz z drewna („holzgas” w wyniku zgazowania, pirolizy),
- gaz z fermentacji osadów i ścieków, gnojowicy,
- gaz z fermentacji odpadów przetwórstwa spożywczego i rolniczego,
- gaz wysypiskowy. (Lewandowski, 2006; www.pelet.com.pl).

Produkcja peletów ma swoje początki w latach 80-tych XX-ego wieku w Ameryce Północnej i Skandynawii. Obecnie najbardziej popularne są w Niemczech, Austrii, USA, Kanadzie, zaś w Szwecji, Belgii, Holandii i Danii ich zużycie znacznie przekracza produkcję (www.pelet.com.pl; www.kostrzewa.com.pl). Pelet w języku angielskim oznacza kulkę, tabletkę, granulkę. Pelety nazywane są paliwem XXI-ego wieku. Produkcja peletów polega na sprasowaniu pod wysokim ciśnieniem suchych odpadów z drewna lub innych odpadów naturalnych i uzyskanie z nich kulek, walców (tak zwanych minibrzykiecików) o określonym kształcie i strukturze. Najczęściej mają one średnicę 6 do 25 mm i długość 20-30 mm (www.szkozenia-junkers.pl; mojaenergia.pl). Materiałem do produkcji peletu mogą być (www.pelet.com.pl):

- trociny, wióry, zrębki,
- słoma,
- nasiona słonecznika,
- rzepak,
- pestki owoców,
- mikstant cukrowy.

Surowiec służący do produkcji pelet wpływa na ich kolor. W przypadku użycia drzew liściastych np. dębu czy drzew egzotycznych lub w przypadku prowadzenia procesu suszenia w instalacjach bębnowych, kolor jest ciemny (www.pelet.com.pl).

Proces tworzenia pelet zwany jest inaczej paletyzacją, granulacją lub aglomerowaniem. Kolejnymi etapami procesu są mielenie surowca, suszenie i zagęszczanie, prasowanie z dodatkiem pary wodnej oraz formowanie pod wysokim ciśnieniem (około 15-60 MPa) przy użyciu pary wodnej lub wody (www.pelet.com.pl).

Zalety pelet: (Recknagel, i in., 2008; www.pelet.com.pl):

- dostępność,
- pewność dostaw,
- stabilna cena,
- odporność na samozapłon,
- odporność na procesy gnilne (nie pochłania wilgoci, jest trwały i stabilny biologicznie),
- niska emisja tlenków azotu, dwutlenków siarki,
- niewielka ilość popiołu,
- popiół wykorzystywany jest jako nawóz,
- tworzenia nowych miejsc pracy w danym regionie (wytwarzanie biomasy i przetwarzanie jej na biopaliwo na najczęściej charakter lokalny).

3. Dobór urządzeń do analizowanych źródeł zasilania w ciepło oraz określenie kosztów inwestycyjnych

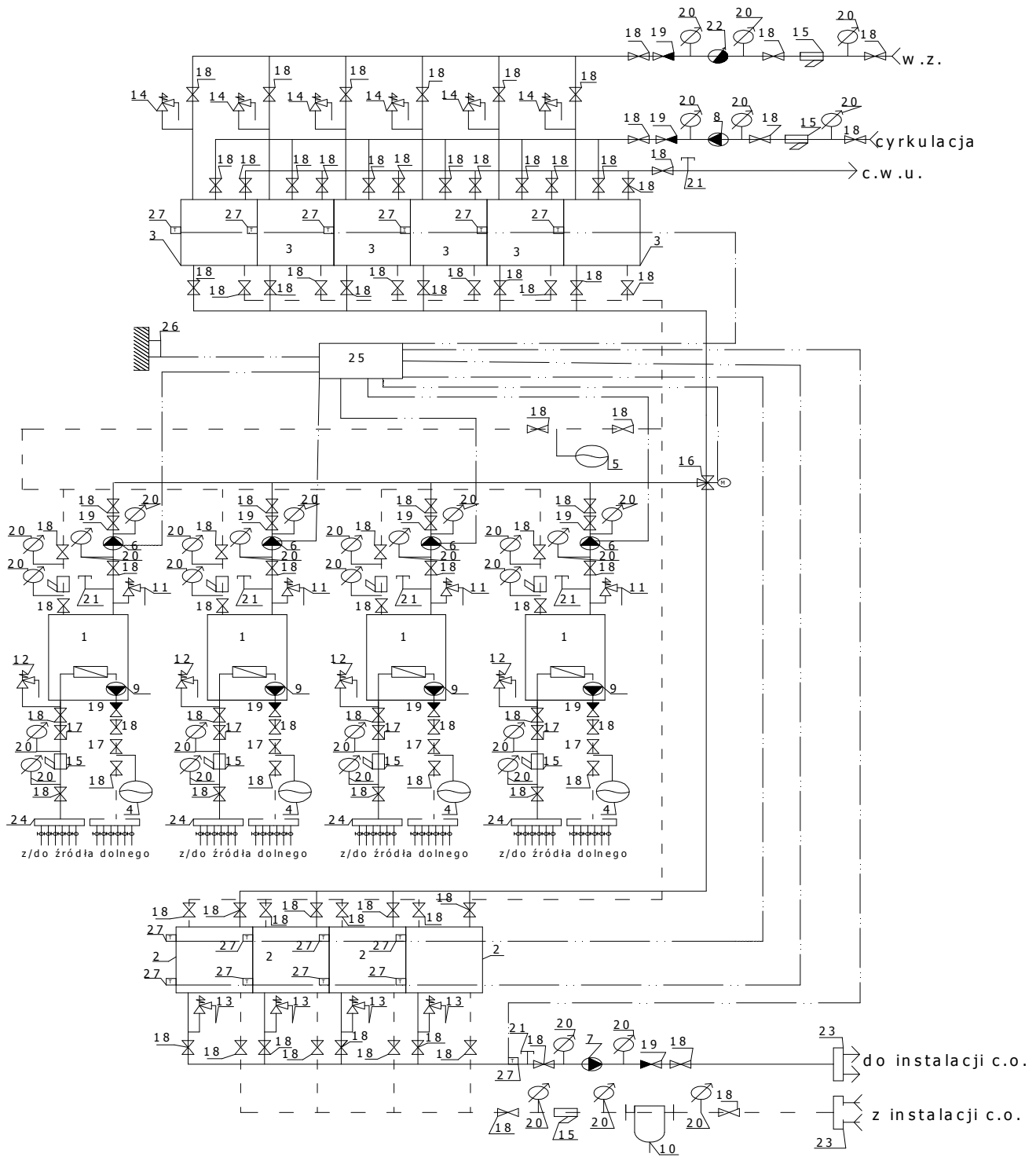
W pracy dokonano analizy źródła ciepła dla obiektów w zabudowie szeregowej z lokalizacją w Jeżewie Starym. Zapotrzebowanie na moc cieplną równe jest 148,97 kW, natomiast liczba osób korzystających z ciepłej wody użytkowej wynosi 63.

Pierwszym analizowanym rozwiązaniem jest źródło zasilania w ciepło z pompą ciepła. Wybrano pompy ciepła solanka/woda z sondami gruntowymi. Tego rodzaju sposób pozyskiwania energii niskotemperaturowej wiąże się z wyższymi, w porównaniu z kolektorami poziomymi, kosztami inwestycyjnymi. Jest to jednak rozwiązanie pozwalające na lepszą pracę pompy ciepła. Energia pozyskiwana jest z głębszych warstw gruntu, gdzie temperatura nie zmienia się tak szybko jak przy powierzchni i pozwala na uzyskanie niższych kosztów eksploatacyjnych. Nie jest w tym przypadku wymagana duża powierzchnia działki (Zalewski, 2001; www.szkozenia-junkers.pl).

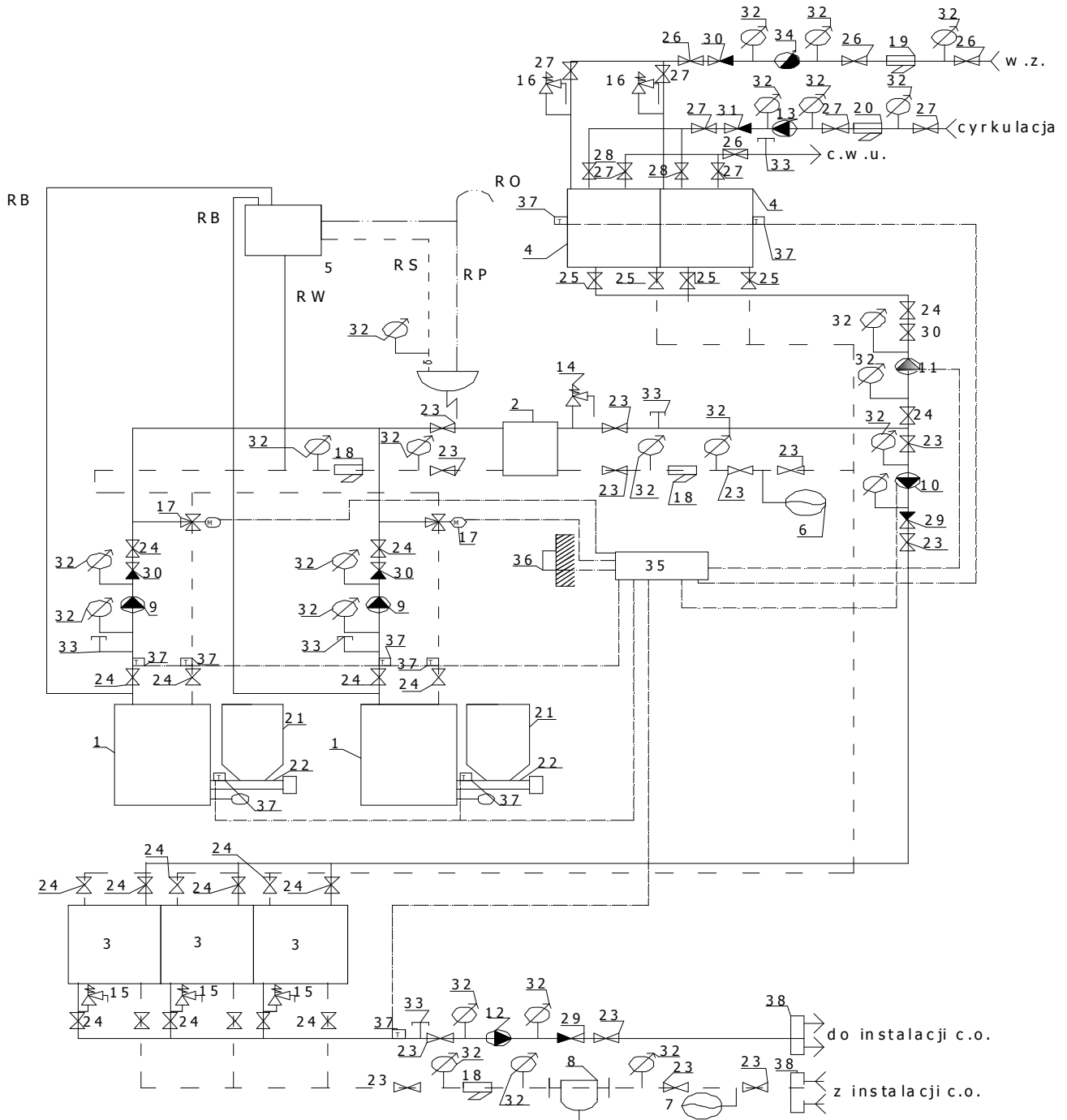
Schemat technologiczny układu z pompą ciepła pokazano na rysunku 1. Dobrano cztery pompy ciepła typu geoTHERM VWS 460/2 firmy Vaillant, każda o mocy grzewczej równej 42,5 kW. W wyniku obliczeń przyjęto po 6 odwiertów, każdy o głębokości 95 m dla jednej pompy ciepła. Wybrano sondy w postaci U-rurki o średnicy 32 × 2,9 mm. W celu oddzielenia obiegu pompy ciepła od obiegu instalacji c.o. zastosowano zbiorniki buforowe pełniące również funkcję akumulatorów ciepła. Dobrano cztery bufor wody grzewczej typu VPS 750 firmy Vaillant. Dodatkowo, oprócz wspomnianych już urządzeń, dobrano także: sześć podgrzewaczy ciepłej wody typu geoSTAR VIH RW 300 firmy Vaillant, magetoodmulacz typu OISm 300/65 firmy SPAW-TEST, przeponowe naczynie wzbiorcze typu N 200 firmy Reflex oraz naczynie wzbiorcze typu NG 35 przy każdej pompie ciepła.

