

**Energetyka i ochrona środowiska –
współczesne rozwiązania
i perspektywy na przyszłość**

Energetyka i ochrona środowiska – współczesne rozwiązania i perspektywy na przyszłość

Redakcja:
Alicja Danielewska
Kinga Kalbarczyk

Lublin 2021

**Wydawnictwo Naukowe TYGIEL składa serdecznie podziękowania
dla zespołu Recenzentów za zaangażowanie w dokonane recenzje
oraz merytoryczne wskazówki dla Autorów.**

Recenzentami niniejszej monografii byli:

- prof. dr hab. inż. Eugeniusz Mokrzycki
- prof. dr hab. Małgorzata Krystyna Pawłowska
- dr hab. inż. Tomasz Cholewa, prof. PL
- dr hab. inż. Urszula Kaźmierczak
- dr hab. inż. Alina Kowalczyk-Juśko
- dr hab. inż. Tomasz Kujawa
- dr hab. Monika Naumowicz, prof. UwB
- dr hab. inż. Sylwia Polesek-Karczewska
- dr Weronika Goraj
- dr Sławomir Gułkowski
- dr Agnieszka Kuźniar
- dr inż. Łukasz Szałata
- dr inż. Mateusz Wnukowski

Wszystkie opublikowane rozdziały otrzymały pozytywne recenzje.

Skład i łamanie:
Monika Maciąg

Projekt okładki:
Marcin Szklarczyk

© Copyright by Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o.

ISBN 978-83-66489-83-7

Wydawca:
Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o.
ul. Głowackiego 35/341, 20-060 Lublin
www.wydawnictwo-tygiel.pl

Spis treści

Joanna Korzeniowska <i>Stan obecny OZE w Polsce i na świecie</i>	7
Antoni Stasch <i>31% zysku z inwestycji w skoncentrowaną fotowoltaikę</i>	19
Piotr Eliaż, Zbigniew Buliński, Maciej Bara <i>Opracowanie modelu numerycznego ogniwa fotowoltaicznego</i>	39
Maciej Bara, Zbigniew Buliński, Piotr Eliaż <i>Wykorzystanie techniki POD (Proper Orthogonal Decomposition) do modelowania turbin wiatrowych</i>	61
Bernard Twaróg <i>Przyjazna dla środowiska turbina Aldena – analizy</i>	73
Bernard Twaróg <i>Przyjazna dla środowiska turbina Archimedesesa – analizy</i>	88
Robert Zarzycki, Rafał Kobylecki, Zbigniew Bis <i>Poligeneracyjny układ dla karbonizacji biomasy i wytwarzania biowęgla</i>	101
Grażyna Pazikowska-Sapota, Grażyna Dembska, Paweł Warszycki, Katarzyna Galer-Tatarowicz <i>Skroplony bio-gaz jako jeden z czynników osiągnięcia neutralności klimatycznej</i>	114
Joanna Biedrońska <i>Wpływ historycznych ukształtowań szklarniowych na rozwój architektury energooszczędnej</i>	125
Dominika Gmur, Grzegorz Siebielec <i>Odzysk pierwiastków ziem rzadkich z gleb oraz odpadów w procesie fitoekstrakcji</i>	138
Tomasz Mach, Joanna Bihałowicz, Jan Stefan Bihałowicz <i>Dobowa i godzinowa zmienność stężeń Pb, Ni, Zn, Mn i V w powietrzu atmosferycznym: badania pilotażowe w wybranym receptorze centralnej Polski</i>	145
Joanna Woroszył-Wojno, Karolina Kawka, Michał Młotek <i>Rozkład toluenu w układzie plazmowo-katalitycznym z zastosowaniem katalizatorów niklowych</i>	164

Bartłomiej Woś, Marek Pająk, Marcin Chodak, Justyna Likus-Cieślik, Marcin Pietrzykowski <i>Projekt Tracer i dobre praktyki w rekultywacji terenów po górnictwie węgla jako elementu transformacji energetycznej</i>	177
Tomasz Śliwa, Martyna Ciepiewska, Piotr Buliński <i>Maksymalizacja mocy otworów geotermalnych z wykorzystaniem innowacyjnych receptur zaczynów uszczelniających</i>	188
Bogdan Ulejczyk, Michał Młotek, Krzysztof Krawczyk <i>Wytwarzanie wodoru z mieszaniny wody i etanolu w wyładowaniu z barierą dielektryczną</i>	201
Indeks autorów	219

Stan obecny OZE w Polsce i na świecie

1. Wprowadzenie

W dzisiejszych czasach, nie tylko w Polsce, ale na całym świecie, uwaga branży energetycznej skupia się na odnawialnych źródłach energii. Energetyka konwencjonalna zastępowana jest energetyką odnawialną. Na świecie, w szczególności w krajach głęboko rozwiniętych, rozwój energetyki odnawialnej nastąpił kilkadziesiąt lat temu. Natomiast w Polsce na większą skalę zaczęto wykorzystywać odnawialne źródła energii dopiero od końca lat 90. XX wieku. W Polsce najwcześniej, bo już w latach 60. XX wieku, zaczęły funkcjonować elektrownie wodne, następnie powstawały elektrownie wiatrowe i fotowoltaiczne. Zasoby geotermalne na cele energetyczne są wykorzystywane w niewielkim stopniu. Pozytywny jest fakt, że na świecie coraz więcej stosuje się nowych rozwiązań technologicznych w zakresie odnawialnych źródeł energii oraz w coraz to większym stopniu korzysta się z tych źródeł. W ten sposób oszczędza się paliwa konwencjonalne i chroni środowisko przed degradacją i zanieczyszczeniem [1].

Bardzo ważnym aspektem rozwoju energetyki odnawialnej jest także ograniczenie emisji dwutlenków węgla i siarki do powietrza. Wykorzystanie OZE (odnawialnych źródeł energii) do produkcji energii elektrycznej i ciepłej jest zgodne z ideą zrównoważonego rozwoju. Współdziałanie na płaszczyźnie społecznej, gospodarczej i politycznej jest bardzo ważne dla zachowania odpowiedniej jakości życia w poszanowaniu środowiska. O kierunku wykorzystania OZE decyduje przede wszystkim polityka energetyczna danego państwa. Stanowi ona długoterminową strategię rozwoju sektora energetyczno-paliwowego, wyznaczając cele i główne założenia w tym zakresie, z poszanowaniem surowców energetycznych i zachowaniem koncepcji zrównoważonego rozwoju.

Do OZE zalicza się energię słoneczną, wiatrową, wodną, biomasy i biogazu oraz geotermalną.

Celem pracy jest ukazanie stanu obecnego energetyki odnawialnej w Polsce i na świecie.

2. Energetyka słoneczna

Podstawowym źródłem energii występującym na Ziemi, który ma ogromny potencjał ze względu na swoją dostępność i niewyczerpalność, jest promieniowanie słoneczne. Energia słoneczna była wykorzystywana znacznie wcześniej niż energia wody i wiatru, ponieważ przekształcenie jej na energię ciepłą nie wymagało zastosowania urządzeń mechanicznych [2].

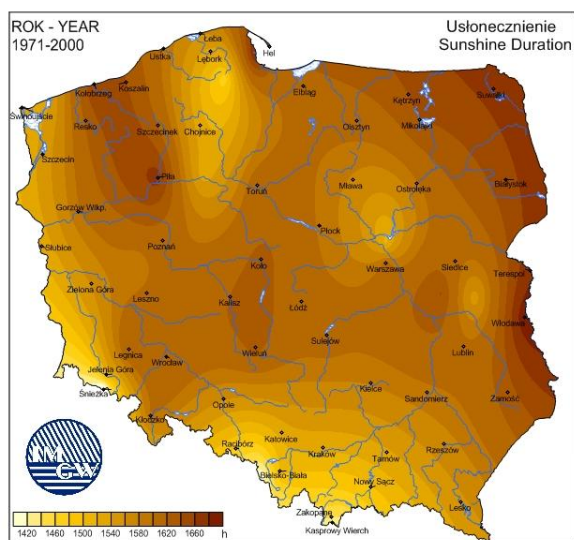
Do granicy atmosfery dociera zaledwie jedna półmiliardowa część energii słonecznej, która jest emitowana przez Słońce. Strumień tej energii ma moc około $1,39 \text{ kW/m}^2$. Z powodu odbicia, absorpcji oraz rozproszenia, w zależności od pory roku i dnia, dociera do Ziemi mniej niż pięćdziesiąt procent tej energii. W słoneczne dni gęstość promie-

¹ Joanna.korzeniowska@up.krakow.pl, Instytut Geografii, Wydział Nauk Ścisłych i Przyrodniczych, Uniwersytet Pedagogiczny im. KEN w Krakowie, www.up.krakow.pl.

niowania wynosi około 1 kW/m^2 . Natężenie promieniowania słonecznego jest zależne od wysokości Słońca nad horyzontem. Przy kącie padania promieni słonecznych 90° , 30° , 20° i 12° można uzyskać odpowiednio moc: 900, 750, 600 i 400 W/m^2 [2].

W Polsce można praktycznie produkować energię w oparciu o promieniowanie słoneczne podczas około 1600 godzin w ciągu roku [3, 4]. Jednostkowy strumień mocy energii słonecznej wynosi więc średnio od 930 do 1163 kW/m^2 . Przy uwzględnieniu natężenia promieniowania słonecznego najlepsze warunki do wykorzystania energii słonecznej w Polsce panują w regionie lubelskim, które wynoszą ponad 1048 kWh/m^2 na rok. Korzystne warunki panują również w środkowej i wschodniej części kraju oraz na wybrzeżu. Ich wartości mieszczą się między 1022, a 1048 kWh/m^2 na rok. Najniższe wartości promieniowania słonecznego (ok. 1000 kWh/m^2) odnotowuje się w północno-zachodniej części Polski [3].

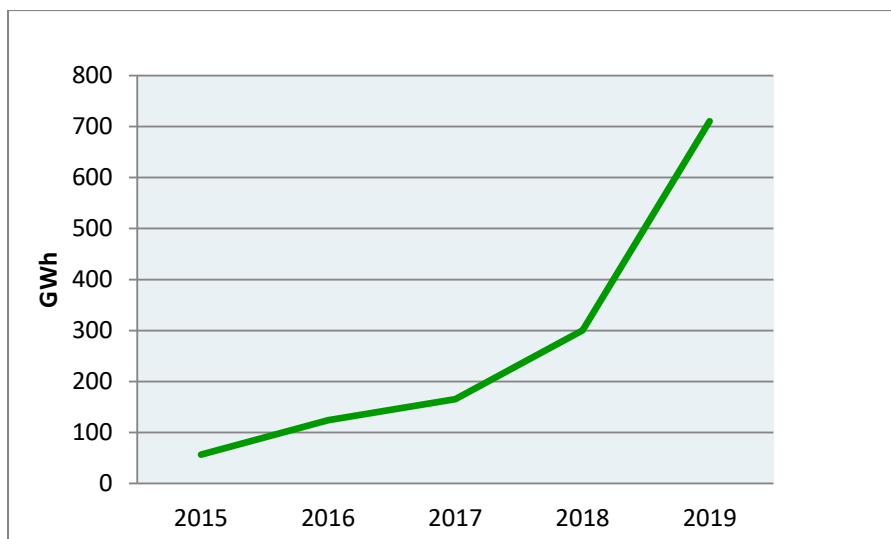
Rycina 1 pokazuje wartości całkowitego usłonecznienia w Polsce w latach 1971-2000.



Rysunek 1. Średnie usłonecznienie w Polsce w latach 1971-2000 [5]

Usłonecznienie wyraża sumaryczny czas, kiedy promienie słoneczne padają bezpośrednio na daną powierzchnię Ziemi. Średnie usłonecznienie dla Polski waha się w granicach 1600 godzin na rok. Charakteryzuje się ono jednak bardzo nierównym rozkładem w cyklu rocznym. Ze względu na warunki klimatyczne Polski ok. 80% całkowitej rocznej sumy usłonecznienia przypada na półroczny sezon wiosenno-letni (kwiecień-wrzesień), przy czym podczas lata czas usłonecznienia to ok. 16 godzin dziennie, a zimą skraca się do ok. 8 godzin dziennie [6].

Na przestrzeni ostatnich kilku lat odnotowuje się znaczący przyrost pozyskiwania energii słonecznej w Polsce. W 2015 roku wynosiła ona niecałe 60 GWh, a w 2019 wzrosła do ponad 710 GWh. Od 2018 roku (ok. 300 GWh) zanotowano największy przyrost o ponad 400 GWh w ciągu roku (rys. 2). Wynika to z popularyzowania paneli fotowoltaicznych wśród mieszkańców Polski oraz wprowadzania różnych form wspomagania finansowego inwestycji dotyczących ogniw fotowoltaicznych.

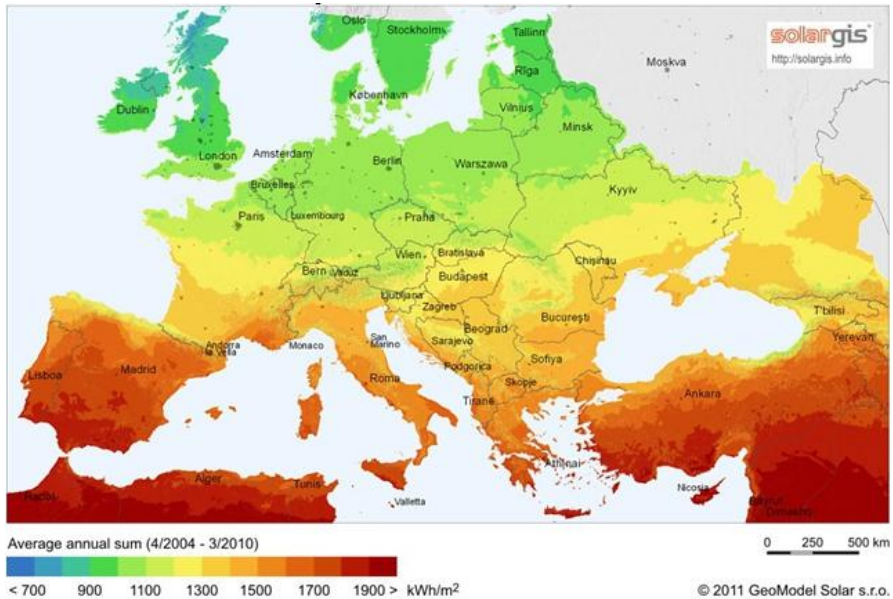


Rysunek 2. Pozyskiwanie energii słonecznej w Polsce w latach 2015-2019.
Opracowanie własne na podstawie danych GUS [7]

Położenie Polski w środkowej części Europy wiąże się z umiarkowanym klimatem i średnim poziomem nasłonecznienia. Z tego powodu wykorzystanie energii słonecznej może stanowić alternatywę energetyczną, ale nie jest możliwe całkowite zastąpienie nią energii ze spalania kopalín. W okresie zimowym do powierzchni Ziemi dociera znacznie mniej promieni słonecznych.

Na świecie średnie sumy nasłonecznienia w ciągu roku wynoszą między 800 kWh/m² a 2200 kWh/m²; skrajne wartości odnoszą się do Skandynawii i Sahary. Duży potencjał do wykorzystania energii słonecznej w Europie mają kraje regionu Morza Śródziemnego. Nasłonecznienie w tym regionie mieści się w przedziale od 1300 do 1900 kWh/m² (rys. 3). Wynika to z klimatu śródziemnomorskiego, który charakteryzują wysokie temperatury i suche powietrze. Takie warunki klimatyczne mogły zaistnieć w strefie międzyzwrotnikowej, gdzie występuje największa ilość promieniowania słonecznego i niewielkie różnice czasu trwania dnia i nocy (równik charakteryzuje się równą długością dnia i nocy w ciągu całego roku, a na zwrotnikach różnica wynosi do dwóch godzin).

Kraje europejskie znajdujące się w jej centralnej części, m.in. Niemcy, Czechy oraz Słowacja, cechują się średnim nasłonecznieniem w przedziale 900-1300 kWh/m² (rys. 3). Jest to spowodowane ich położeniem w strefie umiarkowanej, znajdującej się pomiędzy zwrotnikami raka i koziorożca, a kołami podbiegunowymi. Szczególną cechą tej strefy są wyraźnie odznaczające się pory roku, Słońce nigdy nie góruje w zenicie (oprócz zwrotników), oraz rośnie różnica między długością dnia i nocy wraz ze wzrostem szerokości geograficznej.



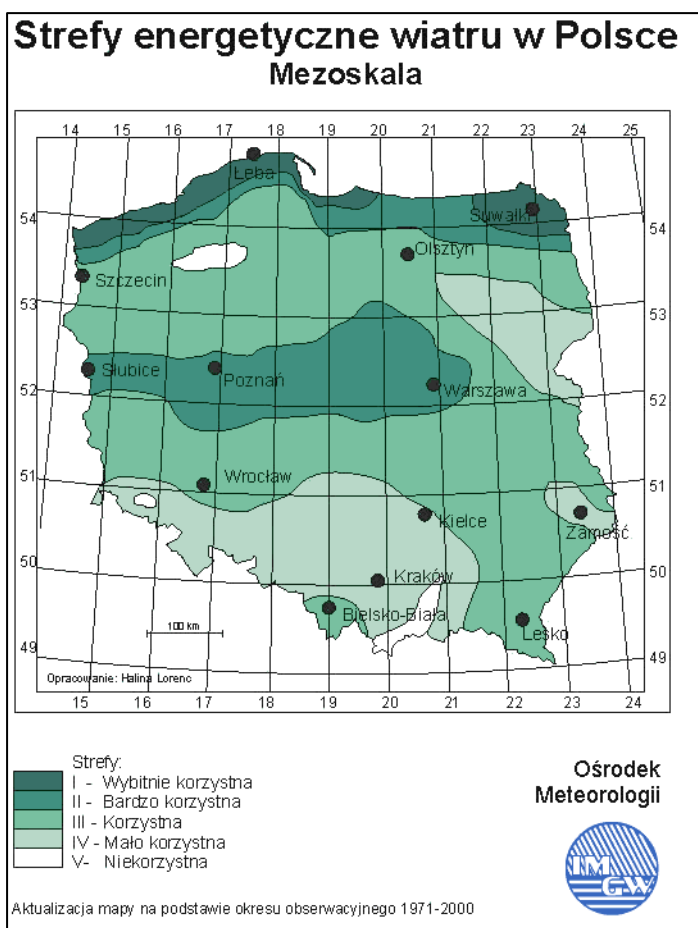
Rysunek 3. Średnie roczne nasłonecznienie na obszarze Europy w latach 2004-2010 [8]

W Europie najmniejszy potencjał charakteryzuje kraje najbardziej wysunięte na północ, m.in. Wielka Brytania, Szwecja, Finlandia i Irlandia. W tym rejonie średnie nasłonecznienie roczne wynosi od poniżej 700 kWh/m², do 900 kWh/m² (rys. 3). Północna część kontynentu także znajduje się w strefie umiarkowanej, lecz w jej najbardziej wysuniętej części blisko koła podbiegunowego północnego. Wiąże się to z występowaniem klimatu umiarkowanego chłodnego.

3. Energetyka wiatrowa

Wykorzystanie energii wiatrowej w Polsce i na świecie wciąż wzrasta. Energetyka wiatrowa rozwinęła się i rozwija nie tylko na lądzie, ale również i na morzu. Energetyka wiatrowa w Polsce zaczęła się rozwijać dopiero w latach dziewięćdziesiątych XX w. [4]. Na prawie 30% powierzchni kraju panują dogodne warunki do instalowania elektrowni wiatrowych. Oprócz tych obszarów, występują powierzchnie, dla których prędkości wiatru są zbyt małe, aby instalacja turbin była opłacalna. Dopiero w pierwszej dekadzie XXI wieku przeprowadzono modyfikacje powierzchni wirnika w odniesieniu do mocy generatora. Dzięki temu możliwa była instalacja turbin wiatrowych na obszarach o niewielkich prędkościach wiatru [9].

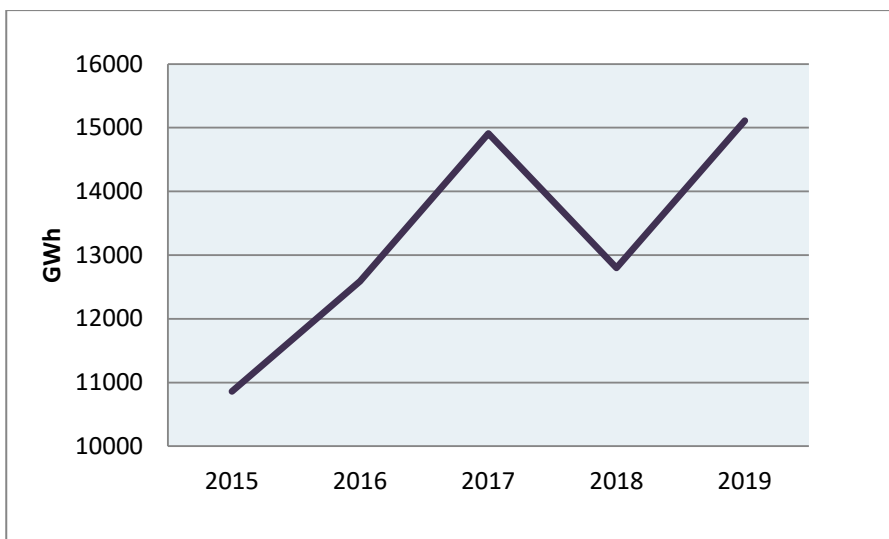
Według danych Urzędu Regulacji Energetyki pod koniec 2020 r. w kraju działało 1239 farm wiatrowych, w tym 1111 o mocy poniżej 10 MW (89,7%) i 128 o mocy większej lub równej 10 MW [10]. Strefy energetyczne wiatru w Polsce są zróżnicowane ze względu na różnorodność terytorium geograficznego i innych czynników, które wpływają na siłę i występowanie wiatrów [11]. Polska w znacznej części znajduje się w nizinach, co sprzyja łatwemu przesuwaniu się mas powietrza. Dominują wiatry o kierunkach północno-zachodnich, zachodnich, oraz południowo-zachodnich, co można zauważyć na poniższej mapie stref (rys. 4).



Rysunek 4. Strefy energetyczne wiatru w Polsce w latach 1971-2000 [12]

Najkorzystniejsza strefa rozciąga się od północno-wschodniej części kraju (okolice Suwałk), przez całe wybrzeże w północno-zachodniej części. Bardzo korzystna strefa znajduje się w centralnej części Polski, od okolic Warszawy, przez miasto Poznań, aż do zachodniej granicy państwa (zachodni kierunek wiatru). Mało korzystne i niekorzystne strefy znajdują się przede wszystkim w południowej części kraju, gdzie dominują wyżyny i znajdują się łańcuchy górskie. Lokalizując elektrownię na terenie strefy II zwiększa się koszt wytwarzania energii o około 30% w porównaniu do jej lokalizacji na obszarze strefy I [4].

Gwałtowny rozwój energetyki wiatrowej w Polsce nastąpił po roku 2005. W roku 2015 ilość pozyskanej energii wyniosła 10858,4 GWh (rys. 5). Natomiast w roku 2017 wartość ta wzrosła do 14909 GWh. Łączna zainstalowana moc farm wiatrowych w 2020 roku (wg danych Polskich Sieci Elektroenergetycznych z dnia 1 listopada 2020 roku) wynosiła 6430,285 MW. Warto nadmienić, że ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych (Dz.U. 2016, poz. 961), zwana „ustawą antywiatrakową” ze względu na kryteria lokalizacji elektrowni wiatrowych, może w najbliższym czasie spowodować mniejszy rozwój energetyki wiatrowej na lądzie.



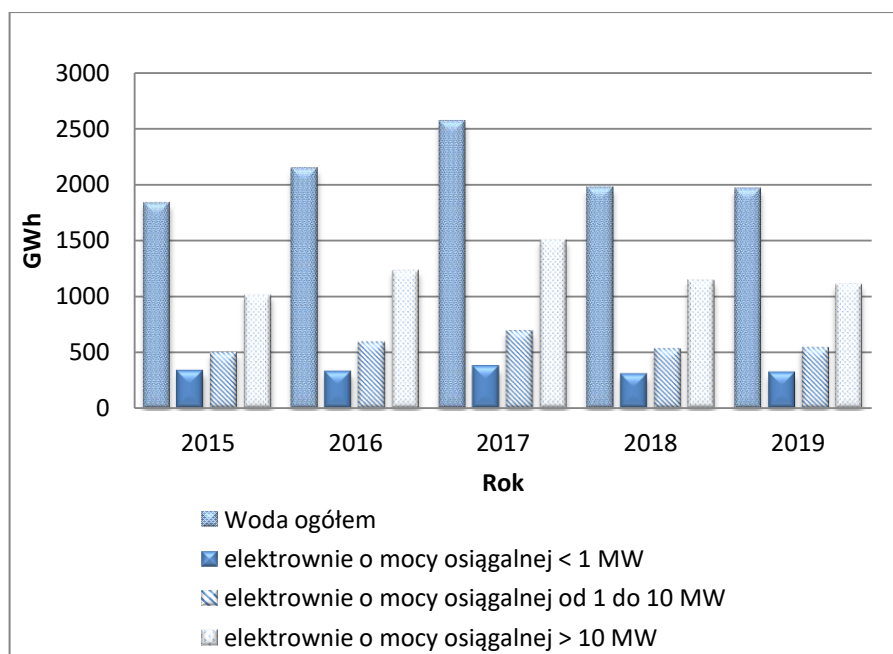
Rysunek 5. Pozyskanie energii wiatrowej w Polsce w latach 2015-2019.
Opracowanie własne na podstawie danych GUS [7]

W Europie dominującą metodą wykorzystania siły wiatru w sektorze energetycznym, są farmy zlokalizowane na morzach. Jest to spowodowane zdecydowanie większą prędkością wiatrów wiejących nad zbiornikami wodnymi, względem frontów kontynentalnych. Łączna moc farm wiatrowych na morzu w 2018 roku wyniosła 18,5 GW, z czego 2,6 GW to moc 15 nowych morskich farm wiatrowych [13]. Łączna liczba wiatrowych farm morskich w Europie wynosiła 409, z czego największy wkład przypadł Wielkiej Brytanii (39 farm o łącznej mocy 8 173 GW), Niemcom (25 farm o łącznej mocy 6 380 GW) i Danii (14 farm o łącznej mocy 1 329 GW).

4. Energia wodna i energia pływów

Energia elektryczna pozyskana w elektrowniach wodnych powstaje na skutek zmiany energii potencjalnej wody na energię mechaniczną w turbinie lub na kołach wodnych, po czym zamieniana jest na energię elektryczną poprzez generatory [14]. Energetykę wodną możemy podzielić na dwa podstawowe rodzaje: energia pozyskana z przepływu rzek oraz energia mechaniczna pochodząca z oceanów. W elektrowniach wodnych budowanych na rzekach przetwarza się energię kinetyczną oraz potencjalną wody w energię elektryczną. W przypadku elektrowni oceanicznych sprawa wygląda nieco bardziej skomplikowanie, wykorzystuje się masy wodne, które wywoływane są pływami, różnicami gęstości i falowaniem do napędu turbiny. Wyróżnia się duże elektrownie wodne, których moc zainstalowanych urządzeń przekracza 5 MW oraz małe elektrownie wodne (MEW) o mocy urządzeń do 5 MW [15].

Najwięcej energii wytwarzają elektrownie wodne o mocy wyższej niż 10 MW, zaś najmniej elektrownie o mocy nieprzekraczającej 1 MW. W roku 2017 odnotowano najwyższe wytworzenie energii, wynoszące 2559,6 GWh. Najniższą wartość z wynikiem 1832,2 GWh odnotowano w 2015 roku. W okresie 2015-2019 nie zaobserwowano jednoznacznej tendencji wzrostowej. Do 2017 roku wytwarzanie energii wzrastało, natomiast po tym okresie nastąpił spadek (rys. 6).



Rysunek 6. Produkcja energii wodnej w Polsce w latach 2015-2019.
Opracowanie własne na podstawie danych GUS [7]

5. Energia z biomasy i biogazu

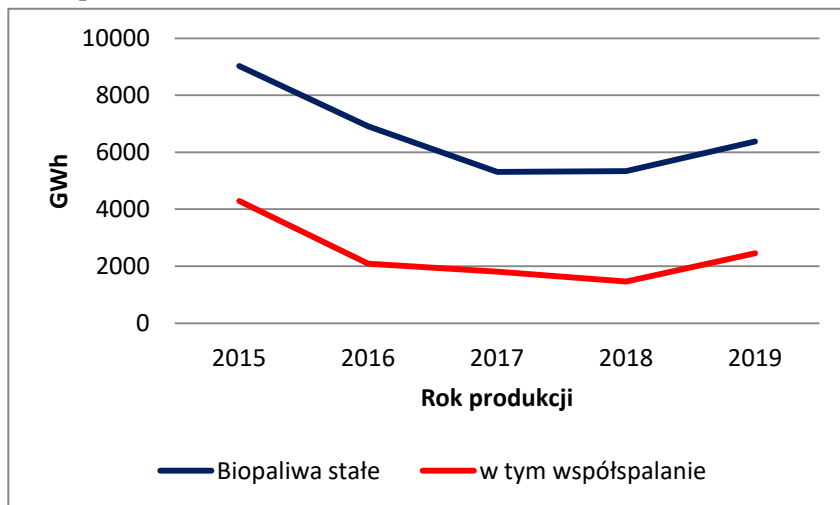
Biomasa stanowi źródło energii odnawialnej. Zgodnie z ustawą z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz. U. 2015, poz. 478) za biomasę uznajemy ulegającą biodegradacji część produktów, odpadów lub pozostałości pochodzenia biologicznego z rolnictwa, w tym substancje roślinne i zwierzęce, leśnictwa i związanych działów przemysłu, w tym rybołówstwa i akwakultury, przetworzoną biomasę, w szczególności w postaci brykietu, peletu, torfikatu i biowęgla, a także ulegającą biodegradacji część odpadów przemysłowych lub komunalnych pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, w tym odpadów z instalacji do przetwarzania odpadów oraz odpadów z uzdatniania wody i oczyszczania ścieków, w szczególności osadów ściekowych, zgodnie z przepisami o odpadach w zakresie kwalifikowania części energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów.

W okresie od 2015 do 2019 roku widać wyraźne zróżnicowanie w wytwarzaniu energii pierwotnej z biomasy w Polsce. W latach 2015-2017 nastąpił spadek w pozyskiwaniu energii (biopaliwa stałe) z 9026,6 GWh (prawie połowę – 4286,1 GWh uzyskano ze współspalania) do 5308,6 GWh, zaś w latach 2018-2019 był niewielki wzrost, do 6377,9 GWh w 2019 roku (rys. 7).

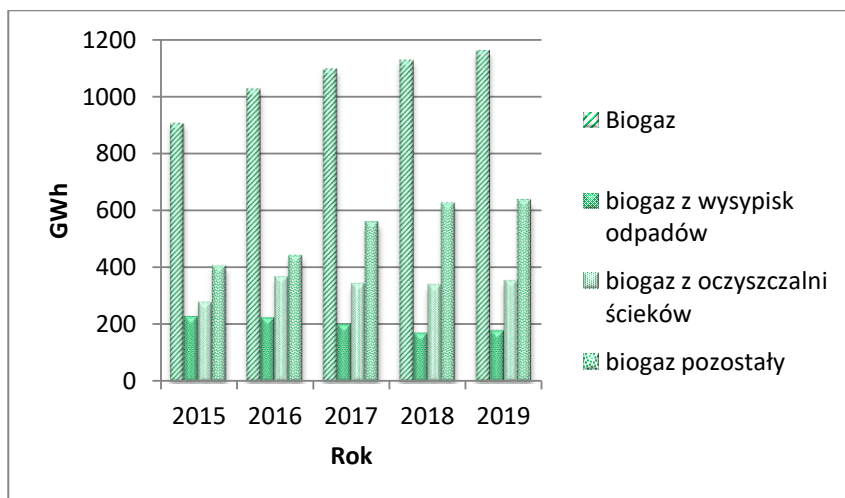
Biomasa jako odnawialne źródło energii ma pewne wady. Jedną z nich jest emisja szkodliwych substancji w wyniku spalania biomasy zanieczyszczonej różnymi chemikaliami. Kolejna to ryzyko zmniejszenia się bioróżnorodności przy dużych plantacjach upraw energetycznych. Pomimo tych wad biomasa posiada wiele zalet: zapewnia stałe dostawy energii, co jest trudne do uzyskania w przypadku energii wiatru czy słońca.

Spalanie biomasy może wpływać na emisję szkodliwych substancji do powietrza, jednak nie zanieczyszcza powietrza tak bardzo jak spalanie węgla [15, 16].

