

Zastosowanie nietypowych konstrukcji wsporczych pod instalacje fotowoltaiczne oraz sposoby optymalizacji ich posadowienia na przykładzie Śląskiego Ogródu Botanicznego w Mikołowie

Mgr inż. Bartosz Piotrowicz, dr hab. inż. Małgorzata Jastrzębska
Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Budownictwa

Tradycyjne rozwiązania w zakresie fotowoltaiki mają pewne wady, które nie pozwalają na ich pełne wykorzystanie. Do takich niedogodności należy zaliczyć, m.in. rozmieszczanie ogniw PV na terenach silnie zurbanizowanych, gdzie po pierwsze – brak jest odpowiednio dużej powierzchni niezagospodarowanego obszaru, a po drugie – wysokie obiekty generują dużo cienia. Próba wyeliminowania niektórych wad może być zastosowanie odpowiednio ukształtowanych konstrukcji wsporczych pod ogniwa fotowoltaiczne. Praca ma na celu pokazanie zalet takich rozwiązań, ich odpowiedniego kształtowania oraz sposobu posadowienia. Prezentowany przykład zaproponowano na podstawie rzeczywistych potrzeb Śląskiego Ogródu Botanicznego (ŚOB) w Mikołowie [1, 11].

W celu określenia zapotrzebowania obiektu CEPiE na energię przeprowadzono audyt energetyczny [1, 11]. Wynikało z niego, że do prawidłowego funkcjonowania całego obiektu, jakim jest Ogród Botaniczny (budynek CEPiE oraz np. oświetlenie alejek, zraszacze itp.), potrzeba 130 tys. kWh/rok energii elektrycznej. Biorąc pod uwagę rzeczywiste zapotrzebowanie na energię oraz na podstawie danych pochodzących: ze stacji meteorologicznej Uniwersytetu Śląskiego, Wydziału Nauk o Ziemi [3], ze stacji meteorologicznej Śląskiego Ogródu Botanicznego [2] oraz ze strony internetowej *Photovoltaic Geographical Information System* dla Mikołowa [10], zaproponowano wykonanie instalacji hybrydowej składającej się z elektrowni wiatrowej o mocy 70 kW oraz baterii ogniw fotowoltaicznych o mocy

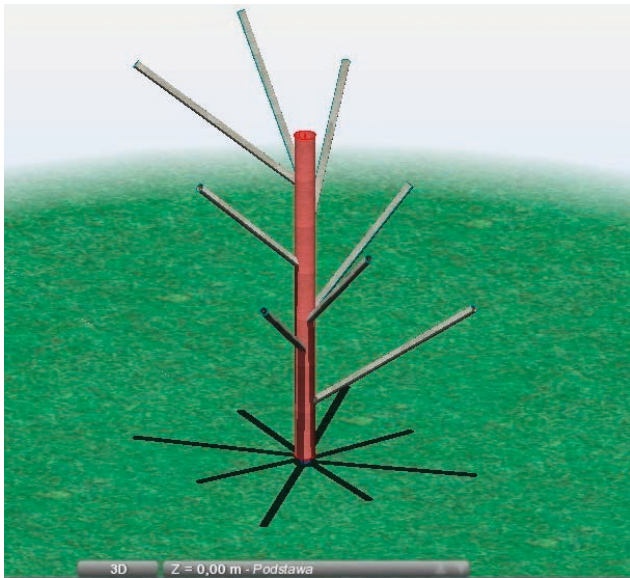
OPIS ZAGADNIENIA

Śląski Ogród Botaniczny

Śląski Ogród Botaniczny rozpościera się na terenie byłej bazy wojskowej w Mikołowie w województwie śląskim, a jego główna siedziba - Centrum Edukacji Przyrodniczej i Ekologicznej (CEPiE) - znajduje się na obszarze Sośniej Góry (rys. 1). Ma on charakter głównie edukacyjny, dlatego też jego władze zdecydowały o podjęciu działań zmierzających do zaadoptowania rozwiązań opartych na odnawialnych źródłach energii (OZE), przy okazji zaspokajając zapotrzebowanie obiektu CEPiE na energię elektryczną. Rozwiązanie takie, z racji swej dostępności, miałyby służyć poszerzeniu wiedzy społeczeństwa na temat OZE oraz promocji samej technologii.