W wyniku zsumowania cen jednostkowych za poszczególne urządzenia oraz po dodaniu kosztów na wykonanie odwiertów, a następnie kosztów na pozostałe urządzenia i robociznę (przyjęto 10% ceny dobranych urządzeń bez odwiertów i sondy) otrzymano koszty analizowanej inwestycji w wysokości 594 010,02 zł.

W drugim przypadku analizie poddano kotłownię na biopaliwo. Jako biopaliwo wybrano pelety. Pelety pakowane są między innymi w worki 25 kg, co umożliwia łatwą aplikację paliwa do zbiornika urządzenia grzewczego. Przyjęto specjalne kotły na pelety ze zbiornikiem na paliwo o pojemności 400 litrów. Schemat technologiczny opisywanej kotłowni przedstawiono na rysunku 2.



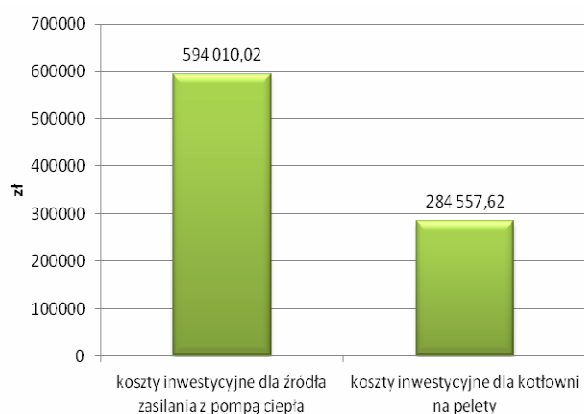
Rys. 1. Schemat technologiczny układu z pompą ciepła, gdzie cyframi oznaczono: 1 – pompa ciepła, 2 – bufor, 3 – podgrzewacz ciepłej wody użytkowej (cwu), 4 – przeponowe naczynie zbiorcze (strona zimna), 5 – przeponowe naczynie zbiorcze N 200, 6 – pompa obiegowa, 7 – pompa obiegu instalacji centralnego ogrzewania (c.o.), 8 – pompa cyrkulacyjna, 9 – pompa obiegu solanki, 10 – magnetoodmulacz, 11 – zawór bezpieczeństwa przy pompie ciepła, 12 – zawór bezpieczeństwa przy pompie ciepła (strona zimna), 13 – zawór bezpieczeństwa na obiegu c.o., 14 – zawór bezpieczeństwa na przewodzie wody zimnej, 15 – filtr siatkowy, 16 – zawór 3-drogowy przełączający, 17 – zawór do napełniania i opróżniania obiegu solanki, 18 – zawór odcinający, 19 – zawór zwrotny, 20 – manometr, 21 – termometr, 22 – wodomierz, 23 – rozdzielacz centralnego ogrzewania (c.o.), 24 – rozdzielacz obiegu solanki, 25 – regulator pompy ciepła, 26 – czujnik temperatury zewnętrznej, 27 – czujnik temperatury



Rys. 2. Schemat technologiczny kotłowni na pelety, gdzie cyframi i literami oznaczono: 1 – kocioł, 2 – wymiennik ciepła, 3 – bufor, 4 – podgrzewacz ciepłej wody użytkowej (cwu), 5 – naczynie bezpieczeństwa otwarte, 6 – przeponowe naczynie wzbiorcze NG 140, 7 – przeponowe naczynie wzbiorcze N 250, 8 – magnetooodmulacz, 9 – pompa obiegu kotłowego, 10 – pompa obiegu centralnego ogrzewania (c.o.), 11 – pompa obiegu ciepłej wody użytkowej (cwu), 12 – pompa obiegu instalacji centralnego ogrzewania (c.o.), 13 – pompa cyrkulacyjna, 14 – zawór bezpieczeństwa, 15 – zawór bezpieczeństwa, 16 – zawór bezpieczeństwa na przewodzie wody zimnej, 17 – zawór mieszający, 18-20 – filtr siatkowy, 21 – zbiornik paliwa, 22 – podajnik ślimakowy, 23-28 – zawory odcinające, 29-31 – zawory zwrotne, 32 – manometr, 33 – termometr, 34 - wodomierz, 35 - regulator pracy kotła, 36 – czujnik temperatury zewnętrznej, 37 – czujnik temperatury, 38 – rozdzielacz centralnego ogrzewania (c.o.), RB – rura bezpieczeństwa, RW – rura wzbiorcza, RO – rura odpowietrzająca, RP – rura przelewowa, RS – rura sygnalizacyjna

W przypadku kotłowni na biopaliwo dobrano dwa kotły grzewcze typu Pellets Fuzzy Logic firmy Kostrzewa, każdy o mocy 75 kW. W celu oddzielenia obiegu kotłowego od części instalacyjnej dobrano na podstawie programu komputerowego HEXE firmy Danfoss lutowany płytowy wymiennik ciepła typu XB 51H-1 40. Część kotłowa została zabezpieczona otwartym naczyniem bezpieczeństwa typu NW 100 firmy Pa-met, natomiast w części instalacyjnej zastosowano przeponowe naczynie wzbiorcze N 200 firmy Reflex. Pozostałe dobrane urządzenia w kotłowni to: dwa pojemnościowe podgrzewacze ciepłej wody Vitocell-300 V EVI firmy Viessmann, dwa zbiorniki buforowe Vitocell 100-E SVP firmy Viessmann, każdy o pojemności 400 litrów, magetoodmulacz typu OISm 300/65 firmy SPAW-TEST. W przypadku kotłowni konieczne było zaprojektowanie komina. Zastosowano dwuścienny komin systemu Dualinox firmy Poujoulat o średnicy 200/250 mm. Ceny powyższych urządzeń, komina wraz z omurowaniem, koszt budowy magazynu na paliwo (obliczono powierzchnię magazynu równą 78 m²) oraz koszty na pozostałe urządzenia i robociznę (równe 10% ceny urządzeń bez omurowania komina) dały łączną sumę na wykonanie inwestycji równą 284 557,62 zł.

Porównanie nakładów inwestycyjnych analizowanych źródeł zasilania w ciepło dla obiektów w zabudowie szeregowej przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Koszty inwestycyjne analizowanych źródeł ciepła

4. Koszty eksploatacyjne analizowanych źródeł zasilania w ciepło

W celu określenia kosztów eksploatacyjnych wyznaczono na podstawie danych Ministerstwa Infrastruktury (www.mi.gov.pl):

- liczbę dni sezonu grzewczego – 232 dni,
- liczbę dni poza sezonem grzewczym – 133 dni.

Następnie na podstawie powyższych danych obliczono liczbę stopniocdni równą 4 095.

W przypadku instalacji z pompą ciepła koszty eksploatacyjne stanowią przede wszystkim opłaty za energię elektryczną. Obliczono całkowite zużycie energii elektrycznej w ciągu roku, korzystając z wzorów:

- 1) na ilość energii elektrycznej E_s do napędu sprężarek pomp ciepła:

$$E_s = \frac{h_{c.o.} \cdot Q_{c.o.} + h_{cwu} \cdot \Phi_{hsr}}{\varepsilon} [kWh/a] \quad (1)$$

gdzie: $h_{c.o.}$ jest liczbą godzin pracy instalacji c.o. przy parametrach obliczeniowych w sezonie grzewczym w h/a, $Q_{c.o.}$ jest zapotrzebowaniem na moc na cele grzewcze budynku w kW, h_{cwu} jest ilością godzin pracy na potrzeby cwu poza sezonem grzewczym w h/a, Φ_{hsr} jest średnią godzinową mocą cieplną na cele cwu w kW, ε jest współczynnikiem COP pompy ciepła (przyjęto $\varepsilon = 3$);

- 2) ilość energii elektrycznej E_{ps} do pracy pomp obiegu solanki:

$$E_{ps} = (P \cdot h_{c.o.} + P \cdot h_{cwu}) [kWh/a] \quad (2)$$

gdzie P jest poborem mocy elektrycznej przez pompę obiegu solanki dla jednej pompy ciepła w kW.

W wyniku obliczeń uzyskano całkowitą ilość energii elektrycznej potrzebnej do pracy analizowanego układu z pompami ciepła równą 145 036,39 kWh. Następnie na podstawie cen i stawek dla grupy taryfowej G11 Taryfy PKP Energetyka dla Wschodniego Rejonu Dystrybucji (Taryfa PKP Energetyka S.A., 2010) określono wysokość opłat za energię elektryczną w ciągu roku. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Opłata za energię elektryczną w ciągu roku w zł/a do pracy pomp ciepła

	Cena jednostkowa	Ilość energii elektrycznej	Całkowita cena [zł/a]
Obrót			
Cena za energię elektryczną czynną	0,2476 zł/kWh	145 036,39 kWh/a	35 911,01
Dystrybucja			
Składnik stały stawki sieciowej (układ pomiarowy 3-fazowy)	3,23 zł/m-c za moc zamówioną	56 kW	2 170,56
Składnik jakościowy stawki systemowej	0,077 zł/kWh	145 036,39 kWh/a	1 116,78
Stawka opłaty przejściowej (dla rocznego zużycia energii > 1 200 kWh)	5,03 zł/m-c za moc zamówioną	56 kW	3 380,16
Składnik zmienny stawki sieciowej	0,1888 zł/kWh	145 036,39 kWh/a	27 381,87
Stawka opłaty abonamentowej (okres rozliczeniowy 1 – miesięczny)	2,4 zł/m-c	-	28,80
Razem w zł			69 990,18

Na podstawie tabeli 1 można stwierdzić, że największy udział w opłatach za energię elektryczną ciągu roku stanowią opłaty za energię elektryczną czynną oraz opłaty za składnik zmienny stawki sieciowej. Najmniejszy wpływ na roczne opłaty za energię elektryczną ma stawka opłaty abonamentowej.