Jedną z metod konwersji biomasy na energię jest jej fermentacja metanowa, prowadząca do powstania biogazu, zawierającego palny metan. Od 2015 do 2019 roku odnotowuje się systematyczny wzrost produkcji energii ze spalania biogazu (odpowiednio 906,4 i 1162 GWh) , głównie dzięki rozwojowi biogazowni rolniczych, określanych przez GUS jako „biogaz pozostały” (rys. 8). W tym samym czasie pozyskiwanie biogazu ze składowisk odpadów i oczyszczalni ścieków pozostało na podobnym poziomie lub nieznacznie spadło.

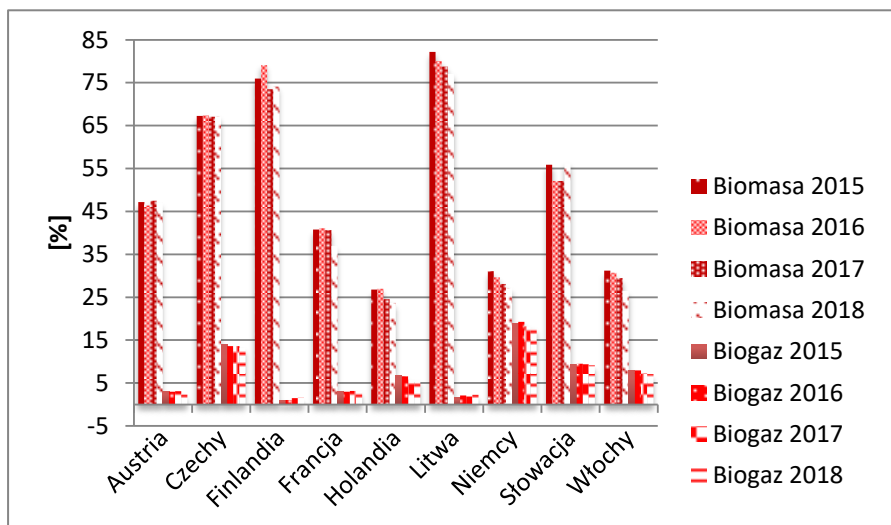


Rysunek 7. Pozyskiwanie energii z biomasy w Polsce w latach 2015-2019.
Opracowanie własne na podstawie danych GUS [7]



Rysunek 8. Pozyskiwanie energii ze spalania biogazów w Polsce w latach 2015-2019.
Opracowanie własne na podstawie danych GUS [7]

Udział procentowy biomasy w strukturze OZE, w latach 2015-2018, najwyższy był na Litwie, w Finlandii i Czech; zaś najniższy w Holandii, Niemczech i Włoszech. Jeśli chodzi o udział procentowy biogazu w OZE to przodują Niemcy oraz Czechy, natomiast w Finlandii, na Litwie, w Austrii i Francji technologia ta ma marginalne znaczenie (rys. 9). W 2015 roku udział procentowy biogazu w Niemczech stanowił 18,9% całości energii wytwarzanej z OZE. Wartość ta wzrosła w 2016 roku do 19,3%, zaś w 2018 roku jej udział zmniejszył się do 17,7%.



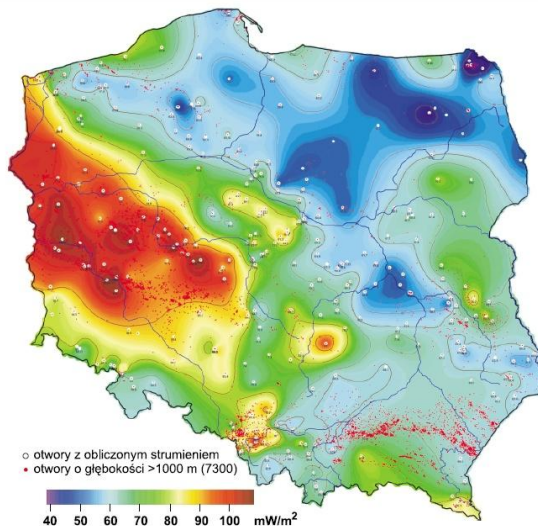
Rysunek 9. Udział procentowy energii z biomasy i biogazu w całej pozyskiwanej energii odnawialnej w wybranych krajach Europy w latach 2015-2018. Opracowanie własne na podstawie danych GUS [7]

6. Energia geotermalna

Energia geotermalna wykorzystuje energię cieplną wnętrza Ziemi. Energię geotermalną wykorzystuje się przede wszystkim jako podstawowe źródło energii grzewczej w układzie centralnego ogrzewania, można wykorzystać ją również do produkcji energii elektrycznej. Ze względu na duże zróżnicowanie grubości i typu płyt tektonicznych (kontynentalna i oceaniczna), które tworzą skorupę ziemską, jej opłacalność jest bardzo zróżnicowana. Do jej produkcji wykorzystuje się gejzery, gorące źródła, ale przede wszystkim wody geotermalne, które w najbardziej optymalnych warunkach występują na głębokości od 250 do 600 metrów i potrafią osiągać temperaturę do około 300°C. Opisane warunki geotermalne zdarzają się bardzo rzadko, dlatego odwierty często sięgają nawet kilku tysięcy metrów. Wraz z głębokością spada opłacalność wydobycia ciepła. Przyjmuje się, iż przy temperaturze wód w złożu przekraczającej 120°C opłaca się wykorzystywać geotermię do produkcji energii elektrycznej. Przy temperaturach niższych wykorzystuje się ją do celów ciepłowniczych (produkcja *ciepła* i dostarczanie do *miejskiej sieci ciepłowniczej*), przemysłowych, klimatyzacyjnych czy rekreacyjnych. Wykonywanie odwiertów i wykorzystanie energii jest możliwe do 5 km pod względem technicznym, jednak opłacalne jest do głębokości 2 km. Istnieją rejony, gdzie odwierty nie są potrzebne, ponieważ płyn geotermalny wydostaje się samoistnie na powierzchnię Ziemi w postaci gejzerów [15].

Na 1/3 obszaru kraju wody geotermalne występują o temperaturze 20-100°C na głębokości do 3 km. Na najbogatsze złoża można natknąć się na Podbeskidziu, w szczególności w okolicach Makowa Podhalańskiego oraz Suchej Beskidzkiej. Woda osiąga tam temperaturę ok. 80°C i znajduje się na głębokości około 2 km. W okolicach Skiernewic, Rawy Mazowieckiej, Łowicza i Sochaczewa temperatura wód geotermalnych wynosi ok. 70°C. Również obszar znajdujący się na zachód od Warszawy jest bardzo interesujący pod względem geotermicznym [15].

Największy potencjał do pozyskiwania energii geotermalnej mają obszary o podwyższonych wartościach strumienia ciepłego (zachodnia i centralna część Polski). Najlepsze możliwości dla rozwoju geotermii występują na terenach o wysokich wartościach strumienia ciepłego, na których występują formacje wodonośne o dobrych warunkach hydrogeologicznych (rys. 10). W zachodniej i centralnej części Polski temperatura na głębokości 5 km osiąga wartości 160-200°C. Dużym potencjałem odznacza się także południowo-wschodnia część kraju, gdzie temperatury sięgają 160-180°C i północno-zachodnia część w okolicy Słupska, gdzie na głębokości 5000 metrów temperatura wód geotermalnych ma ponad 180°C. Najmniejszy potencjał geotermalny jest w północno-wschodniej części kraju, gdzie temperatury są poniżej 100°C.

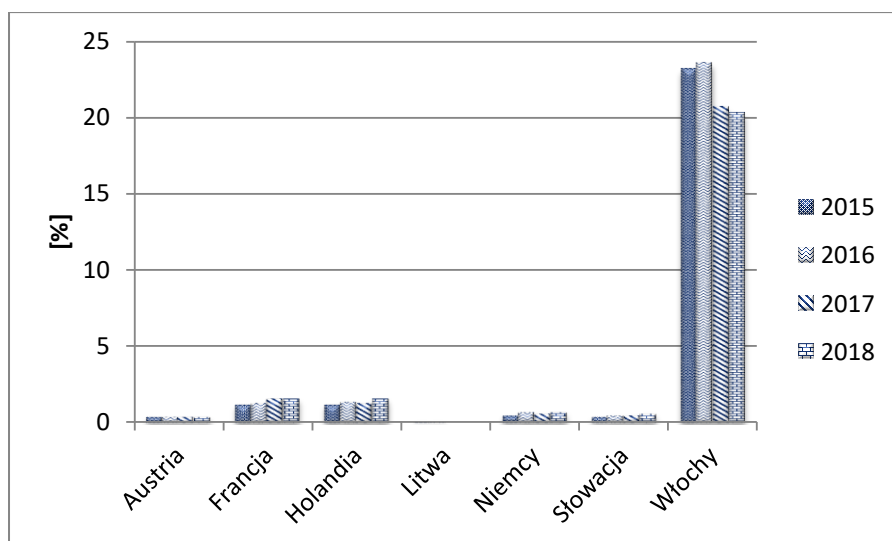


Rysunek 10. Mapa gęstości ziemskiego strumienia ciepłego dla Polski [17]

W Europie całkowita moc zainstalowanych elektrowni geotermalnych w 2019 roku wyniosła 5,5 GWt [18].

Elektrownie geotermalne oparte o technologię par geotermalnych zlokalizowane są w Islandii, we Włoszech i w Portugalii [19].

Analizując udział procentowy energii geotermalnej w strukturze OZE w wybranych państwach europejskich, stwierdzono, że największe wykorzystywanie energii geotermalnej ma miejsce we Włoszech, gdzie w latach 2015-2018 oscylował w granicach 23.6-20,3% (rys. 11). Najmniejszy udział opisywanej energii odnotowano w Litwie (0,1%).



Rysunek 11. Udział procentowy energii geotermalnej w odnawialnej energii wybranych państw Europy w latach 2015-2018. Opracowanie własne na podstawie danych GUS [7]

7. Podsumowanie

Odnawialne źródła energii stanowią wciąż aktualne zagadnienie. Mieszkańcy Ziemi mają coraz większą świadomość negatywnego wpływu na środowisko energetyki tradycyjnej i dążą do rozwoju energetyki odnawialnej poprzez indywidualne rozwiązania, np. w fotowoltaice. Na całym świecie, w ostatnich 20 latach, obserwowany jest ciągły rozwój energetyki odnawialnej, stosowane są coraz lepsze materiały i technologie.

W najbliższych latach OZE, według wszelkich prognoz, będą nadal rozwijać się zarówno w Polsce jak i na świecie. Korzystanie z energetyki odnawialnej ma wiele zalet (małe zanieczyszczenie środowiska, odnawialne zasoby oraz dostępność), jednak ma też wady (koszty instalacji, potrzeba dużych powierzchni). Należy także pamiętać, że rozwój OZE uwarunkowany jest czynnikami przyrodniczymi, politycznymi, prawnymi i społecznymi. Odpowiednia polityka i regulacje prawne państwa mogą wpłynąć na rozwój OZE lub skutecznie go zahamować.

Literatura

1. Stryczewska H.D. (red.), *Energie odnawialne. Przegląd technologii i zastosowań*, Politechnika Lubelska, Lublin 2012.
2. Lewandowski W.M., Klugmann-Radziemska E., *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
3. Cieśliński J., Mikielwicz J., *Niekonwencjonalne źródła energii*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1996.
4. Tytko R., *Urządzenia i systemy energetyki odnawialnej*, Eco Investment, Kraków 2016.
5. Lorenc H., *Atlas Klimatu Polski*, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 2005.
6. Orlewska W., Siwek A., *Możliwość wykorzystania odnawialnych źródeł energii w środowisku miejskim na przykładzie Krakowa*, Czasopismo Techniczne, z. 3-A., 2007, s. 188-195.

7. GUS, <https://stat.gov.pl/>, 24.05.2021 r.
8. GeoModel Solar s. r. o., <https://www.info-solar.ro/2013/03/europe-global-solar-horizontal.html?m=0>, 24.05.2021r.
9. Wiśniewski G., Michałowska-Knap K., Koć S., *Energetyka wiatrowa – stan aktualny i perspektywy rozwoju w Polsce*, Instytut Energetyki Odnawialnej, Warszawa 2012.
10. <https://www.rynekelektryczny.pl/moc-zainstalowana-farm-wiatrowych-w-polsce/>, 23.07.2021 r.
11. Nalepa K., Miąskowski W., Pietkiewicz P., Piechocki J., Bogacz P., *Poradnik małej energetyki wiatrowej*, Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, Olsztyn 2011.
12. Ośrodek Meteorologii IMGW, <https://www.imgw.pl/>, 24.05.2021r.
13. <https://www.windpowermonthly.com>, 24.05.2021r.
14. Niechciał J., *Energetyka wodna. Polska wobec świata*, Energia Gigawat, nr 9, 2014, s. 1-8.
15. Lewandowski W.M., *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, WNT, Warszawa 2007.
16. Ociepa-Kubicka A., *Wykorzystanie biomasy w przedsiębiorstwach energetycznych*, Proceedings of ECOpole, 9(1), 2015, s. 279-286.
17. www.pig.gov.pl, 24.05.2021r.
18. <https://energia-geotermalna.org.pl/geotermia-na-swiecie/>, 23.07.2021r.
19. Kępińska B., *Przegląd stanu wykorzystania energii geotermalnej na świecie i w Europie w latach 2015-2018 r.*, [w:] Bujakowski W. (red.), *Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia*, Zrównoważony Rozwój, IGSMiE PAN, Kraków 2018.

Stan obecny OZE w Polsce i na świecie

Streszczenie

W Polsce i na świecie następuje rozwój OZE. Jest on podyktowany odpowiednimi uwarunkowaniami przyrodniczymi, ekonomicznymi, politycznymi i społecznymi. Coraz więcej państw rozwija się gospodarczo jak również energetycznie. Odchodzi się od energetyki tradycyjnej na korzyść energetyki odnawialnej. Energetyka odnawialna, od ostatnich kilkunastu lat, ciągle rozwija się i dzięki coraz większej ekologicznej świadomości ludzi wzrasta zastosowanie indywidualnych zastosowań OZE. Jeśli chodzi o rozwój OZE w najbliższych latach, to prognozy są optymistyczne i mówią o coraz większym rozwoju każdego rodzaju energii odnawialnej. W pracy przedstawiono wykorzystanie OZE w różnych państwach.

Słowa kluczowe: energetyka odnawialna, energetyka wiatrowa, energetyka słoneczna, energetyka geotermalna, hydroenergetyka, biomasa

The current state of renewable energy in Poland and in the world

Abstract

RES development is taking place in Poland and in the world. It is dictated by appropriate natural, economic, political and social conditions. More and more countries are developing economically as well as energetically. Traditional energy is being abandoned in favor of renewable energy. Renewable energy has been constantly developing for the last dozen or so years, and thanks to the growing ecological awareness of people, the use of individual renewable energy applications is increasing. When it comes to the development of renewable energy sources in the coming years, the forecasts are optimistic and speak of an increasing development of all types of renewable energy. The paper presents the use of renewable energy sources in various countries.

Keywords: renewable energy, wind energy, solar energy, geothermal energy, hydroenergy, biomass

31% zysku z inwestycji w skoncentrowaną fotowoltaikę

1. Wstęp – 8 rozwiązań European Business Club e.V produkcji taniej czystej energii

W pracy przedstawiamy 8 rozwiązań technologicznych European Business Club e.V. gwarantujących ponad 3-krotne obniżenie kosztów produkcji i dystrybucji czystej energii elektrycznej i ciepłej. Rozwiązania te zostały przygotowane w ostatnich 15 latach, w ramach 17 projektów, a ich celem jest umożliwienie 11-krotnego wzrostu produkcji czystej energii do 2050 r.

Taki, 11-krotny wzrost jest konieczny dla realizacji programu zapobieżenia katastrofie klimatycznej przedstawionego przez Billa Gatesa w imieniu Breakthrough Energy Coalition („Koalicji Przełomu Energetycznego”) na XXV Konferencji COP w Paryżu, 30 listopada 2015 roku [1-3, 22, 23]. Od czasu tej konferencji 34 korporacje Breakthrough Energy Coalition, kierowanej przez Billa Gatesa zainwestowały ponad 210 miliardów US \$ w produkcję czystej energii, głównie w fotowoltaice i elektrowniach wiatrowych [2-6, 99]. Oznacza to, że inwestycje Breakthrough Energy Coalition stanowią ponad 21% światowych inwestycji fotowoltaicznych 981 miliardów US\$ w latach 2015 do 2020 [4, 5, 99].

Rozwiązania European Business Club e.V. gwarantują rocznie ponad 30% zysku z produkcji czystej energii elektrycznej i ciepłej 3 krotnie tańszej od najbrudniejszej energii z węgla.

W pracy pokazujemy, iż dzięki prostej koncentracji promieniowania słonecznego na panelach fotowoltaicznych i/lub kolektorach termosolarnych możliwe jest osiągnięcie ponad 30% zysku bez jakichkolwiek subwencji. Idea tych inwestycji jest zilustrowana na rysunku 1 i 2, a algorytmy obliczania zysku dla obu technologii są przedstawione na stronach 12, 13, 14. W przypadku uzyskania dofinansowania z Programów Unii Europejskiej, Szwajcarii, Norwegii i innych zysk inwestorów rośnie do 51%.

Należy podkreślić, iż tak znaczna redukcja kosztów LCOE [36-38, 9, 40-47] jest warunkiem koniecznym 11 krotnego wzrostu ilości produkowanej energii będącego z kolei *condicio sine qua non* wzrostu produkcji energii elektrycznej niezbędnej dla:

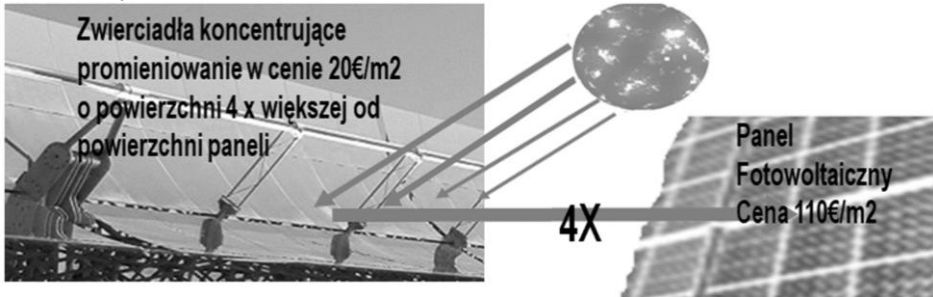
1. autonomicznej e-mobilności [9, 10, 12-16],
2. 3 razy tańszego ogrzewanie budynków i wody przy pomocy pomp ciepła [17-19],
3. 3 x tańszej produkcji wodoru,
4. 3-krotnego obniżenia kosztów produkcji energii dla:
 - a) recyklingu odpadów z przemysłu, rolnictwa oraz usług [52-55],
 - b) energii elektrycznej przy pomocy nanofotowoltaiki i fotowoltaiki perowskitowej [65],
 - c) systemów 5G rewolucji IoT oraz KI, w tym Industry4 [61-64],
 - d) produkcji wodoru,
 - e) do budowy Tarczy Antymeteorytowej [55-59],

¹ European Business Club Association e.V., Oedheim, D_74229, FRG.

- f) dla zasilania Kolei Elana Muska (Hyperloop) podróżujących z dwukrotną prędkością dźwięku, czyli 5x szybciej niż TGV [65-69],
- g) dla zapewnienia taniej energii do produkcji słodkiej wody i żywności dla 9,5 miliardów mieszkańców naszej planety w roku 2050, [70-72],
- h) dla projektów Galileo (GPS) i innych inżynierii kosmicznej [73-82],
- i) dla znacznie tańszych lotów kosmicznych,
- j) dla laserowej i tokamakowej energetyki termojądrowej [83, 84].

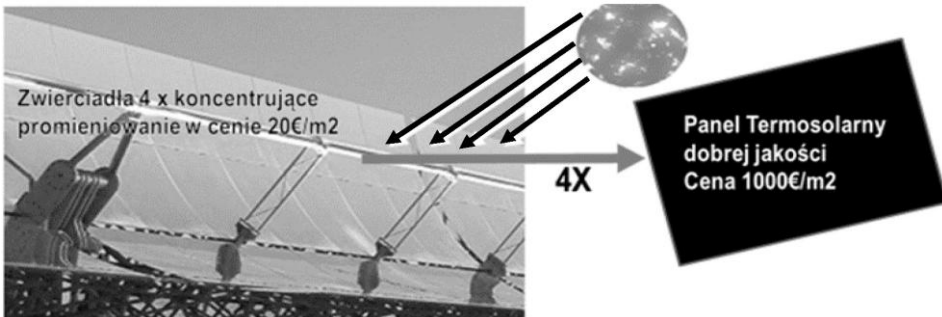
2. Produkcja energii z prostą koncentracją energii słonecznej

Idea taniej energii wykorzystujące prostą koncentrację energii słonecznej jest przedstawiona na rysunku 1.



Rysunek 1. Produkcja energii elektrycznej w prostej skoncentrowanej fotowoltaice, w cenie 0,016€/kWh, 3 razy taniej od energii z węgla i z wiatru onshore, 2,8 razy taniej niż w lądowych, 4,1 razy taniej jak w morskich farmach wiatrowych, 5,3 razy taniej niż w skoncentrowanych elektrowniach słonecznych, (CSPP) [od 30 do 50]

Należy podkreślić, iż prosta, skoncentrowana fotowoltaika jest rozwinięciem tradycyjnej fotowoltaiki, technologii sprawdzonej i opłacalnej, która przynosi inwestorom zysk ponad 6% nawet bez koncentracji promieniowania słonecznego [od 30 do 50].

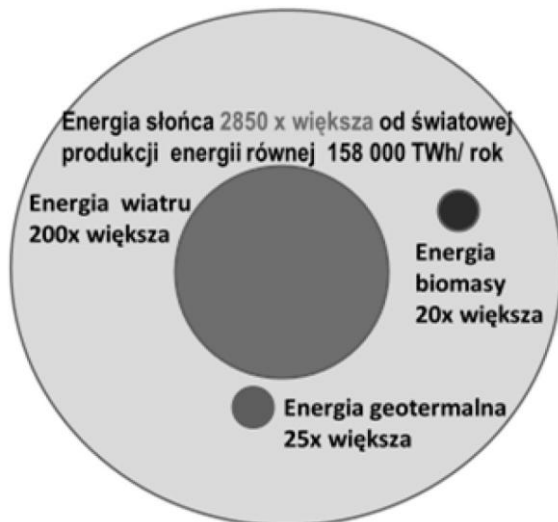


Rysunek 2. Ilustracja wzrostu opłacalności produkcji najtańszej energii cieplnej przy pomocy prostej skoncentrowanej technologii termosolarnej, przy pomocy koncentracji promieniowania słonecznego zwierciadłami w cenie 20€/m²

Wykorzystanie prostej skoncentrowanej technologii termosolarnej zapewnia ogrzewanie budynku i wody w cenie 0,09 Zł. / kWh, 2,4 razy tańsze od najtańszego i najbrudniejszego węgla grzebnym i także znacznie czystsza i tańsza od ogrzewania gazowego lub paletowego.

Uwaga: optymalne jest połączenie systemu prostej skoncentrowanej technologii termosolarnej z powietrzną pompą ciepła ogrzewającą wodę i pomieszczenia oraz akumulacją ciepła w izolowanym termicznie zbiorniku wody, szczególnie deszczowej.

3. Energia promieniowania słonecznego – energią XXI wieku



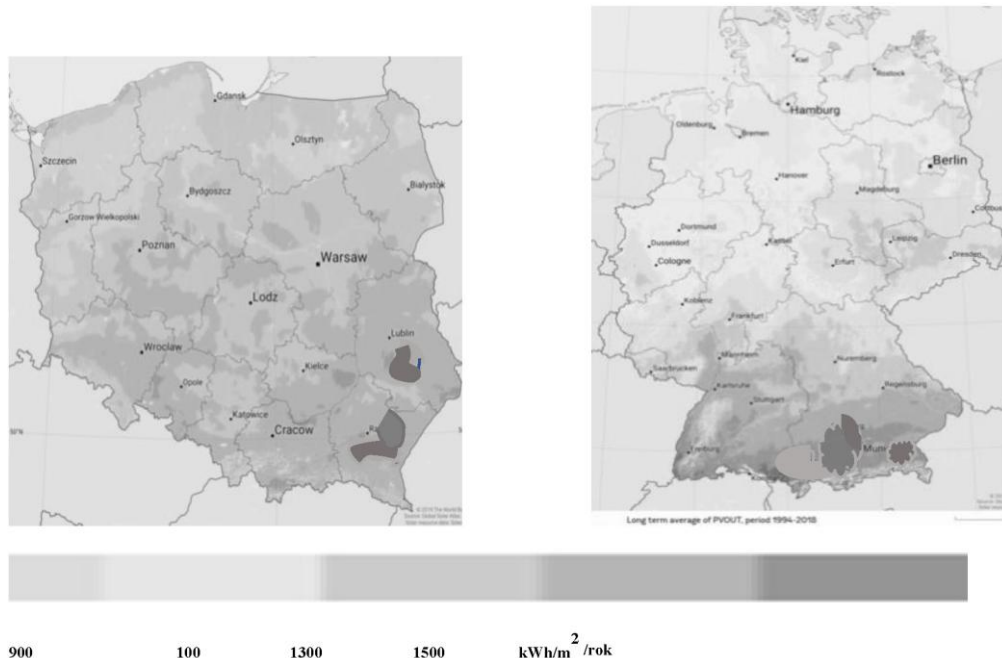
Rysunek 3. Zasoby Energii słonecznej są 2850 x większe od światowej produkcji energii (158tys.TWH/rok) [6] Diagram ilustruje, iż jedynie energia słoneczna i pochodzące od niej energia wiatrowa są w stanie dostarczyć ilości energii konieczne do zapobieżenia katastrofie klimatycznej. Natomiast do stabilizacji dostaw energii korzystna jest energia geotermalna, energia spalania biomasy i biogazu.
Źródło: <https://www.pinterest.de/pin/38562140534696508/?d=t&mt=login> [6]

W kolejnych częściach pracy przedstawimy trzy technologie taniej produkcji czystej energii przy pomocy prostej koncentracji energii słonecznej, których idee są zilustrowane na rysunkach 1, 2 i 4

1. Technologię 3-krotnego obniżenia kosztów produkcji energii elektrycznej przy pomocy prostej skoncentrowanej fotowoltaiki.
2. Technologię ponad 3-krotnego obniżenia kosztów ogrzewania budynków i wody przy pomocy prostej koncentracji promieniowania słonecznego na kolektorach termosolarnych.
3. Technologię 6-krotnego obniżenia ceny produkcji energii cieplnej przy pomocy hybrydyzacji skoncentrowanej fotowoltaiki i powietrznej pompy ciepła ogrzewającej budynek i zapewniającej ciepłą wodę.

Należy zaznaczyć, że jedynie przy tak znacznej redukcji kosztów produkcji energii możliwy jest 11-krotny wzrost produkcji czystej energii do 2050 roku. Taki wzrost jest konieczny dla zapobieżenia katastrofie klimatycznej, czyli realizacji programu Breakthrough Energy Coalition 34 korporacji technologicznych powstałej z inicjatywy Billa Gatesa i Konferencji COP ONZ [1-3, 22, 23].

4. Zasoby energii słonecznej w Polsce i w Niemczech



Rysunek 4. Porównanie rocznych zasobów energii słonecznej w Polsce i w Niemczech,

Źródła: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/poland>, [20], <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/germany> [21]

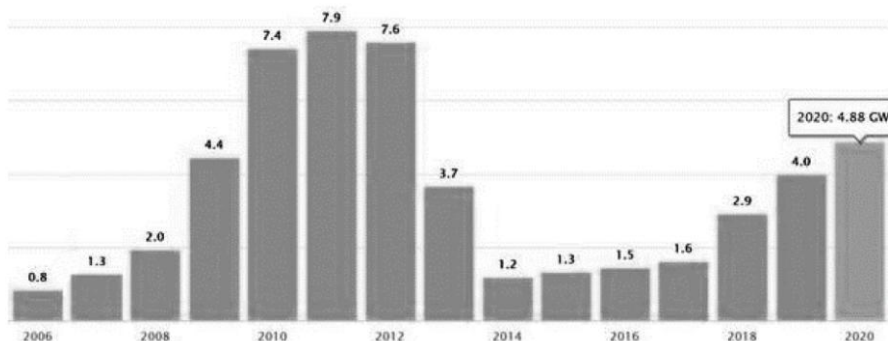
Dane przedstawione powyżej zaprzeczają podstawowemu argumentowi czarnego marketingu, że w szerokości geograficznej Polski nasłonecznienie nie gwarantuje zysku z prostej fotowoltaiki.

Przy pomocy tego kłamstwa udało się wielkim korporacjom energetycznym Europy zahamować rozwój fotowoltaiki w Niemczech od 2015 do 2018 roku i w Polsce do 2019 roku.

W obu przypadkach finansowana ponad 1 miliardem US \$ kampania czarnego PR [24-27] największych europejskich korporacji wydobywczych energetycznych i chemicznych oraz Gazpromu doprowadziła do znacznego spowolnienia inwestycji w fotowoltaikę. Narzędziem były, tak w Niemczech, jak i w Polsce ustawy Anty-OZE, przy czym Polska ustawa, uchwalona w 2015 roku, wzorowała się na ustawie niemieckiej EEG z 2011 roku.

Wolny rynek w Niemczech zareagował na korporacyjno-rządową blokadę opłacalności inwestycji w fotowoltaikę kolejnym, znacznym obniżeniem cen inwestycji fotowoltaicznych. Ogromne inwestycje w sektorze autonomicznej e-mobilności poczyniły największe globalne koncerny samochodowe, w tym niemieckie, przerażone ponad 10-letnim wyprzedzeniem Tesli Elona Muska i 5 letnim przez chińską konkurencję. Ponadto powyższe koncerny samochodowe zapowiedziały znaczne inwestycje w sektorach produkcji, badań, rozwoju i wdrożeń różnych typów akumulatorów. Efektem tych działań jest ponowny szybki wzrost zainstalowanej mocy fotowoltaicznej przedstawiony poniżej na rysunku 5.

Moc GW



Rysunek 5. Efekt reakcji wolnego rynku Niemczech na korporacyjno - rządową blokadę fotowoltaiki w Niemczech przy pomocy Anti-OZE ustawy EEG z 2011 roku. W efekcie tej ustawy w latach 2014 do 2017 inwestycje fotowoltaiczne stały się niskoopłacalne, ale od 2018 roku ponownie stały się opłacalne i w 2021 roku przyniosą rocznie ponad 7% zysku [od 30 do 50]. Przyczyną tego jest obniżenie cen inwestycji.

Skutkiem tego moc nowych instalacji w 2021 roku przekroczy 6 GW. Źródła:

<https://www.solarify.eu/2021/02/05/552-0-2020-knapp-5-gw-pv-zubau/> i pozycje internetowe [od 30 do 50]

5. Konieczny, 11-krotny, wzrost produkcji energii do 2050 roku

Aktualnie czysta energia stanowi 15 %, a brudna 85% ogółu produkowanej energii, czyli samo zastąpienie brudnej energii czystą wymaga niemal 6-krotnego wzrostu produkcji czystej energii.

Równocześnie konieczność zapewnienia ludności państw II-go, III-go i IV-go świata poziomu życia będącego aktualnie udziałem zaledwie 20% ludności państw I-go świata wymaga dodatkowo 4-krotnego wzrostu produkcji czystej energii. Biorąc pod uwagę, iż wdrożenie nowych, energooszczędnych technologii zmniejszy o 50% zapotrzebowanie energii na jednostkę produkowanych dóbr i świadczonych usług konieczne jest zatem 11-krotne zwiększenie podaży czystej energii.

11-krotny wzrostu produkcji taniej i czystej energii jest warunkiem koniecznym zapewnienia energii:

1. dla e- mobilności na lądzie, na wodzie i w powietrzu [od 9 do 16].
2. dla recyklingu odpadów z przemysłu, rolnictwa oraz usług [52, 53, 54].
3. do budowy Tarczy Antymeteorytowej [55-59].
4. dla nanofotowoltaiki i fotowoltaiki perowskitowej [64].
5. dla systemów 5G rewolucji IoT oraz KI, w tym Industry4 [60-63].
6. dla zasilania Kolei Elana Muska (Hyperloop) podróżujących z dwukrotną prędkością dźwięku, czyli 5x szybciej niż TGV [65-69].
7. dla taniej produkcji słodkiej wody i żywności dla wszystkich 9,5 miliardów mieszkańców naszej planety w roku 2050, [70-72].
8. dla projektów Galileo (GPS) i innych inżynierii kosmicznej [73-82].
9. dla znacznie tańszych lotów kosmicznych.
10. dla laserowej i tokamakowej energetyki termojądrowej [83, 84].