Rys. 1. Centrum Edukacji Przyrodniczej i Ekologicznej (CEPiE) – siedziba Śląskiego Ogródu Botanicznego w Mikołowie (fotografia własna)



Rys. 2. Wizualizacja konstrukcji wsporczej pod ogniwa PV – model obliczeniowy w programie Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014 [6]

54 kW i *trackera*, czyli urządzenia umożliwiającego ustawienie ekranów prostopadle do padania promieni słonecznych.

W niniejszej pracy zaprezentowano przykładowe rozwiązanie układu: ogniwa fotowoltaiczne + *tracker*. Zestaw baterii PV o niezbędnej mocy 54 kW musiałby składać się z 216 ogniw, których ustawienie w technologii tradycyjnej zajęłoby obszar około 0,5 ha. Biorąc pod uwagę brak do dyspozycji tak dużej powierzchni oraz konieczność ograniczenia ingerencji budowlanej na terenie ŚOB, zaproponowano rozwiązanie alternatywne – odpowiednio ukształtowaną konstrukcję wsporczą (rys. 2).

Układ hybrydowy: ogniwa fotowoltaiczne i *tracker*

Ostatecznie konstrukcję ukształtowano w taki sposób, aby swoim wyglądem przypominała drzewo (rys. 3). Składa się ona



Rys. 3. Wizualizacja instalacji fotowoltaicznej na potrzeby ŚOB [6]

z głównego trzonu nośnego oraz ośmiu dodatkowych gałęzi wychodzących z niego. Łącznie w konstrukcji przewidziano montaż 9 baterii składających się z 24 ogniw fotowoltaicznych. Powstałe w ten sposób ekrany mają wymiar $6,93 \times 6,60$ m każdy. Dodatkowo przewidziano zastosowanie *trackera*. Łączna masa *trackera* oraz baterii ogniw wynosi 750 kg. Podczas rozmieszczania ekranów wzięto pod uwagę wiele czynników, z których najważniejszymi były brak wzajemnego zacięcia ekranów w dniu, w którym jest najniższy kąt padania promieni słonecznych wynoszący $14^{\circ}15'$ oraz zapewnienie swobody poruszania się ekranów względem siebie i promieni słońca.

ANALIZA SPOSOBU POSADOWIENIA UKŁADU WSPORCZEGO POD OGNIWA FOTOWOLTAICZNE

Na podstawie dokumentacji geotechnicznej [4] udostępnionej przez Gminę Mikołów stwierdzono, że na terenie Śląskiego Ogrodu Botanicznego panują proste warunki gruntowo-wodne. W poziomie posadowienia występują ropy zwarte o wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu i bez konsolidacji $c_u = 73,9$ kPa i efektywnym kącie tarcia wewnętrznego $\phi' = 13^{\circ}$. Podłoże gruntowe nie zmienia się do poziomu -4,5 m p.p.t. Na uwagę zasługuje tu jednak fakt, że są to grunty nasypowe, silnie przeobrażone z licznymi pustkami.

Posadowienie tego rodzaju obiektów hybrydowych wymaga odpowiedniego podejścia obliczeniowego. Podczas analizy uwzględniono szereg przypadków obciążenia konstrukcji. Ze względu na warunki ekspozycji konstrukcji oraz materiał, z jakiego zaprojektowano ją, głównymi obciążeniami są oddziaływania klimatyczne, w szczególności obciążenie wiatrem oraz temperatura.