Główne koszty eksploatacyjne związane z kotłownią na pelety stanowią koszty związane z zakupem paliwa. Ilość paliwa w sezonie grzewczym oraz na cele cwu poza sezonem grzewczym policzono kolejno ze wzorów (3) i (4) (Pieńkowski i in. 1999):

$$B_{c.o.} = \frac{y \cdot a \cdot 3,6 \cdot 24 \cdot S_d \cdot Q_{c.o.}}{Q_i \cdot \eta_{sr} (t_w - t_z)} \quad [kg/a] \quad (3)$$

$$B_{c.wu} = \frac{y \cdot a \cdot 3,6 \cdot 18 \cdot 133 \cdot \Phi_{hsr}}{Q_i \cdot \eta_{sr}} \quad [kg/a] \quad (4)$$

gdzie: y jest współczynnikiem zmniejszającym, a jest współczynnikiem zwiększającym, S_d jest liczbą stopniodni, $Q_{c.o.}$ jest zapotrzebowaniem na moc cieplną w W, Q_i jest wartością opałową paliwa w kJ/kg, η_{sr} średnią eksploatacyjną sprawnością kotła, t_w jest średnią temperaturą w budynku w °C, t_z jest temperaturą zewnętrzną w °C, Φ_{hsr} jest średnią godzinową mocą cieplną na cele c.w.u. w W.

Całkowite roczne zapotrzebowanie na paliwo równe jest 87 403 kg/a. Założono, że pelety będą przechowywane w magazynie w workach o masie 25 kg, w ilości zapewniającej paliwo na cały rok. Przyjęto koszt pelet wraz z dostawą 799,10 zł/t, co daje łączną kwotę za roczny zapas paliwa równą 69 841,34 zł/a. Dodatkowo doliczone roczne wynagrodzenie palacza równe 8 640 zł, przy założeniu, że będzie on zatrudniony na ¼ etatu.

Tak jak w przypadku pomp ciepła, również doliczono opłatę za energię elektryczną potrzebną do pracy do kotłów. Zużycie energii elektrycznej obliczono z wzoru:

$$E_{ps} = (P_{k1} \cdot h_{c.o.} + P_{k2} \cdot h_{c.wu}) \quad [kWh/a] \quad (5)$$

gdzie: P_{k1} jest poborem energii elektrycznej przez kotły w okresie grzewczym w kW, P_{k2} jest poborem energii elektrycznej przez kotły w okresie poza sezonem grzewczym w kW.

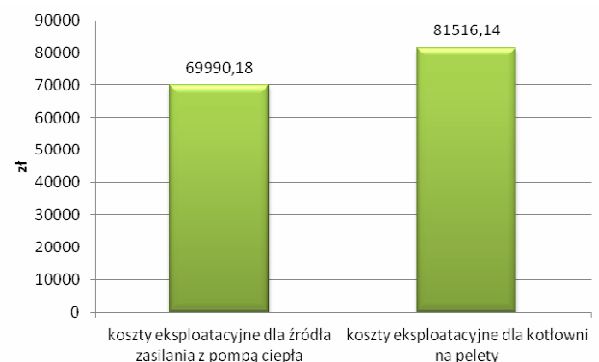
Roczne zużycie energii elektrycznej przez dobrane kotły równa jest 6 367 kWh/a. Koszty poniesione za pobór energii elektrycznej przedstawiono w tabeli 2.

Po zsumowaniu opłat za zakup i transport paliwa, wynagrodzenie palacza oraz za pobór energii elektrycznej otrzymano łączne koszty eksploatacyjne kotłowni na pelety równe 81 516,14 zł.

Porównanie analizowanych kosztów przedstawiono na rysunku 4.

Tab. 2. Opłata za energię elektryczną w ciągu roku do pracy kotłów na pelety

	Cena jednostkowa	Ilość energii elektrycznej	Całkowita cena [zł/a]
Obrót			
Cena za energię elektryczną czynną	0,2476 zł/kWh	6 367 kWh/a	1 576,47
Dystrybucja			
Składnik stały stawki sieciowej (układ pomiarowy 3-fazowy)	3,23 zł/m-c za moc zamówioną	1,8 kW	69,77
Składnik jakościowy stawki systemowej	0,077 zł/kWh	6 367 kWh/a	49,03
Stawka opłaty przejściowej (dla rocznego zużycia energii > 1 200 kWh)	5,03 zł/m-c za moc zamówioną	1,8 kW	108,65
Składnik zmienny stawki sieciowej	0,1888 zł/kWh	6 367 kWh/a	1 202,09
Stawka opłaty abonamentowej (okres rozliczeniowy 1 – miesięczny)	2,4 zł/m-c	-	28,80
Razem w zł			3 034,80



Rys. 4. Koszty eksploatacyjne analizowanych źródeł ciepła

5. Wybór źródła zasilania w ciepło

Na podstawie uzyskanych kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych analizowanych źródeł ciepła dla obiektów w zabudowie szeregowej obliczono czas zwrotu nakładów inwestycji z pompą ciepła:

$$SPBT = \frac{I}{Z} \quad [lat] \quad (5)$$

gdzie: I jest różnicą nakładu inwestycyjnego na źródło z pompą ciepła i kotłowni na pelety, Z są rocznymi oszczędnościami w eksploatacji.

Obliczenia w wyniku których otrzymano wysoki koszt inwestycyjny źródła zasilania z pompą ciepła, niewielka różnica kosztów eksploatacyjnych analizowanych źródeł oraz obliczony na podstawie tych kosztów prosty czas zwrotu nakładów inwestycji z pompą ciepła wynoszący 27 lat, pokazały, że korzystniejszym pod względem ekonomicznym źródłem ciepła dla analizowanych obiektów jest kotłownia na pelety.

6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej kotłowni na biopaliwo i źródła zasilania z pompą ciepła dla obiektów w zabudowie szeregowej o zapotrzebowaniu na moc cieplną równą 148 970 W można sformułować przedstawione poniżej wnioski.

- Inwestycja źródła zasilania z pompą ciepła jest ponad dwukrotnie droższa od inwestycji kotłowni na pelety. Koszty związane z wykonaniem źródła zasilania z pompą ciepła wynoszą 594 010,02 zł, natomiast kotłowni na pelety 284 557,62 zł.
- Realizacja inwestycji, jaką jest źródło zasilania z pompą ciepła związana jest z zakupem czterech pomp ciepła, sześciu podgrzewaczy ciepłej wody użytkowej, czterech buforów wody grzewczej, dwóch przeponowych naczyń wzbiórczych oraz wykonania wykopów pod sondy gruntowe i zakupu tych sond. Decydujący wpływ na wysokość tych kosztów mają ceny pomp ciepła oraz wykonanie odwiertów w gruncie, co stanowi 4/5 całkowitych kosztów.
- Kotłownia na pelety jest inwestycją, która wymaga zakupu dwóch kotłów ze zbiornikiem na paliwo oraz z automatycznym podajnikiem pelet, dwóch podgrzewaczy ciepłej wody użytkowej, dwóch buforów wody grzewczej, wymiennika ciepła, otwartego naczynia wzbiórczego, przeponowego naczynia wzbiórczego, budowy dwóch kominów oraz magazynu na pelety. Największe koszty zostaną poniesione w tym przypadku na budowę magazynu, a w dalszej kolejności na zakup kotłów i podgrzewaczy. Stanowi to również około 4/5 całkowitych kosztów.
- Wysoka cena pomp ciepła ma decydujący wpływ na to, że źródło zasilania z pompą ciepła jest inwestycją droższą w porównaniu z kotłownią na pelety.
- Koszty eksploatacyjne źródła zasilania z pompą ciepła są niższe od kosztów związanych z kotłownią na pelety. Różnica ta wynosi 11 525,96 zł w ciągu roku.
- Eksploatacja źródła zasilania z pompą ciepła wiąże się przede wszystkim z opłatą za pobór energii elektrycznej potrzebnej do pracy sprężarki pomp ciepła oraz zainstalowanych w pompie ciepła pomp obiegu źródła dolnego. Ilość pobieranej energii elektrycznej przez pompy ciepła w ciągu roku wyniesie 145 036,39 kWh. Roczne koszty eksploatacyjne wyniosą w tym przypadku 69 990,18 zł.
- Koszty związane z użytkowaniem kotłowni na pelety stanowią: opłata za zakup i transport pelet, których w ciągu roku potrzeba 87,4 tony, wynagrodzenie palacza oraz opłata za pobór energii elektrycznej potrzebnej do pracy podajnika ślimakowego. Roczna eksploatacja kotłowni na pelety wynosi 81 516,14 zł.
- Przy takich kosztach inwestycyjnych i eksploatacyjnych źródło zasilania z pompą ciepłą zwróci się po 27 latach.
- Pomimo, że przy zastosowaniu instalacji z pompą ciepła nie korzysta się z paliw kopalnych, to koszty poniesione na zakup energii elektrycznej koniecznej do pracy pompy ciepła są porównywalne do tych jakie należy ponieść na zakup i transport pelet w przypadku kotłowni na pelety.

Literatura

- Juliszewski T. (2009). Ogrzewanie biomasą. *Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne*, Warszawa.
- Lewandowski W. M. (2006). Proekologiczne odnawialne źródła energii. *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*, Warszawa.
- Pieńkowski K., Krawczyk D., Tumul W. (1999). Ogrzewnictwo. *Wydawnictwo Politechniki Białostockiej*, Białystok.
- Recknagel H., Schramek E. R. (2008). Kompendium wiedzy. Ogrzewnictwo, klimatyzacja, ciepła woda, chłodnictwo. *Omni Scala*, Wrocław.
- Rubik M. (2006). Pompy ciepła. *Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie”*, Warszawa.
- Szecówka L. (2009). Ekologiczny efekt energetycznego wykorzystania biopaliw. *Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej*, Częstochowa.
- Taryfa PKP Energetyka S.A. (2010) z dnia 07.05.2010. *Taryfa PKP Energetyka S.A.*
- Zalewski W. (2001). Pompy ciepła sprężarkowe, sorpcyjne i termoelektryczne: podstawy teoretyczne, przykłady obliczeniowe. *Inżynierskie Przedsiębiorstwo Produkcyjno-Uslugowe MASTA*, Gdańsk.

CHOICE OF POWER SOURCE OF HEAT BETWEEN BIOFUEL-FIRED BOILER ROOM AND HEAT PUMP FOR TERRACE HOUSES

Abstract: In paper choice between biofuel and heat pumps as heat sources for terrace house was made. Calculations for heat demand equaling 148,97 kW were made. Geothermal heat pumps were matched and pellets were chosen as a biofuel. Afterward capital and working costs for analyzed heat sources were calculated. Results showed which of both heat sources is more cost-effective investment.

METODY OCENY EFEKTYWNEJ GRUBOŚCI DOCIEPLANIA ŚCIAN ZEWNĘTRZNYCH

Robert STACHNIEWICZ*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: Dużą rolę przy określaniu efektywnej grubości izolacji termicznej ma przyjęta metoda oceny. Najczęściej spotykana prosta metoda oceny, na przykład *SPBT*, wskazuje na inne efektywne grubości niż metody wykorzystujące technikę dyskonta, na przykład *NPV*. Rozbieżności w efektywnej grubości wynikają przede wszystkim z faktu, iż metoda prosta *SPBT* zawęża okres rachunku do czasu zwrotu nakładów, natomiast metody dyskontowe obejmują rachunkiem ekonomicznym cały okres funkcjonowania inwestycji. Ponadto w artykule przeanalizowano wpływ cen 5 nośników energii na efektywną grubość izolacji termicznej w przykładowym domu jednorodzinnym. Efektywną grubość izolacji termicznej określono stosując prosty czas zwrotu *SPBT* i zaktualizowaną wartość netto *NPV*.