Wdrażaniu technologii przedstawionych powyżej było, w latach 2004 do 2021, tematem 17 projektów European Business Club e.V. w Oedheim oraz Senior Experten Service Stiftung für internationale Zusammenarbeit gmbH w Bonn [28-30].

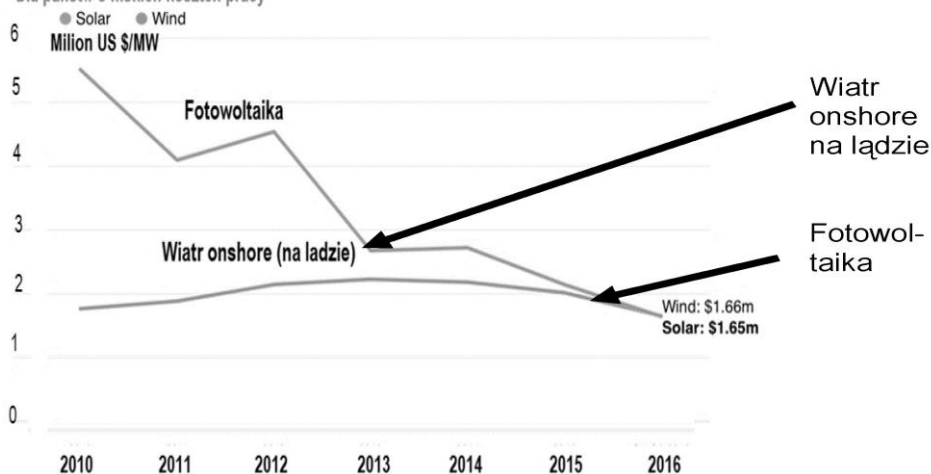
6. Tradycyjna fotowoltaika – zysk > 6% [od 30 do 50]

Należy podkreślić, iż jak to ilustrują diagramy na rys. od 6 do 10 oraz wyniki obliczeń i analizy w pozycjach internetowych [od 30 do 50] przedstawione w kolejnej części pracy technologie wyjściowe stosowane w skoncentrowanych prostych układach solarnych: tradycyjna fotowoltaika i technologia termosolarna przynoszą inwestorom od 2015 roku bez żadnych dotacji odpowiednio zysk ponad 6% i 2%. W kolejnym rozdziale pokażemy, iż prosta koncentracja promieniowania słonecznego zwiększa ten zysk do ponad 30%.

Solar Surprise: Prices Fall Below Wind

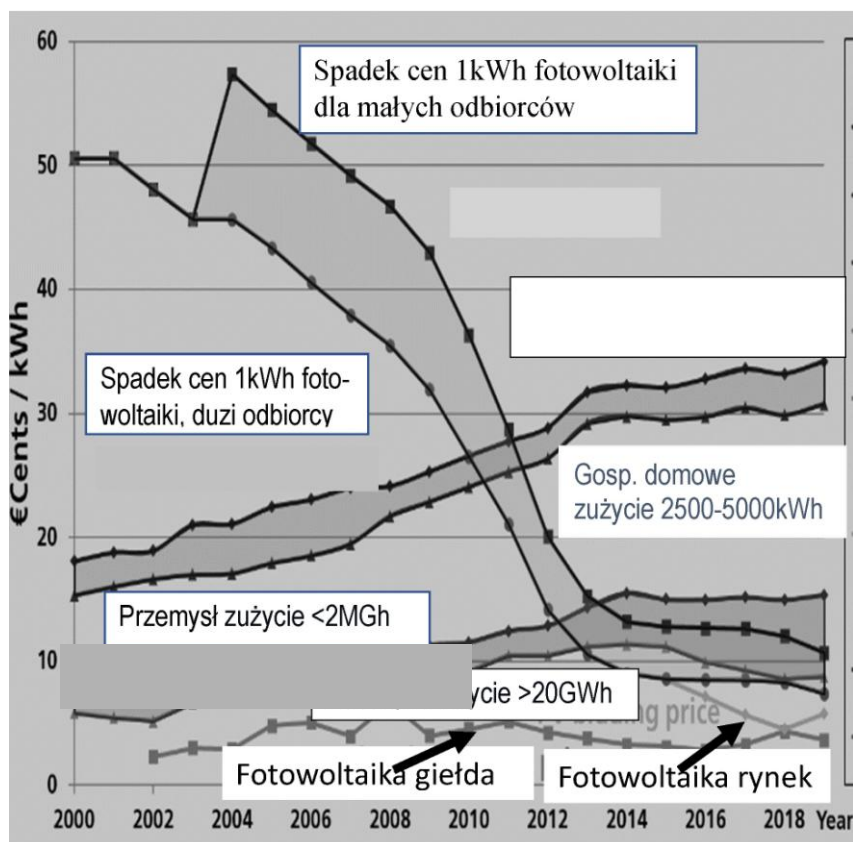
A turning point for renewables in lower-income countries

Dla państw o niskich kosztach pracy

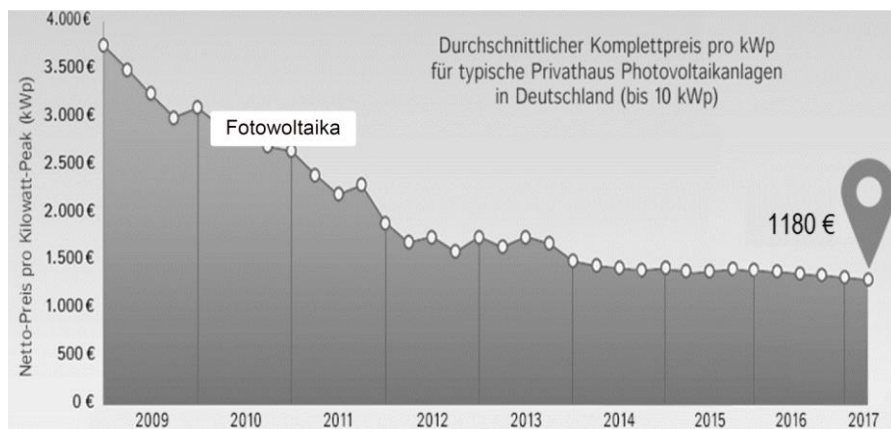


Rysunek 6. Zgodnie z analizami Instytutu Fraunhofera i agencji Blomberga i fotowoltaika jest najtańszą technologią produkcji energii elektrycznej, tańszą od energii wiatrowej i (od 2015 roku) o 15% tańszą od energii elektrycznej z węgla brunatnego.

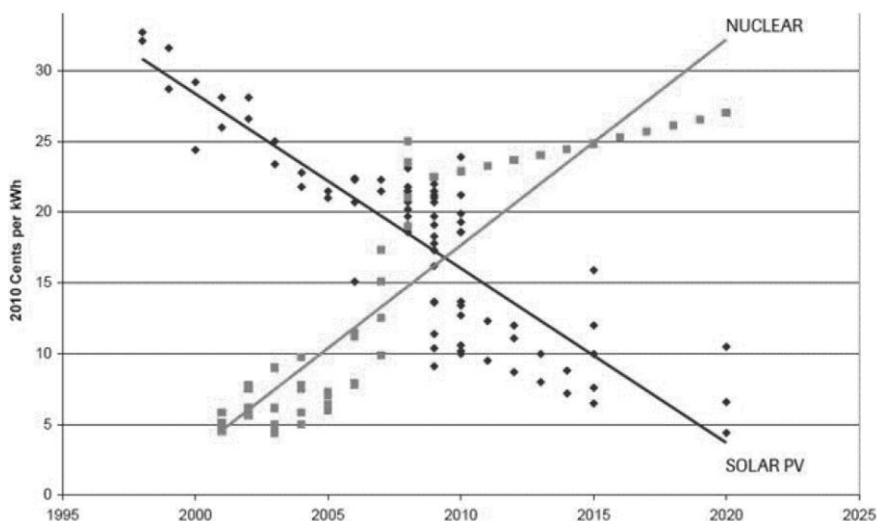
Źródła: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>, [34] (site 23) <https://www.pv-tech.org/bnef-solar-leads-renewables-growth-in-2020-despite-covid-19-slowdown/> BloombergNEF [5]



Rysunek 7. Zgodnie z analizami Instytutu Fraunhofera fotowoltaika nawet bez koncentracji promieniowania słonecznego jest najtańszą technologią produkcji energii elektrycznej, tańszą od energii wiatrowej i od 2015 roku o 15% tańszą od energii elektrycznej z węgla brunatnego [38, s. 41], Źródła: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>, "Photovoltaic Report" [38, s. 41].



Rysunek 8. Efekt Chińskiej rewolucji energetycznej, obniżenie o 67% w ciągu 4 lat (2008-2011) ceny instalacji 1kW mocy fotowoltaicznej Źródło: <https://www.photovoltaik-angebotsvergleich.de/photovoltaik-kosten.html> [18]



Rysunek 9. The Historic Crossover- John O. Blackburn Sam Cunningham (2010) str 3.w/g projektu Rządu Federalnego USA na podstawie rezultatów analiz ponad 50 światowych ośrodków naukowych i agencji ratingowych. Porównanie kosztów produkcji 1kWh energii fotowoltaicznej i jądrowej w latach 1995-2010 z ekstrapolacją do roku 2020 [37]. Zródło: John O. Blackburn and Sam Cunningham, www.ncwam.org/2010/07/solar-and-nuclear- costs-the-historic-crossover

Na kolejnych stronach od 18 do 21 zilustrowane są technologie magazynowania energii elektrycznej celem dostosowania dostaw do krzywej dobowego zapotrzebowania odbiorców w niezależnie od pory dnia i roku. Na stronach tych proponujemy całoroczne zapewnienie stabilnych dostaw energii dzięki magazynowania czystej energii w:

- systemie Powerwall Bateria Pack akumulatorów Tesli/Panasonic Elona Muska [87];
- w magazynach zużytych zaledwie w 16%, po 10 letnim okresie eksploatacji, bateriach akumulatorów e-pojazdów firm Daimler i BMW [86, 88];
- większych (od 5m³) zbiornikach wody deszczowej;
- Powyższe technologie produkcji i magazynowania czystej energii sa elementami systemu energetycznego „Budynku Plus Energetycznego”.

Należy podkreślić, iż cena magazynowania 1GWh energii przy pomocy powyższych technologii jest wielokrotnie niższa niż w norweskich i szwajcarskich gigantycznych elektrowniach szczytowo pompowych, stabilizujących wahania produkcji turbin wiatrowych w Europie [100].

Aktualnie europejskim liderem magazynowania energii w elektrowniach szczytowo pompowych w Europie jest Norwegia, której elektrownie szczytowo pompowe są w stanie zmagazynować i dostarczyć rocznie ponad 80 TWh energii elektrycznej [100]. Jest to ilość, która pokrywa 6-miesięczne zapotrzebowanie Polski na energię elektryczną.

7. 31 % zysku z prostej skoncentrowanej fotowoltaice

31% zysku zysk produkcji czystej energii elektrycznej, bez dotacji i bez uwzględnienia wzrostu cen brudnej energii w prostej skoncentrowanej fotowoltaice wynika z obliczenia ceny produkcji 1 kWh przy pomocy wzoru:

$$K_{1\text{kWh}} = K_i / E_p \quad [24 \text{ do } 41] \quad (1)$$

gdzie K_i oznacza całkowity koszt inwestycji, a E_p jest ilością wyprodukowanej energii w okresie gwarancyjnym (minimum 25 lat)

w powyższym algorytmie K_i jest sumą kosztów instalacji pod klucz paneli fotowoltaicznych K_{pf} i zwierciadeł K_{zw} oraz kosztów serwisu K_{cs} (w okresie 25 lat gwarancji), czyli

$$K_i = K_{pf} + K_{zw} + K_{cs} \quad (1a)$$

Gdzie

$$K_{cs} = K_{rs} \times T_p \quad (1b)$$

przy czym K_{rs} jest rocznym kosztem serwisu, a T_p całkowitym okresem produkcji, który przyjmuje się jako równy okresowi gwarancji, czyli 25 lat [82], Liczbowo roczny koszt serwisu K_{rs} w przypadku instalacji fotowoltaicznej jest równy ca. $0,011 \times (K_{pf} + K_{zw})$ czyli 1,1% kosztów pod klucz inwestycji, a całkowity okres produkcji energii T_p jest równy okresowi gwarancji paneli i wynosi minimum 25 lat.

Wyniki obliczenia przy pomocy powyższego algorytmu dokumentujące 31% zysku z inwestycji w prostej skoncentrowanej fotowoltaice i są przedstawione na przezroczach

Na kolejnych przezroczach przedstawimy wyniki analiz redukcji kosztów produkcji energii przy pomocy fotowoltaiki i technologii termosolarnej, które wyjaśniają, dlaczego właśnie jedynie prosta koncentracja promieniowania słonecznego na panelach fotowoltaicznych i kolektorach termosolarnych gwarantują zapewnienie 11-krotnego wzrostu produkcji czystej energii do 2040 roku.

Równocześnie należy jednak zawsze pamiętać, iż stabilizacja zaopatrzenia w godzinach bezsłonecznych i w okresie 4 miesięcy mniejszego nasłonecznienia wymaga wykorzystania do produkcji energii wiatrowej, termicznej, biomasowej, biogazowej oraz budowy tras przesyłu równocześnie prądu stałego jak i zmiennego,

Uwaga 1. W naszych obliczeniach przy pomocy wzoru (1) uwzględnione są koszty serwisu K_{cs} , często pomijane czego efektem jest pozorne zwiększenie opłacalności i pozorne skrócenie okresu zwrotu kapitału.

Uwaga 2. Wysokość zysku obliczona przy pomocy wzoru 1 nie uwzględnia wzrostu cen energii elektrycznej, który, zwłaszcza w przypadku Polski poważnie zwiększy opłacalność i skróci czas zwrotu kapitału.

Uwaga 3. Opłacalność inwestycji zwiększają dotacje z programów: „Czyste Powietrze”, „Mój Prąd”, „Energia Plus”, dodatkowo zmniejszające ceny produkcji 1 kWh [96-98].

8. Case study – zysk 31% z prostej skoncentrowanej fotowoltaiki

Instalacja prostej skoncentrowanej fotowoltaiki dla gospodarstw domowych produkującej rocznie 10 000 kWh energii z 20 m² paneli fotowoltaicznych o mocy 2,5 kWp i 80 m² zwierciadeł

Koszt inwestycji

Koszt paneli o powierzchni 20 m² 11 100 Zł.

Koszt 60 m² zwierciadeł a 50 zł/m² 3 000 Zł.

Koszt serwisu(utrzymania w ruchu) przez 25 lat 3 887

Całkowity koszt 17 978 Zł.

Energia wyprodukowana w okresie gwarancyjnym 25 lat jest równa 250000 kWh (0,25 MWh)

Cena produkcji 1 kWh wynosi 0,07 zł (czyli 0,016 €)

Stąd w Polsce przy cenie energii elektrycznej 0, 61 zł/1 kWh płaconej przez gospodarstwa domowe i Małe i Średnie podmioty gospodarcze zysk producenta przez 25 lat jest równy 135 000 zł, a zysk roczny wyniesie 5 400 zł, czyli koszt inwestycji zwróci się w okresie ca. 3,5 lat przy zysku rocznym inwestora ponad 31%.

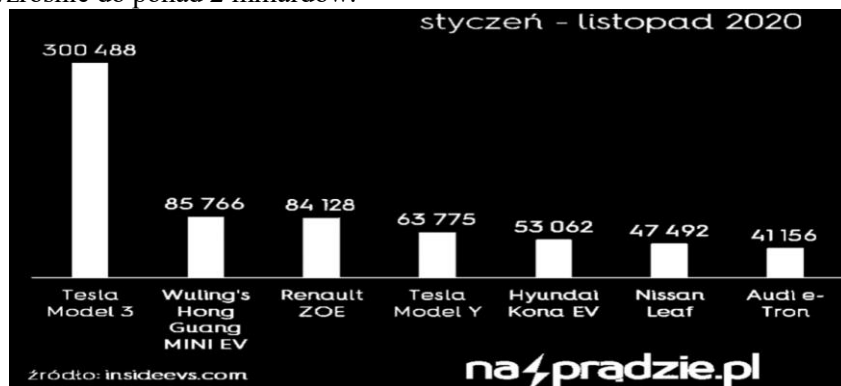
Uwaga: zysk będzie w rzeczywistości większy i czas zwrotu inwestycji krótszy ponieważ w obliczeniach:

1. Założyliśmy, iż inwestor nie korzysta z żadnych programów pomocowych.
2. Nie uwzględniliśmy nieuniknionego wzrostu cen energii w Polsce w kolejnych 25 latach.

W rzeczywistości zgodnie z doświadczeniami najwyżej rozwiniętych państw europejskich ceny energii w Polsce w kolejnych 25 latach wzrosną o co najmniej 100%, czyli ca. 2,5% w skali rocznej, a dla przedsiębiorców, rolników, szpitali, szkół i wielu innych odbiorców jeszcze szybciej.

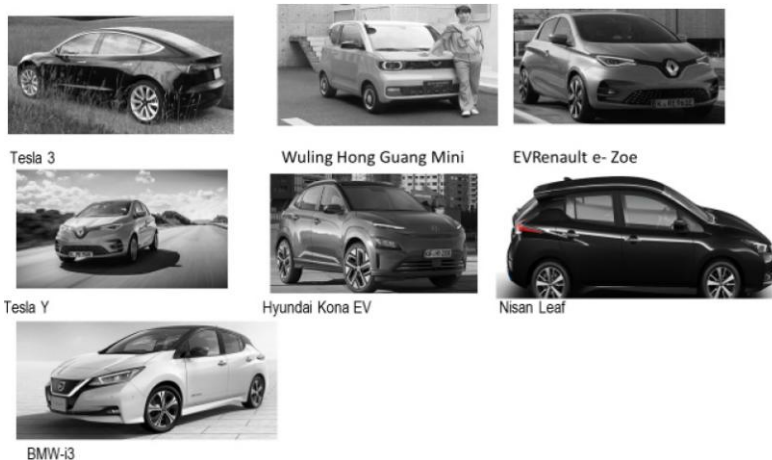
9. Magazynowanie energii w bateriach e-samochodów

Zastąpienie e-samochodami do 2040 roku miliardów dieslowskich, benzynowych i gazowych samochodów elektrycznymi generuje problem recyklingu akumulatorów samochodów elektrycznych, przy czym liczba akumulatorów do recyklingu do 2040 roku wzrośnie do ponad 2 miliardów.



Rysunek 10. 7 najczęściej kupowanych modeli e-samochodów w 2020 roku [8-16]

Źródło: <https://na.pradzie.pl/2021/01/01/nowy-rekord-sprzedazy-samochodow-elektrycznych-na-swiecie-listopad-2020/>



Rysunek 11. Najczęściej kupowane samochody elektryczne (dane z roku 2020), dokumentujące, iż niekwestionowanym liderem sprzedaży jest Tesla, która sprzedała ponad 450 tys. modeli. Na 2 i 3, 4, 5 i 6-tym miejscu rankingu sprzedaży znalazły się Wuling Hong Guang Mini, e-Zoe, Renault, Tesla Y, Hyundai Kona EV, Nissan Leaf i BMWi3 [89-95].

10. Prosta skoncentrowana technologia termosolarna

Analogicznie jak w przypadku prostej skoncentrowanej fotowoltaiki obliczamy 39% zysku z inwestycji w prostej skoncentrowanej technologii termosolarnej otrzymujemy obliczając koszt 1 kWh energii cieplnej korzystając z wzoru:

$$K_i = K_{kts} + K_{zw} + K_{cs} \quad (2)$$

gdzie K_{kts} jest kosztem kolektorów termosolarnych a

$$K_{cs} = 0,027 (K_{kts} + K_{zw}) \times T_p \quad (2a)$$

Ponieważ, w przypadku skoncentrowanej technologii termosolarnej roczne koszty utrzymania instalacji wynoszą 2,7%, czyli są większą od 1,1 % jak w skoncentrowanej fotowoltaice.

Zważywszy, że dla wyprodukowania 10 000kWh energii cieplnej konieczna jest instalacja 6 m² kolektorów termosolarnych w cenie 13 200 zł i 10 m² zwierciadeł w cenie 500 zł cena 1 kWh wynosi 0,091 zł. Jest to 2,4 x taniej niż koszt najtańszego i najbrudniejszego ogrzewania budynku i wody węglem i 2,7 razy taniej jak gazem ziemnym

11. Stabilizacja zaopatrzenia dzięki magazynowaniu energii fotowoltaicznej i wiatrowej

Jak już wspomnieliśmy dostosowanie wielkości dostaw energii słonecznej i wiatrowej wymaga nowych idei magazynowania energii elektrycznej i cieplnej.

Przy tym szczególnie problematyczne jest magazynowanie energii z farm wiatrowych, ponieważ ilość wytworzonej energii rośnie z 3 potęgą prędkości wiatru, czyli wzrost tej prędkości z 5 km/sek do 25 km/sek powoduje 125-krotny wzrost produkcji. Ponadto przy prędkości wiatru powyżej 25m/s skrzydła turbin wiatrowych muszą być

zatrzymane ponieważ dynamiczne obciążenia mechaniczne grożą zniszczeniem konstrukcji.

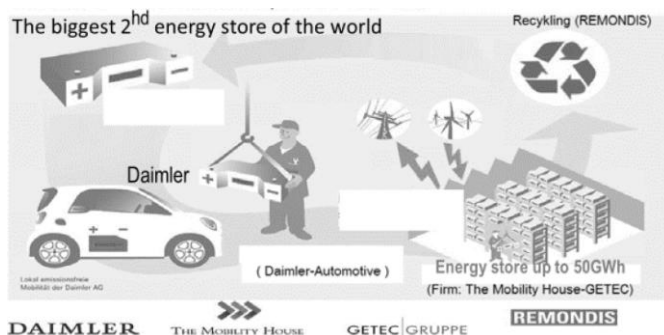
Na kolejnych rysunkach 9 i 10 przedstawiamy rozwiązania w tym zakresie z wykorzystaniem zużytych w 20% (po 10 do 15 latach jazdy) akumulatorów e-samochodów [86, 88].

Na rys. 11 przedstawione jest magazynowanie energii fotowoltaicznej w nowych akumulatorach. Tesli-Panasonica [87]. Używanie nowych akumulatorów może stać się ekonomicznie opłacalne w stosunkowo krótkim czasie 5 do 10 lat ze względu na znaczne zmniejszanie kosztów jednostkowych ich produkcji. Poprzez rozszerzenie łańcucha, przedłużenie czasu użytkowania i zyskanie czasu na opracowanie tanich technologii recyklingu akumulatorów zwiększa się dodatkowo zysk inwestorów.

Jest to rzadki przykład znacznego wzrostu zysku przy bardzo małym wzroście kosztu inwestycji.

Skale problemu ilustruje analiza wielkości sprzedaży samochodów elektrycznych do 2035 roku przez analityków banku J.P. Morgan [90]. Analitycy J.P Morgan szacują, że udział samochodów elektrycznych w światowym rynku wyniesie 35% do 2030 roku i 48% do 2035 roku, ponieważ różnica w cenie między samochodami elektrycznymi a spalinowymi zmniejsza się dzięki spadającym cenom akumulatorów. Ponadto konsumenci mogą jeszcze wcześniej przestawić się na samochody elektryczne z powodu obaw o spadek wartości samochodów spalinowych. W liczbach oznacza to sprzedaż 280 milionów samochodów elektrycznych do roku 2040 i konieczność recyklingu ponad 100 milionów częściowo zużytych baterii.

Oczywiście magazynowanie energii elektrycznej w takich magazynach energii jest zdecydowanie tańsze niż metody akumulacji energii wiatrowej i słonecznej w elektrowniach szczytowo pompowych. Akumulacja energii elektrycznej w częściowo wyeksploatowanych bateriach e-samochodów umożliwi ponadto przesunięcie o co najmniej 15 lat terminu recyklingu wszystkich nowych typów baterii e-samochodowych, nad których rozwojem pracują wszystkie największe korporacje samochodowe i nie tylko samochodowe. W przypadku europejskich korporacji samochodowych nowe rodzaje baterii są podmiotem badań i wdrożeń w programach „Electric for all” (VW), „E-Mobility first”, BMW, „Electric first” (Daimler) i „kolejny etap mobilności” (Audi).



Rysunek 12. Konsorcjum magazynowania energii elektrycznej: Daimler-Mobility House-GETEC-REMONDIS (Projekt w trakcie realizacji). Magazyn 50 GWh energii słonecznej i wiatrowej z wykorzystaniem zużytych w 20% (po 10 do 15 latach jazdy) akumulatorów e-samochodów [86]
 Źródło: <https://www.springerprofessional.de/energie/energiespeicher/grosster-second-life-batteriespeicher-geht-ans-netz/7069902>



Rys. 13. Projekt BMW w Lipsku – zmagazynowanie 66 MWh (energii wystarczającej dla 15 000 gospodarstw domowych przez 3 dni) przy użyciu 700 częściowo (w 16%) wyeksploatowanych akumulatorów BMW i3 o pojemności 94 kWh [88].

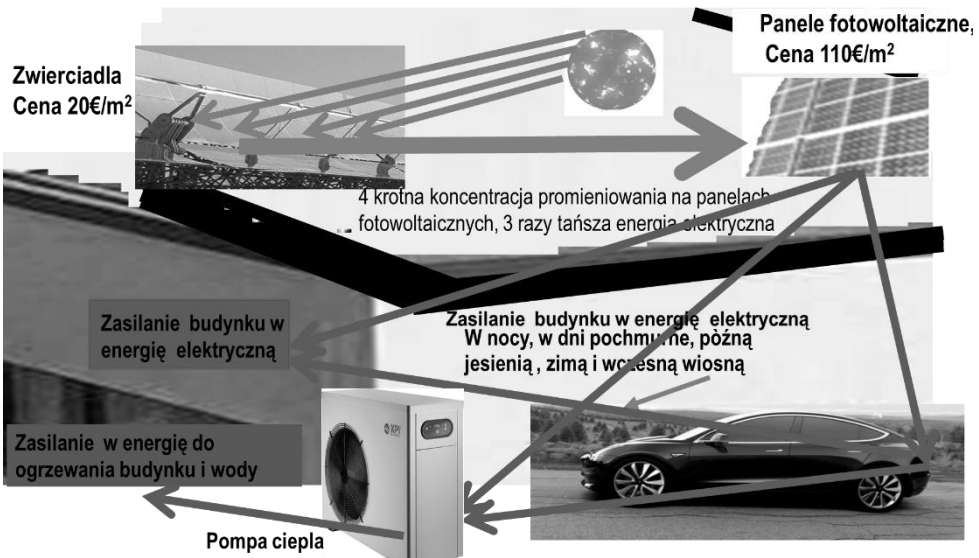
Źródło: <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/elektroautos-als-energiespeicher-bmw-will-ins-stromnetz/24328088.html> [88]



Rysunek 14. Projekt Elana Muska w Australii, zrealizowany w 100 dni – magazyn 29 MWh energii w akumulatorach Tesli dla zdecentralizowanego (off the grid) zaopatrzenia w energię elektryczną 30 tysięcy gospodarstw domowych przez 3 dni [87].

Źródło: <https://www.theverge.com/2017/12/1/16723186/elon-musk-battery-launched-south-australia> [87]

Na kolejnym 12 rysunku przedstawiamy optymalny zhybrydowany system produkcji i magazynowania czystej energii elektrycznej przynoszący inwestorom indywidualnym, komunalnym i państwowym maksymalny, stabilny zysk i gwarantujący pełną niezależność od wzrostu cen energii.



Rysunek 13. Hybrydowy układ skoncentrowanej fotowoltaiki, pompy ciepła i samochodu elektrycznego [51]. W czasie korzystania z akumulatorów w samochodzie można ich także używać do magazynowania energii na okresy bez lub z małym natężeniem promieniowania słonecznego. Aktualnie dotyczy to kilkunastu modeli o akumulatorach magazynujących ponad 60 kWh. Natomiast w kolejnych 2-3 latach szanse takie otworzy ponad 120 modeli z akumulatorami ponad 100 kWh. Źródło: <https://www.enerix.de/produkte> [51, 86-88]

Uwaga: J.P. Morgan [93] przewiduje, że udział samochodów elektrycznych w światowym rynku wzrosnie do 48% do 2030 roku. Spowodowane jest to zmniejszaniem różnicy ceny w cenie między samochodami elektrycznymi a spalinowymi dzięki spadającym cenom akumulatorów.

12. Wnioski-Konsekwencje IV Zielonej Rewolucji Energetycznej

Całkowite zastąpienie czystą energią, do roku 2050, brudnej energii ze spalania węglowodorowych surowców kopalnych jest warunkiem sine qua non uniknięcia przez ludzkość losu dinozaurów jest Równocześnie podniesienie poziomu jakości życia mieszkańców państw II-go, III-go i IV, go świata przy równoczesnej realizacja programów IoT, KI, Industry IV, lotów kosmicznych i zwalczania pandemii wymaga 11-krotnego zwiększenia produkcji czystej i taniej energii. Dane z lat 2015 do 2019 wskazują, iż, mimo znacznego wzrostu opłacalności i tym samym inwestycji w dwie najbardziej rentowne technologie klasyczna fotowoltaikę i technologie wiatrowa na lądzie (onshore) poziom globalnej emisji wzrósł o 7%, zamiast obniżyć się, zgodnie z Porozumieniem Paryskim 198 państw 12%.

W pracy proponujemy:

1. wdrożenie prostej skoncentrowanej fotowoltaiki i prostej skoncentrowanej technologii solarnej przynoszących inwestorom ponad 31% zysku,
2. wykorzystanie wyprodukowanej w systemie prostej skoncentrowanej fotowoltaice energii elektrycznej:
 - a) w e-mobilności na lądzie, na wodzie i w powietrzu [od 9 do 16],
 - b) do zasilania powietrznych pomp ciepła do ogrzewania budynków i wody,

- c) akumulację energii elektrycznej w częściowo (w16%)wyeksplataowanych bateriach akumulatorów e- samochodowych,
- d) produkcji wodoru,
- e) dla recyklingu odpadów z przemysłu, rolnictwa oraz usług [52, 53, 54],
- f) do budowy Tarczy Antymeteoritowej [55-59],
- g) dla nanofotowoltaiki i fotowoltaiki perowskitowej [64],
- h) dla systemów 5G rewolucji IoT oraz KI, w tym Industry4 [60-63],
- i) dla zasilania Kolei Elana Muska (Hyperloop) podróżujących z dwukrotną prędkością dźwięku, czyli 5x szybciej niż TGV [65-69],
- j) dla zapewnienia taniej energii do produkcji słodkiej wody i żywności dla 9,5 miliardów mieszkańców naszej planety w roku 2050 [70-72],
- k) dla projektów Galileo (GPS) i innych inżynierii kosmicznej [73-82] ;
- l) dla znacznie tańszych lotów kosmicznych dla laserowej i tokamakowej energetyki termojądrowej [83, 84]

Znaczenie wdrożenia technologii prostej skoncentrowanej fotowoltaiki ilustrujemy przykładem domowego gospodarstwa w Polsce, które dzięki tym technologiom rocznie może oszczędzić ponad 15 tys. zł.

Na sumę tę składają się: koszty paliw samochodowych, koszty ogrzewania budynków i wody, koszty europejskich opłat klimatycznych, koszty paliw komunikacji publicznej oraz koszty produkcji i transportu wyprodukowanych produktów, oraz świadczonych usług. Kwoty roczne płacone w skali krajowej są zestawione w poniższej tabelce.

Rodzaj kosztu	Koszt w skali kraju w miliardach zł
Paliwo do napędu samochodu	77
Paliwo do ogrzewanie budynku i wody	61
Oplaty klimatyczne (2018)	12
Energia do produkcji i transportu towarów i usług	76
Łącznie Polska	226

Zgodnie z prognozą do 2025 roku koszty te wzrosną o kolejne 81 miliardów zł, czyli do 307 miliardów zł z powodu wzrostu europejskich opłat klimatycznych [101, 102]. Oznacza to wzrost średniego rocznego obciążenia polskiej rodziny do 20,6 tys. zł

Literatura

1. www.b-t.energy, Bill Gates, Facebook, <https://www.gatesnotes.com/energy/investing-in-energy-innovation>.
2. <https://www.pv-tech.org/amazon-becomes-worlds-largest-renewable-energy-backer-with-26-new-utility-scale-solar-projects/>, Edith Hancock, *Amazon becomes 'world's largest' renewable energy backer with 26 new utility-scale solar and wind projects*.
3. <https://www.forbes.com/sites/stephenmcbride1/2020/02/11/warren-buffett-has-started-the-biggest-energy-revolution/?sh=62c21a794494>, Stephen McBride, *Warren Buffett Has Started The Biggest Energy Revolution*.
4. <https://www.statista.com/statistics/186823/global-investment-in-solar-technology-since-2004/>.
5. <https://www.pv-tech.org/bnef-solar-leads-renewables-growth-in-2020-despite-covid-19-slowdown/>, BloombergNEF.
6. <https://specials-images.forbesimg.com/imageserve/5e413c78f133f400076c0b1e/960x0.jpg?fit=scale>.
7. <https://www.breakthroughenergy.org/investing-in-innovation/bev-board-and-investors>.