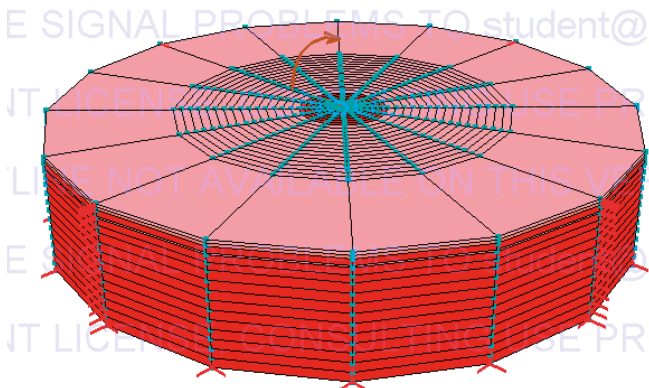
W przypadku obciążenia wiatrem, obliczonego na podstawie normy PN-EN 1991-1-4 [7], uwzględniono sześć przypadków położenia ekranów. W pierwszym założono, że ekrany znajdują się pod kątem 90° do poziomu – praca konstrukcji jako tablica. W następnych dwóch przypadkach uwzględniono pracę ekranów jako wiaty jednoszpadowe o nachyleniu połaci do poziomu odpowiednio 45° oraz 0° . Dodatkowo analizę przeprowadzono w dwóch wzajemnie do siebie prostopadłych kierunkach.

W przypadku obciążenia temperaturą największe znaczenie ma fakt nierównomiernego ogrzania ustroju nośnego, co powoduje wystąpienie deformacji zwiększających skutek oddziaływania pozostałych obciążeń. Po przeanalizowaniu wszystkich przypadków obciążeń oraz przeprowadzeniu kombinacji oddziaływań za pomocą programu *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014* otrzymano obwiednię sił wewnętrznych. Ekstremalne wartości sił, wynikające z przeprowadzonej analizy, zebrano i przedstawiono w tabl. 1.

Otrzymane wartości obciążeń przekazywane z trzonu nośnego na fundament konstrukcji wskazują na działanie sił na dużym mimośrodku. Jako punkt odniesienia w analizie posadowienia konstrukcji zaproponowano posadowienie bezpośrednie obiektu hybrydowego na kołowej stopie fundamentowej. Za warunek wyjściowy przy doborze wymiarów fundamentu uznano założenie, zgodne z normą Eurokod 7 [8], że mimośród działania obciążenia nie powinien przekraczać 0,6 długości promienia. Warunek ten jest słuszny ze względu na zapewnienie konstrukcji stateczności na obrót względem bardziej obciążonej krawędzi

Tabl. 1. Ekstremalne wartości sił wewnętrznych

| Nazwa | Wartość |
|---|--|
| Sila F_x | 974,19 kN |
| Moment M_z | -30 201,54 kNm |
| Moment M_y | 7,37 kNm |
| Najbardziej niekorzystna kombinacja obciążeń | |
| Wiodące obciążenie zmienne | Temperatura |
| Obciążenie towarzyszące 1 | Wiatr – kierunek zgodny z osią Y, ekrany nachylone pod kątem 0° |
| Obciążenie towarzyszące 2 | Obciążenie eksploatacyjne (montażowe) |



Rys. 4. Model stopy fundamentowej w programie Z-Soil [6]

fundamentu. Ostatecznie stwierdzono, że warunki I Stanu Granicznego Nośności (I SGN) według (1) spełnia kołowa stopa o promieniu $R = 5,6$ m i wysokości $H = 1,6$ m, posadowiona na głębokości $D = 3,3$ m. Przy tych wymiarach poziom wykorzystania nośności podłoża to 98,73%.

$$F_{x,d} = 9\,899,4 \text{ kN} \leq R_d = 10\,026,5 \text{ kN}$$

gdzie:

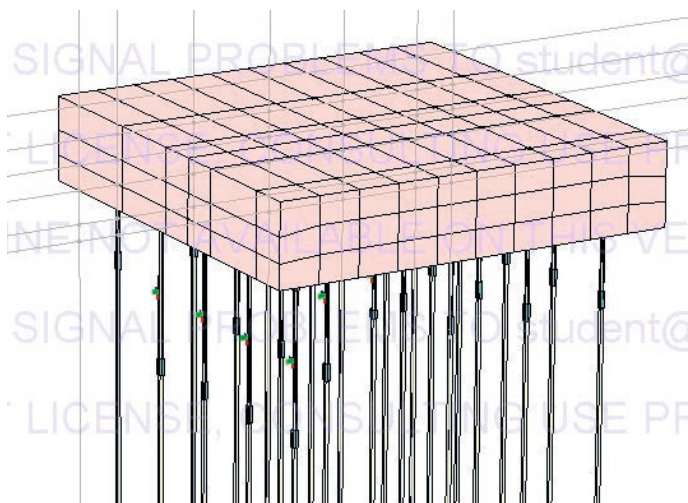
$F_{x,d}$ – obliczeniowa siła pionowa w poziomie posadowienia [kN],

R_d – obliczeniowa nośność fundamentu [kN].