Słowa kluczowe: fizyka budowli, termomodernizacja, efektywność inwestycji.

1. Wprowadzenie

Użytkowanie budynków jest nierozdzielnie związane ze zużyciem energii potrzebnej przede wszystkim do ich ogrzewania, ale również do normalnej eksploatacji. Stale wzrasta zapotrzebowanie na energię w budownictwie. Nie dotyczy to jedynie wznoszenia nowych budynków, ale przede wszystkim eksploatacji istniejących zasobów. Obecnie ze względu na zagrożenie wyczerpywania się zasobów naturalnych dąży się do oszczędności tej energii. Związane to jest głównie z aspektem ekonomicznym. Stale rosnące ceny surowców energetycznych powodują konieczność minimalizowania energii potrzebnej do ogrzewania budynków.

Wielkość konsumpcji energii w sektorze komunalno-bytowym zależy między innymi od wielkości i standardu energetycznego zasobów budowlanych. Chcąc polepszyć standard energetyczny istniejących zasobów konieczna jest ich termomodernizacja. Ponieważ wiąże się ona z poniesieniem kosztów finansowych, które dopiero w przyszłości będą przynosić efekty w postaci oszczędności eksploatacyjnych, dobrze jest aby była ona prawidłowo zaplanowana i wykonana. Temu celowi służyć może audyt energetyczny budynku, w którym oprócz analizy energetycznej stanu istniejącego wykonywana jest szczegółowa analiza efektywności możliwych do wykonania zabiegów termomodernizacyjnych, w tym docieplenia przegród zewnętrznych. W chwili obecnej analizy efektywności

wykonywane w audytach energetycznych oparte są na prostej metodzie oceny stosującej jako kryterium wyboru minimalizację wartości prostego czasu zwrotu *SPBT* według Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 17 marca 2009 roku w sprawie szczegółowego zakresu i form audytu energetycznego oraz części audytu remontowego, wzorów kart audytów, a także algorytmu oceny opłacalności przedsięwzięcia termomodernizacyjnego. (Dz. U. nr 43 z 2009 r., poz. 346). Metoda ta, choć prosta w interpretacji nie jest jedyną metodą oceny efektywności zastosowanych przedsięwzięć termomodernizacyjnych. Jedną z często stosowanych metod oceny efektywności jest metoda oparta na kryterium wartości bieżącej netto *NPV*, która wykorzystuje technikę dyskonta.

W artykule przeanalizowano czy i w jakim stopniu zmieniają się efektywne grubości docieplenia przegród zewnętrznych w przykładowym jednorodzinnym budynku mieszkalnym w zależności od przyjętej metody oceny.

2. Wpływ przyjętej metody oceny opłacalności inwestycji na efektywną grubość izolacji termicznej w przykładowym budynku jednorodzinnym

2.1. Opis budynku poddawanego analizie

Na potrzeby analizy efektywnej grubość izolacji termicznej w zależności od przyjętej metody oceny,

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: r.stachniewicz@pb.edu.pl

posłużono się jednorodnym budynkiem mieszkalnym, wykonanym w latach 70, położonym w Białymstoku. Jest to budynek parterowy z poddaszem użytkowym, niepodpiwniczony. Ściany zewnętrzne są murowane z cegły pełnej grubości 38 cm na zaprawie cementowo-wapiennej. Stolarka okienna i drzwiowa jest drewniana – okna dwuszybowe. Więźba dachowa jest drewniana z dachem dwuspadowym. Powierzchnia użytkowa budynku wynosi 175,5 m².

Współczynniki przenikania ciepła U przegród zewnętrznych w budynku wynoszą:

- ściany – 1,43 W/(m²·K),
- dach – 0,32 W/(m²·K),
- okna – 3,0 W/(m²·K),
- podłoga na gruncie – 0,27 W/(m²·K) dla I strefy i 0,21 W/(m²·K) dla II strefy.

Przegrody zewnętrzne nie spełniają obecnych wymagań stawianych współczynnikiem przenikania ciepła U według rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 roku dotyczącego warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. nr 75 z 2008r., poz. 690 z późn. zm.).

Zgodnie z wyżej wymienionym rozporządzeniem budynkom jednorodnym stawia się alternatywnie wymagania odnośnie wskaźników zapotrzebowania na energię pierwotną. W przedmiotowym budynku wskaźnik ten wynosi 234,67 kWh/(m²·rok) i wynika z niedostatecznej izolacyjności cieplnej przegród zewnętrznych.

Ciepło do ogrzewania budynku dostarczane jest z kotła węglowego o mocy 25 kW, jednakże możliwe jest zastosowanie (po modernizacji kotłowni) innych nośników energii takich jak biomasa (drewno), olej opałowy, gaz ziemny GZ-50 oraz prąd elektryczny.

2.2. Przyjęte metody oceny efektywnej grubości izolacji termicznej

Przy ocenie efektywności (opłacalności) inwestycji modernizacyjnych można posłużyć się metodami prostymi, dyskontowymi lub wielokryterialnymi nie opartymi na wysokości nakładów inwestycyjnych. Do metod prostych można zaliczyć między innymi stopę zwrotu nakładów ROI (*Return on the Investment*), przeciętną stopę zwrotu ARR (*Accounting Rate of Return*) lub najczęściej stosowaną metodę prostego czasu zwrotu $SPBT$ (*Simple Pay Back Time*). Ogólnie w metodach tych wykorzystywana jest prosta relacja zysku lub możliwych oszczędności, które powstają na skutek realizacji przedsięwzięcia i nakładów potrzebnych do jego wykonania. W metodach dyskontowych takich jak wartość bieżąca netto NPV (*Net Present Value*) czy wewnętrzna stopa zwrotu IRR (*Internal Rate of Return*) lub też metodzie optymalnego kosztu globalnego (Behrens i Hawranek, 1991; Sierpińska i Jachna, 2007; Rogowski, 2008; Dziennik Urzędowy UE Nr L 81), które uwzględniają wpływ czasu na opłacalność zabiegów.

Do wyboru efektywnej grubości izolacji termicznej przyjęto dwie najczęściej stosowane w Polsce metody

oceny efektywności inwestycji: metodę prostego czasu zwrotu nakładów $SPBT$ i metodę wartości bieżącej netto NPV . Pierwsza z nich należy do metod prostych i jest stosowana na przykład w rozporządzeniach wykonawczych do Ustawy termomodernizacyjnej (Dz. U. nr 43 z 2009 r., poz. 346), druga jest metodą dyskontową oceniającą przedsięwzięcie (projekt inwestycyjny) w całym okresie jego funkcjonowania.

Prosty czas zwrotu nakładów $SPBT$ jest nieskomplikowaną metodą statyczną. Określany jest jako czas niezbędny do odzyskania nakładów początkowych, poniesionych na realizację przedsięwzięcia.

Wartość $SPBT$ określa się na podstawie poniższego wzoru:

$$SPBT = \frac{N_U}{\Delta O_{r.c.o.}} \text{ [lata]} \quad (1)$$

gdzie: N_U jest planowanym kosztem robót związanych ze zmniejszeniem strat ciepła przez przenikanie dla całkowitej powierzchni wybranej przegrody wyrażone w zł, a $\Delta O_{r.c.o.}$ jest roczną oszczędnością kosztów energii wynikającą z zastosowania usprawnienia termomodernizacyjnego wyrażona w zł/rok.

Metoda prostego czasu zwrotu nakładów opisuje opłacalność inwestycji w sposób uproszczony, ponieważ nie uwzględnia całego okresu funkcjonowania przedsięwzięcia. Dlatego metoda ta służy raczej do wykonywania wstępnych ocen efektywności ekonomicznej rozpatrywanych przedsięwzięć, głównie na etapie studiów przedrealizacyjnych. Stosując to kryterium oceny podjęcie decyzji polega na wyborze rozwiązania zapewniającego jak najszybsze odzyskanie początkowych nakładów. Metoda ta kładzie główny nacisk na szybki zwrot nakładów, pomijając efekty powstające w wyniku funkcjonowania przedsięwzięcia po czasie jego zwrotu.

Najbardziej precyzyjnym narzędziem oceny efektywności przedsięwzięć inwestycyjnych są metody oparte na technice dyskonta. Uwzględniają one, w przeciwieństwie do prostych metod oceny, rozłożenie w czasie przewidywanych wpływów i wydatków związanych z badaną inwestycją. Służy temu wykorzystanie tak zwane dyskonta, które pozwala sprowadzić do porównywalności nakłady i efekty realizowane w różnych okresach czasu przy określonej stopie dyskonta i . Określenie ich wartości bieżącej, to jest zaktualizowanej na moment przeprowadzenia oceny, stanowi podstawę dalszego wnioskowania.

Podstawową metodą wykorzystującą dyskonto jest wartość bieżąca netto NPV . Pozwala ona określić różnicę pomiędzy obecną wartością wpływów i wydatków finansowych związanych z realizacją ocenianego przedsięwzięcia. Wyraża ona zatem, zaktualizowaną na moment dokonywania oceny, wielkość korzyści, jakie może przynieść rozpatrywane przedsięwzięcie inwestycyjne. NPV określa się jako sumę zdyskontowanych oddzielnie dla każdego roku przepływów pieniężnych netto zrealizowanych w całym

okresie objętym rachunkiem, przy stałym poziomie stopy dyskontowej według wzoru:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{\Delta O_{r.c.o.t}}{(1+i)^t} - \sum_{t=0}^{n_1} \frac{J_t}{(1+i)^t} \quad [\text{zł}] \quad (2)$$

gdzie: $\Delta O_{r.c.o.t}$ jest oszczędnością kosztów energii w roku t wyrażona w zł, J_t jest nakładem inwestycyjnym wyrażonym w zł, i jest stopą dyskontową, n jest okresem eksploatacji budynku, a n_1 okresem ponoszonych nakładów inwestycyjnych.

Jeżeli $NPV > 0$, to realizacja przedsięwzięcia jest opłacalna. Przy $NPV = 0$ stopa dyskontowa jest równa minimalnej stopie granicznej, a więc efekty (oszczędności z przeprowadzonej termomodernizacji) jedynie pokrywają wydatki na realizację przedsięwzięcia. Jeżeli $NPV < 0$, to przedsięwzięcie będzie przynosić straty. Przy opracowywaniu wielu wariantów przedsięwzięć modernizacyjnych należy realizować te, dla których NPV przyjmuje wartość maksymalną.

2.3. Przyjęte założenia

Do analiz efektywności przy wykorzystaniu techniki dyskonta przyjęto jego wielkość na podstawie wzoru (3) na tak zwaną realną stopę dyskontową, uzależnioną od średniej rocznej stopy inflacji oraz średniej stopy oprocentowania kredytów termomodernizacyjnych.

$$i = \frac{i_{kred} - i_{inf}}{1 + i_{inf}} \quad [\%] \quad (3)$$

gdzie: i_{kred} jest oprocentowaniem kredytu długoterminowego, a i_{inf} jest stopą inflacji.