8. <https://napradzie.pl/2021/01/01/nowy-rekord-sprzedazy-samochodow-elektrycznych-na-swiecie-listopad-2020/>.
9. <https://de.motor1.com/news/456916/automarkt-europa-oktober-2021-jato-vw-id3/>.
10. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/tesla/tesla-model-3>.
11. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/bmw/i3/i01-facelift/294684/>.
12. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/nissan/nissan-leaf/>.
13. <https://www.golem.de/news/gruenheide-bau-von-tesla-werk-in-unter-einem-jahr-koennteklappen-2008-150006.html>.
14. <https://electrek.co/2020/09/07/tesla-ceo-elon-musk-test-drive-vw-id3>, video – rozmowy Elona Muska o współpracy z Volkswagemem i wizyta na placu budowy nowej fabryki w Brandenburgii pod Berlinem, wrzesień 2020.
15. <https://teslawissen.ch/tesla-kosten-im-vergleich/>.
16. <https://www.wiwo.de/unternehmen/auto/e-auto-champion-das-erfolgreichste-elektroauto-chinas/23769574.html>.
17. <https://www.solarserver.de/2020/05/26/waermepumpen-marktanteil-2019-im-neubauspitzenposition-verteidigt/>.
18. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/237364/umfrage/bedeutung-der-waermepumpen-im-neubau-in-deutschland/>.
19. <https://vaillant-partner.pl/kalkulatory-on-line/kalkulator-kosztow-ogrzewania-domu-i-podgrzewania-ciepłej-wody-uzytkowej/>.
20. <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/poland>.
21. <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/germany>.
22. <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/un-klimakonferenzen/ergebnisse-der-un-klimakonferenzen/>.
23. <https://www.bmu.de/cop25/>.
24. Murphy M., Sigmund T., Sommer U., Stratmann K., Weishaup G., *Deutsche Solarbranche vor der Sonnenfinsternis*, Handelsblatt, 14.06.2012, <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/studie-zum-niedergang-energiekonzerne-fuer-die-solarbranche-keine-unterstuetzung/6748936-7.html?ticket=ST-3330387-xfMoL3iTH0pihNCbtE1J-ap5>.
25. <https://www.heise.de/tp/features/Die-hilflose-Doppelstrategie-der-alten-Energiekonzerne-5004826.html>.
26. <https://www.ingenieur.de/fachmedien/umweltmagazin/energie-wende-und-solarenergie/bundesregierung-blockiert-ausbau-der-solarenergie/>, Carsten König.
27. <http://sternhageltoll.de/wp-content/uploads/2016/03/Gr%C3%BCnde-gegen-den-Einsatz-von-Solarenergie.pdf>.
28. Stasch A., Pacholarz V., <http://www.jmest.org/wp-content/uploads/JMESTN42351072.pdf>.
29. Stasch A., <https://www.agh.edu.pl/info/article/inauguracja-wykladow-universytetu-otwartego-agh/>.
30. Stasch A., *CEE Conference*, Krakow, June 14-18, https://ceeche2018.urk.edu.pl/scientific_program.html.
31. <https://www.irena.org/newsroom/articles/2020/Jun/How-Falling-Costs-Make-Renewables-a-Cost-effective-Investment>.
32. Forecast International, <http://www.fi-powerweb.com/Renewable-Energy.html>.
33. Graichen P., March 25th, 2015, cleantechnica.com/2015/03/25/cost-of-solar-pv-will-fall-to-2-cents-kwh-in-2050-says-fraunhofer-study.

34. Kost Ch., Sammugan S., Jülch V., Nguyen H.T., Schleg T., www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/EN2018_Fraunhofer-ISE_LCOE_Renewable_Energy_Technologies.pdf, 10,14.15.
35. www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf, Umweltinstitut_München, Solarstromanlagen (PV-Anlagen) Stand: 28.02.2019, Harry Wirth, (site. 10).
36. E-ON, <https://www.eon.de/de/gk/photovoltaik.html>.
37. E-ON, www.eon-solar.de/photovoltaik-rechner.
38. Christian Münch GmbH, www.photovoltaik.org/wirtschaftlichkeit/photovoltaik-preise.
39. Meyer S., *Mit gesunkenen Photovoltaik Kosten weiterhin gute Renditen in 2021*, <http://www.photovoltaik-angebotsvergleich.de/photovoltaik-kosten.html>.
40. Blackburn O.J., Cunningham S., www.ncwarn.org/2010/07/solar-and-nuclear-costs-the-historic-crossover.
41. <https://www.bmu.de/meldung/global-trends-in-renewable-energy-investment-report-2018-veroeffentlicht/>, Global Trends in Renewable Energy Investment – Report, 2018.
42. <https://www.gramwzielone.pl/energia-sloneczna/16920/uruchomiono-najwieksza-farme-fotowoltaiczna-w-polsce>, *Uruchomiono największą farmę fotowoltaiczną w Polsce*.
43. <https://www.youtube.com/watch?v=xmbNpSR17Q0> „Farma Fotowoltaiczna w Ostrzeszowie”.
44. <https://www.test.de/Photovoltaik-Rechner-1391893-0/>, *Berechnen Sie die Rendite Ihrer Solaranlage*, Stiftung Warentest, 18.05.2020.
45. <http://www.rolfdisch.de/>.
46. <https://www.gramwzielone.pl/energia-sloneczna/20348/rwe-instaluje-fotowoltaike-w-warszawie>.
47. [https://.info/wiki/Building_Integrated_Photovoltaics_\(BIPV\)#cite](https://.info/wiki/Building_Integrated_Photovoltaics_(BIPV)#cite).
48. <https://www.vpsolar.com/en/bipv-building-integrated-photovoltaics/>.
49. <https://www.dandelionrenewables.com/understanding-building-integrated-photovoltaic-systems/>.
50. <https://wysokienapiecie.pl/35619-zrodla-energii-w-polsce-w-2020-mniej-wegla-wiecej-gazu-oze/>.
51. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen>.
52. <http://strom-report.de/strompreise>.
53. <http://strom-report.de/strompreise>.
54. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/07/PD20_247_31121.html.
55. <https://www.enerix.de/produkte>.
56. Pohl M., Quicker P., *Evaluation neuer Entwicklungen bei alternativen thermischen Abfallbehandlungsanlagen*, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-09-28_texte_77-2018_veroelung.pdf, TEXTE 77/2018Projektnummer 82615UBA-FB 002679.
57. Koch Ch., <https://www.youtube.com/watch?v=Hc-8dvvXWME>.
58. Inventors: Oberlaender I., Koch Ch., Gruhnert W., <https://patents.google.com/patent/DE10049377A1/de>.
59. Schäfer F., *Neoshield – Asteroidenabwehr statt Armageddon*, <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/forschungsfelder/schutz-sicherheit/krisenmanagement/asteroidenabwehr-neoshield.html>.
60. <https://www.welt.de/wissenschaft/weltraum/article13849960/NEO-Shield-als-Abwehr-gegen-kosmische-Bomben.html>, Die Welt, 04.02.201.
61. <https://www.facebook.com/astromariusz/videos/405210446977879/>, *Discovery Channel - Large Asteroid Impact Simulation*.

62. <https://www.augsburger-allgemeine.de/wissenschaft/Schutzschild-gegen-den-Gott-der-Zerstoerung-id18634306.html>, Schutzschild gegen den "Gott der Zerstörung", Augsburger Allgemeine Zeitung, 06.02.2012.
63. <http://www.kopernik.org.pl/orientuj-sie/tajemnica-katastrofy-tunguskiej>.
64. https://www.researchgate.net/publication/311750469_Green_Industrial_Internet_of_Things_Architecture_An_Energy-Efficient_Perspective/link/5ceb2ddc458515712ec5f1e2/download.
65. Wang K., Wang Y., Sun Y., Guo S., Jinsong Wu, *Green Industrial Internet of Things Architecture, An Energy-Efficient Perspective*.
66. Truby J., *Decarbonizing Bitcoin: Law and policy choices for reducing the energy consumption of Blockchain technologies and digital currencies*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214629618301750>.
67. Williamson S., *Is Bitcoin a Waste of Resources?*, https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3194982.
68. Hossain M.I., Saleque A.M., Safayet A., Saidjafarzoda I., Shahiduzzamand, Qarony W., Knipp D., Biyikli N., Tsang Y.H., *Perovskite/perovskite planar tandem solar cells: A comprehensive guideline for reaching energy conversion efficiency beyond 30%*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211285520309770>.
69. <https://odpalprojekt.pl/projekty/finansujacy/676,w-35-minut-z-gdanska-do-krakowa>.
70. <https://www.nevomo.tech/pl/>.
71. www.hyperpoland.com/.
72. <https://www.facebook.com/HyperPoland>.
73. <https://de.wikipedia.org/wiki/Hyperloop>.
74. <https://www.rp.pl/artukul/883263-Na-swiecie-powstaje--odcoraz-wiecejsalarni-morskiej-wody.html>
75. MacDonald A.M., Bonsor H.C., Dochartaigh B., Taylor R.G., *Environmental Research Letters* Vo.7 Nr. 2, 2012, <https://wileyearthpages.wordpress.com/2012/05/23/groundwater-in-africa>.
76. MacDonald A.M., Bonsor H.C., Dochartaigh B., Taylor R.G., *Quantitative maps of groundwater resources in Africa*, Published 19 April 2012, IOP Publishing Ltd, *Environmental Research Letters*, Volume 7, Number 2, 2012, <https://iopscience.iop.org/article/15.1088/1748-9326/7/2/024009>.
77. [https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_\(satellite_navigation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_(satellite_navigation)).
78. https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/What_is_Galileo, ESA.
79. https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_constellation, wikipedia.
80. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Falcon_Heavy_Demo_Mission_\(38583829295\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Falcon_Heavy_Demo_Mission_(38583829295).jpg).
81. https://de.wikipedia.org/wiki/Falcon_Heavy_Demonstration_Mission, Wikipedia, SpaceX, *Falcon Heavy Demonstration Mission*, 2017.
82. https://geospatialmedia.s3.amazonaws.com/wp-content/uploads/2019/07/rocket_1.jpg.
83. *Elon Musks Weltraumtourismus: So hoch ist der Preis für eine Reise ins All*, <https://www.gq-magazin.de/lifestyle/artikel/weltraumtourismus-elon-musk-reise-ins-all-kosten>.
84. Von Paloma González, 20. November, 2020.
85. <https://www.travelbook.de/fliegen/blue-origin-bezos-weltall-programm>, TRAVELBOOK 15.Januar 2021.
86. https://en.wikipedia.org/wiki/Space_launch_market_competition, Wikipedia, *Ares-in-the-international-launch-market*.
87. *Virgin Galactic Signs NASA Deal to Take Private Citizens to the ISS*, <https://www.entrepreneur.com/article/352203>.
88. Max-Planck- Institut für Plasmaphysik, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, *Fusion Basics-Kernfusion*, https://www.ipp.mpg.de/46293/fusion_d.pdf.

89. <https://www.euro-fusion.org>, EFDA-JET (EUROfusion).
90. <https://www.springerprofessional.de/energie/energiespeicher/groesster-second-life-batteriespeicher-geht-ans-netz/7069902>.
91. <https://www.theverge.com/2017/12/1/16723186/elon-musk-battery-launched-south-australia>.
92. <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/elektroautos-als-energiespeicher-bmw-will-in-stromnetz/24328088.html>.
93. <https://www.firmenauto.de/anzahl-der-ladestationen-in-deutschland-es-geht-aufwaerts-11154824.html>.
94. <https://www.automobil-industrie.vogel.de/studie-e-autos-erreichen-50-prozent-marktanteil-bis-2040-a-947796/>.
95. MacKenzie W., <https://energyload.eu/elektromobilitaet/elektroauto/elektroautos-2040/>, 16. Oktober 2018.
96. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/247129/umfrage/weltweite-neuzulassungen-von-pkw/>.
97. Kords M., *280 Millionen Elektroautos bis 2040?*, Johann Nagengast J., 27.04.2021.
98. <https://www.n-tv.de/wirtschaft/BMW-gibt-E-Mobilitaet-jetzt-klar-den-Vorzug-article22433340.html>.
99. Morgan J.P., <https://energyload.eu/elektromobilitaet/wirtschaftliche-risiken-elektromobilitaet/>.
100. *Größter Markt und höchste Produktion: Tesla setzt trotz Geopolitik-Bedenken voll auf*, Musk E., <https://teslamag.de/news/groesster-markt-hoechste-produktion-tesla-trotz-geopolitik-bedenken-china-35269>.
101. Elon Musk says China will become Tesla's largest market, <https://news.cgtn.com/news/2021-03-24/Elon-Musk-says-China-will-become-Tesla-s-largest-market-YS3IFM8/index.html>, 24-Mar-2021.
102. <https://czystepowietrze.gov.pl/>.
103. <https://enerad.pl/aktualnosci/moj-prad-2021/>.
104. <https://stiloenergy.pl/program-energia-plus/>.
105. <https://www.linkedin.com/pulse/why-do-buffettbill-gatesmusk-many-business-mogul-pursue-joy-lee/>.
106. <http://energiespeicher.blogspot.com/2012/06/norwegen-die-superbatterie.html>.
107. A. Torchała Bankier.pl, <https://www.bankier.pl/wiadomosc/Ceny-uprawnien-do-emisji-CO2-szybuja-w-gore-Prad-uderzy-nas-po-kieszeni-8073361.html>.
108. <https://wysokienapiecie.pl/9288-rekordowy-czas-dla-polskiego-rynku-gazu-pgnig>.

31% zysku z inwestycji w skoncentrowaną fotowoltaikę

Streszczenie

W pracy pod tytułem „31% zysku z inwestycji w skoncentrowaną fotowoltaikę” przedstawiamy wyniki analizy, z których wynika, że prosta koncentracja promieniowania słonecznego na panelach fotowoltaicznych (SCP):

1. zapewnia bez żadnej dotacji ponad 30% zysku dzięki obniżeniu do 0,016 €/kWh (0,075 zł) uśrednionych kosztów wytwarzania energii elektrycznej LCOE (*levelized costs of electricity*)
2. gwarantuje przy 60% dotacji z Unii Europejskiej inwestorom 51% zysku i ponad 3-krotne obniżenie LCOE.

znacza to, że wdrożenie prostej fotowoltaiki skoncentrowanej zmniejszy w latach 2021-2050 z 15 000 do 10 000 mld \$, czyli o 5 000 mld \$ koszty globalnych inwestycji w produkcję czystej energii. Takie obniżenie kosztów inwestycyjnych znacząco pomoże w 11-krotnym zwiększeniu produkcji czystej energii do 2050 roku, co jest warunkiem koniecznym do realizacji programów paryskiej konferencji klimatycznej ONZ oraz Koalicji Przełomu Energetycznego przedstawionej przez Billa Gatesa.

W pracy pokazujemy także, iż prosta koncentracja promieniowania słonecznego zredukuje o 27 bilionów (27 tysięcy miliardów) USS koszty inwestycyjne rewolucji czystej energii. Redukcja ta jest, szczególnie dla krajów czwartego, trzeciego i drugiego świata, warunkiem koniecznym do osiągnięcia poziomu rozwoju państw OECD w latach 2021-2050.

Słowa Kluczowe: prosta skoncentrowana fotowoltaika, prosta skoncentrowana technologia termosolarna, czysta energia, tania energia, Elon Musk, Bill Gates, ONZ, Konferencje COP, los dinozaurów, fotowoltaika, technologia termosolarna, uśredniona cena energii elektrycznej (LCOE), zysk, koszt inwestycji, tarcza antymeteoritowa

31% return on investment in concentrated solar farm

Abstract

In a paper titled "31% Return on Investment in Concentrated Photovoltaics," we present the results of an analysis, which shows that simple concentrating solar photovoltaic (SCP) panels:

1. provides without any subsidy more than 30% profit by reducing to 0.016 €/kWh (0.075 Zł.) of the levelized costs of electricity (LCOE)
2. guarantees, with 60% subsidy from the European Union, 51% profit for investors and more than 3-fold reduction in LCOE.

This means that the implementation of simple concentrated solar PV will reduce the global investment cost of clean energy production from \$15,000 billion to \$10,000 billion, or \$5,000 billion, between 2021 and 2050. This reduction in investment costs will significantly help 11-fold increase clean energy production by 2050, which is a prerequisite for achieving the programs of the UN Paris Climate Conference and the Energy Breakthrough Coalition of Bill Gates.

In the paper, we also show that simply concentrating solar radiation will reduce the capital costs of the clean energy revolution by 27 trillion (27,000 billion) USS. This is very important for the fourth, third and second world countries being a prerequisite to reach the development level of OECD countries between 2021 and 2050.

Keywords: simple concentrated photovoltaics, simple concentrated termosolar technology, clean energy, cheap energy, Elon Musk, Bill Gates, UN, COP Conferences, fate of the dinosaurs, photovoltaic, termosolar technology, LCOE, profit, investment cost, antimeteorite shield

Opracowanie modelu numerycznego ogniwa fotowoltaicznego

1. Wprowadzenie

Rozwój cywilizacji jest połączony z coraz większym zapotrzebowaniem na energię w określonej postaci. Najczęściej słowo „energia” kojarzone jest z energią elektryczną, która napędza wiele urządzeń, a technologia wykorzystania oraz przesyłania tego rodzaju energii jest ludziom bardzo dobrze znana od wielu lat. Natomiast nie jest to jedyny sposób przesyłania i wykorzystania energii. W polskich warunkach klimatycznych, aby funkcjonować, ludzie potrzebują ogrzewać siebie oraz swoje domy. W naszym kraju, najczęściej wykorzystywaną formą energii ostatecznej jest energia elektryczna oraz ciepło, aby wytworzyć te formy energii najczęściej konwertuje się energię chemiczną węgla kamiennego oraz brunatnego przy pomocy znanych technologii. Produkcja energii elektrycznej tymi sposobami niesie za sobą duży ślad węglowy oraz zanieczyszczenie środowiska, którego skutkiem jest nasilenie się efektu cieplarnianego. W wielu domach w naszym kraju zapewnienie ogrzewania jest realizowane przez centralne doprowadzenie ciepła z elektrociepłowni, aczkolwiek w większości domy ogrzewane są przy pomocy pieców węglowych oraz gazowych. W krajach Europy, dużo częściej niż w Polsce, produkcja energii elektrycznej jest realizowana wykorzystując energię jądrową, odpadową, a także odnawialne źródła energii. Pod koniec XX wieku ludzkość zaczęła wykorzystywać zasoby uznawane za odnawialne na szeroką skalę, tak aby ograniczyć zużycie paliw kopalnych, a także powstrzymać globalne ocieplenie. Wiele koncepcji oraz dynamiczny rozwój technologii ma wpływ na rozszerzanie możliwości wykorzystania energii z tych źródeł. Duży udział w produkcji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł na świecie ma energia wytwarzana w elektrowniach wodnych. Zaletą tego typu rozwiązania jest możliwość stałej pracy w przypadku utworzenia tego typu elektrowni na rzece, której ustrój jest mieszany, tak aby zapewniać w ciągu roku stabilny strumień wody. Inną koncepcją jest wykorzystanie energii wiatru. Ludzie opracowali, a także rozwinęli różne możliwości przetworzenia jej na energię elektryczną za pomocą turbin wiatrowych. Rozróżniamy kilka rodzajów tego typu urządzeń ale przede wszystkim są to turbiny o poziomej osi obrotu oraz turbiny o pionowej osi obrotu. Każda z konstrukcji ma swoje wady i zalety, aczkolwiek energię z wiatru można produkować tylko wtedy, gdy wieje wiatr – więc nie jest ona stabilna. Kolejnymi ograniczeniami często są przepisy, które w naszym kraju znacznie ograniczyły opłacalność i możliwość budowy farm wiatrowych w głębi lądu. Kolejnym odnawialnym źródłem energii to innowacyjna, aczkolwiek coraz częściej spotykana koncepcja wykorzystania

¹ pioteli459@student.polsl.pl, Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska, <http://www.polsl.pl>.

² zbigniew.bulinski@polsl.pl, Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska, <http://www.polsl.pl>.

³ macibar533@student.polsl.pl, Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska, <http://www.polsl.pl>.

energii fal morskich. Pomysł ten został zapoczątkowany na szerszą skalę w Japonii, tymczasem w Polsce jak do tej pory nikt nie podjął się budowy elektrowni wykorzystującej taką technologię. W wielu krajach można się również spotkać z rozwojem technologii pozyskiwania ciepła z wnętrza Ziemi. Instalacje wykorzystujące ten rodzaj odnawialnej energii znajdują się również w Polsce na Podhalu. Ostatnie lata w naszym kraju są związane z bardzo szybkim rozwojem technologii wytwarzania energii wykorzystującej energię docierającą do nas ze Słońca w postaci promieniowania elektromagnetycznego. Energetyka słoneczna jest głównym rynkiem wytwarzania energii z OZE i cały czas się rozwija. Technologie są bardzo popularne, a programy rządowe dofinansowują często instalacje u osób prywatnych. Szybki rozwój w ostatnich latach jest spowodowany między innymi spadkiem cen instalacji, a co za tym idzie większą popularnością. Prawo w Polsce dopuszcza produkowanie małych ilości energii elektrycznej w przydomowych instalacjach oraz oddawanie jej do sieci energetycznej. Powstają również elektrownie o większej mocy od kilku do kilkudziesięciu MW, choć w wielu aspektach prawo nie nadąża za rozwojem tej dziedziny przemysłu i ich budowa często trafia na duże utrudnienia [1].

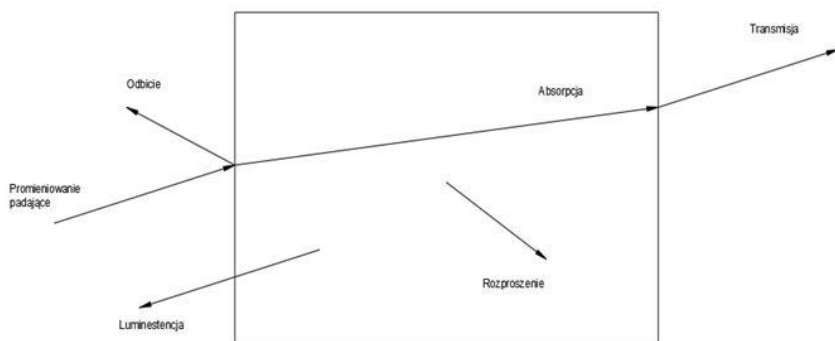
Ogólnie można podzielić źródła konwertujące energię słoneczną, na źródła przetwarzające ją na:

- ciepło – kolektory słoneczne, w Polsce popularne w przydomowych instalacjach na małą skalę służące najczęściej jako dodatkowe źródło ogrzewania domu lub dodatkowe źródło ogrzewania ciepłej wody użytkowej;
- energię elektryczną – ogniwa fotowoltaiczne, wykorzystujące zjawisko fotowoltaiczne do produkcji prądu stałego, przetwarzanego na prąd zmienny i w takiej formie oddawanego do sieci energetycznej.

Poza licznymi ograniczeniami wynikającymi z przepisów problemem jest niestabilność produkcji energii, w przypadku niepogody czy pory dnia. Mimo to rozwój badań źródeł wykorzystujących energię ze Słońca może przynieść duże profity przy projektowaniu nowoczesnych ogniw czy kolektorów w przyszłości.

2. Optyka w ogniwach fotowoltaicznych

W ciałach stałych zjawiskami optycznymi nazywamy ich oddziaływanie z falą elektromagnetyczną o długości od kilku nanometrów do około 1 mm (daleka podczerwień). Odpowiada to energii fotonów o zakresie od 102 eV do 10⁻³ eV. Niektóre z półprzewodników mają małą koncentrację nośników i szeroką przerwę energetyczną, dzięki czemu mogą mieć właściwości izolatorów. Inne natomiast, dzięki dużej koncentracji nośników i wąskiej przerwie energetycznej, jak przykładowo krzem, podobne są do metali. Do zjawisk zachodzących podczas oddziaływania fal elektromagnetycznych z materią należą absorpcja (pochląnianie), odbicie padającego promieniowania oraz emisja własna. Innymi zjawiskami są: luminescencja i rozpraszanie fal. Na powierzchni ośrodka część światła ulega odbiciu, reszta dostaje się do jego wnętrza, gdzie część może zostać zaabsorbowana, a kolejno wyemitowana ze zmianą częstotliwości (fotoluminescencja) lub przekształcona w ciepło. Reszta promieniowania przedostaje się przez ciało stałe bez zmian. Zjawisko to nazywamy transmisją [2]. Opisywane procesy przedstawiono schematycznie na rysunku 1.



Rysunek 1. Zjawiska towarzyszące oddziaływaniu fal elektromagnetycznych z materia

Światło pada na ciało stałe i oddziałuje z nim wzajemnie, a co za tym idzie – wymienia energię. Istotne znaczenie dla oddziaływania materii i promieniowania ma natężenie padającego światła, wzrost natężenia powoduje zwiększenie liczby wybitych elektronów i powstanie chmury elektronowej, zagęszczającej się w strukturze krystalicznej. Absorpcja światła przez półprzewodnik jest zjawiskiem polegającym na pochłanianiu fotonów przez nośniki ładunku (elektrony). Dostarczenie elektronom energii pozwala im na przejście z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. W procesie absorpcji foton o znanej energii wzbudza elektrony z niższych do wyższych stanów energetycznych. Zatem umieszczając płytkę półprzewodnika na wyjściu źródła światła i badając promieniowanie przechodzące przez próbkę możemy wyznaczyć szerokość pasma wzbronionego, czyli przerwy energetycznej pomiędzy pasmem walencyjnym, a pasmem przewodnictwa. Znaczny wpływ na absorpcję światła w półprzewodnikach mają warunki zewnętrzne. Przy podwyższaniu temperatury szerokość pasma zabronionego maleje dla większości półprzewodników. W związku z tym krawędź absorpcji podstawowej przemieszcza się w stronę długich fal. Zmiana kształtu zmienia szerokość pasma zabronionego, co prowadzi do przemieszczania krawędzi absorpcji podstawowej [2].

Widmo transmisji światła jest indywidualne dla każdego półprzewodnika. Część widma światła przechodzi przez warstwy półprzewodnika w prawie niezmięnionej postaci. To zjawisko zachodzi kiedy energia padającego promieniowania jest mniejsza od energii potrzebnej elektronowi do przekroczenia pasma wzbronionego. Wzrost transmisji jest następstwem skokowego spadku prawdopodobieństwa wybicia elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Promieniowanie rekombinacyjne w ciele stałym jest to luminescencja, która powstaje wskutek określonych przejść początkowo swobodnych nośników ładunku. Przejścia te wywołane są w różny sposób: poprzez wstrzykiwanie nośników z elektrod lub przez złącza p-n, poprzez wzbudzenie cząstkami posiadającymi wysoką energię lub wzbudzenie optyczne [2].

Straty optyczne definiujemy jako światło, które mogło utworzyć parę elektron-dziura, ale tego nie zrobiło, gdyż zostało odbite od powierzchni panelu lub nie zostało zaabsorbowane przez ogniwo. Przekłada się to na obniżenie prądu zwarciego. W przypadku najpowszechniejszych ogniw krzemowych, całe widmo widzialne ma

wystarczającą energię aby utworzyć parę elektron-dziura dlatego ograniczenie strat optycznych jest tak ważne dla opracowania wysokowydajnych paneli fotowoltaicznych [3].

Istnieje wiele sposobów ograniczenia strat optycznych:

- pokrycie powierzchni ogniwa warstwami antyrefleksyjnymi;
- teksturowanie powierzchni;
- pogrubienie ogniwa, aby zwiększyć prawdopodobieństwo absorpcji.

Refleksyjność powierzchni krzemu przekracza 0.3, ze względu na wysoki współczynnik załamania światła [3]. Współczynnik odbicia R między dwoma materiałami o różnych współczynnikach załamania światła jest określony przez równanie:

$$R = \left(\frac{n_0 - n_{si}}{n_0 + n_{si}} \right)^2 \quad (1)$$

Gdzie n_0 to współczynnik załamania światła materiału pokrywającego krzem, a n_{si} to współczynnik załamania światła krzemu, zmienny wraz z długością fali [3].

W praktyce odbicie jest redukowane głównie przez teksturowanie oraz nakładanie powłok antyrefleksyjnych (ARC).

O optymalnej grubości urządzenia decyduje nie tylko potrzeba pochłonięcia całego światła, ale również zmniejszenie prawdopodobieństwa rekombinacji elektronów generowanych poza obszarem dyfuzyjnym złącza p-n. Stąd, cieńsze ogniwo, zachowujące absorpcyjność grubszego może mieć wyższe napięcie. Przy projektowaniu ogniw fotowoltaicznych dąży się więc do wydłużenia ścieżki optycznej, która może być nawet kilkakrotnie większa od rzeczywistej grubości urządzenia. Przez ścieżkę optyczną urządzenia rozumiemy dystans jaki niewchłonięty foton może przebyć w urządzeniu zanim wydostanie się z niego wydostanie. Wydłużenie ścieżki optycznej odbywa się poprzez wykorzystanie efektu załamania światła na granicy dwóch ośrodków, a co za tym idzie efektu całkowitego wewnętrznego odbicia światła na granicy faz. Teksturowanie powierzchni nie tylko redukuje efekt odbicia od powierzchni panelu, ale także pozwala wydłużyć ścieżkę optyczną [3].

Kąt, pod jakim światło jest załamywane przy przejściu przez granice dwóch ośrodków o różnych prędkościach rozchodzenia się światła jest opisany prawem Snella [3]:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2)$$

Gdzie θ_1 , θ_2 to kąty padania na powierzchnie w stosunku do płaszczyzny normalnej, natomiast n_1 , n_2 to współczynniki załamania światła w ośrodkach obliczane ze wzoru:

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \quad (3)$$

Gdzie v_1 to prędkość światła w danym ośrodku, a c to prędkość światła w próżni.

Przykładowe współczynniki załamania światła wybranych materiałów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Przyjęte i wyliczone współczynniki załamania światła dla kilku wybranych materiałów

Materiał	Współczynnik załamania światła n
	-
woda	1,33
alkohol etylowy	1,36
powietrze	1,0003
szkło	1,5
folia antyrefleksyjna	2
folia EVA	1,48
krzem	3,5

3. Promieniowanie ciała doskonale czarnego

Każde ciało, którego temperatura jest różna od temperatury zera absolutnego, emituje promieniowanie elektromagnetyczne w całym spektrum długości fal, rozkład tego spektrum zależy od temperatury ciała. Spektralna emisja własna ciała doskonale czarnego jest opisana równaniem Plancka:

$$E_{b\lambda}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \{ \exp[c_2/(\lambda T)] - 1 \}} \quad (4)$$

Gdzie c_1 i c_2 są stałymi, a λ jest długością fali w μm .

Natomiast, prawo Stefana-Boltzmana określa emisję własną ciała doskonale czarnego:

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad (5)$$

Gdzie σ jest nazywana stałą Stefana-Boltzmana, której wartość wynosi:

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4) \quad (6)$$

Podsumowując, równania (5) i (6) określają jaką część promieniowania jest emitowana w określonym zakresie długości fal. Wielkości te są determinowane przez tak zwaną funkcję promieniowania zdefiniowaną jako:

$$f_{0-\lambda}(T) = \frac{\int_0^\lambda E_{b\lambda}(T) d\lambda}{\int_0^\infty E_{b\lambda}(T) d\lambda} = \frac{\int_0^\lambda E_{b\lambda}(T) d\lambda}{\sigma T^4} \quad (7)$$

Aby obliczyć, część energii promieniowania Słońca jaka przypada na każdy z zakresów długości fal elektromagnetycznych, możemy podzielić spektrum promieniowania na zakresy, następnie możemy wyznaczyć odpowiednie wartości funkcji promieniowania dla zdefiniowanych zakresów przyjmując temperaturę zewnętrznej powierzchni Słońca równą 5776 K [4]. Wyniki analizy przeprowadzonej na potrzeby tej pracy przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Podział fal oraz zależność λT , a także $f_{0-\lambda}$, określająca odsetek energii emitowany w paśmie

rodzaj fal	długość fali		λT		Funkcja promieniowania wg. [4] Odsetek energii emitowany w paśmie		
	nm		$\mu\text{m}\cdot\text{K}$		$f_{0-\lambda}(T)$		
	od	do	od	do	min	max	odsetek energii
ultrafiolet	0	380	0	2195	0,000	0,100	0,100
fioletowe	380	436	2195	2518	0,100	0,165	0,065
niebieskie	436	495	2518	2859	0,165	0,242	0,077
zielone	495	566	2859	3269	0,242	0,333	0,091
żółte	566	589	3269	3402	0,333	0,362	0,029
pomarańczowe	589	627	3402	3622	0,362	0,408	0,046
czerwone	627	780	3622	4505	0,408	0,565	0,157
podczerwone	780	10000	4505	57760	0,565	1,000	0,435

Zakładając uśrednioną gęstość strumienia promieniowania słonecznego docierającą do powierzchni ziemi na poziomie $1000 \frac{W}{m^2}$ [3], można wyznaczyć część energii przypadającą na każdy ze zdefiniowanych zakresów. W tabeli numer 3 zostały przedstawione wyniki dla omawianego przypadku.