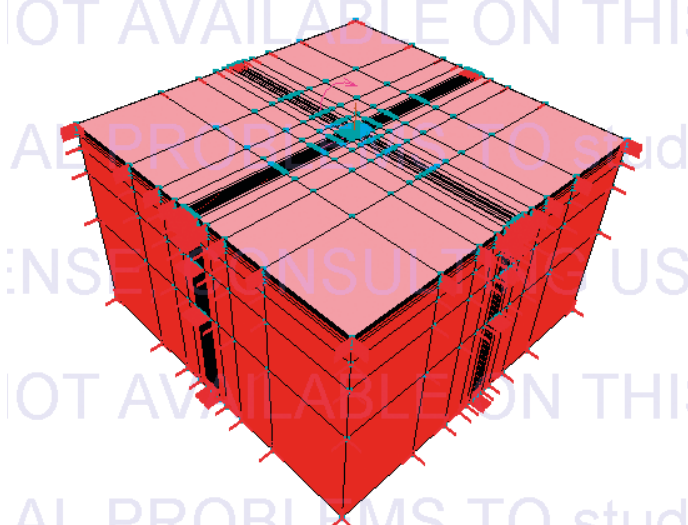
Sprawdzenie II Stanu Granicznego Użytkowalności przeprowadzono drogą numeryczną, w środowisku programu *Z_Soil 2012 v12.19*. Zbudowany model konstrukcji w układzie 3D składał się z 6593 węzłów (rys. 4) i odwzorowywał całą konstrukcję. Siatkę elementów skończonych dobrano w taki sposób, aby jej największe zagęszczenie występowało w rejonie przyłożenia obciążenia. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że wartość osiadań konstrukcji wynosi 9,6 mm, co według relacji (2) i zgodnie z normą [9] jest wartością mniejszą od wartości osiadań dopuszczalnych równej $s_{dop} = 50$ mm:

$$|s_{\max}| = 9,6 \text{ mm} \leq s_{dop} = 50,0 \text{ mm} \quad (2)$$

Posadowienie bezpośrednie konstrukcji wsporczej pod ogniwą PV wiązałoby się z dużą degradacją terenu, znaczną ilością robót ziemnych i betoniarskich oraz groźbą uszkodzenia systemów korzeniowych unikatowej roślinności znajdującej się na terenie ŚOB. Z tego względu zaproponowano posadowienie alternatywne na mikropalach, których technologia wykonania



Rys. 5. Model oczezu z mikropalami w programie Z-Soil [6]



Rys. 6. Model obliczeniowy oczezu oraz mikropali wraz z podłożem gruntowym – wydruk z programu Z-Soil [6]

nie wymaga stosowania dużych urządzeń palujących. Pale rozmieszczono w siatce kwadratowej o boku 1,0 m oraz spięto je oczezem o wymiarach $5,0 \times 5,0$ m, którego głębokość posadowienia wynosi 1,0 m (rys. 5). Na podstawie obliczeń wykonanych metodą Gwizdały i Motaka [3] i zgodnie z normą PN-EN 1997-1 [8] stwierdzono, że warunki I SGN według warunków (3) i (4) spełnia konstrukcja posadowiona na 24 mikropalach Titan 130/60 o buławie iniekcyjnej długości 16,0 m (rys. 6):

$$N_s = 2\,161,7 \text{ kN} \leq N_{t,d} = 2\,162,0 \text{ kN} \quad (3)$$

gdzie:

N_s – siła ściskająca przypadająca na jeden mikropal [kN],

$N_{t,d}$ – obliczeniowa nośność mikrofala ściskanego [kN],

$$N_r = 1\,884,8 \text{ kN} \leq N_{r,d} = 1\,885,0 \text{ kN} \quad (4)$$

gdzie:

N_r – siła rozciągająca przypadająca na jeden mikropal [kN],

$N_{r,d}$ – obliczeniowa nośność mikrofala rozciąganego [kN].