Przyjęty w obliczeniach okres oceny efektywności docieplenia n i n_1 wynosi 15 lat. Zakładany okres jest zalecany do rozpatrywania inwestycji termomodernizacyjnych.

Przy założeniu oprocentowania kredytów długoterminowych (na przykład kredyty termomodernizacyjne) na poziomie 8% i średniej stopy inflacji na poziomie średnio 4% rocznie, obliczona realna stopa dyskonta wynosi 3,85%. Taką stopę dyskonta przyjęto w dalszej części referatu do określenia efektywnej grubości izolacji przy pomocy metody dyskontowej NPV .

Aby poszerzyć analizę efektywnej grubości izolacji do obliczeń oszczędności eksploatacyjnych wprowadzono różne nośniki energii, które mogą być użyte po modernizacji kotłowni: drewno (biomasa), węgiel, olej opałowy, gaz ziemny i prąd elektryczny.

Ilość ciepła potrzebna do ogrzewania analizowanego domu jednorodzinne w standardowym sezonie grzewczym obliczona została programem Arcadia-termo. Ciepło do ogrzewania z uwzględnieniem sprawności składowych systemu grzewczego obliczono ze wzoru (4).

$$Q_{0,1co} = w_{t0,1} \cdot w_{d0,1} \cdot Q_{0,1netto} / \eta_{0,1} \quad [\text{GJ/rok}] \quad (4)$$

gdzie: $Q_{0,1co}$ jest zapotrzebowaniem na energię cieplną brutto, przed (indeks „0”) i po (indeks „1”) usprawnieniu termomodernizacyjnym wyrażoną w GJ/rok, $\eta_{0,1}$ jest

całkowitą sprawnością systemu grzewczego przed i po modernizacji, $w_{t0,1}$ to współczynniki uwzględniające przerwy w ogrzewaniu w okresie tygodnia, które przyjmuje się z rozporządzenia (Dz. U. nr 43 z 2009 r., poz. 346), $w_{d0,1}$ to współczynniki uwzględniające przerwy w ogrzewaniu w okresie doby przyjmuje się z rozporządzenia, a $Q_{0,1netto}$ jest zapotrzebowaniem netto na ciepło do ogrzewania przed i po usprawnieniu termomodernizacyjnym w GJ/rok.

Przyjęta sprawność systemu grzewczego η jest różna w zależności od źródła ciepła i nośników energii (tab. 1).

Tab. 1. Sprawności systemu grzewczego w zależności od nośnika ciepła

Rodzaje nośników energii	η_w	η_p	η_r	η_e	η_0, η_1	$w_{t0,1}, w_{d0,1}$
drewno (biomasa)	0,65	0,95	0,95	0,95	0,557	1,0
węgiel	0,65	0,95	0,95	0,95	0,557	1,0
olej opałowy	0,88	0,95	0,95	0,95	0,754	1,0
gaz	0,88	0,95	0,95	0,95	0,754	1,0
prąd elektryczny	0,97	0,95	1,0	0,95	0,875	1,0

Po określeniu zapotrzebowania na ciepło w budynku, przy uwzględnieniu cen O_z danego nośnika ciepła, obliczono roczną oszczędność kosztów ogrzewania po dociepleniu ścian zewnętrznych i dachu (dla każdego z osobna) posługując się wzorem (5).

$$\Delta O_{rc.o.} = \frac{w_{t0} \cdot w_{d0} \cdot Q_{0c.o.}}{\eta_0 - w_{t1} \cdot w_{d1} \cdot Q_{1c.o.}} \cdot O_z \quad [\text{zł/rok}] \quad (5)$$

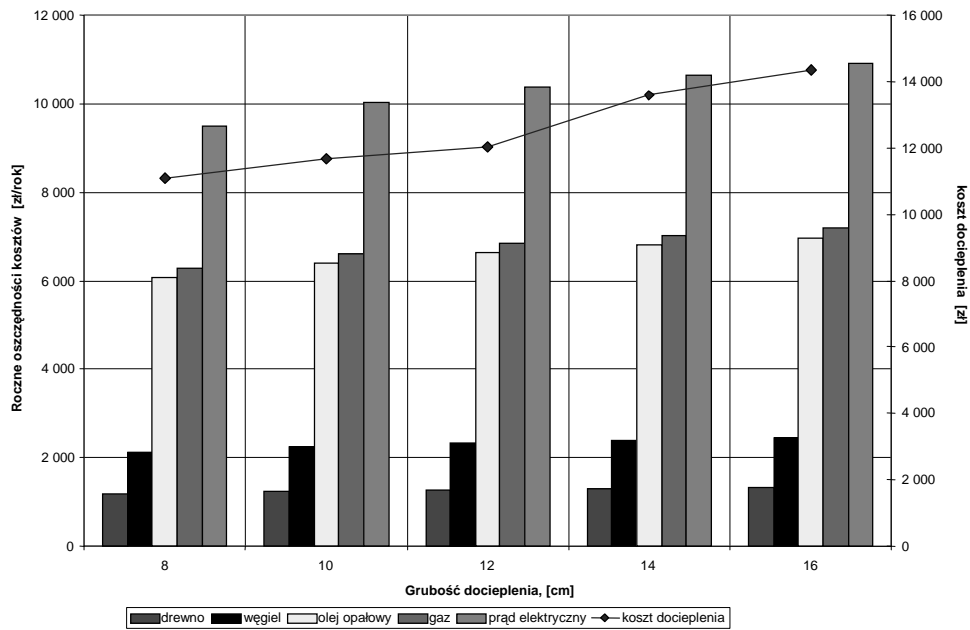
Następnie z zależności (6) określone zostały koszty docieplenia ścian zewnętrznych (metoda BSO tak zwana „lekka-mokra” przy użyciu płyt ze styropianu Knauf EPS 70-040 Fasada, gęstość objętościowa 15 kg/m³, 150 zł/m³, koszt stały) i dachu budynku (ocieplenie wełną mineralną ISOVER, gęstość objętościowa 20 kg/m³, 120 zł/m³).

$$N_U = A \cdot (d \cdot m + w) \quad [\text{zł}] \quad (6)$$

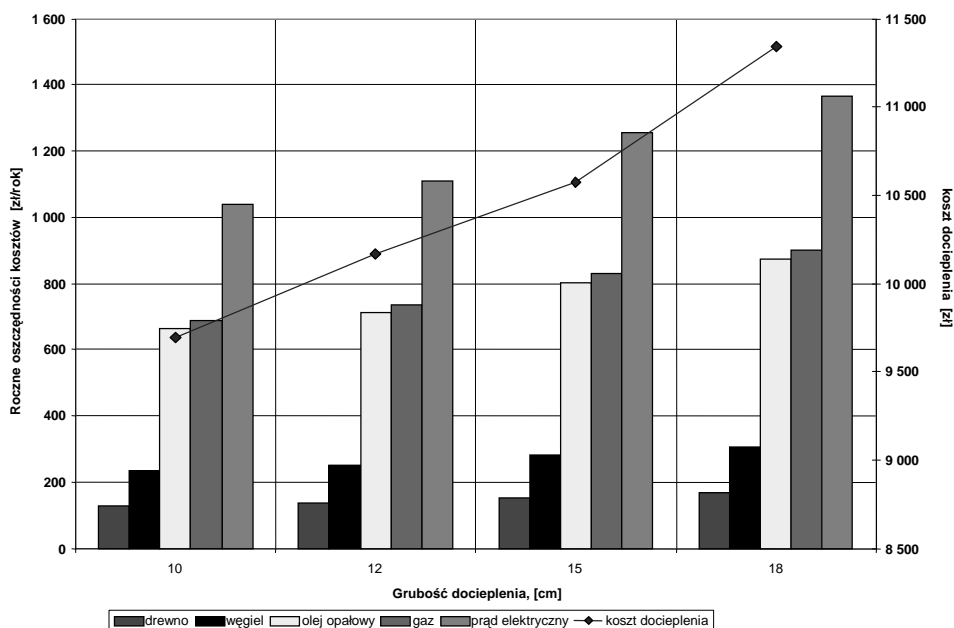
gdzie: m jest kosztem materiału użytego do termomodernizacji w zł/m³, d jest grubością docieplenia w m, w jest kosztem wykonania docieplenia w zł/m² (ściana – 80 zł/m², dach – 40 zł/m²), a A jest powierzchnią docieplaną przegrody wyrażoną w m².

2.4. Wyniki obliczeń i analiza

Wyniki obliczeń oszczędności eksploatacyjnych otrzymanych przy zastosowaniu równania (5) oraz wielkości nakładów eksploatacyjnych według wzoru (6) zamieszczono na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Oszczędność kosztów ogrzewania dla różnych nośników ciepła przy dociepleniu ścian zewnętrznych metodą BSO (lekka-mokra)



Rys. 2. Oszczędność kosztów ogrzewania dla różnych nośników ciepła przy dociepleniu dachu

Po obliczeniu oszczędności kosztów ogrzewania budynku po dociepleniu ścian zewnętrznych i dociepleniu dachu oraz ustaleniu nakładów na termomodernizację tych przegród, korzystając ze wzorów (1) i (2) określono wartości *SPBT* i *NPV* dla wybranych grubości docieplenia.

W tablicach 2 i 3 wyłuszczone zostały wartości najbardziej efektywne ekonomicznie według kryterium *SPBT* i *NPV* odpowiadające określonym grubościom izolacji. Można zauważyć, zróżnicowanie efektywnych grubości izolacji w przypadku stosowania przy ocenie kryterium *NPV* (szczególnie przy dociepleniu dachu). Stosując kryterium *SPBT* otrzymujemy jedną wartość

efektywnej grubości dodatkowej izolacji termicznej, niezależnie nawet od stosowanego nośnika energii. Różnica w efektywnych grubościach dodatkowej izolacji wynika z faktu, iż metoda dyskontowa *NPV* obejmuje przy ocenie cały okres funkcjonowania przedsięwzięcia, a nie zawęża się tylko do czasu zwrotu nakładów jak to ma miejsce w metodzie *SPBT*. Jedynie przy najdroższym nośniku energii (prąd elektryczny) i niskim współczynniku przenikania ciepła dla dachu ($U = 0,32 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) obydwie metody dają jednakową efektywną grubość izolacji termicznej równą 18 cm.