Tabela 3. Gęstość strumienia energii docierająca do Ziemi w każdym z zakresów

rodzaj fal	ilość energii
	$\frac{W}{m^2}$
ultrafiolet	100
fioletowe	65
niebieskie	77
zielone	91
żółte	29
pomarańczowe	46
czerwone	157
podczerwone	435

Energię promieniowania, którą Słońce emituje w zakresie fal dłuższych niż fale podczerwone, dodano do energii niesionej przez fale podczerwone ze względu na fakt, że jest to bardzo mały odsetek całości energii jaką emituje Słońce.

4. Zależność właściwości radiacyjnych ciał od długości fali

Współczynnik absorpcji krzemu jest funkcją długości fali. Krzem jest półprzewodnikiem z pośrednim pasmem wzbronionym, a spadek absorpcji w paśmie zabronionym (około 1100 nm) jest zdecydowany [3]. Po podzieleniu na zakresy w których uśredniona została absorpcyjność dla każdego konkretnego zakresu została przedstawiona w tabeli 4.

Tabela 4. Uśredniona absorpcyjność krzemu dla poszczególnych zakresów fal

rodzaj fal	długość fali		średnia absorpcyjność krzemu
	nm		
	od	do	$\frac{1}{cm}$
ultrafiolet	0	380	920190
fioletowe	380	436	162050
niebieskie	436	495	21100
zielone	495	566	8210
żółte	566	589	4905
pomarańczowe	589	627	3880
czerwone	627	780	2140
podczerwone	780	10000	0

5. Weryfikacja dokładności modeli na potrzeby obliczeń ogniwa fotowoltaicznych

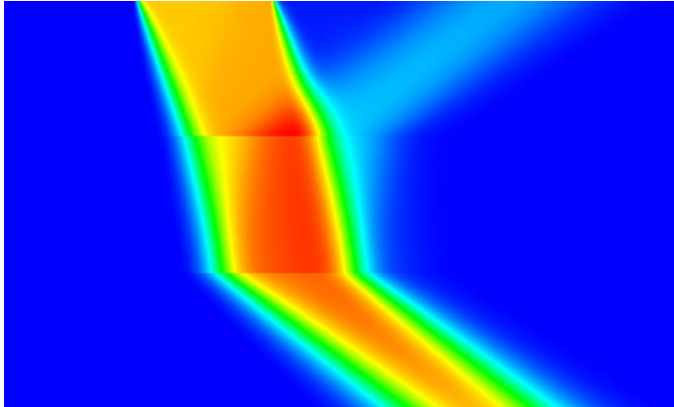
Model matematyczny ogniwa fotowoltaicznego został zbudowany z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS. Spośród modeli promieniowania dostępnych w tym oprogramowaniu wstępnie wybrano modele Discrete Ordinate (DO) i Monte Carlo (MC). Aby jednoznacznie ocenić przydatność każdego z modeli do rozprzestrzeniania się promieniowania w ogniwie fotowoltaicznym zweryfikowano jak dokładnie są one w stanie przewidzieć kąt załamania światła na granicy faz. Geometrie obszarów obliczeniowych na potrzeby przeprowadzenia testów modeli DO i MC, zostały przygotowane tak, aby było łatwo zaobserwować kąt załamania. Analizy dla modelu dwuwymiarowego zostały przeprowadzone na prostej, trójwarstwowej próbce wykonanej w oprogramowaniu ANSYS DesignModeler, w której każda z warstw ma 100 μm szerokości oraz 20 μm wysokości. Na górnej krawędzi modelu w odległości 20 μm od osi Y utworzono wycinek tej krawędzi o długości 20 μm który emituje promieniowanie. Dla analizowanej dwuwymiarowej geometrii przeznaczonej została utworzona siatka numeryczna w oprogramowaniu ANSYS Mesher o wielkości elementu 0,5 μm .

Jako, że w oprogramowaniu Ansys Fluent zjawisko promieniowania jest traktowane jako zjawisko trójwymiarowe, na potrzeby testów efektywności modeli promieniowania przygotowano również model trójwymiarowy. W modelu tym której każda z warstw ma 100 μm szerokości oraz 20 μm wysokości, a także 0,5 μm grubości. Na

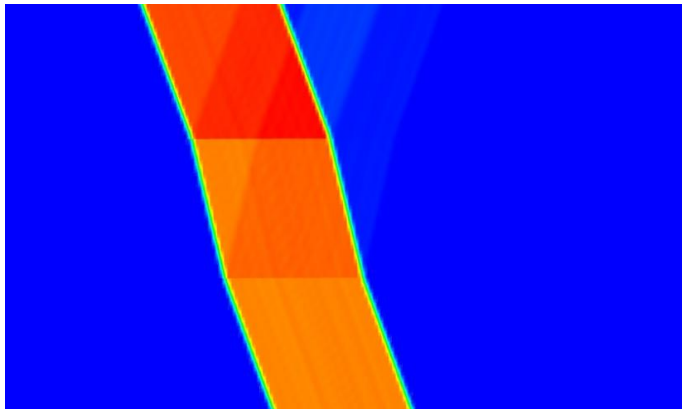
górnjej krawędzi modelu w odległości 20 μm od osi Y utworzono płaszczyznę o długości 20 μm i szerokości równej grubości warstw, jest to płaszczyzna która emituje promieniowanie. Dla trójwymiarowej geometrii została utworzona siatka numeryczna w oprogramowaniu ANSYS Mesher o wielkości 0,5 μm .

Metody modelowania promieniowania (MC i DO) zbadano przy identycznych ustawieniach obliczeń. Wykonane zostały 3 próby dla każdego modelu. W symulacjach założono współczynnik załamania światła wynoszący 1 – dla górnjej oraz dolnej warstwy (co odpowiada próżni lub powietrzu), natomiast dla środkowej przyjęto wartość współczynnika wynoszącą 1,5 (co odpowiada warstwie szkła). Model w założeniu ma obrazować efekt załamania światła oraz wewnętrznego odbicia przy przejściu pomiędzy ośrodkami o różnych prędkościach rozchodzenia się fali świetlnej.

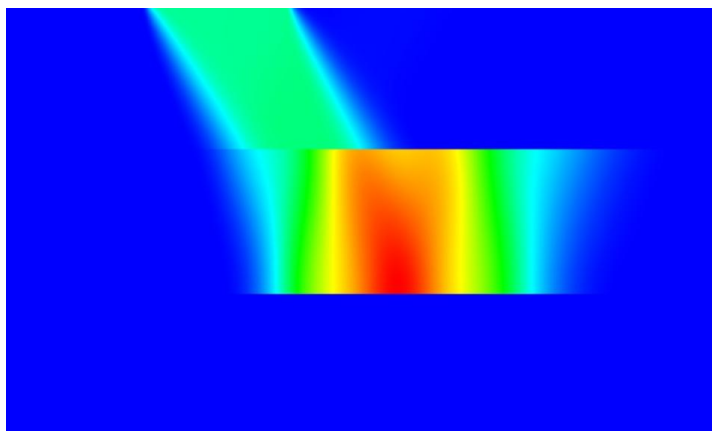
W pierwszych analizach (rys. 2 i 3) założono, że światło pada na szkło pod kątem 20 stopni w stosunku do normalnej do powierzchni szkła. W kolejnych przypadkach (rys. 4 i 5) kąt ten wynosił 30 stopni. Natomiast w 3 próbie dla każdej z metod modelowania promieniowania (rys. 6 i 7) kąt ten wynosił odpowiednio 40 stopni względem normalnej do powierzchni szkła.



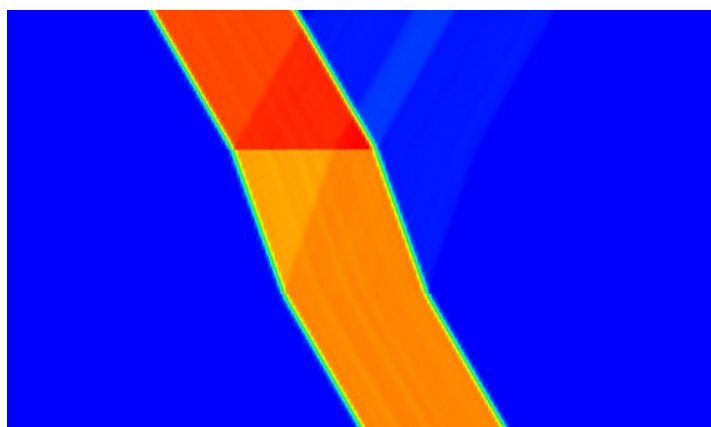
Rysunek 2. Wyniki analizy dla metody DO, gdzie światło pada na szkło pod kątem 20 stopni w stosunku do normalnej do powierzchni szkła



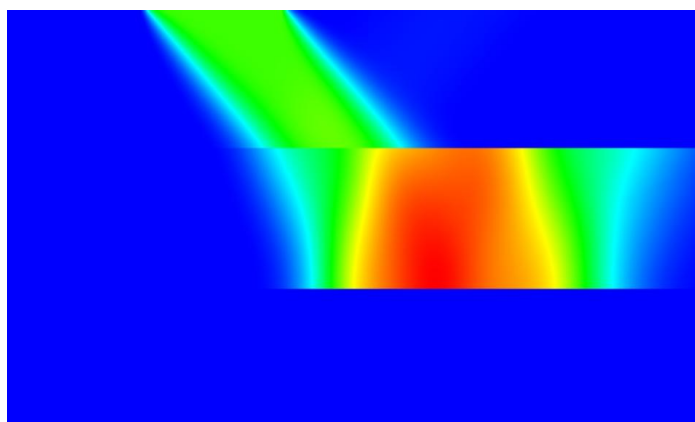
Rysunek 3. Wyniki analizy dla metody MC, gdzie światło pada na szkło pod kątem 20 stopni w stosunku do normalnej do powierzchni szkła.



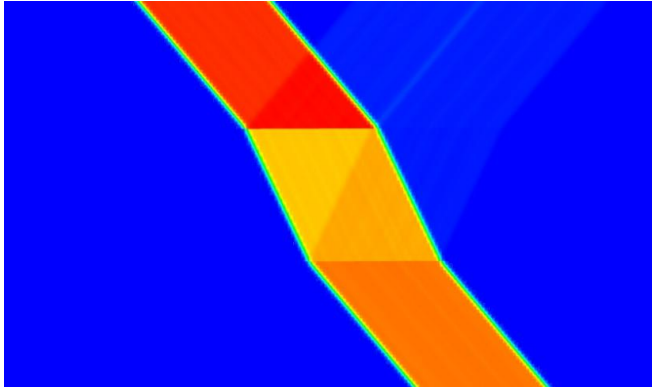
Rysunek 4. Wyniki analizy dla metody DO, gdzie światło pada na szkło pod kątem 30 stopni w stosunku do normalnej do powierzchni szkła.



Rysunek 5. Wyniki analizy dla metody MC, gdzie światło pada na szkło pod kątem 30 stopni w stosunku do normalnej do powierzchni szkła.



Rysunek 6. Wyniki analizy dla metody DO, gdzie światło pada na szkło pod kątem 40 stopni w stosunku do normalnej do powierzchni szkła.

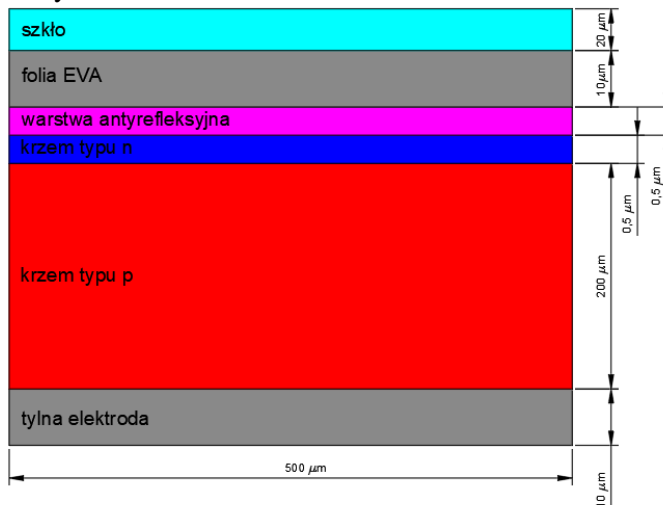


Rysunek 7. Wyniki analizy dla metody MC, gdzie światło pada na szkło pod kątem 40 stopni w stosunku do normalnej do powierzchni szkła.

Przeprowadzone analizy pokazały, że model DO nie jest w stanie odwzorować załamania promieni słonecznych zgodnie z prawem Snella. Ponadto można zaobserwować występowanie całkowitego wewnętrznego odbicia w zakresie kątów dla których nie powinno mieć ono miejsca. Analizy przeprowadzone dla metody Monte Carlo pokazały bardzo dobrą zgodność wyników z prawem Snella. Podsumowując przeprowadzone analizy, do obliczeń promieniowania rozchodzącego się w strukturze rzeczywistego panelu fotowoltaicznego wykorzystana została metoda Monte Carlo.

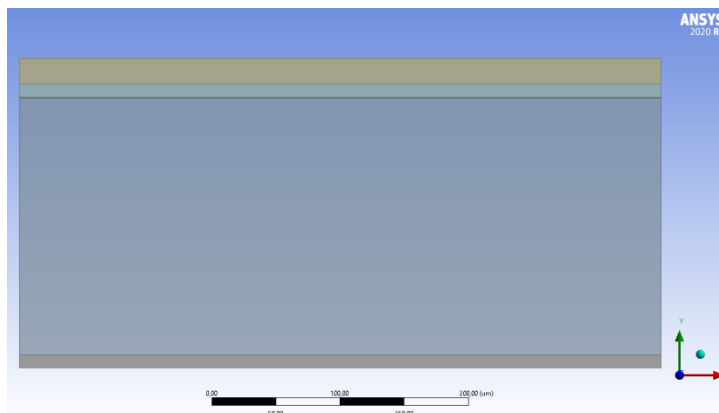
6. Model numeryczny ogniwa fotowoltaicznego

Trójwymiarowy model wycinka z ogniwa fotowoltaicznego został wykonany z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS DesignModeler. Jest to model mikroskopowy wycinka ogniwa wykonanego z krzemu monokrystalicznego. Model uwzględnia część warstwy szkła powyżej folii EVA, natomiast górne złącze zostało w nim pominięte. Schemat budowy ogniwa fotowoltaicznego wraz z wymiarami została zaprezentowana na rysunku 8.

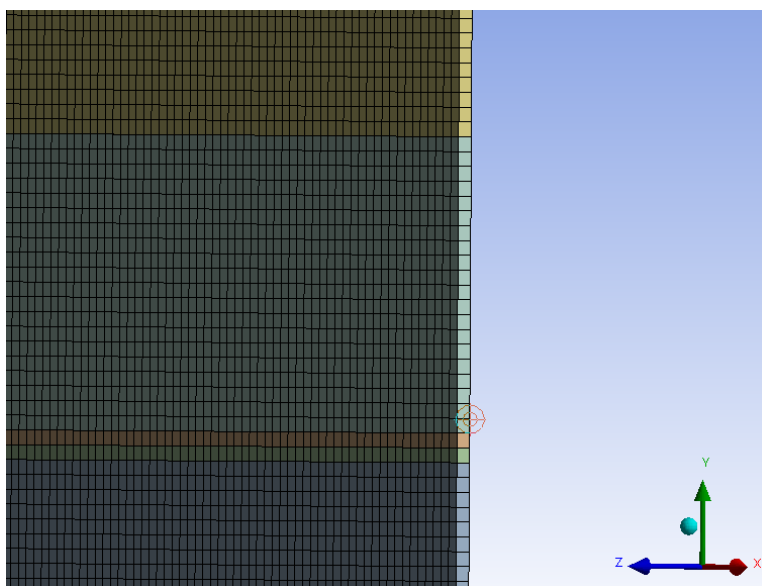


Rysunek 8. Schematyczna budowa wycinka ogniwa wraz z wymiarami

Na rysunku 9 został przedstawiony model wykonany w oprogramowaniu ANSYS DesignModeler, każda z warstw pokazuje wymiary wycinka rzeczywistego ogniwa, w konsekwencji warstwa krzemu typu n oraz warstwa antyrefleksyjna są słabo widoczne, dlatego przyjęte wymiary pokazano na rysunku 8. Ze względu na niewielkie grubości poszczególnych warstw tworzących ogniwo fotowoltaiczne i relatywnie duże wymiary samego ogniwa, model geometryczny na potrzeby obliczeń został ograniczony do niewielkiego wycinka o grubości $0,5 \mu\text{m}$ (porównaj rys. 8). Obszar obliczeniowy został podzielony siatką numeryczną sześcienną o długości boku $0,5 \mu\text{m}$ (porównaj rys. 9). Co dało model składający się z 482000 komórek.



Rysunek 9. Model wycinka ogniwa fotowoltaicznego przygotowany w programie ANSYS DesignModeler



Rysunek 10. Siatka numeryczna badanej próbki

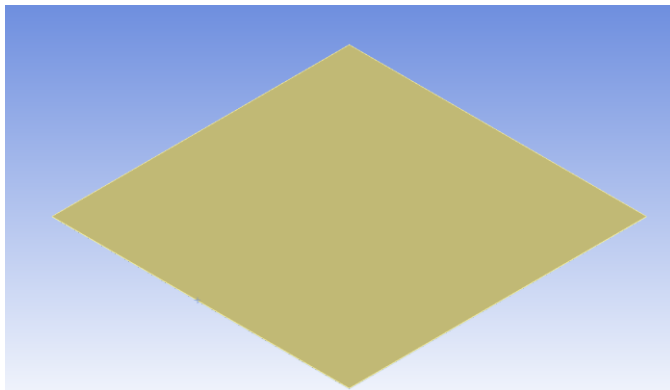
Obliczenia były prowadzone w sposób ustalony. W modelu uwzględniono równanie energii, natomiast promieniowanie zostało zamodelowane wykorzystując metodę

Monte Carlo. W tym modelu, kluczowym parametrem jest liczba śledzonych „fotonów” lub paczek fotonów (charakteryzowanych przez tę samą długość fali oraz kąt rozprzestrzeniania się), w przeprowadzonych obliczeniach wielkość ta wynosiła 2000000 i była kompromisem pomiędzy dokładnością obliczeń oraz możliwościami obliczeniowymi komputera na którym realizowane były obliczenia.

W ustawieniach „modelu ciała nieszarego” został wprowadzony podział na 8 zakresów długości fal, takich jak przedstawiono w tabeli 2.

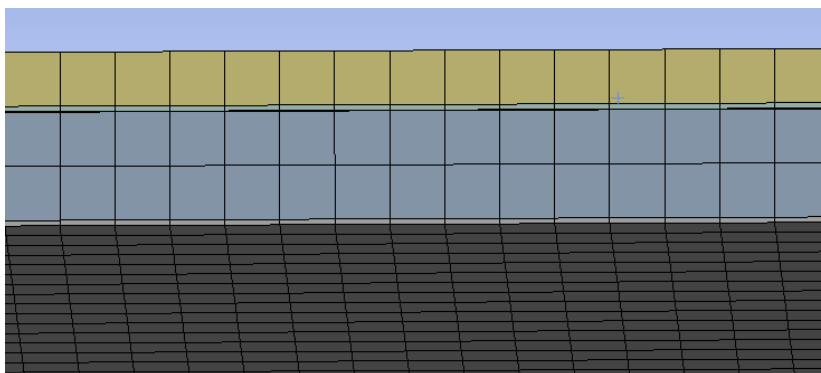
Dane o materiałach zostały zaimportowane z bazy materiałów GRANTA MDS Database, dodatkowo współczynniki załamania światła w materiałach przyjęto takie jak w tabeli 1. Dla materiału krzemu dodano współczynniki absorpcyjności dla poszczególnych fal zgodne z wartościami w tabeli 4. Wszystkie warstwy w opracowanym modelu matematycznym uczestniczyły w promieniowaniu i traktowane były jako półprzezroczyste, co więcej odbicia promieniowania zamodelowano jako w pełni lustrzane. Na zewnętrznych warunkach brzegowych obszaru obliczeniowego, poza górną powierzchnią, założono stałą wartość temperatury wynoszącą 10 K, tak aby zminimalizować strumień promieniowania dyfuzyjnego emitowanego przez te powierzchnie.. Ponadto na tych powierzchniach przyjęto emisyjność równą 1. Na górnej powierzchni założono skupiony strumień promieniowania o rozkładzie odpowiadającym promieniowaniu Słońca i kierunku odpowiadającym średnim warunkom świetlnym w naszym kraju [5, 7, 9]. Przy takich założeniach ilość promieniowania dyfuzyjnego jest pomijalnie mała, natomiast ilość promieniowania bezpośredniego emitowanego z tej powierzchni jest zgodna z wartościami w tabeli 3.

W dalszym etapie stworzono trójwymiarowy model pojedynczej celi ogniwa fotowoltaicznego. Model składa się z takich samych warstw jak model model uproszczony, a wymiary są zbliżone do rzeczywistego ogniwa. Jediną różnicą porównując ze standardową celą ogniwa fotowoltaicznego jest brak sfazowanych rogów jak na rysunku 11, zabieg ten zastosowano aby możliwe było zastosowanie siatki sześcienniej o wysokiej jakości. Zaprezentowany model numeryczny jest znacznie dokładniejszej od siatek numerycznych dostępnych w literaturze dla zastosowań modeli PV i PV-T w analizach CFD[6].



Rysunek 11. Model pojedynczej celi ogniwa fotowoltaicznego opracowany z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS DesignModeler

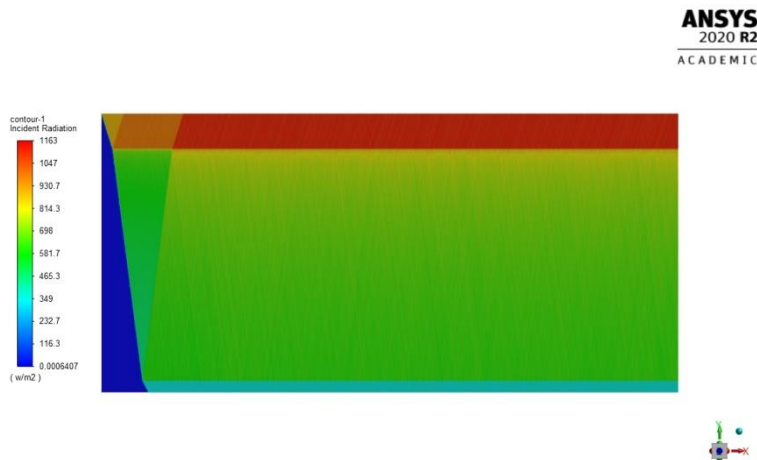
Siatka numeryczna utworzona na potrzeby symulacji pojedynczej celki składa się z około 11 miliona elementów. W cieńszych warstwach komórki mają mniejszą grubość niż w warstwach grubszych (porównaj rys. 12 i 13).



Rysunek 13. Siatka numeryczna na krawędzi ogniwa

7. Wyniki

Na rysunku 14 zostały przedstawione wyniki symulacji przedstawiające rozkład intensywności promieniowania we wszystkich długościach fal we wnętrzu próbki mikroskopowej (intensywność promieniowania policzona jako całka po wszystkich kierunkach).

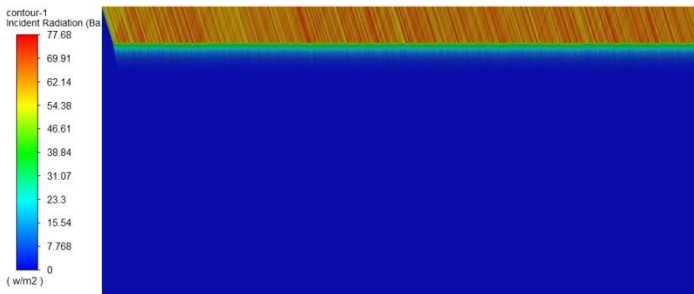


Rysunek 14. Promieniowanie we wszystkich długościach fal wewnątrz wycinka ogniwa

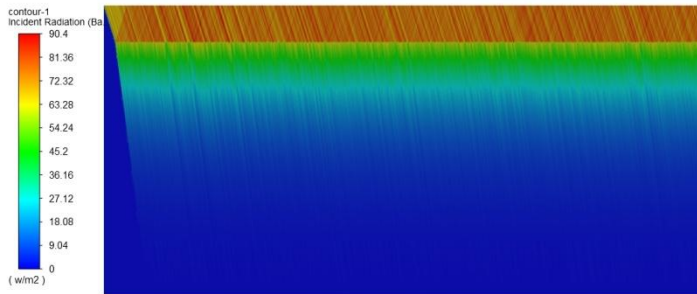
Jak wyżej zostało wspomniane, ze względu na silną zależność współczynnika absorpcji krzemu od długości fali na rysunkach 15-22 przedstawiono rozkład promieniowania o określonej wewnątrz ogniwa.



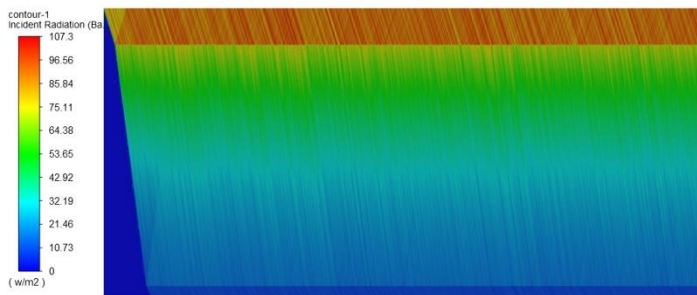
Rysunek 15. Promieniowanie w zakresie fal ultrafioletowych wewnątrz wycinka ogniwa



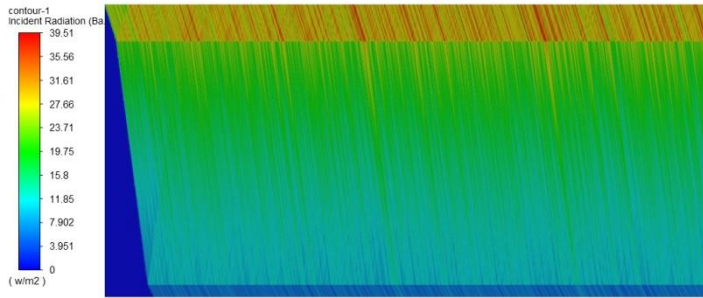
Rysunek 16. Promieniowanie w zakresie fal fioletowych wewnątrz wycinka ogniwa



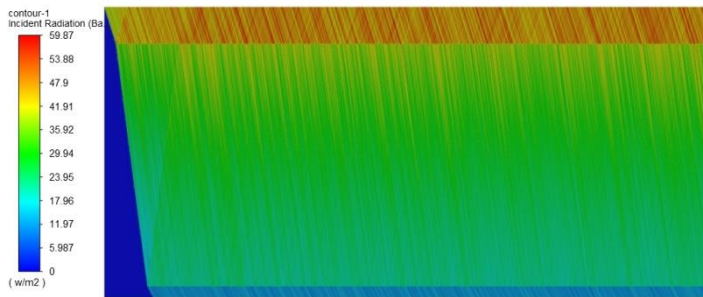
Rysunek 17. Promieniowanie w zakresie fal niebieskich wewnątrz wycinka ogniwa



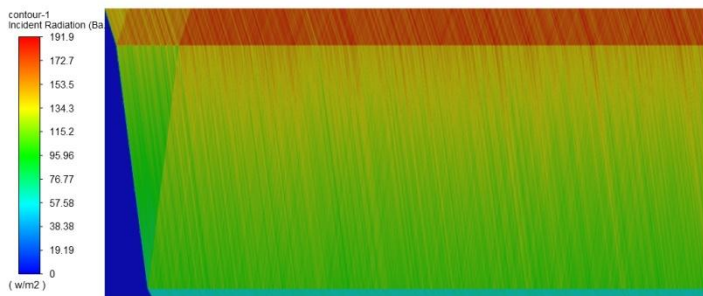
Rysunek 18. Promieniowanie w zakresie fal zielonych wewnątrz wycinka ogniwa



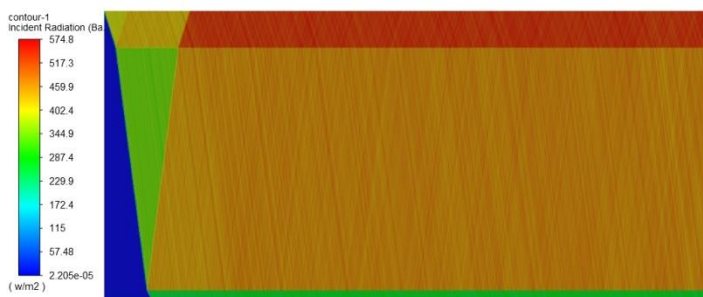
Rysunek 19. Promieniowanie w zakresie fal żółtych wewnątrz wycinka ogniwa



Rysunek 20. Promieniowanie w zakresie fal pomarańczowych wewnątrz wycinka ogniwa



Rysunek 21. Promieniowanie w zakresie fal czerwonych wewnątrz wycinka ogniwa



Rysunek 22. Promieniowanie w zakresie fal podczerwonych wewnątrz wycinka ogniwa

Można zaobserwować, że najsilniej pochłaniane jest promieniowanie krótkofalowe, natomiast promieniowanie podczerwone jest silnie przenikliwe. W tabeli 5 została przedstawiona ilość promieniowania zaabsorbowana w krzemie, która w przybliżeniu można traktować jako ilość energii wytworzoną z tego wycinka ogniwa.

Tabela 5 Ilość energii pochłoniętej w krzemie

Całkowita ilość energii pochłonięta w warstwie krzemie	W
W warstwie typu n	8,38721e-09
W warstwie typu p	7,45364e-08
Sumarycznie w obu warstwach	8,29236e-08

Tabela 6 przedstawia strumień energii promieniowania padający na powierzchnię ogniwa.

Tabela 6 Promieniowanie emitowane ze źródła zewnętrznego

Całkowita ilość promieniowania emitowanego ze źródła	<i>W</i>
Źródło 1	2,73056e-07

Sprawność optyczną ogniwa można oszacować z następującego wzoru:

$$\eta = \frac{\text{Energia zaabsorbowana w układzie}}{\text{Energia która została doprowadzona do układu}} \quad (8)$$

Podstawiając wielkości wyznaczone w symulacji wyznaczono przybliżoną sprawność ogniwa (tabela 7).

Tabela 7 Przybliżona sprawność optyczna zamodelowanego wycinka ogniwa

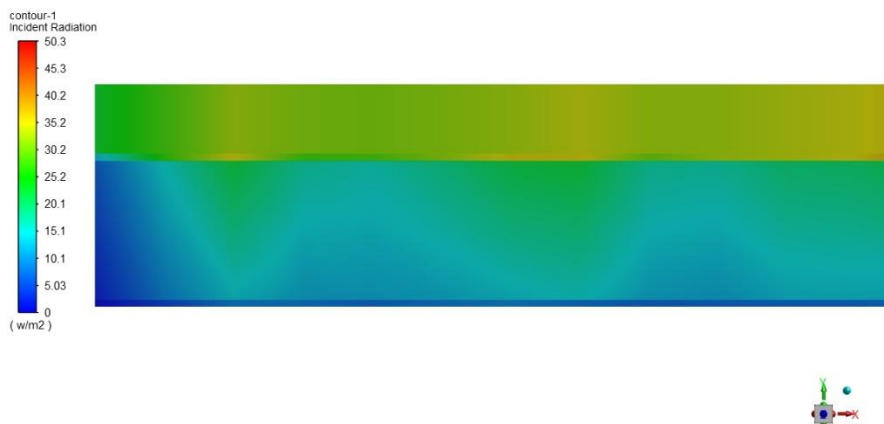
Strumień promieniowania wyemitowanego ze źródła	2,73E-07	<i>W</i>
Strumień promieniowania zaabsorbowanego w krzemie	8,29E-08	<i>W</i>
Przybliżona sprawność optyczna wycinka ogniwa	0,3036	-

Na rysunkach 23-25 zostały przedstawione wyniki symulacji przedstawiające rozkład intensywności promieniowania dla kilku długości fal elektromagnetycznych we wnętrzu pojedynczej celi ogniwa fotowoltaicznego.