Jak poprzednio, sprawdzenie II Stanu Granicznego Użytkowalności przeprowadzono z wykorzystaniem programu *Z_Soil*

2012 v12.19. Kotwy zamodelowano za pomocą komendy „anchor”, uwzględniając ich możliwą pracę na wciskanie i wyciąganie. Podobnie, jak w wariancie posadowienia bezpośredniego, również i w tym przypadku warunek nieprzekroczenia wartości osiadań dopuszczalnych według (2) został spełniony:

$$|s_{\max}| = 17,0 \text{ mm} \leq s_{\text{dop}} = 50 \text{ mm}$$

PODSUMOWANIE

Istotą zaproponowanego rozwiązania hybrydowego układu: konstrukcja wsporcza pod ogniwa PV i urządzenia zwanego *trackerem* jest możliwość jego adaptacji do innych warunków terenowych poprzez nadanie dowolnego kształtu konstrukcji w taki sposób, aby spełnione były specyficzne wymagania każdego inwestora oraz, aby zoptymalizować proces produkcji energii. Przedstawiony w pracy układ „konstrukcja wsporcza – ogniwa fotowoltaiczne – fundament” można uznać za układ uniwersalny (wyjściowy), a jego kształt, moc oraz wygląd jest uzależniony tylko od stawianych mu wymagań. Posadowienie konstrukcji wsporczych tego rodzaju wiąże się z występowaniem obciążeń działających na dużym mimośrodku. Wymusza to stosowanie tzw. fundamentów masywnych w przypadku posadowienia bezpośredniego. W celu ograniczenia wielkości robót ziemnych lub posadowienia w trudnych warunkach grunto-wodnych można zastosować posadowienie pośrednie, którego przykładem wykorzystanym w niniejszej koncepcji jest wykonanie mikropali. Należy pamiętać, że technologia wykonania fundamentu zależy w dużej mierze od zastanych warunków terenowych oraz uwarunkowań lokalizacyjnych.

LITERATURA

1. Bilans aktualnego zużycia mediów (prąd, woda i paliwo płynne) dla budynku Centrum Edukacji Przyrodniczej i Ekolog. Śląskiego Ogrodu Botanicznego, październik 2013.
2. Dane klimatyczne ze stacji meteorologicznej Śląskiego Ogrodu Botanicznego w Mikołowie, 2013.
3. Dane klimatyczne ze stacji meteorologicznej Uniwersytetu Śląskiego, Wydział Nauk o Ziemi, mgr Tomasz Budzik.
4. Dokumentacja Geotechniczna MIKOŁÓW, ul Sosnowa – Centrum Edukacji Przyrodniczej i Ekologicznej Śląskiego Ogrodu Botanicznego – obiekt wolnostojący. 2010 i 2013.
5. Gwizdała K., Motak E.: Analityczna i doświadczalna ocena nośności pali fundamentowych nowych technologii. XI Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania. Geotechnika w Budownictwie i Transporcie. Gdańsk 1997.
6. Piotrowicz B., Ćwirko M.: Analiza systemu OZE i sposobu jego posadowienia na terenie Sośniej Góry w Mikołowie. Magisterska praca dyplomowa pod kierunkiem M. Jastrzębskiej, Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014.
7. PN-EN 1991-1-4 Oddziaływania na konstrukcję. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru.
8. PN-EN 1997-1 Projektowanie geotechniczne. Zasady ogólne.
9. PN-81/B-03020 Posadowienie bezpośrednie budowli.
10. Strona internetowa: PVGIS (c) European Communities, 2001-2012.
11. Świadectwo charakterystyki energetycznej dla budynku nr 5/2010 (dotyczy budynku Centrum Edukacji Przyrodniczej i Ekologicznej Śląskiego Ogrodu Botanicznego), listopad 2010.