Tab. 2 Wartości *SPBT* i *NPV* przy dociepleniu ścian zewnętrznych

Grubość docieplenia d [cm]	Nośnik energii				
	drewno (biomasa)	węgiel	olej opałowy	gaz	energia elektryczna
<i>SPBT</i>					
8	9,61	5,23	1,83	1,78	1,17
10	9,45	5,14	1,802	1,746	1,152
12	9,46	5,15	1,805	1,748	1,154
14	9,55	5,20	1,82	1,76	1,16
16	9,63	5,24	1,84	1,78	1,18
<i>NPV</i>					
8	971	11104	52305	54367	88083
10	1225	11924	55416	57593	93189
12	1254	12328	57345	59599	96451
14	1168	12521	58677	60987	98774
16	1085	12720	60014	62382	101111

Tab. 3. Wartości *SPBT* i *NPV* przy dociepleniu dachu

Grubość docieplenia d [cm]	Nośnik energii				
	drewno (biomasa)	węgiel	olej opałowy	gaz	energia elektryczna
<i>SPBT</i>					
10	76,35	41,54	14,57	14,11	9,32
12	74,91	40,77	14,30	13,85	9,15
15	69,03	37,57	13,17	12,76	8,43
18	68,08	37,06	12,99	12,58	8,31
<i>NPV</i>					
10	-8369	-7257	-2743	-2517	1176
12	-8747	-7560	-2737	-2496	1449
15	-8974	-7634	-2185	-1912	2534
18	-9602	-8144	-2215	-1919	2920

Poza tym obydwie metody nie dają jednakowych wniosków, co do opłacalności inwestycji. W przypadku docieplenia dachu, gdy do ogrzewania budynku zastosowany został olej, gaz i prąd, posługując się metodą *SPBT* można uznać, że opłacalność jest jeszcze zadowalająca, natomiast metoda *NPV* wskazuje na opłacalność docieplenia dachu grubością 18 cm izolacji jedynie przy ogrzewaniu energią elektryczną ($NPV > 0$).

3. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych powyżej rozważań można stwierdzić, że:

- metody dyskontowe dają bardziej realne wyniki, ponieważ obejmują cały okres funkcjonowania inwestycji termomodernizacyjnej, co wpływa na występowanie w budynku różnicy w efektywnych grubościach izolacji termicznej (ściany 10 cm do 12 i 16 cm);

- oprócz cen nośnika energii duże znaczenie dla efektywności przedsięwzięcia termomodernizacyjnego odgrywa również wartość początkowa współczynnika przenikania ciepła U przegrody; efektywność ta jest tym większa, im większa jest wartość współczynnika przenikania ciepła U docieplanej przegrody.

Literatura

- Behrens W., Hawranek P. M. (1991). Manual for the preparation of industrial feasibility studies Newly revised and expanded edition. *UNIDO United Nations Industrial Development Organization*. Vienna.
- Rogowski W. (2008). Rachunek efektywności inwestycji. *Oficyna ekonomiczna Wolters Kluwer Polska*. Warszawa.
- Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) nr 244/2012 z dnia 16 stycznia 2012 r. sprawie charakterystyki energetycznej budynków i ustanawiające ramy metodologii porównawczej do celów obliczania optymalnego pod względem kosztów poziomu wymagań minimalnych dotyczących

charakterystyki energetycznej budynków i elementów budynków. *Dziennik Urzędowy UE Nr L 81*.
Sierpiska M., Jachna T. (2007). Ocena przedsiębiorstwa według standardów światowych. *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa.

METHODS OF ESTIMATION OF THE EFFECTIVE THICKNESS OF INSULATING OUTER WALLS

Abstract: The applied method of the judgement plays a vital role in case of the determination of effective thickness of thermal isolation. Simple methods (such as *SPBT - Simple Pay Back Time*) point at other effective thicknesses than the methods

making use of the discount technique (for example *NPV – Net Present Value*). The effective thickness of thermal isolation calculated with the simple method (*SPBT*) will be different from the second one, calculated with the method *NPV*. It results from the fact that the calculations making use of the *SPBT* method include solely the period of the expenses refund. On the other hand the calculations making use of the discount technique involve the whole period of the investment duration. Additionally in the report the influence of five kinds of fuel on effective thickness of thermal insulation in the hypothetical cottage has been analysed. The effective thickness of thermal insulation was determined applying the criterion simple payback time *SPBT* and net present value *NPV*.

IMPLEMENTACJA METODY RÓŻNIC SKOŃCZONYCH Z OPTYMALIZACJĄ METODY LIEBMANNA W MODELOWANIU LAMINARNYCH PRZEPŁYWÓW W PRZEWODACH PROSTOOSIOWYCH O DOWOLNYM KSZTAŁCIE PRZEKROJU PRZEWODU

Tomasz Janusz TELESZEWSKI, Sławomir Adam SORKO*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W artykule zaprezentowano metodę różnic skończonych (MRS) przy zastosowaniu płaskich siatek z optymalizacją metody Liebmana w modelowaniu laminarnych przepływów w przewodach prostoosiowych o dowolnym kształcie przekroju przewodu, jako alternatywę dla metod numerycznych wykorzystujących trójwymiarowe siatki. Dwuwymiarowe siatki w przekrojach przewodów mogą być wykorzystane do wyznaczania wielkości jednoczłonowych opisujących przepływ. W celu weryfikacji metody porównano rezultaty obliczeń numerycznych ze znanym rozwiązaniem analitycznym laminarnego przepływu przez przewód okrągły. W pracy przedstawiono przykłady obliczeniowe pól prędkości, dla których nie są znane proste rozwiązania teoretyczne.

Słowa kluczowe: przewody prostoosiowe, przepływ laminarny, współczynnik Coriolisa, współczynnik Boussinesqa.

1. Wprowadzenie

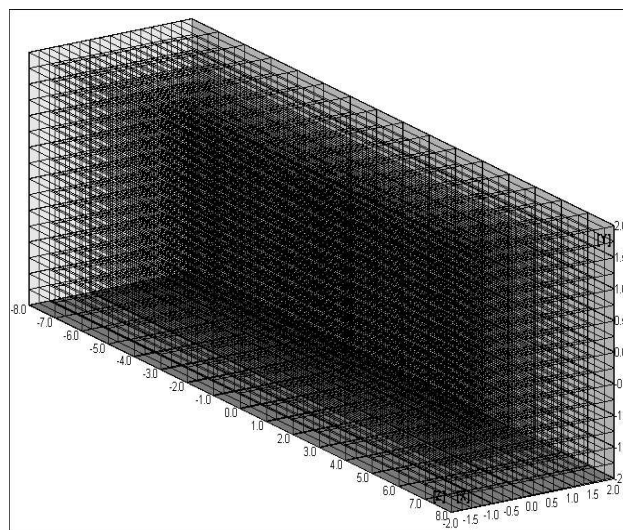
Znajomość pól prędkości w przekrojach przewodów prostoosiowych ma istotne znaczenie w tworzeniu programów służących do obliczeń hydraulicznych. Obecnie jedynie niektóre zagadnienia można policzyć metodami analitycznymi, natomiast w przypadku skomplikowanych geometrii przekrojów przewodów prostoosiowych wymagane jest zaawansowane oprogramowanie komputerowe. Klasyczne, a zarazem najczęściej stosowane siatkowe algorytmy rozwiązywania przepływu w przewodach prostoosiowych wymagają budowy pracochłonnych trójwymiarowych siatek (Kosma, 2007; Huang i Ho, 1993).

Wyprowadzony w publikacji algorytm pozwala zastąpić skomplikowaną siatkę przestrzenną (rys. 1) wewnątrz przewodu dwuwymiarową siatką zlokalizowaną w przekroju przewodu (rys. 2).

Płaski, izotermiczny przepływ płynu lepkiego opisuje równanie (Batchelor, 2000):

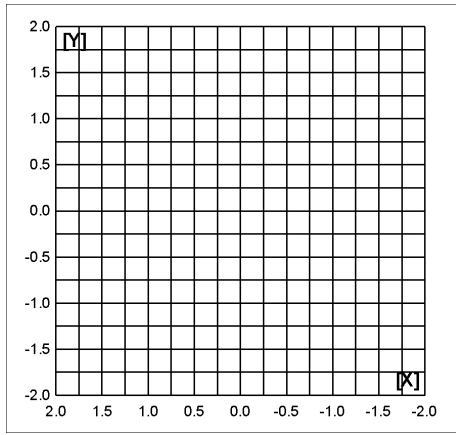
$$\frac{d\bar{c}}{dt} = \bar{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad}(p) + \nu \nabla^2 \bar{c} + \frac{1}{3} \nu \text{grad}(\text{div} \bar{c}) \quad (1)$$

gdzie: c jest prędkością przepływu, F są to siły masowe, p jest ciśnieniem, ρ jest gęstością, a ν współczynnikiem lepkości kinematycznej.



Rys. 1. Przykładowa przestrzenna siatka stosowana w symulacji przepływu w przewodach prostoosiowych składająca się z 4096 prostopadłościaków

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: s.sorko@pb.edu.pl

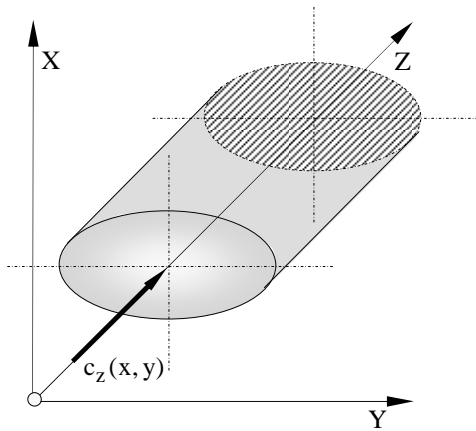


Rys. 2. Przykładowa płaska siatka przekroju przewodu prostoosiowego składająca się z 256 prostokątnych elementów

Przepływ laminarny w przewodzie prostoosiowym można sprowadzić do zagadnienia przepływu jednokierunkowego (rys. 3). Przy założeniu stacjonarności przepływu, a także uwzględnieniu składowej prędkości wzdłuż osi przewodu c_z ($c_x \ll c_z$, $c_y \ll c_z$) równanie (1) przyjmuje postać (Batchelor, 2000):

$$\left(\frac{\partial^2 c_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_z}{\partial y^2} \right) = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2)$$

gdzie: c_z oznacza prędkość przepływu, p jest ciśnieniem, a μ jest współczynnikiem lepkości dynamicznej.



Rys. 3. Jednokierunkowy przepływ przez przewód prostoliniowy

W celu założenia warunku brzegowego jedynie na konturze przekroju przewodu pole prędkości przepływu jednokierunkowego c_z podzielono na składową prędkości przepływu niezakłóconego c_∞ oraz składową prędkości przepływu wzbudzonego ściankami prostoliniowego kanału c_w (Teleszewski i Sorko, 2011):

$$c_z = c_\infty + c_w \quad (3)$$

gdzie:

$$c_\infty = -\frac{1}{4} \wp (x^2 + y^2) \quad ; \quad \wp = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dz} \quad (4)$$

Wartość prędkości na brzegu (L) materialnym i nieprzepuszczalnym równa jest zero, wobec czego warunek brzegowy na ścianie (L) przyjmuje postać:

$$c_w = -c_\infty \quad (5)$$

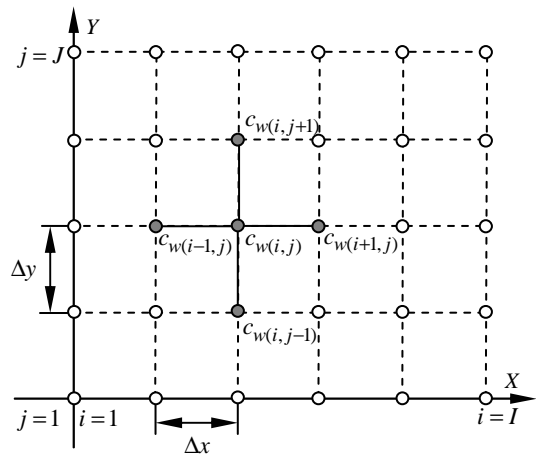
Warunek brzegowy (5) redukuje równanie Poissona (2) do równania Laplace'a:

$$\frac{\partial^2 c_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_w}{\partial y^2} = 0 \quad (6)$$

W dalszej kolejności równanie (6) zostanie rozwiązane metodą różnic skończonych (MRS) z optymalizacją obliczeń metody Liebman'a.