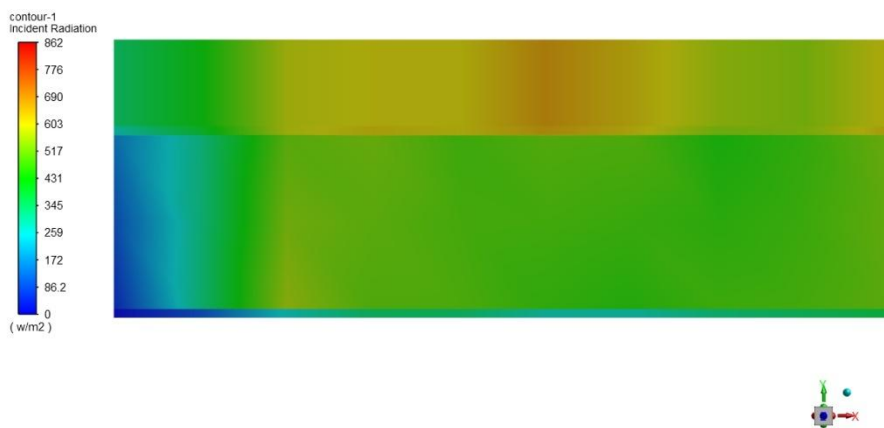
ANSYS
2020 R2



Rysunek 23. Promieniowanie w zakresie fal ultrafioletowych wewnątrz modelu ogniwa



Rysunek 24. Promieniowanie w zakresie fal żółtych wewnątrz modelu ogniwa



Rysunek 25. Promieniowanie w zakresie fal podczerwonych wewnątrz modelu ogniwa

W tabeli 8 została przedstawiona ilość promieniowania zaabsorbowana w krzemie, w makroskopowym modelu ogniwa.

Tabela 8 Ilość energii pochłoniętej w krzemie w makroskopowym modelu

Ilość energii zaabsorbowana w warstwie krzemu dla konkretnej fali	W
Ultrafiolet	1,397593
Fiolet	0,87927
Niebieski	0,96726
Zielony	0,99154
Żółty	0,25982
Pomarańczowy	0,36548
Czerwony	0,85445
Podczerwony	0
Sumarycznie	5,715413

Tabela 9 pokazuje strumień energii promieniowania wyemitowanej z powierzchni którą przyjęliśmy jako źródło zewnętrznego promieniowania w analizowanym modelu ogniwa.

Tabela 9 Promieniowanie emitowane ze źródła zewnętrznego

Ilość energii wyemitowana dla konkretnej fali	W
Ultrafiolet	1,7101664
Fiolet	1,1114
Niebieski	1,3189
Zielony	1,5695
Żółty	0,51193
Pomarańczowy	0,82454
Czerwony	2,9471
Podczerwony	9,2146
Sumarycznie	19,20814

Podstawiając otrzymane w symulacji dane do wzoru 8 przybliżona sprawność optyczna modelu ogniwa została przedstawiona w tabeli 10.

Tabela 10 Przybliżona sprawność optyczna modelu celi ogniwa fotowoltaicznego.

Strumień promieniowania wyemitowanego ze źródła	19,20814	W
Strumień promieniowania zaabsorbowanego w krzemie	5,715413	W
Przybliżona sprawność optyczna wycinka ogniwa	0,297552	-

8. Wnioski i plan na przyszłą pracę

Zaprezentowany model ogniwa w sposób przybliżony odwzorowuje strukturę ogniwa fotowoltaicznego. W opracowanym modelu matematycznym przyjęto, że tylko krzem absorbuje promieniowanie. W rzeczywistości każdy z materiałów oddziałuje z promieniowaniem, w różnym stopniu – w przyszłych modelach planuje się rozszerzyć opracowywany model matematyczny (między innymi o własności materiałów wg [8]). W rzeczywistości występuje odbicie od górnej powierzchni szkła, które mimo warstwy antyrefleksyjnej zmniejsza ilość docierającego promieniowania do wewnętrznej warstwy szkła [6]. Obecne w rzeczywistych panelach teksturowanie powierzchni krzemu, które zwiększa sprawność, zostało pominięte. Dzięki zastosowaniu metody Monte Carlo możemy zaobserwować załamanie fal promieniowania wewnątrz ogniwa

zgodnie z prawami optyki, a w ramach dalszych prac planuje się zasymulować również odpowiednie odbicie od powierzchni. Koncepcja wykorzystania narzędzi symulacyjnych w pracy, zostanie w przyszłości wykorzystana do badania innych ogniw wykonanych z innych materiałów oraz różnej technologii. Możliwe jest również rozszerzenie o analizę przepływu ciepła na potrzeby modeli PV-T czy kolektorów. Wyznaczona sprawność optyczna modułu PV z wykorzystaniem modelu uproszczonego oraz modelu pojedynczego ogniwa PV zarówno w przypadku modelu uproszczonego, jak i model pojedynczej celi PV jest znacząco wyższa od rzeczywistej sprawności osiąganey w badaniach eksperymentalnych. Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że istotny wpływ na ostateczny wynik ma odpowiednio dokładna siatka, a także ilość promieni wysyłanych z powierzchni emitującej promieniowanie. Jest to szczególnie zauważalne w przypadku promieniowania o długości fal w zakresie, w którym była wysyłana mała ilość ogółu energii. Podejście do modelowania ogniwa fotowoltaicznego zaprezentowane w niniejszej pracy, nie było wcześniej przedstawione w żadnej publikacji, która mogłaby posłużyć jako rozwiązanie odniesienia, stąd też konieczna była weryfikacja modelu, który jest w stanie w rzeczywistości odwzorować Prawo Snella.

Stosując opracowane narzędzie symulacyjne, można w fazie projektowej uniknąć wielu błędów konstrukcyjnych oraz dobrać m.in. odpowiednią grubość poszczególnych warstw materiałów w ogniwie, a także sprawdzać jak wpływa zastosowanie nowego materiału w miejsce starego o innych właściwościach.

Literatura

1. *Rynek Fotowoltaiki w Polsce 2020*, Edycja VII, Czerwiec 2020, Instytut energetyki odnawialnej – www.ieo.pl – 04.12.2020.
2. Laboratorium Inżynierii Materiałowej, Katedra Urządzeń Elektrycznych i TWN, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska, *Podstawy teoretyczne do ćwiczenia nr 8 „Badanie właściwości optycznych półprzewodników”*.
3. *Optical properties of silicon*, <https://www.pveducation.org/pvcdrom/materials/optical-properties-of-silicon>, 05.12.2020.
4. Necati Ozisik M., *Heat transfer a basic approach*, McGraw-Hill Book Company, 1985.
5. Bhattarai S., *Simulation and model validation of sheet and tube type photovoltaic thermal solar system and conventional solar collecting system in transient states*, doi:10.1016/j.solmat, 2012, 04, 017.
6. Maadia S.R., Khatibi M., *Coupled thermal-optical numerical modeling of PV/T module – Combining CFD approach and two-band radiation DO model*, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111781>.
7. Crisostomo F., Taylor R.A., Surjadi D., Mojiri A., Rosengarten G., Hawkes E.R., *Spectral splitting strategy and optical model for the development of a concentrating hybrid PV/T collector*, *Applied Energy*, doi:10.1016/j.apenergy, 2014, 12, 044, 2015.
8. Abdolzadeh M., Zarei T., *Optical and thermal modeling of a photovoltaic module and experimental evaluation of the modeling performance*, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, doi:10.1002/ep.12493, 2016.
9. Zajkowski M., Prorok M., *Analiza propagacji promieniowania słonecznego w systemach solarnych typu „zimny dach”*, doi:10.15199/48.2015.07.26, 2015.

Opracowanie modelu numerycznego ogniwa fotowoltaicznego

Streszczenie

Zakres tematyczny pracy obejmuje tematy takie jak promieniowanie, optyka oraz rozbudowany temat szeroko pojętej fotowoltaiki. Celem pracy było stworzenie symulacji oddziaływania promieniowania wewnątrz ogniwa fotowoltaicznego przy pomocy oprogramowania CFD. W ramach pracy, w oprogramowaniu ANSYS opracowano trójwymiarowy model optyczny wycinka ogniwa fotowoltaicznego wykonanego z monokryształu krzemu, w którym wszystkie warstwy modułu były symulowane z ich rzeczywistymi właściwościami optycznymi. W celu zwiększenia dokładności modelu i aby uchwycić rzeczywistą absorpcję promieniowania w krzemie, symulowane promieniowanie docierające do ogniwa zostało sklasyfikowane pod kątem długości fali oraz ilości energii docierającej do ogniwa w danym zakresie. W ramach pracy została zweryfikowana dokładność modelu Discrete Ordinate (DO) oraz Monte Carlo w oprogramowaniu ANSYS Fluent pod kątem rzeczywistego przedstawiania prawa Snella. Wyniki pokazują w sposób rzeczywisty zachowanie się promieniowania wewnątrz ogniwa, a także stwarzają możliwość dalszej rozbudowy modelu w celu zwiększenia dokładności odwzorowywania natury. Z pracy wynika, że wykonanie takiej symulacji przy pomocy oprogramowania CFD jest możliwe, do dalszych prac zakładać można używanie wyłącznie modelu Monte Carlo. Zastosowanie praktyczne tego rodzaju symulacji może przekładać się w przyszłości do przyspieszenia procesu projektowania ogniw oraz eliminację błędów konstrukcyjnych.

Słowa kluczowe: Ogniwo fotowoltaiczne, Promieniowanie, Optyka w fotowoltaice, Obliczeniowa dynamika płynów (CFD), Monte Carlo model

Development of a numerical model of a photovoltaic cell

Abstract

The thematic scope of the work covers topics such as radiation, optics and an extensive topic of widely understood photovoltaics. The aim of the work was to simulate the impact of radiation inside a photovoltaic cell using CFD software. As part of the work, the ANSYS software developed a three-dimensional optical model of a photovoltaic cell segment made of a single silicon crystal, in which all layers of the module were simulated with their real optical properties. In order to increase the accuracy of the model and to capture the actual absorption of radiation in silicon, the simulated radiation reaching the cell has been classified according to wavelength and the amount of energy reaching the cell in a given range. As part of the work, the accuracy of the Discrete Ordinate (DO) and Monte Carlo models in the ANSYS Fluent software was verified in terms of the actual representation of Snell's law. The results show the actual behavior of radiation inside the cell, and also make it possible to further expand the model to increase the accuracy of mapping nature. The work shows that it is possible to perform such a simulation using the CFD software, for further work it is possible to use only the Monte Carlo model. The practical application of this type of simulation may translate into acceleration of the cell design process and elimination of design errors in the future.

Keywords: Photovoltaic cell, Radiation, Optics in photovoltaics, Computational fluid dynamics (CFD), Monte Carlo model

Wykorzystanie techniki POD (*Proper Orthogonal Decomposition*) do modelowania turbin wiatrowych

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach elektrownie wiatrowe zyskują na popularności. Przyczyn zwiększonego zainteresowania jest kilka, jedną z nich są względy ekonomiczne, chęć poszukiwania alternatywnych źródeł energii. Kolejną czynnikiem są regulacje ze strony Unii Europejskiej, które wymuszają na krajach członkowskich wzrost udziału odnawialnych źródeł energii w energetyce krajowej, w tym turbin wiatrowych, dla których prowadzone są szeroko zakrojone analizy numeryczne pozwalające na określenie ich optymalnych parametrów pracy [1].

Opracowanie modelu zredukowanego turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu na podstawie wcześniejszej analizy numerycznej, pozwala na stosunkowo szybką analizę wpływu zmian kształtu geometrycznego płata turbiny i skutków tych zmian na efektywność jej działania. Modele zredukowane umożliwiają nie tylko skrócenie czasu obliczeniowego, ale także wyznaczenie podstawowych parametrów pracy turbiny takich jak moment obrotowy przy zaangażowaniu dużo mniejszych zasobów obliczeniowych niż ma to miejsce w przypadku pełnoskalowych obliczeń numerycznej mechaniki płynów (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) [2].

Istnieją różne sposoby opracowywania modeli zredukowanych, począwszy od metod aproksymacji funkcjami bazowymi np. radialnymi funkcjami bazowymi (RBF – *Radial Basis Functions*) czy wykorzystujące metody rzutowania na podprzestrzenie. W przedstawionych badaniach wykorzystano metodę opartą na właściwej dekompozycji ortogonalnej, która może być zaliczona do drugiej grupy metod.

2. Ustawienia i parametry obliczeniowe

2.1. Geometria

Analizie numerycznej poddany został dwuwymiarowy model turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu z trzema łopatkami. Łopatka turbiny oparta została na 9 punktach bazowych, na których za pomocą funkcji sklepanych została rozpięta geometria łopatki. Bazowe współrzędne pochodzą z modelu łopatki NACA-0018.

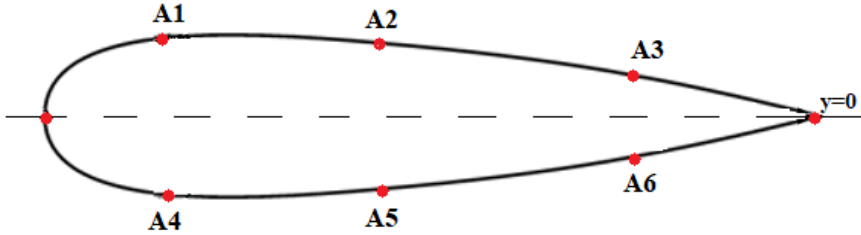
Dla poszukiwania optymalnego kształtu łopatki turbiny, przy którym jej wydajność będzie największa, punkty bazowe (parametry) kolejno A1, A2, A3, A4, A5 oraz A6 zostały przesunięte o 20% odległości danego punktu od $y=0$ (współrzędne na osi x nie zostały zmienione) w górę i dół co zostało przedstawione na rysunku 1. Ostatecznie

¹ Maciej Bara, Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska, www.polsl.pl.

² Zbigniew Buliński, Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska, www.polsl.pl.

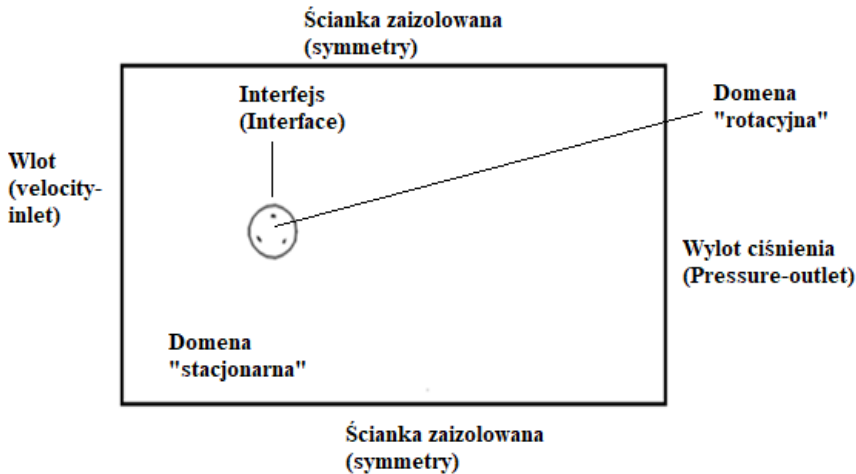
³ Piotr Elias, Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska, www.polsl.pl.

analizie numerycznej zostało poddane 14 różnych kształtów łopatki: 12 modeli będąc wynikiem różnych kombinacji zmian współrzędnych parametrów, model porównawczy o przesuniętych punktach (A1 - +15%, A2 - +6%, A3 - +0%, A4 - 8%, A5 - -5%, A6 - +12%) oraz model bazowy oparty na modelu NACA-0018.



Rysunek 1. Profil łopatki turbiny NACA-0018 oraz koncepcja zmiany położenia punktów sparametryzowanych ; A1, A2, A3, A4, A5, A6 – punkty bazowe [opracowanie własne]

2.2. Domena obliczeniowa i warunki pracy turbiny



Rysunek 2. Schemat domeny obliczeniowej 2-wymiarowej turbiny z pionową osią obrotu [opracowanie własne]

Na rysunku 2 przedstawiono domenę obliczeniową wykorzystaną w przeprowadzonych symulacjach. Przepływ powietrza wokół turbiny można określić jako zewnętrzny, więc istotne jest określenie rozmiarów domeny obliczeniowej, jako że wpływa ona w sposób istotny na otrzymywane wyniki [3]. Nie prowadzono badań wrażliwości wpływu wymiarów domeny obliczeniowej na wynik symulacji, wymiary zostały określone na podstawie analiz przeprowadzonych przez innych naukowców [3]. Zewnętrzna domena obliczeniowa imitująca tunel aerodynamiczny ma kształt prostokąta o bokach 10x15 m co odpowiada 20x30 długości średnicy turbiny, w analizie została określona jako „stacjonarna”. Wewnętrzna domena obliczeniowa określona w modelu jako „obrotowa”, to okrąg o średnicy 0,75 m, czyli 1,5 długości średnicy. Dolna i górna

krawędź zewnętrznej domeny potraktowane zostały zaizolowane cieplnie (*symmetry*), natomiast krawędziom bocznym przypisany został warunek wlotu czynnika (powietrza) o zadanej prędkości (*velocity-inlet*) oraz wylot ciśnienia (*pressure-outlet*). Obwód okręgu wewnętrznej domeny obliczeniowej została określona jako interfejs (*interface*) [3].

Tabela 1. Parametry geometryczne oraz warunki pracy turbiny [opracowanie własne]

Symbol	Parametr	Jednostka	Wartość
c	Długość cięciwy	m	0,005
D	Średnica turbiny	m	0,5
H	Wysokość turbiny	m	1
n	Liczba łopatek turbiny	-	3
R	Promień turbiny	m	0,25
v	Prędkość płynu (powietrze)	m/s	10
λ	Współczynnik szybkobieżności	-	3

W tabeli 1 przedstawiono parametry geometryczne oraz warunki pracy turbiny. Na warunku pierwszego rodzaju zadano stałą prędkość płynu (powietrze) o wartości 10 m/s Na przeciwległym warunku ciśnieniowym zadano wylot ciśnienia przy założeniu, że wartość ciśnienie statycznego równa jest 0 Pa. Dla górnej i dolnej krawędzi domeny zastosowano warunek symetrii. Wewnętrznej domenie obliczeniowej zadano prędkość obrotową równą 120 rad/s, co w przeliczeniu wynosi około 1145 obrotów/minutę dla λ równego 3, obliczono to ze wzoru (1):

$$\omega = \frac{\lambda \cdot v}{R} \quad (1)$$

gdzie: ω – prędkość obrotowa $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$, v – prędkość płynu (powietrze) $\frac{\text{m}}{\text{s}}$, R – promień turbiny m.

W analizie numerycznej zastosowano schemat rozwiązania oparty na ciśnieniu (schemat sekwencyjny) ze względu na małe prędkości wokół łopatki turbiny. Zgodnie z badaniami prowadzonymi przez Abdolrahim Rezaeihaa, Hamid Montazeria, Bert Blockena z Eindhoven University of Technology w pracy wykorzystano model turbulencji Transition SST [3]. Wybrany został sprzężony schemat ciśnienie-prędkość typu SIMPLE (*Semi Implicit Method for Pressure – Linked Equations*) dla uzyskania stabilności obliczeń, brak znaczących różnic wyników w przypadku stosowania schematu Coupled. Do dyskretyzacji ciśnienia zastosowano metodę PRESTO. Dla pozostałych składowych równania przepływu oraz turbulencji wybrany został schemat dyskretyzacji drugiego rzędu [3].

Krok czasu stosowany w analizie numerycznej zmiennej w czasie obliczono z wzoru (2) i (3):

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2)$$

$$\Delta t = \frac{T}{720} \quad (3)$$

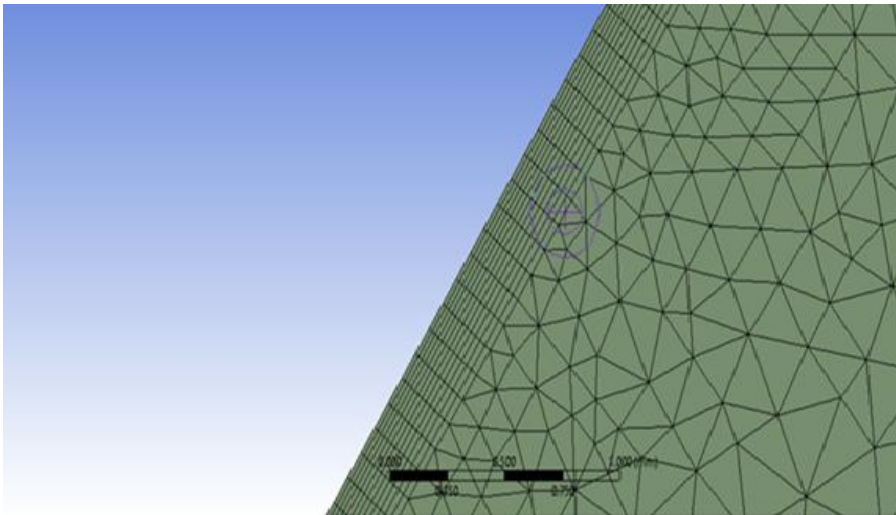
gdzie: T – okres czasu $\frac{1}{\text{s}}$, ω – prędkość obrotowa $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$, Δt – długość kroku czasu s.

Przy założeniu, że jeden pełny obrót wirnika to 720 kroków czasu, dla uzyskania miarodajnych wyników zasymulowano 20 obrotów, co daje 14 400 kroków czasu. Dla każdego kroku czasu, który wynosi 0,0000726 sekundy wykonano 20 iteracji.

2.3. Siatka obliczeniowa

Obliczenie przepływu płynu (powietrza) wokół turbiny wymaga rozwiązania równań przepływu. Podobnie występujące wokół łopatki zjawisko turbulencji wymaga rozwiązania równań Naviera-Stokesa. Konieczne do tego jest stworzenie odpowiedniej jakości siatki numerycznej, a jej generowanie polega na podzieleniu domeny obliczeniowej na mniejsze, nienakładające się na siebie komórki. Analiza numeryczna została przeprowadzona przy użyciu oprogramowania ANSYS Fluent zapewniającego dyskretyzację w przestrzeni i czasie równań różniczkowych opisujących przepływ płynu, a następnie ich rozwiązanie. Dyskretyzacja jest prowadzona metodą elementów skończonych (FVM – *Finite Volume Method*) [4].

Dla badanej turbiny istotne było dobre odwzorowanie zachowania wokół łopatki turbiny i przepływu płynu w warstwie przyściennej. Jakość siatki w warstwie przyściennej ma istotny wpływ na wartość momentu oraz rozkład wektorów prędkości. Struktura siatki w warstwie przyściennej przedstawiona została na rysunku 3. Współczynnik przejścia przyjął domyślną wartość 0,272, liczba warstw to 12, natomiast współczynnik wzrostu wynosił 1,2. Wielkość elementu w domenie wewnętrznej wynosiła 15 mm, a współczynnik wzrostu 1,05. Ostatni element warstwy nie może być znacznie większy od wielkości komórki domeny obracającej się, by uniknąć gwałtownego przejścia pomiędzy dwoma sąsiadującymi elementami siatki, co przedstawione zostało na rysunku 3. Domyślna wielkość elementu to 35 mm. Siatka numeryczna została w całości stworzona z elementów trójkątnych [3]. Siatka bazowego modelu NACA-0018 składa się z 461 869 elementów, jej średnia jakość ortogonalna to 0,95611, a skośność 0,6945.



Rysunek 3. Siatka numeryczna w warstwie przyściennej [opracowanie własne]

2.4. Zjawisko turbulencji

Turbulencja jest zjawiskiem powszechnie występującym w otaczającym nas świecie. Jej zrozumienie, przewidzenie oraz analiza skutków stanowi podstawę funkcjonowania wielu dziedzin nauki. Zjawisko turbulencji ma istotny wpływ na przepływ masy, pędu czy też energii. Przepływ turbulentny charakteryzuje się fluktuacjami przestrzennymi i czasowymi parametrów przepływu, z czym wiąże się zdolność intensywnego mieszania się, a co za tym idzie intensyfikacji wymiany masy, pędu i energii w przepływie turbulentnym. Energia kinetyczna tzw. dużych wirów (o największej energii) w przepływie turbulentnym wskutek ich rozpadu jest przekazywana mniejszym wirom, aż w końcu jest zamieniana na ciepło. To zjawisko nazywamy kaskadą energii, a wiry rozpadają się do momentu, w którym mniejsze już być nie mogą, gdyż ich rozmiary ograniczone są lepkością [5].

Ze względu na silnie nieustalony, trójwymiarowy i chaotyczny charakter przepływu turbulentnego, modelowanie tego typu przepływu jest niezwykle wymagającym zadaniem. Wyróżnia się trzy podstawowe metody modelowania przepływów turbulentnych: LES (*Large Eddy Simulation*), DNS (*Direct Numerical Simulation*) oraz URANS (*Unsteady Reynolds-Average Navier-Stokes Equations*). Pierwsze dwa podejścia dostarczają więcej szczegółów przepływu turbulentnego, jednak wiąże się to z dużym kosztem obliczeniowym tych metod. Powoduje to wykluczenie ich z modeli potencjalnie wykorzystanych do symulacji numerycznych pracujących turbin wiatrowych. W tej pracy wykorzystano podejście URANS, co wydaje się bardziej racjonalnym wyborem do modelowania przepływu wokół turbin wiatrowych [5]. Podstawą tego modelu jest uśrednienie wszystkich składowych równania Naviera-Stokesa, obejmujących równanie ciągłości (4) i pędu (5):

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u u) = -\nabla p + \nabla T + \rho \cdot g \quad (5)$$

gdzie: ρ – gęstość płynu $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, t – czas s, u – wektor prędkości płynu (powietrza) $\frac{\text{m}}{\text{s}}$, p – ciśnienie Pa, T – tensor naprężeń ścinających N, g – wektor siły grawitacji $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

3. Model zredukowany turbiny wiatrowej

3.1. POD (*Proper Orthogonal Decomposition*) – właściwa dekompozycja ortogonalna

Modele zredukowane stanowią skuteczną alternatywę dla zaawansowanych modeli matematycznych opartych na układach równań różniczkowych, których koszt obliczeniowy jest zazwyczaj bardzo wysoki. Modele zredukowane można podzielić na dwie grupy: modele typu fenomenologicznego oraz oparte na bezpośredniej redukcji danych. W pierwszym typie modeli zredukowanych parametr wejściowy jest modelowany za pomocą równań różniczkowych. W modelach fenomenologicznych stosowane są samowzbudzające oscylatory, które modelują np. zakres pracy serca czy obwody RLC. Bezpośrednie podejście wymaga dekompozycji ortogonalnej – POD (*Proper Orthogonal Decomposition*), tworzące zredukowane funkcje bazowe [6]. W badaniu zastosowano funkcje radialną (IMQD – *Inverse Multi Quadric*) wzór (6):

$$\varphi(\|x-x_i\|) = \frac{1}{\sqrt{\|x-x_i\| + c}} \quad (6)$$

gdzie: $\|x - x_i\|$ to odległość od punktu.

Metoda oparta na bezpośredniej redukcji danych znalazła zastosowanie w modelowaniu siły aerodynamicznych czy turbulencji oraz jej zaburzeń [3]. Dekompozycji ortogonalnej dokonuje się według wartości osobliwych, czyli SVD (*Singular Value Decomposition*), jest to rozkład pewnej macierzy na iloczyn trzech specjalnych macierzy. Każdą macierz Y można przedstawić w postaci rozkładu SVD (7):

$$Y = U\Sigma V^T = UA \quad (7)$$

gdzie U ($m \times n$ lub $m \times m$) i V ($n \times n$) – macierze to ortogonalne, Σ ($m \times n$ lub $n \times n$) – macierz diagonalna stworzona z wartości osobliwych macierzy Y , A – macierz amplitudy, m – liczba w wierszy, n – liczba kolumn macierzy Y .

Macierz Y jest macierzą nieosobliwą o wymiarach ($m \times n$), możemy dobrać tak macierz U i V , żeby jej wartości były osobliwe, czyli dodatnie. Układ, czyli model matematyczny traktujemy jako „czarną skrzynkę”, w pierwszym etapie rozwiązujemy wielokrotnie pełny zestaw równań modelu, aby zarejestrować jego odpowiedź dla parametrów wejściowych. Parametry wejściowe i wartości wyjściowe są ze sobą skorelowane, ponieważ pochodzą z tego samego układu fizykalnego [7].

3.2. Model zredukowany turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu

Redukcja danych jest efektywnym narzędziem pozwalającym określić wydajność pracy turbiny oraz poznanie wartości momentu obrotowego dla różnych właściwości geometrycznych. Model zredukowany stworzony został na podstawie danych z obliczeń numerycznych CFD. Pozwoliło to na stworzenie bazy parametrów (zmiana współrzędnych punktów, na których rozpięty jest profil turbiny), tym samym obliczenie wydajności turbiny VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*) Pozwoliło porównać jej działanie z innymi parametrami wejściowymi bez konieczności prowadzenia każdorazowej analizy numerycznej CFD [7].

Model parametryczny stworzony z wykorzystaniem oprogramowania Matlab składał się z macierzy parametrów (współrzędnych punktów bazowych) oraz macierzy składników (wartości momentu chwilowego w trakcie ostatniego obrotu turbiny dla 13 kombinacji kształtu łopatki turbiny). Macierz parametrów ma wymiary 6×13 – 6 wierszy dla współrzędnych punktów bazowych, 13 kolumn dla każdej kombinacji kształtu łopatki. Macierz obrazów ma wymiary 720×13 – 720 wierszy reprezentuje liczbę kroków czasu odpowiadających jednemu obrotowi turbiny. W analizowanym przypadku jest to ostatni obrót turbiny oraz 13 kolumn dla każdej kombinacji kształtu łopatki.

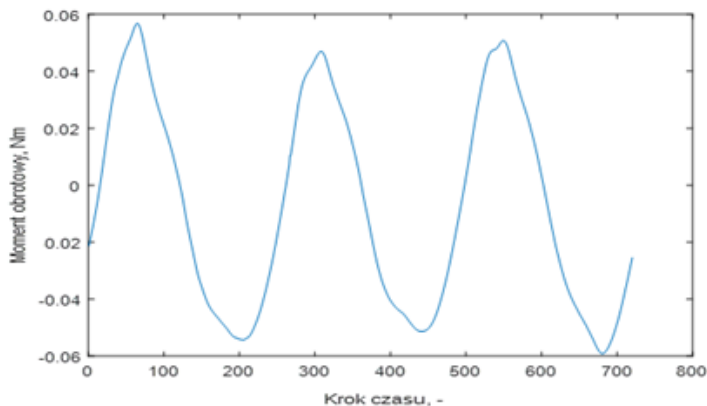
Kolejną przeprowadzoną została dekompozycja ortogonalna, gdzie zastosowano radialną funkcję bazową odwrotnie wielokwadratową (IMQD). Dla porównania błędu obliczania wartości momentu przy użyciu bazy modelu zredukowanego, analizie numerycznej poddany został model porównawczy opisany w podrozdziale 2.1. W wyniku czego utworzone zostały kolejne macierze: macierz obrazów dla wartości momentu chwilowego dla przeliczonego modelu porównawczego o wymiarach 720×1 - 720 wierszy reprezentuje ilość kroków czasu odpowiadających jednemu obrotowi turbiny, w analizowanym przypadku jest to ostatni obrót turbiny oraz 1 kolumna dla jednego

modelu. Druga macierz parametrów ma wymiary $6 \times 1 - 6$ wierszy dla współrzędnych punktów bazowych, 1 kolumna dla jednego modelu

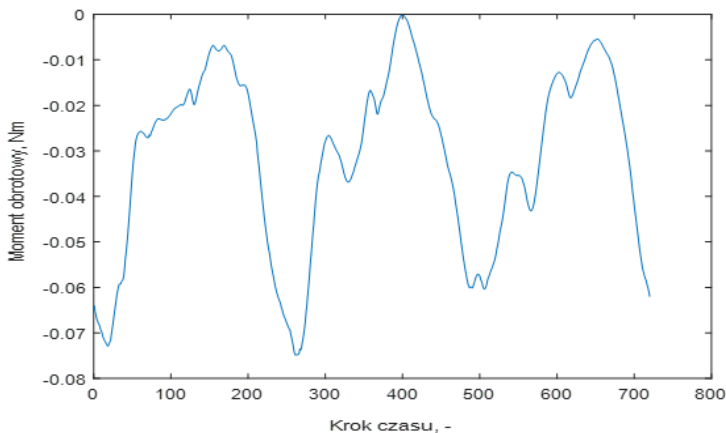
Jednym z parametrów wpływających na jakość interpolacji wielowymiarowej jest parametr kształtu c będący elementem wyprowadzonego wzoru radialnych funkcji bazowych. Wraz ze wzrostem tego parametru dokładność interpolacji maleje, odpowiednie dobranie go zależy głównie od analizowanego problemu. Kolejnym parametrem jest parametr regulacyjny, którego wartość we wszystkich analizowanych w tej pracy przypadkach wynosiła 0. Ostatnim wyznacznikiem pozwalającym ocenić dokładność interpolacji jest tzw. liczba modów. Analiza wektorów własnych macierzy U przedstawiona została w rozdziale 4.