2. Rozwiązanie przepływu laminarnego w przewodach prostoosiowych o dowolnym kształcie przekroju przewodu metodą różnic skończonych z optymalizacją metody Liebman'a

Podstawą rozwiązania równania (6) metodą różnic skończonych jest siatka węzłów z krokiem Δx i Δy (rys. 4).



Rys. 4. Szkic do analizy zagadnień brzegowych w obszarze płaskim

Po zastosowaniu różnic centralnych drugie pochodne funkcji $c(x,y)$ można opisać wzorami (Mitchell i Griffiths, 1980):

$$\frac{\partial^2 c_w}{\partial x^2} = \frac{c_w(i+1,j) - 2c_w(i,j) + c_w(i-1,j)}{\Delta x^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 c_w}{\partial y^2} = \frac{c_w(i,j+1) - 2c_w(i,j) + c_w(i,j-1)}{\Delta y^2} \quad (8)$$

Po uwzględnieniu (7) i (8) w równaniu (6) otrzymuje się zależność:

$$\frac{c_w(i+1,j) - 2c_w(i,j) + c_w(i-1,j)}{\Delta x^2} + \frac{c_w(i,j+1) - 2c_w(i,j) + c_w(i,j-1)}{\Delta y^2} = 0 \quad (9)$$

W celu przyspieszenia zbieżności procesu stosuje się nadrelaksację w procesie iteracji wprowadzając współczynnik λ według schematu Liebmana (Isaacson i Keller, 1994):

$$c_{w(i,j)}^{(n+1)} = \lambda \cdot c_{w(i,j)}^{(n+1)} + (1-\lambda) \cdot c_{w(i,j)}^{(n)} \quad ; \quad n = \overline{1, N} \quad (10)$$

gdzie n jest numerem iteracji.

Proces iteracji jest prowadzony do momentu, kiedy maksymalna różnica wartości funkcji w dwóch kolejnych iteracjach będzie mniejsza lub równa od przyjętej wartości błędu.

$$\max \left| \frac{c_{w(i,j)}^{(n+1)} - c_{w(i,j)}^{(n)}}{c_{w(i,j)}^{(n+1)}} \cdot 100 \right| \leq \varepsilon \quad ; \quad n = \overline{1, N} \quad (11)$$

Po wyznaczeniu składowej przepływu wzbudzonego, prędkość c_z wyznacza się z zależności (3)

3. Ocena dokładności MRS z optymalizacją obliczeń metody Liebmana

W celu oceny dokładności prezentowanej numerycznej metody dokonano porównania rezultatów rozwiązania zagadnienia laminarnego przepływu w przewodzie okrągłym metody różnic skończonych z optymalizacją obliczeń metody Liebmana z wynikami obliczeń teoretycznych.

Pole prędkości przepływu laminarnego glicerolu w przewodzie o przekroju kołowym jest opisane rozkładem parabolicznym (Batchelor, 2000):

$$c_T(x, y) = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} (r_0^2 - r^2) \quad ; \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (12)$$

gdzie: $r_0 = 10\text{mm}$ jest promieniem przewodu, a $\mu = 1,499 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ jest współczynnikiem lepkości dynamicznej glicerolu.

W przypadku metody różnic skończonych wykonano podział przekroju przewodu na siatkę składającą się z 100 i 10000 węzłów. Do obliczeń przyjęto, że $\varepsilon = 0,0001$.

Błąd rozwiązania MRS z optymalizacją metody Liebmana dla wybranych punktów zestawiono w tabeli 1.

Względne błędy obliczeń poszczególnych prędkości do przedstawionych niżej zestawień graficznych i tabelarycznych wyznaczono z zależności:

$$\delta c_{MRS} = \left| \frac{c_T - c_{MRS}}{c_T} \right| * 100\% \quad (13)$$

gdzie: c_{MRS} jest to prędkość wyznaczona numerycznie MRS z optymalizacją metody Liebmana, natomiast c_T jest to prędkość teoretyczna wyznaczona z równania (12).

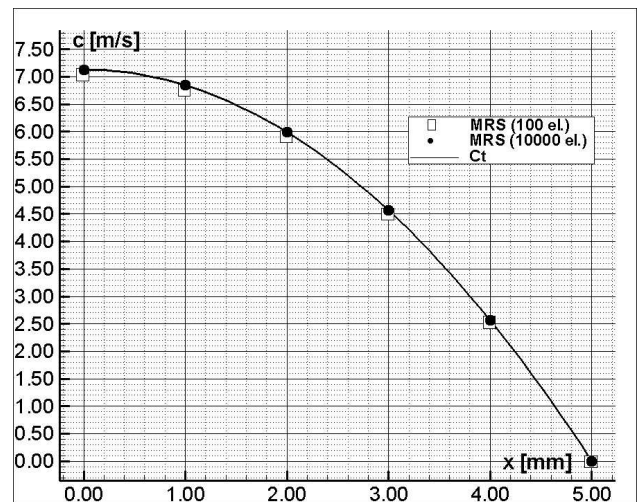
Na rysunku 5 przedstawiono graficzne porównanie rezultatów numerycznych z rozwiązaniem teoretycznym (12).

Tab. 1. Laminarny przepływ glicerolu w przewodzie kołowym ($Re = 30$) – błąd rozwiązania MRS z optymalizacją metody Liebmana

Współrzędne węzłów		Rozwiązanie teoretyczne	Rozwiązanie num. MRS 100 el.	Błąd metody MRS 100 el.
x	y	c_T	c_{MRS}	δc_{MRS}
[mm]	[mm]	[m/s]	[m/s]	[%]
0,0E+00	0,0E+00	7,1320E+00	7,0459E+00	1,2067E+00
1,0E+00	0,0E+00	6,8467E+00	6,7639E+00	1,2093E+00
2,0E+00	0,0E+00	5,9909E+00	5,9183E+00	1,2109E+00
3,0E+00	0,0E+00	4,5645E+00	4,5097E+00	1,1993E+00
4,0E+00	0,0E+00	2,5675E+00	2,5375E+00	1,1691E+00
5,0E+00	0,0E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	-

Współrzędne węzłów		Rozwiązanie teoretyczne	Rozwiązanie num. MRS 1000 el.	Błąd metody MRS 1000 el.
x	y	c_T	c_{MRS}	δc_{MRS}
[mm]	[mm]	[m/s]	[m/s]	[%]
0,0E+00	0,0E+00	7,1320E+00	7,1285E+00	4,8958E-02
1,0E+00	0,0E+00	6,8467E+00	6,8436E+00	4,5462E-02
2,0E+00	0,0E+00	5,9909E+00	5,9890E+00	3,0848E-02
3,0E+00	0,0E+00	4,5645E+00	4,5633E+00	2,5293E-02
4,0E+00	0,0E+00	2,5675E+00	2,5670E+00	1,8437E-02
5,0E+00	0,0E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	-

Maksymalny błąd metody MRS z optymalizacją metody Liebmana w przypadku siatki składającej się z 100 elementów nie przekracza 1,5 %, natomiast w przypadku siatki złożonej z 10000 elementów nie przekracza 0,05 %. Wraz ze wzrostem liczby węzłów zwiększa się dokładność metody.



Rys. 5. Porównanie rozwiązania numerycznego prędkości z rezultatami obliczeń numerycznych MRS z optymalizacją metody Liebmana

Niewielkie różnice pomiędzy rozwiązaniem analitycznym i MRS z optymalizacją metody Liebmana w odniesieniu do wyznaczanego pola prędkości wskazują, że proponowane algorytmy obliczeniowe przedstawionej metody charakteryzują się dużą dokładnością obliczeń.

Na dokładność obliczeń ma wpływ również parametr ε (11). Wzrost wartości ε powoduje zmniejszenie błędu metody oraz dłuższy czas obliczeń.

4. Przykłady obliczeniowe

Niżej przedstawiono rezultaty obliczeń pól prędkości przepływu glicerolu ($R_e = 30$, $\mu = 1,499$ Pa·s) w wybranych przekrojach przewodów. Przyjęto siatkę składającą się z 1000 węzłów, którą również wykorzystano do wyznaczenia współczynnika energii kinetycznej (Coriolisa) oraz współczynnika pędu (Boussinesqa).

Współczynnik Coriolisa wyznaczono ze wzoru (Chadwick i in., 2012, Nalluri i Marriott, 2009):

$$\alpha = \frac{\int c_z^3 d\Lambda}{\Lambda c_{sr}^3} \approx \frac{\sum_{i=1}^N c_{zi}^3 d\Lambda_i}{\Lambda c_{sr}^3} \quad (14)$$

gdzie: c_z oznacza prędkość w polu przepływu, c_{sr} jest prędkością średnią przepływu w kanale, a Λ jest polem powierzchni przewodu.

Współczynnik Boussinesqa wyznaczono z zależności (Chadwick i in., 2012):

$$\beta = \frac{\int c_z^2 d\Lambda}{\Lambda c_{sr}^2} \approx \frac{\sum_{i=1}^N c_{zi}^2 d\Lambda_i}{\Lambda c_{sr}^2} \quad (15)$$

Liczba Reynoldsa została obliczona z następującego wzoru (Batchelor, 2000):

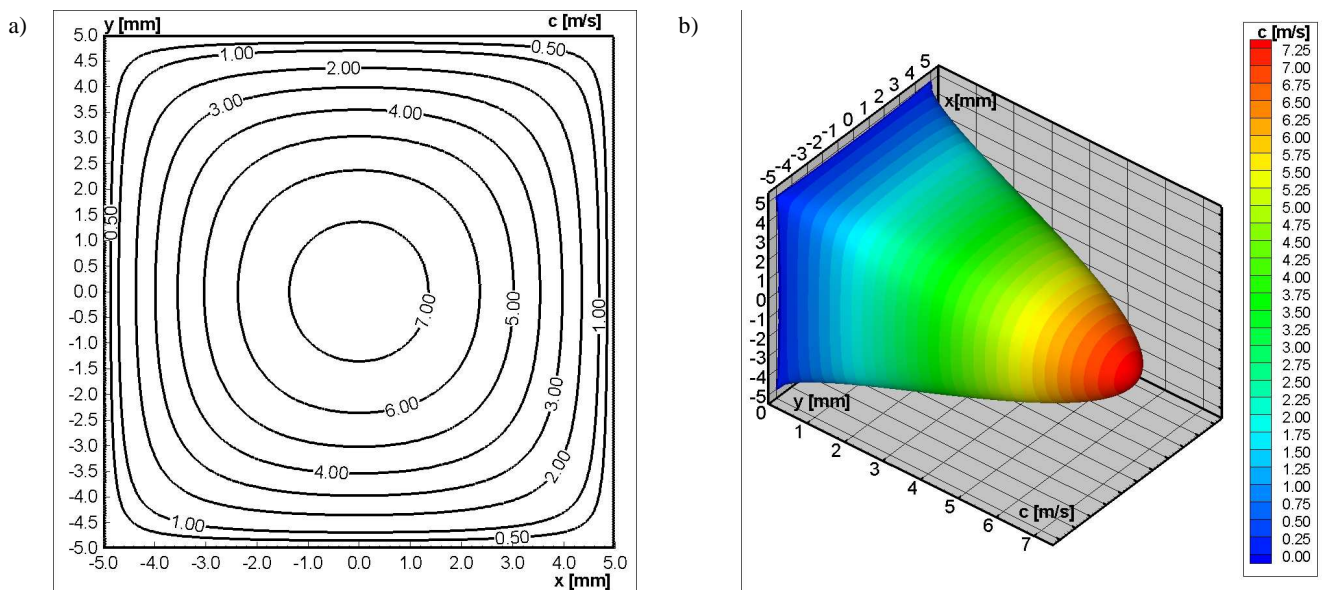
$$Re = \frac{c_{sr} D_h}{\nu} ; \quad D_h = \frac{4\Lambda}{L} \quad (16)$$

gdzie: D_h jest to średnica hydrauliczna, ν jest to współczynnik lepkości kinematycznej, a L jest obwodem przewodu (obwód zwilżony).

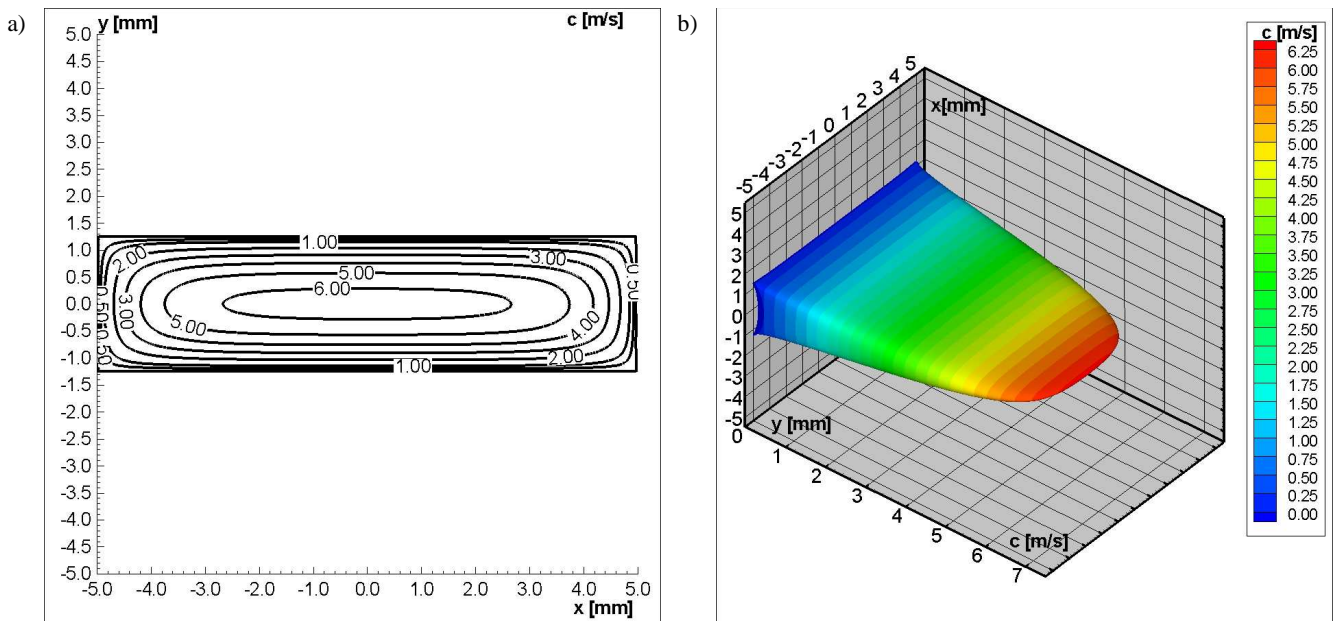
Na rysunku 6 wykreślono pole prędkości przepływu laminarnego ($R_e = 30$) w przewodzie o przekroju kwadratowym ($\alpha = 2,15$, $\beta = 1,38$).

Rysunek 7 przedstawia pole prędkości ($R_e = 30$) w przewodzie o przekroju prostokąta dla założonego stosunku boków wysokości do podstawy 1:4 ($\alpha = 1,83$, $\beta = 1,29$).

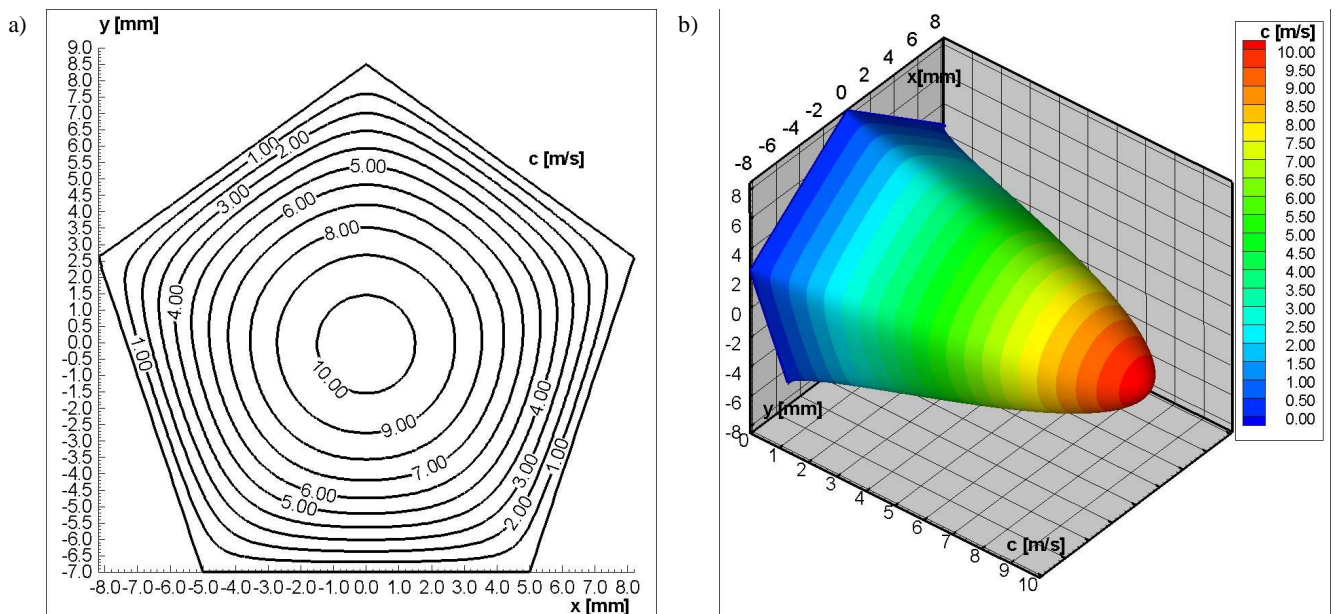
Na rysunku 8 przedstawiono pole prędkości ($R_e = 30$) w przewodzie o przekroju pięciokąta foremnego ($\alpha = 2,09$, $\beta = 1,36$).



Rys. 6. Pole prędkości ($R_e = 30$) w przewodzie o przekroju kwadratu: a) izotachy, b) trójwymiarowy kształt pola prędkości



Rys. 7. Pole prędkości ($Re = 30$) w przewodzie prostokątnym o stosunku wysokości do podstawy przekroju poprzecznego 1:4: a) izotachy, b) trójwymiarowy kształt pola prędkości



Rys. 8. Pole prędkości ($Re = 30$) w przewodzie o przekroju pięciokąta foremnego: a) izotachy, b) trójwymiarowy kształt pola prędkości

5. Podsumowanie

Przedstawiona metoda różnic skończonych pozwala w efektywny sposób wyznaczać pola prędkości przepływów laminarnych w przewodach prostoosiowych niezależnie od kształtu przekroju przewodu. Implementacja metody Liebmann'a w MRS znacznie skraca czas obliczeń, a także zmniejsza pobór zasobów pamięci komputera.

Algorytm nie wymaga budowy pracochłonnych trójwymiarowych siatek, przez co metoda ta może być wykorzystywana jako aplikacja stosowana zarówno w zagadnieniach inżynierskich jak i naukowych.

Zastosowana płaska siatki w przekroju obliczanego kanału może być podstawą do wyznaczania wielkości jednoczłonowych charakteryzujących przepływ takich jak

liczba Reynoldsa, współczynnik energii kinetycznej czy współczynnik pędu.

Weryfikacja metody wykazała dużą dokładność metody. Zaprojektowany algorytm umożliwia rozwiązywanie zagadnień przepływów laminarnych w przewodach prostoliniowych bardzo złożonej geometrii przekroju przewodu.

Algorytm również może być stosowany w przepływach w mikrokanalach (Sharp i Adrian, 2004; Wibel i Ehrhard, 2009), gdzie przepływy zgodne są z makroprzepływami.

Literatura

- Huang M. Y., Ho C. H. (1993). Study of the Fluid in the Elliptical Duct by the Method of Characteristics. *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 115, No. 1, 80-84.
- Kosma Z. (2007). Symulacja numeryczna ruchu cieczy lepkiej metodą sztucznej ścisłości. Monografie, *Wydawnictwo Politechniki Radomskiej*, Radom 97/2007, 1- 108.
- Batchelor G. K. (2000). An introduction to fluid dynamics. *Cambridge University Press*, Cambridge.
- Teleszewski T. J., Sorko S. A. (2011). Zastosowanie metody elementów brzegowych do wyznaczania jednokierunkowego przepływu w przewodach prostoosiowych o dowolnym kształcie przekroju poprzecznego. *Acta Mechanica et Automatica*, Vol. 5, No. 3, 124-132.
- Mitchell A. R., Griffiths D. F. (1980). The finite difference method in partial differential equations. *Wiley-Interscience*, Chichester, New York.
- Isaacson E., Keller H. B. (1994). Analysis of numerical methods. *John Wiley & Sons*, New York.
- Nalluri C., Featherstone R. E., Marriott M. (2009). Civil Engineering Hydraulics, 5th Edition. *John Wiley & Sons*, New York.
- Chadwick A., Morfett J., Borthwick M. (2012). Hydraulics in Civil and Environmental Engineering, 5th Edition. *Spon Press*, New York.
- Sharp K. V., Adrian R. J. (2004). Transition from laminar to turbulent flow in liquid filled microtubes. *Experiments in Fluids*, Vol. 36, No. 5, 741-747.
- Wibel W., Ehrhard P. (2009). Experiments on the laminar/turbulent transition of liquid flows in rectangular microchannels. *Heat Transfer Engineering*, Vol. 30, No. 1-2, 70-77.

IMPLEMENTATION OF THE FINITE DIFFERENCE METHOD WITH THE LIEBMANN METHOD FOR THE SOLUTION OF LAMINAR FLOW THROUGH STRAIGHT PIPES

Abstract: The work contains the implementation of the Finite Difference Method with the Liebmann Method for the solution of laminar flow through straight pipes using a two-dimensional grid. This method is the reduction of the three-dimensional grid to two-dimensional in the cross-section of duct. The algorithm were verified by numerical tests and compared with analytical solution. A numerical examples are presented.

Opracowanie zrealizowano w ramach pracy własnej W/WBiŚ/8/2011.