4. Wyniki oraz optymalizacja

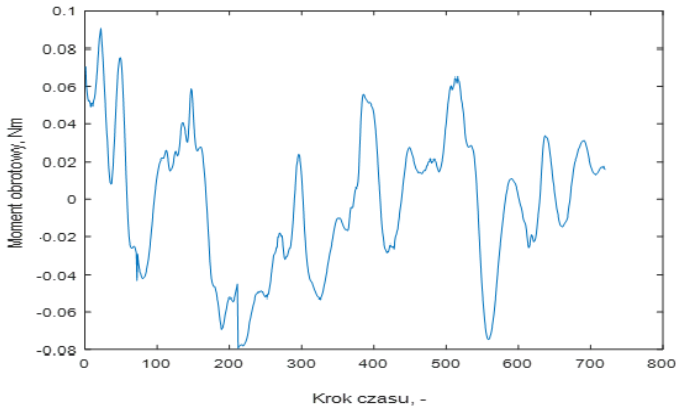
Dekompozycja ortogonalna pozwala na rozłożenie dowolnej macierzy na iloczyn trzech specyficznych macierzy. Na rysunku 4-6 przedstawione zostały wykresy wektorów bazowych macierzy $U(720 \times 720)$:



Rysunek 4. Wykres wartości wektorów bazowych macierzy U dla pierwszego modu [opracowanie własne]



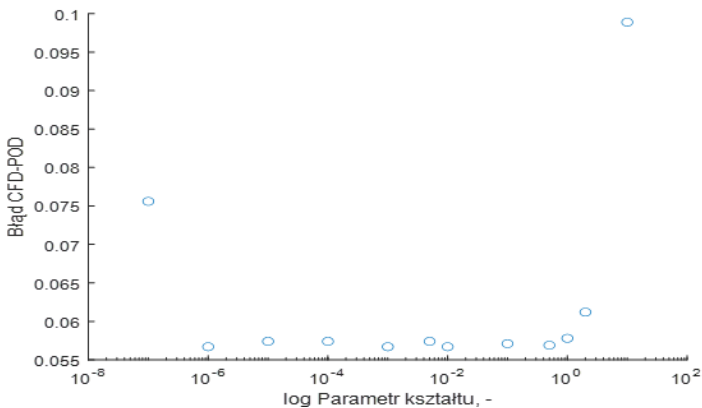
Rysunek 5. Wykres wartości wektorów bazowych macierzy U dla trzeciego modu [opracowanie własne]



Rysunek 6. Wykres wartości wektorów bazowych macierzy U dla szóstego modu [opracowanie własne]

Macierz U wartości szczególnych przyjmuje rozmiary $m \times m$, czyli liczby wierszy macierzy rozkładanej $Y(720 \times 13)$ w tym wypadku wartości momentu obrotowego dla kolejnych profili łopatek turbiny. Widać także, że dla każdego kolejnego modu wykres wartości wektorów bazowych zagęszcza się, przyjmując coraz mniejsze wartości.

Optymalizacji również poddany został wspomniany w podrozdziale 3.2. parametr kształtu, dla którego poszukiwana była wartość ekstremum błędu opisującego różnicę wartości momentu obliczanego z wykorzystaniem techniki POD, a momentu obliczanego z wykorzystaniem analizy CFD przeprowadzanej w oprogramowaniu AnsysFluent. Parametr kształtu przyjął maksymalną wartość równą 10, natomiast minimalna jego wartość to 0,0000001 (przy założeniu, że parametr regulacji równy jest 0). Wartości błędu dla różnych parametrów kształtu przedstawia rysunek 7.



Rysunek 7. Wykres przedstawiający zmiany błędu obliczania momentu obrotowego za pomocą CFD, a POD wraz ze zmianą parametru kształtu [opracowanie własne]

Istotą redukcji danych było stworzenie narzędzia pozwalającego na znalezienie optymalnego kształtu łopatki. Optymalizacja uwzględniła 15 625 przypadków, dla których wartość współczynnika mocy obliczonego z analizy POD jest optymalna. Dla takiego rozwiązania przeprowadzona została analiza numeryczna mająca na celu porów-

nanie różnicy obu analiz. Wartość współczynnika mocy i innych wartości potrzebnych do obliczenia reprezentują wzory (8), (9), (10).

Moc P generowana przez turbinę obliczana jest ze wzoru (8):

$$P = T_{ave} \cdot \omega \quad (8)$$

gdzie: T_{ave} – średnia moment obrotowy w czasie ostatniego obrotu Nm, ω – prędkość obrotowa $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$.

P_{max} to teoretyczna i maksymalna moc, które osiąga turbina w danych warunkach (9):

$$P_{max} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot D \cdot H \cdot \rho \cdot v^3 = 306,25 \text{ W} \quad (9)$$

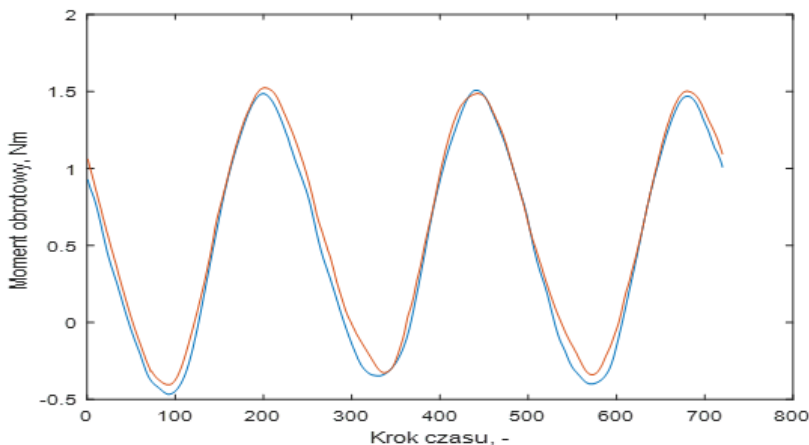
gdzie: ρ – gęstość płynu $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, D – średnica turbiny s, v – prędkość wiatru $\frac{\text{m}}{\text{s}}$, p – ciśnienie Pa, H – wysokość turbiny m, A – powierzchnia odniesienia m^2 .

Współczynnik mocy C_p oceniający sprawność turbiny obliczono ze wzoru (10):

$$C_p = \frac{P}{P_{max}} \quad (10)$$

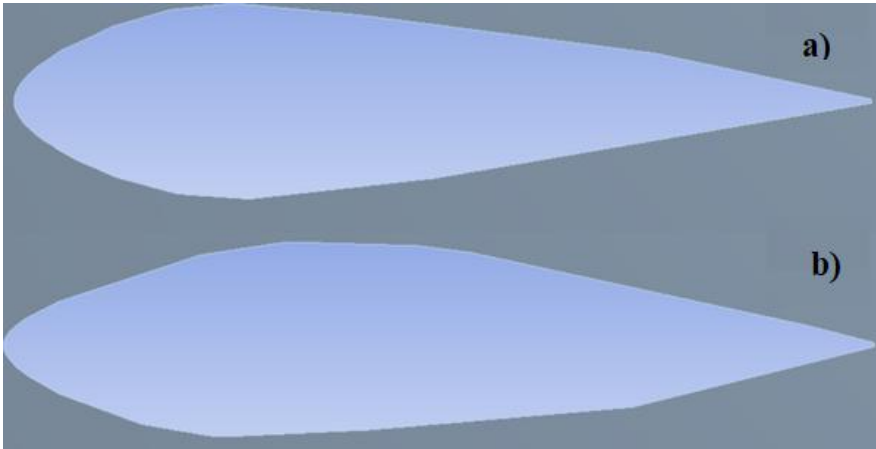
Optymalna wartość współczynnika mocy to 0,3033. Jest to wartość obliczona za pomocą dekompozycji ortogonalnej. Dla analizy CFD wartość współczynnika mocy wyniosła 0,2913. Są to wyniki maksymalne dla wszystkich badanych kształtów łopatki turbiny. Obliczenia prowadzone dla optymalnego współczynnika kształtu, dla którego błąd obu analiz jest najmniejszy (przy współczynniku równym 0,5 średnia wartość błędu wynosi 5,65%).

Wyznaczenie optymalnego parametru kształtu konieczne jest do uwiarygodnienia porównania przebiegu momentu obrotowego obliczonego w czasie ostatniego obrotu turbiny dla obliczeń wynikających z analizy CFD i dekompozycji POD dla profilu porównawczego. Porównanie obu analiz przedstawiono została na rysunku 8.



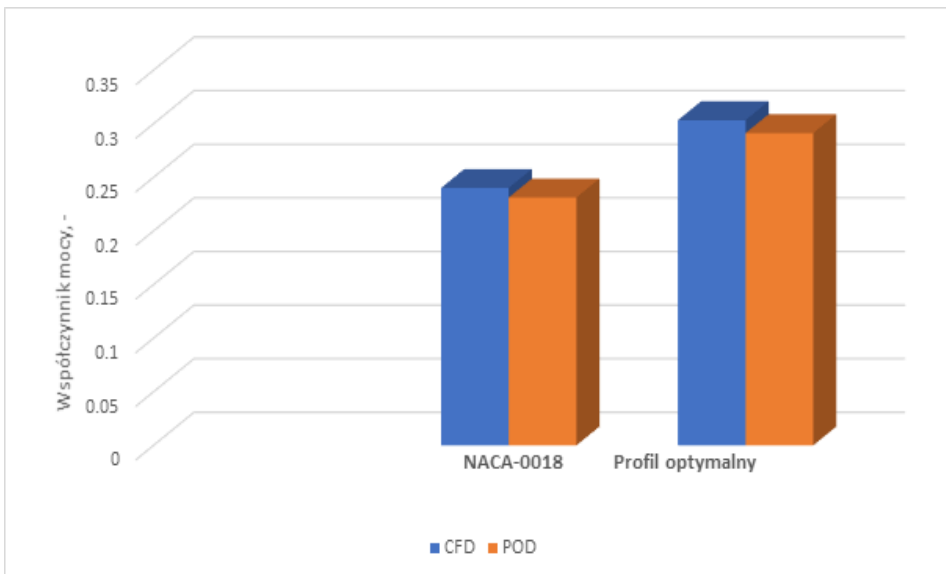
Rysunek 8. Wartość momentu obrotowego w czasie jednego obrotu [opracowanie własne]

Na rysunku 9 przedstawiono optymalny kształt łopatki turbiny zestawiony z bazowym profilem.



Rysunek 9. a) Bazowy profil b) Profil optymalny [opracowanie własne]

Rysunek 10 przedstawia dwa wykresy słupkowe porównujące wartości współczynników mocy łopatki profilu bazowego (NACA-0018) oraz profilu optymalnego, obliczonych dzięki wykorzystaniu metody aproksymacji POD oraz analizie numerycznej.



Rysunek 10. Wykres wartości współczynnika mocy [opracowanie własne]

5. Wnioski

Przeprowadzona optymalizacja pozwoliła na znalezienie optymalnej wartości współczynnika kształtu oraz poznanie maksymalnego błędu wynikającego z różnicy pomiędzy wartością momentu obliczanego za pomocą analizy CFD, a wartością obliczoną z wykorzystaniem techniki POD. Ostatnim etapem było znalezienie optymalnego kształtu łopatki oraz porównanie wartości współczynnika mocy obliczonego przy użyciu techniki POD oraz analizy numerycznej.

Porównując wyniki dla analiz przeprowadzonych przez inne zespoły badawcze, wartość współczynnika mocy wynosi około 0,25 [8, 9]. Zaznaczyć należy fakt, iż badany model nie jest w 100% odwzorowaniem modelu NACA-0018. Rozpięcie go na mniejszej ilości punktów doprowadziło do zmian geometrycznych profilu (zachowane zostały wartości punktów z oryginalnego profilu). Dodatkowo wielowymiarowa optymalizacja kształtu łopatki doprowadziła do zwiększania współczynnika mocy i pozwoliła na znalezienie optymalnego dla danych warunków przepływu kształtu.

Dalszy rozwój modelu dwuwymiarowego mogłyby uwzględnić różne kombinacje zmian parametrów punktów bazowych – w przeprowadzonym badaniu tylko jeden punkt bazowy ulegał przesunięciu prostopadle do osi Y, kolejne obliczenia mogłyby przesuwac kilka punktów jednocześnie i zwiększyłyby to liczbę kombinacji, w wyniku czego rozwiązanie mogłoby być jeszcze bardziej dokładne. Stworzony model parametryczny pozwala na testowanie różnych kształtów łopatki oraz poznanie parametrów pracy turbiny bez konieczności analizy numerycznej, co znacząco zmniejszy koszt oraz czas obliczeniowy, (przeliczenie 15 625 różnych kombinacji kształtu łopatki zajęło około 0,5 sekundy).

Podziękowania

Praca została zrealizowana w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki, nr projektu: 2017/27/B/ST8/02298 tytuł: „Heurystyczny algorytm optymalizacyjny ze sprzężoną generacją modeli zredukowanych do obliczeń turbin wiatrowych”.

Literatura

1. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=\newline Renewable_energy_statistics/pl, 21.10.2020.
2. Rabbani, T., Khalid M., Imran A. Siddiqui M. S., 2014. *Reduced Order Modeling of Loads on a Vertical Axis Wind-Turbine*, Proceedings of 2014 11th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology, IBCAST 2014. 10.1109/IBCAST.2014.6778160.
3. Rezaeiha A., Montazeri H., Blocken B., *Towards accurate CFD simulations of vertical axis wind turbines at different tip speed ratios and solidities: Guidelines for azimuthal increment, domain size and convergence*, Energy Conversion and Management, Tom 156, 2018, s. 301-316.
4. Tumidajski J., *Comparative CFD Analysis of Vertical Axis Wind Turbines*, Bachelor Thesis. Politechnika Śląska, Gliwice 2019.
5. Krysiński T., *Mathematical Modelling and Shape Optimisation of Vertical Axis Wind Turbines Blades*, Ph. D. Thesis. Politechnika Śląska, Gliwice 2018.
6. Bugmann M.D., *Multivariate interpolation using radial basis function*, Ph. D. Thesis. University of Cambridge, Cambridge 1989.

7. Buliński Z., Wiśniewski P., Krysiński P., Marzec Ł., *Full scale and reduced order modelling of the Vertical Axis Wind Turbine*, International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2019), Wrocław 23-28.06.2019.
8. Roy S., Branger H., Christopher L., Bourras D., Paillard B., *Design of an offshore three-bladed vertical axis wind turbine for wind tunnel experiments*, ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2017, Trondheim 01.2017.
9. Hara Y., Hara K., Hayashi T., *Moment of Inertia Dependence of Vertical Axis Wind Turbines in Pulsating Winds*, University Tottori, Tottori 02.2012.

Wykorzystanie techniki POD do modelowania turbin wiatrowych

Streszczenie

Praca podejmowała zagadnienie związane z wykorzystaniem właściwej dekompozycji ortogonalnej w modelowaniu turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu. Wzrost zapotrzebowania na moc oraz potrzeba wykorzystywania mniej szkodliwych dla środowiska źródeł energii spowodowały płynny rozwój energetyki wiatrowej. Zamodelowany oraz poddany analizie numerycznej został dwuwymiarowy model turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu na podstawie stworzonego modelu matematycznego uwzględniający zachowanie turbiny w zadanych warunkach przepływu i z uwzględnieniem zjawiska turbulencji. Kolejno na podstawie uzyskanych wyników opracowany został model zredukowany, do którego stworzenia wykorzystano radialne funkcje bazowe. Taki model pozwolił na skrócenie czasu i kosztów obliczeniowych – obliczenie parametrów pracy turbiny bez konieczności przeprowadzania analizy numerycznej. Dla stworzonego modelu wykonana została optymalizacja: znaleziono optymalny kształt łopatki turbiny, dla którego współczynnik mocy jest najwyższy, sprawdzono wpływ parametru kształtu na jakość interpolacji oraz porównano wartość momentu obrotowego w czasie trwania jednego obrotu turbiny, obliczanego przy wykorzystaniu właściwej dekompozycji ortogonalnej i CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Wykorzystanie techniki POD (*Proper Orthogonal Decomposition*) pozwoliło na wiarygodną analizę parametrów pracy turbiny oraz skrócenie czasu obliczeń numerycznych.

Słowa kluczowe: turbina wiatrowa o pionowej osi obrotu, model zredukowany, właściwa dekompozycja ortogonalna, radialne funkcje bazowe

Using the POD method for modelling wind turbines

Abstract

The purpose of this study was to investigate the issue of using proper orthogonal decomposition (POD) in modelling wind turbines with vertical axis of rotation. The increase in demand for power and the need to use less environmentally harmful sources of energy have resulted in the smooth development of wind energy. Numerous changes in legislation have, in particular, increased the profitability of investments in small wind power plants in terms of nominal capacity. The first part contains the history of wind energy development, types of wind turbines, the principle of their operation, as well as the condition of wind energy in Poland. A two-dimensional model of a wind turbine with a vertical axis of rotation was modelled and subjected to numerical analysis on the basis of a mathematical model created, taking into account the behaviour of the turbine under given flow conditions and taking into account the turbulence phenomenon. Then, on the basis of the obtained results, a reduced model was created, to which radial base functions (RBF) were used. Such a model allowed to shorten the calculation time and costs – calculating the parameters of the turbine operation without the necessity to perform numerical analysis. Optimisation was performed for the created model: the optimum shape of the turbine blade was found for which the power factor is the highest, the influence of the shape parameter on the quality of interpolation was checked and the value of the torque during one turbine revolution, calculated using the correct orthogonal decomposition and CFD (*Computational Fluid Dynamics*) was compared. Despite the limitations of the model, which is the use of fewer parameters in the created reduced model, which affects the created geometric shape of the blade. The solution can be considered reliable given the short calculation time and low cost. Further research may take into account a larger number of parameters, which will require conversion using CFDs of subsequent models being the base of the reduced model.

Keywords: vertical axis wind turbine, reduced order model, proper orthogonal decomposition (POD), radial basis function (RBF)

Przyjazna dla środowisk turbina Aldena – analizy

1. Wstęp

Idea ekologicznej turbiny Aldena narodziła się w 1993 [1]. Dwa główne założenia (poprawienie wydajności oraz zmniejszenie wpływu na środowisko) wytyczały prace nad nową konstrukcją turbiny. Koncentracja prac doprowadziła do radykalnie nowej konstrukcji wirnika turbiny: ograniczono liczbę łopatek, zmniejszono gradienty ciśnienia i prędkości, zminimalizowano przeswit między wirnikiem i kierownicą oraz zmaksymalizowano wielkość przestrzeni przepływowych.

Na podstawie wyników badań prototypów [2] można stwierdzić, że nową konstrukcję charakteryzuje znacznie wyższy wskaźnik przeżywalności ryb dla porównywalnych przepływów, spadów i rodzajów ryb oraz wyższa sprawność w stosunku do porównywalnych turbin Kaplana lub Francisa. Dobór turbin Aldena odbywa się na podstawie dwóch parametrów: spadu i przepływu [3]. Praktycznie zakłada się spad dla turbiny Aldena w granicach od 7,6 do 43 m oraz minimalny przepływ od 14 m³/s. Charakterystycznymi parametrami są wartości spadu, przepływu, prędkość obrotowa oraz moc. Racjonalne wielkości średnic wirnika dla turbiny Aldena wynoszą od 2,4 do 4,5 m. Przy średnicach poniżej 2,4 m zmniejsza się niekorzystnie wielkość rozstawu elementów turbiny (łopatek oraz przestrzeni pomiędzy nimi) co zmniejsza przeżywalność ryb. Z kolei duże średnice skutkują nieekonomicznością instalacji. Odpowiednia prędkość obrotowa turbiny Aldena wynosi od 90 do 140 obrotów na minutę. Przy prędkościach poniżej 90 obrotów na minutę, turbiny Aldena wymagają kosztownych generatorów, natomiast przekroczenie 140 obrotów na minutę wpływa na pogorszenie warunków przeżywalności ryb. Niniejsza praca prezentuje wieloaspektową analizę dwóch przypadków instalacji turbin Aldena. Przypadki są zróżnicowane kształtem rury ssącej oraz wysokością spadu.

2. Założenia modelowania CFD

Model analizowanych instalacji został opracowany w oprogramowaniu Flow 3D. Założono opis przepływu lepkiego i turbulentnego bez uwzględnienia ograniczonej ściśliwości wody. Elementy wirujące zostały opisane z wykorzystaniem systemu GMO – General Moving Objects, udostępnionego w interfejsie Flow 3D. Do opisu przepływu wody zastosowano uśrednioną po czasie postać równań Naviera-Stokesa (N-S) znanych pod nazwą równań Reynoldsa [4]:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij}) + \bar{F}_i \quad (1)$$

gdzie U , p , ρ , F oznaczają odpowiednio prędkość, ciśnienie, gęstość płynu oraz siłę masową.

¹ btwarog@pk.edu.pl, Katedra Geoinżynierii i Gospodarki Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Krakowska, www.pk.edu.pl.

Wyrażenie $(\sigma_T)_{ij}$ jest niewystępującym w równaniach N-S tensorem naprężeń Reynoldsa:

$$\sigma_{ij} = -\bar{p}\delta_{ij} + \nu\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right) - (\sigma_T)_{ij} \quad (2)$$

$$(\sigma_T)_{ij} = \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (3)$$

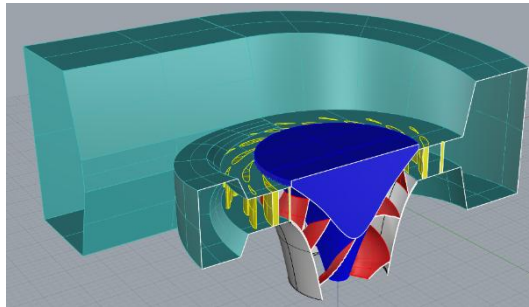
Dodatkowy element $(\sigma_T)_{ij}$ jest symetrycznym tensorem naprężeń Reynoldsa, którego elementy stanowią składowe jednostkowego burzliwego strumienia pędu.

3. Charakterystyka analizowanych instalacji

Testowa instalacja została przystosowana do warunków maksymalnego spadku elektrowni Dobczyce [5]. Założono modelową średnicę turbiny 2,0 m. Układ doprowadzający wodę do wirnika turbiny zbudowany został ze spirali o przekroju trapezowym oraz kierownicy z czternastoma kanałami przepływowymi (rys. 1).

Obliczenia wykonano dla następujących parametrów:

- prędkość obrotowa turbiny 140 min^{-1} ;
- rzędna zwierciadła wody górnej: +30,00 m npm;
- rzędna zwierciadła wody dolnej: -0,20 m npm, w przypadku krzywaka;
- rzędna zwierciadła wody dolnej: -3,50 m npm, w przypadku stożkowej rury ssącej;
- rzędna osi kierownicy +2,60 m npm;
- ciśnienie zewnętrzne: 101325 Pa (ciśnienie normalne);
- temperatura wody: 5°C ;
- prężność pary wodnej: 900 Pa;
- gęstość wody: $999,9 \text{ kg/m}^3$.



Rysunek 11. Przekrój instalacji turbiny Aldena. Źródło: opracowanie własne

Analizę wyników symulacji pracy wykonano z zastosowaniem profesjonalnego postprocesingu oprogramowania Flow 3D – FlowSight. Obszar poszukiwania rozwiązania został zróżnicowany pod względem wielkości oczka siatki. Spirala dolotowa oraz obszar wirnika został opisany siatką sześcienną o oczkach 0,04 m. Pozostałe elementy obszarów pokryto siatką sześcienną 0,05 m.

4. Kawitacja hydrodynamiczna w instalacjach hydroenergetycznych

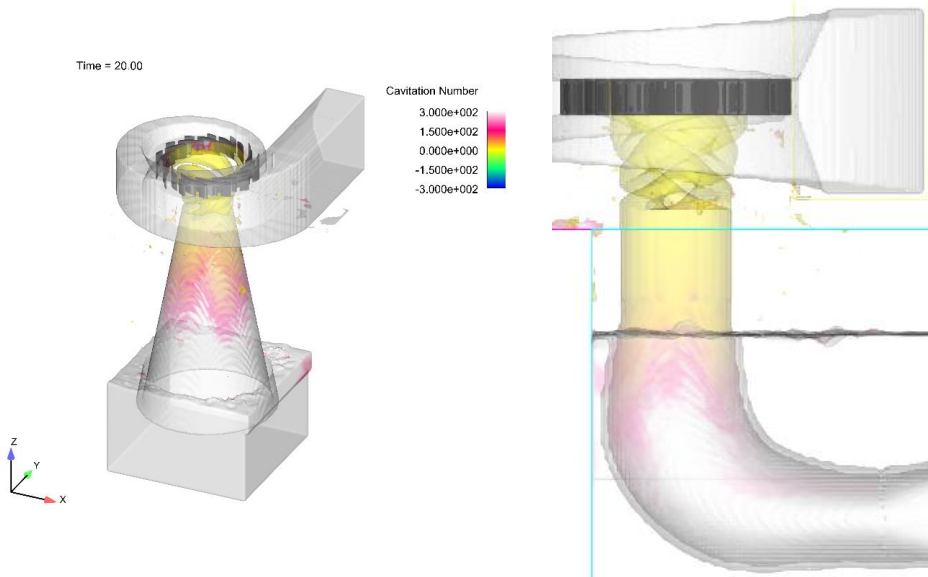
Zjawisko kawitacji hydrodynamicznej pojawia się w cieczy pod wpływem zmieniającego się w czasie i przestrzeni pola ciśnienia. Zmiany te związane są z rozprężaniem się cieczy do poziomu ciśnienia krytycznego, przy którym w cieczy pojawiają się przestrzenie wypełnione parą nasyconą, a także rozpuszczonymi gazami. Analizując zjawisko kawitacji, można określić parametr lub liczbę kryterialną, pozwalającą na ilościową ocenę przepływu w dwu aspektach:

- parametr, który przyjmuje jednakową wartość przy dowolnych i podobnych dynamicznie warunkach kawitacji;
- parametr określający warunki przepływu bezkawitacyjnego oraz warunki powstawania, zanikania lub rozwoju poszczególnych stadiów kawitacji.

Pomimo, że w niniejszej analizie zjawisko kawitacji nie jest modelowane, to można zaproponować identyfikację potencjalnych obszarów występowania tego zjawiska (rys. 2). Miarodajnym wskaźnikiem jest liczba kawitacyjna c_a charakteryzująca skłonność obszarów do pojawienia się zjawiska kawitacji:

$$c_a = \frac{(p - p_n)}{\frac{\rho u^2}{2}} \quad (4)$$

gdzie: c_a – liczba kawitacyjna, p – wartość ciśnienia w danym punkcie przepływu [Pa], p_n – prężność pary [Pa], ρ – gęstość cieczy [kg/m^3], u – prędkość cieczy [m/s]



Rysunek 12. Liczba kawitacyjna, turbiny Aldena, rura stożkowa (temperatura: 5°C, ciśnienie zewnętrzne normalne: 101325 Pa, ciśnienie pary wodnej: 900 Pa). Źródło: opracowanie własne

Badania nad zjawiskiem kawitacji w instalacjach hydroenergetycznych wskazują, że zarówno obniżenie poziomu wody dolnej, jak i wzrost spadu brutto wpływają ujemnie na warunki kawitacyjne turbiny. Wraz z obniżeniem ciśnienia na ssaniu wzrastają pulsacje ciśnień oraz drgania wału turbiny, a więc występują oznaki, które mogą być

wywołane kawitacją lecz również mogą przyczyniać się do powstawania zjawiska kawitacji. Zależności te uwzględnia się przy projektowaniu elektrowni wodnych. Sprawdza się czy wyznaczona wartość współczynnika kawitacji σ jest większa od wartości krytycznej:

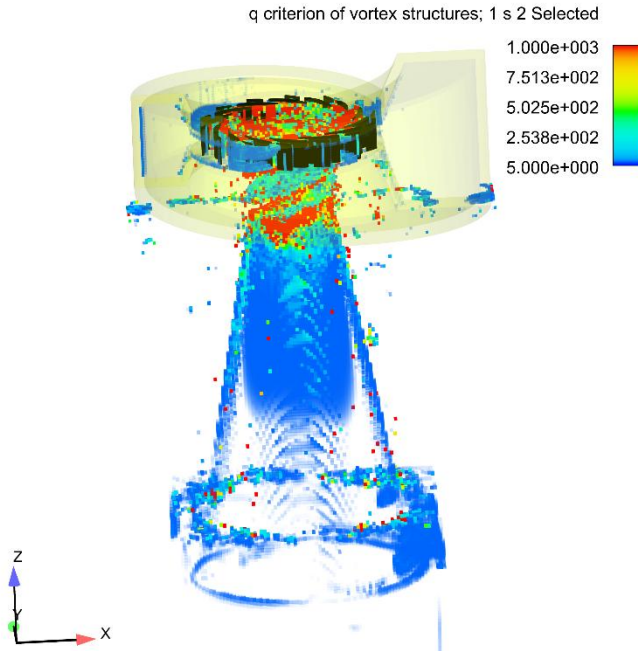
$$\sigma = H_B - \frac{H_S}{H} > \sigma_c \quad (5)$$

gdzie: H_B jest ciśnieniem barometrycznym w [m] słupa wody, H_S jest ciśnieniem ssania w [m] na wylocie z turbiny lub wysokością wirnika powyżej dolnej wody, H jest wysokością spadu turbiny elektrowni w [m]. Wartość σ_c może być wyznaczona na podstawie odpowiednich formuł empirycznych [10].

5. Wyznaczenie rdzenia wirowości

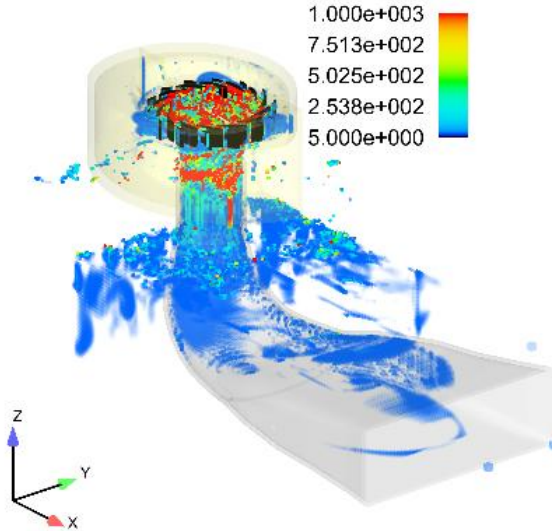
Odkrycie struktur wirowych zaowocowało szeregiem metod służących do identyfikacji wirów. Stosowanych jest kilka klasyfikacji [8, 11], ogólnie można wyróżnić tzw. metody obiektywne oraz subiektywne, gdzie w pierwszych metodyka identyfikacji wiru nie wpływa na jego postać. Metody obiektywne głównie opierają się na niezmiennikach struktur wirowych: Galileusza, Lagrange'a czy rotacji.

Jedną z obiektywnych metod bazujących na tensorze gradientu prędkości do identyfikacji obszarów wirowych jest Q -kryterium.



Rysunek 13. Wirowość w instalacji Aldena z rurą stożkową wg Q -kryterium. Źródło: opracowanie własne

q criterion of vortex structures; 1 s 2 Selected



Rysunek 14. Wirowość w instalacji Aldena z krzywakiem wg Q -kryterium, Źródło: opracowanie własne

Tensor gradientu prędkości D_{ij} może być zapisany jako

$$D_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

Tensory II rzędu podlegają dobrze znanym operacjom matematycznym charakterystycznym dla przestrzeni wektorowej. Jednak w przeciwieństwie do konwencjonalnych wektorów w przestrzeni euklidesowej można dla nich zdefiniować dodatkowe operacje takie jak transpozycja, złożenie, odwrotność. Ponadto, każdy tensor II rzędu może zostać zdekomponowany addytywnie na część symetryczną i antysymetryczną:

$$D_{ij} = S_{ij} + \Omega_{ij} \quad (7)$$

gdzie:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

S_{ij} , Ω_{ij} – tensory

Charakterystyczne równanie dla ∇u można zapisać:

$$\lambda^3 + P\lambda^2 + Q\lambda + R = 0 \quad (10)$$

P , Q i R są trzema niezmiennikami tensora gradientu prędkości. Stosując dekompozycję na część symetryczną tensora oraz antysymetryczną, niezmienniki mogą być wyrażone w następujący sposób:

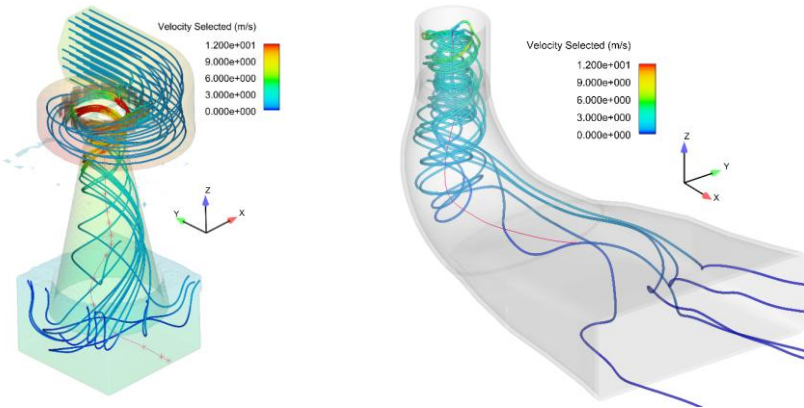
$$P = -\text{tr}(\bar{D}) \quad (11)$$

$$Q = \frac{1}{2}(\text{tr}(\bar{D})^2 - \text{tr}(\bar{D}^2)) = \frac{1}{2}\|\bar{\Omega}\|^2 - \|\bar{S}\|^2 \quad (12)$$

$$R = -\det(\bar{D}) \quad (13)$$

W niniejszej analizie (rys. 3 i 4) wirowość ruchu została oceniona z wykorzystaniem Q -kryterium [12], które odpowiada drugiemu niezmiennikowi tensora gradientu prędkości. Kryterium jest odpowiednie do identyfikacji wirów o dużej skali w przepływie turbulentnym płynów nieściśliwych – identyfikuje obszary przepływu w których siły powodujące obrót przewyższają siły lepkości.

Kryterium to definiuje wirowość jako obszar o dodatnim drugim niezmienniku tensora ∇u , $Q > 0$. W tym kryterium dodany jest również drugi warunek na ciśnienie, które ma być mniejsze od ciśnienia otoczenia wiru. Patrząc na definicję, drugi niezmiennik wyraża lokalną równowagę pomiędzy szybkością odkształcenia przy ścinaniu oraz wielkością wiru. Dodatnia jego wartość wskazuje przewagę wartości wirowości nad szybkością odkształcenia.



Rysunek 15. Rdzeń wiru w krzywaku na tle linii strumienia, Źródło: opracowanie własne

Linia rdzenia wiru została wytyczona z wykorzystaniem algorytmu wyznaczania wartości własnych [6]. W skrócie, zastosowany algorytm, obszar poszukiwania dzieli na elementarne podobszary. Dla każdego z nich określana jest unikalna postać tensora gradientu prędkości \bar{D} . Przy wykorzystaniu algorytmu analizy wartości własnych wyznacza się zredukowane wartości prędkości w punktach węzłowych, które z kolei pozwalają identyfikować powierzchnie obszarów elementarnych przebijanych rdzeniem wiru. Zbiór tych linii pozwala określić kształt i przebieg rdzenia wiru (rys. 5).

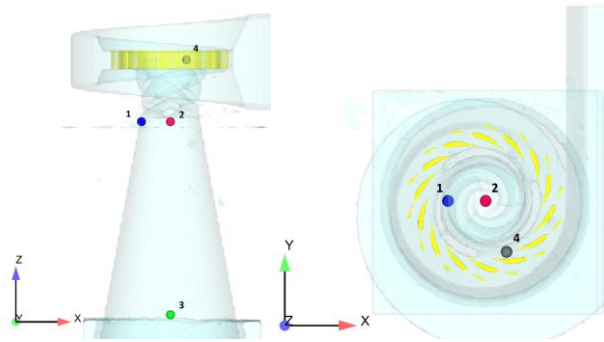
6. Obciążenia hydrodynamiczne w rurze ssącej

Przepływ wody przez hydrozespół charakteryzuje się dużymi pulsacjami ciśnienia. Amplituda wahań rośnie w kierunku wirnika i następnie maleje w stronę wylotu z rury ssącej. Charakterystyki statystyczne pulsacji są zmienne i zależą od lokalizacji punktu analizy. Rysunek 7 i 10 pokazuje przebieg pulsacji w czasie wielkości ciśnienia wyznaczonego na modelu w punktach znajdujących się (rys. 6 i 9):

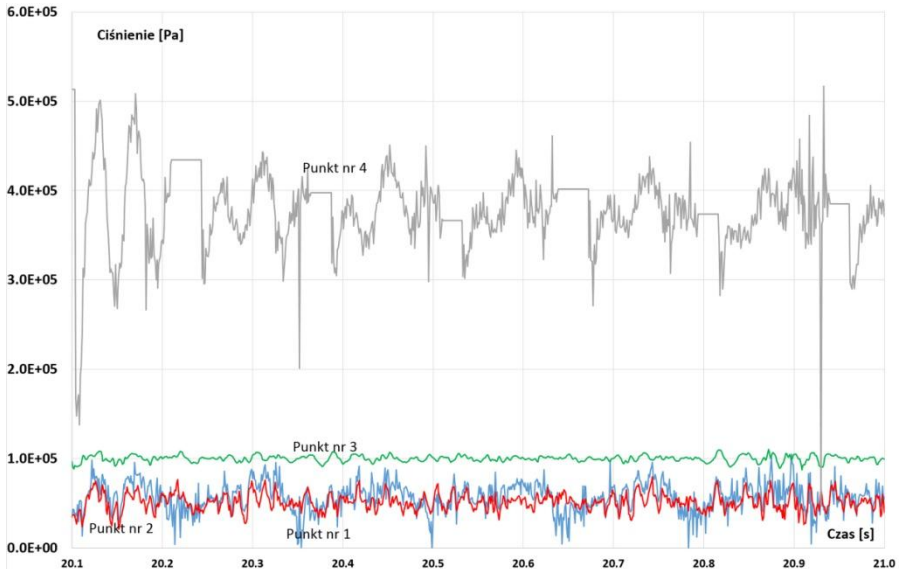
- pod wirnikiem przy płaszczu rury ssącej (Punkt nr 1);
- pod wirnikiem turbiny w jego osi (Punkt nr 2);

- w osi wirnika zaraz nad poziomem wody dolnej (Punkt nr 3);
- na wlocie do turbiny za łopatkami kierownicy (Punkt nr 4).

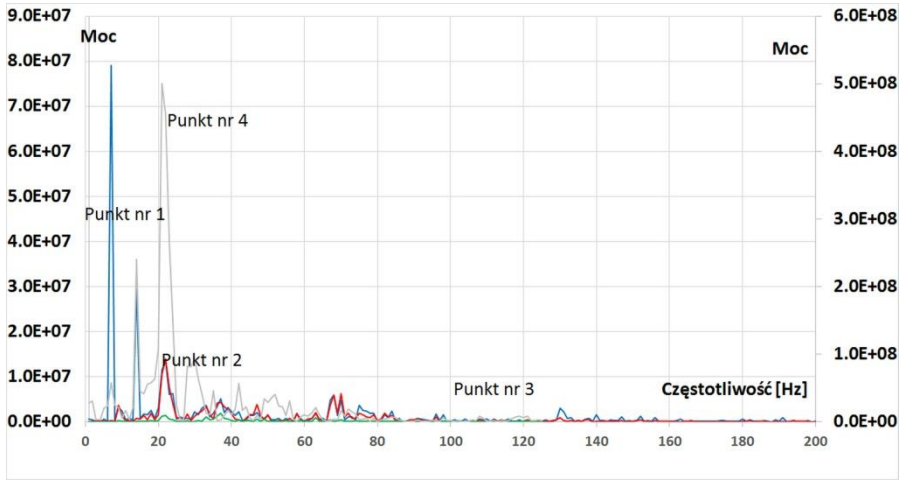
Konstrukcja wirnika, liczba obrotów oraz liczba kanałów przepływowych kierownicy wskazują, że najwyższy poziom drgań składowych będzie występował przy częstotliwościach około 2,33, 7,00, 32,67, 98,00 Hz. Wykonana analiza spektralna (rys. 8 i 11) potwierdza dominujące częstotliwości pulsacji ciśnienia. Częstotliwości te są ściśle związane z szybkością obrotową wirnika, liczbą kanałów przepływowych oraz liczbą łopatek wirnika. W rozpatrywanym przypadku mamy 3 łopatki wirnika, 14 przepływowych kanałów kierownicy współpracujących z wirnikiem poruszającym się z szybkością obrotową 140 min^{-1} . Głównym źródłem drgań będą pulsacje przepływu wywołane łopatkami wirnika i kierownicy. W rzeczywistości, na wartość tych pulsacji wpływają również zjawiska kawitacyjne przy wypływie cieczy z wirnika.



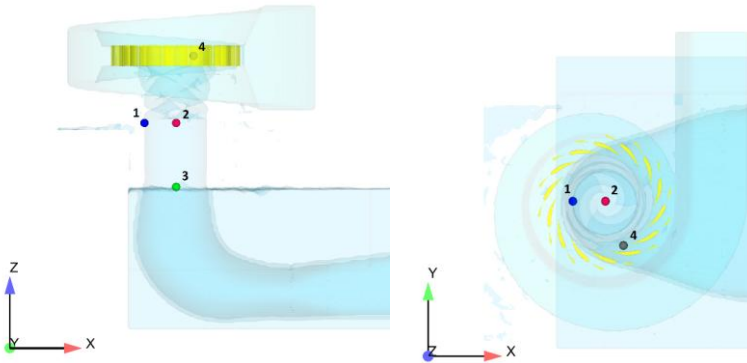
Rysunek 16. Lokalizacja punktów pomiarowych – rura stożkowa, Źródło: opracowanie własne



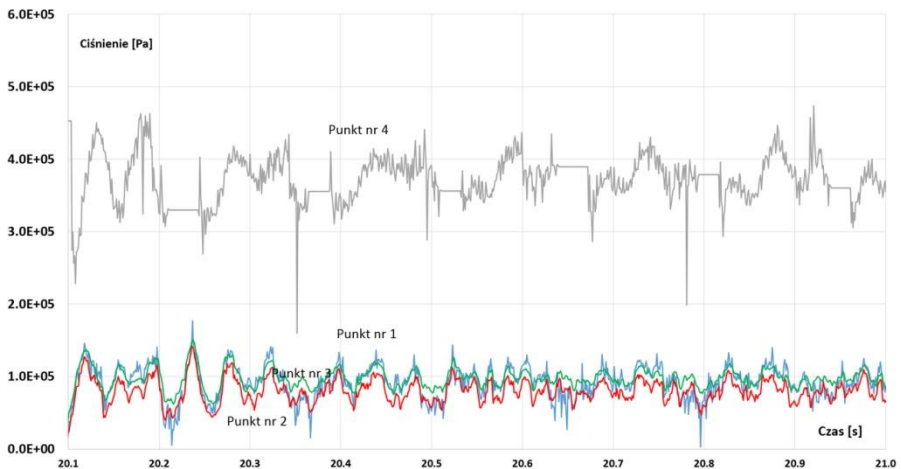
Rysunek 17. Pulsacja ciśnienia w instalacji ze stożkową rurą ssącą, Źródło: opracowanie własne



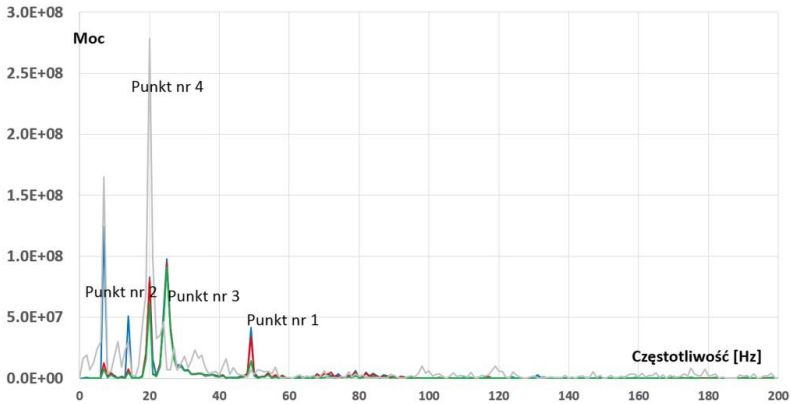
Rysunek 18. Analiza spektralna pulsacji ciśnienia w instalacji ze stożkową rurą ssącą,
Źródło: opracowanie własne



Rysunek 19. Lokalizacja punktów pomiarowych – krzywak. Źródło: opracowanie własne



Rysunek 20. Pulsacja ciśnienia w instalacji z krzywakiem. Źródło: opracowanie własne



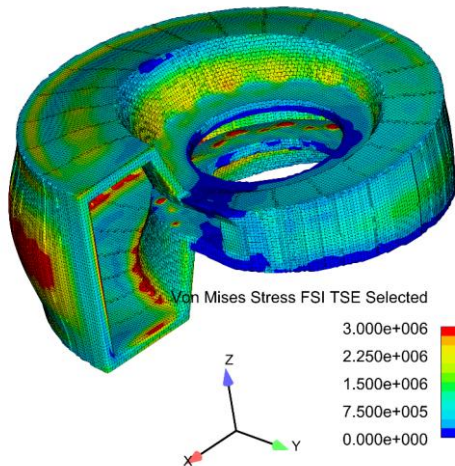
Rysunek 21. Analiza spektralna pulsacji ciśnienia instalacji z krzywakiem. Źródło: opracowanie własne

7. Naprężenia i odkształcenia w wybranych elementach instalacji hydroenergetycznej

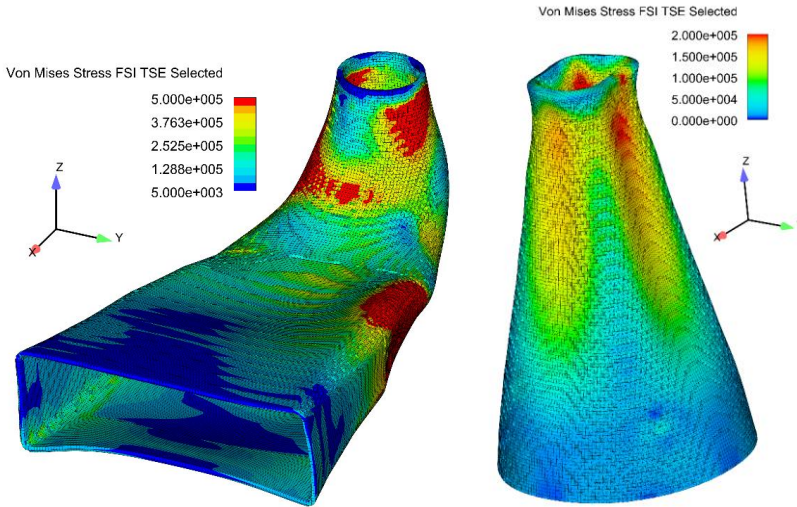
W celu określenia naprężeń oraz przemieszczeń wybranych elementów instalacji zastosowano model FSI. Analizie poddano rury ssące oraz spiralę wlotową instalacji (rys. 12 i 13). Dla każdego z elementów przedstawiono rozkład naprężenia wg teorii wyężeniowej von Mises'a [13, 14].

Dla wszystkich, poddanych analizie FSI, elementów instalacji hydroenergetycznej przyjęto następujące parametry materiałowe:

- materiał – stal;
- gęstość 7700 kg/m^3 ;
- moduł Younga $2,15 \text{ e}+11 \text{ Pa}$;
- współczynnik Poissone'a równy $0,3$.



Rysunek 22. Naprężenia wg teorii von Misesa [Pa] na tle zniekształconych elementów w skażonej skali, spirala wlotowa. Źródło: opracowanie własne



Rysunek 23. Naprężenia wg teorii von Misesa [Pa] na tle zniekształconych elementów w skażonej skali, krzywak i dyfuzor. Źródło: opracowanie własne

8. Ekologiczne kryteria pracy analizowanych instalacji

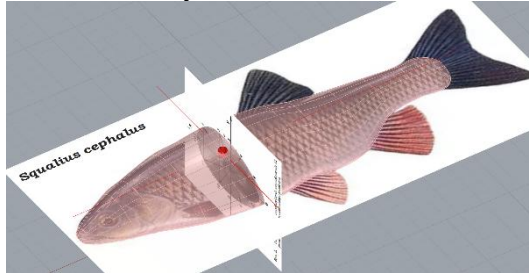
Uwzględnianie kryteriów i norm środowiskowych zmierzających do minimalizacji negatywnego wpływu turbin na stan środowiska staje się jedną z podstawowych zasad stosowanych przy doborze urządzeń hydroenergetycznych. Największe szkody wyrządzone są populacji ryb. Zmienność warunków ciśnienia, prędkości, naprężeń jak również nagle zmiany kształtu i geometrii kanałów, którymi przepływa ryba, zmniejszają jej szansę przeżycia.

Trajektoria, jaką musi pokonać ryba przemieszczając się ze stanowiska górnego do dolnego zawiera szereg czynników negatywnie wpływających na jej kondycję. Występują obszary nagłego wzrostu i spadku ciśnienia, obszary kawitacyjne, obszary w których ryby narażone są na ścieranie, uderzanie, ścinanie, zgniatanie oraz turbulencje. Turbina Aldena jest jedną z niewielu gdzie przy projektowaniu jej kształtu starano się uwzględnić wymogi środowiskowe ustanowione przez Cook et al. 1997 and Franke et al. 1997, [9]. Kryteria przedstawiono poniżej:

- prędkości obwodowe wirnika powinny być mniejsze lub równe 12 m/s;
- minimalne ciśnienie w wirniku nie powinno być mniejsze niż 69 kPa;
- szybkość zmiany ciśnienia w wirniku powinna być mniejsza niż 550 kPa/s;
- szybkość zmiany prędkości w strefie ścinania nie powinna być większa niż 4,5 m/s na 2,54 mm;
- wskaźnik zmiany naprężeń ścinających powinien być mniejszy lub równy 180 m/s/m;
- odstęp między elementami obrotowymi i stacjonarnymi powinien wynosić mniej niż 2 mm;
- kanał przepływowy w wirniku powinien być jak największy;
- liczba i długość krawędzi łopatek wirnika powinny być zminimalizowane.

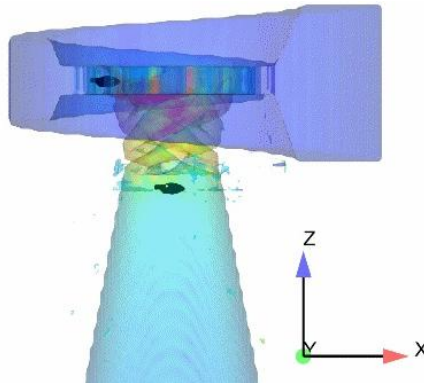
Dla określonych parametrów biomechanicznych ciała ryby (rys. 14) zastosowano model FSI do określenia wartości naprężeń. Dla analizowanych przypadków lokalizacji (rys. 15) przyjęto następujące parametry biomechaniczne [7, 14-16]:

- materiał – ciało ryby;
- gęstość 1080 kg/m^3 ;
- moduł Younga $2,2 \text{ e}+9 \text{ Pa}$;
- współczynnik Poissona równy $0,4$.



Rysunek 24. Model ryby (*Squalius cephalus*), z zaznaczonym punktem pomiaru naprężeń.

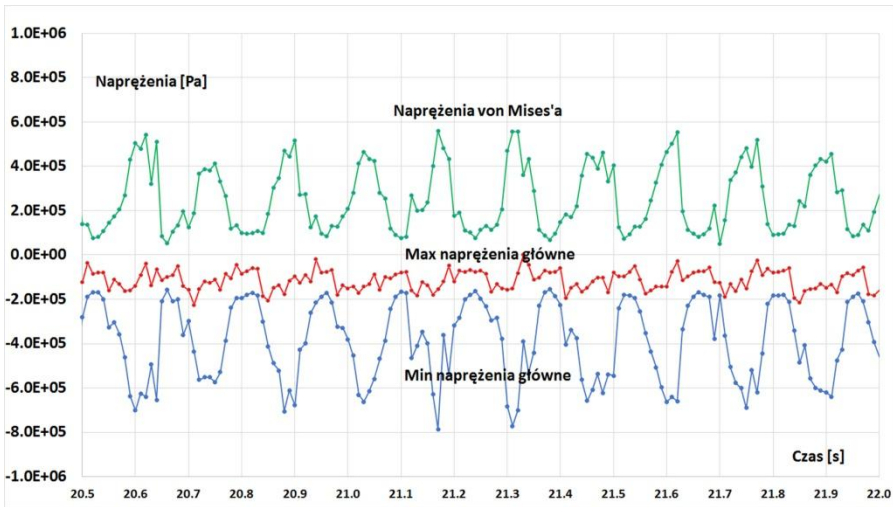
Źródło: opracowanie własne



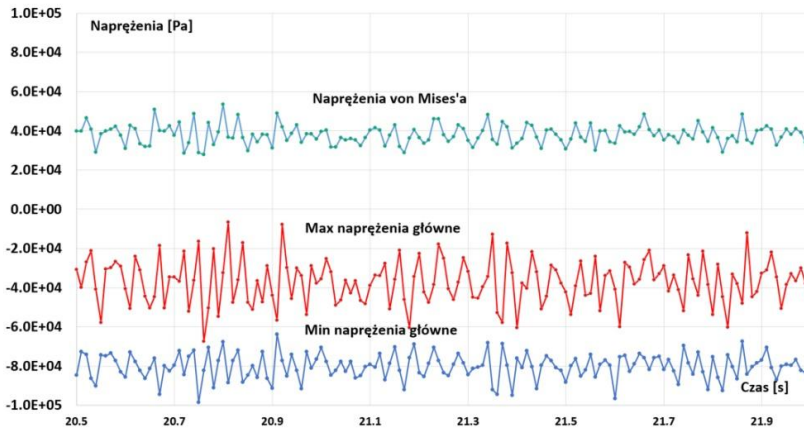
Rysunek 25. Lokalizacja analizowanych ryb, na wlocie do turbiny oraz na wlocie do rury ssącej.

Źródło: opracowanie własne

Model testowej ryby został umieszczony w dwóch miejscach: na wlocie do kierownicy oraz na wlocie do rury ssącej pod turbiną (rys. 15). Wykorzystując mechanizmy dyskretyzacji edytora FSI, opisany został hexahedronowymi (sześcián poczwórny) elementami skończonymi. Następnie we wskazanym punkcie w ciele ryby określono ekstremalne wartości tensora naprężeń Couchy'ego. Na wykresach przedstawiono zmienność wartości maksymalnych oraz minimalnych naprężeń głównych tensora naprężeń oraz naprężenia wg teorii wyężeniowej von Misesa (rys. 16 i 17).



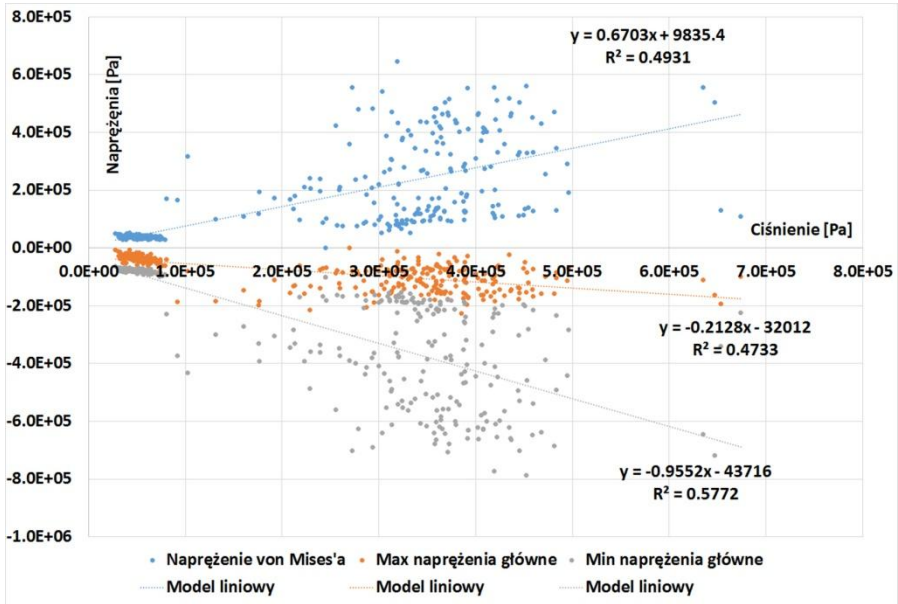
Rysunek 26. Napężenia występujące w ciele ryby znajdującej się na wlocie do kierownicy.
Źródło: opracowanie własne



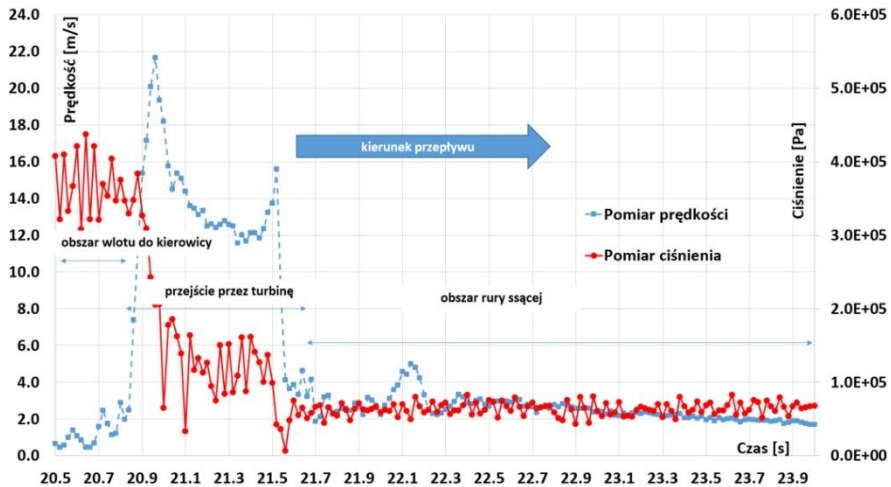
Rysunek 27. Napężenia występujące w ciele ryby znajdującej się na wlocie do rury ssącej pod turbiną.
Źródło: opracowanie własne

Ze względu na bezpośredni związek pomiędzy ciśnieniem oraz wartościami naprężeń zaproponowano korelacyjny model liniowy dla 95% przedziału ufności pomiędzy wartościami ciśnienia oraz naprężeń. Wyniki analiz zostały przedstawione na rysunku 18.

W punktach położenia modelu ryby, na wlocie do kierownicy umieszczono ruchomy punkt pomiarowy przemieszczający się wraz z przepływającą wodą. Mierzone wartości ciśnienia i prędkości przedstawiono poniżej, rys. 19, na którym wyróżniono trzy obszary: obszar spirali doprowadzającej wodę do turbiny, obszar turbiny oraz obszar rury ssącej. Każdy z tych obszarów został scharakteryzowany wartością ciśnienia i prędkości jakie zostały zapisane na ruchomym punkcie pomiarowym, przemieszczającym się wraz z przepływającą wodą.



Rysunek 28. Korelacja liniowa wartości ciśnienia na zewnątrz ryby oraz naprężeń w ciele ryby. Źródło: opracowanie własne



Rysunek 29. Zmiany ciśnienia i prędkości od wlotu do spirali do wylotu z rury ssącej. Źródło: opracowanie własne

9. Podsumowanie

Starano się przedstawić wieloaspektową charakterystykę pracy instalacji Aldena z punktu widzenia różnych dziedzin współczesnej nauki. Przedstawione wyniki oraz analizy w całości są efektem modelowania CFD oraz przetwarzania wyników symulacji przez autora. Uwagę skupiono nie tylko na opracowaniu modeli symulacji oraz analizie wyników, lecz również starano się przedstawić współczesne metody analizy

w rozwiązywaniu problemów CFD. Opisano pokrótce stosowane równania Naviera – Stokesa znane pod nazwą Reynoldsa. Opisano najbardziej dotkliwe problemy pracy instalacji hydroenergetycznych: kawitację, wirowość oraz obciążenia hydrodynamiczne. Przedstawiono wyniki analiz mechanicznych oraz biomechanicznych. Dla wybranych elementów instalacji: spirali wlotowej oraz rury ssącej przedstawiono rozkłady naprężeń wg wyężeniowej teorii von Misesa oraz obraz zdeformowanych pod wpływem naprężeń elementów. Ze względu na największą szkodliwość instalacji hydroenergetycznych dla populacji ryb, dla zdefiniowanych wymogów środowiskowych zaprezentowano identyfikację obszarów niekorzystnych, w których wartości graniczne kryteriów są przekroczone. Wykonana analiza biomechaniczna, dla opracowanego modelu ryby pozwoliła we wskazanym punkcie w ciele ryby określić między innymi wartości tensora naprężeń Couchy’ego oraz pokazać związek regresyjny pomiędzy parametrem ciśnienia oraz wartościami maksymalnymi i minimalnymi naprężeń głównych jak również naprężeniami von Misesa a ciśnieniem.

Literatura

1. Alto P., *"Fish Friendly" Hydropower Turbine Development and Deployment: Alden Turbine Preliminary Engineering and Model Testing*, EPRI, CA and U.S. Department of Energy, Washington, DC, 2011, s. 1019890.
2. Cook T.C., Hecker G.E., Amaral S.V., Stacy P.S., Lin F., Taft E.P., *Final report – pilot scale tests Alden/Concepts NREC Turbine*, Prepared for U.S. Department of Energy, Washington, DC, 2003, Contract No. DE-AC07-99ID13733.
3. Fay C., Hecker G., Hogan T., Perkins N., *Alden Turbine Market Analysis for New York State*, Final Report, Report Number 13-19, September 2012, New York State Energy Research and Development Authority, Alden Research Laboratory, Inc., 2012.
4. Orszag S.A., Yakhot V., Flannery W.S., Boysan F., Choudhury D., Maruzewski J., Patel B., *Renormalization Group Modeling and Turbulence Simulations*, In International Conference on Near-Wall Turbulent Flows, Tempe, Arizona, 1993.
5. Twaróg B., *An analysis of the application of the Alden turbine – a case study of the Dobczyce hydroelectric power plant*, Technical Transactions. Environment Engineering, Y. 112, Iss. 18, ISSN:1897-6336, DOI: 10.4467/2353737XCT.15.193.4398, 2015.
6. Haimes R., Kenwright D., *On the velocity gradient tensor and fluid feature extraction*, 14th Computational Fluid Dynamics Conference, Fluid Dynamics and Colocated Conferences, <https://doi.org/10.2514/6.1999-3288>, 1999.
7. Vernerey F.J., Barthelat F., *On the mechanics of fishscale structures*, International Journal of Solids and Structures, 47, 2010, s. 2268-2275.
8. Zhang Y., Liu K., Xian H., Du X., *A review of methods for vortex identification in hydroturbines*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81, 2018, s. 1269-1285.
9. Cook T.C., Hecker G.E., Faulkner H.B., Jansen W., *Development of a more fish tolerant turbine runner – Advanced hydropower turbine project*, prepared for DOE (Idaho Operations Office), contract No. DE-AC07-95ID13383, 1997.
10. Kumar P., Saini R.P., *Study of cavitation in hydro turbines-A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, 2010, s. 374-383.
11. Bogusławski A., Drobniak S., Tyliczek A., *Turbulencja – od losowości do determinizmu*, Modelowanie Inżynierskie ISSN 1896-771X, Gliwice, Instytut Maszyn Ciepłych, Politechnika Częstochowska, 36, 2008, s. 41-48.
12. Hunt J.C.R., Wray A., Moin P., *Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows*, Center for Turbulence Research Report CTR-S88, 1988.

13. Hou G., Wang J., Layton A., *Numerical Methods for Fluid-Structure Interaction – A Review*, Commun. Comput. Phys., 2012, DOI: 10.4208/cicp.291210.290411s, Vol. 12, No. 2, s. 337-377
14. Twaróg B., *Interaction between hydraulic conditions and structures – fluid structure interaction problem solving. A case study of a hydraulic*, Technical Transactions, DOI: 10.4467/2353737XCT.18.029.8002, ISSN 0011-4561, 115, Iss. 2, 2018, s. 187-209.
15. Twaróg B., *CFD analysis for an eco-friendly Alden turbine system*, 3rd International Conference on the Sustainable Energy and Environmental Development, Krakow, Poland, October 16-18, 2019, book of abstracts. Kraków : Institute of Sustainable Energy – Publishing House, 2019. ISBN 978-83-954975-3-7.
16. Twaróg B., *The analysis of the reactive work of the Alden turbine*, Technical Transactions, doi:10.4467/2353737X, 2019, Vol. 116, Iss. 1, s. 143-166.

Przyjazna dla środowiska turbina Aldena – analizy

Streszczenie

Niniejszy artykuł prezentuje wieloaspektową charakterystykę pracy instalacji Aldena wskazując obszary negatywnie wpływające na populację ryb. Uwagę skupiono na przypadku pracy turbiny Aldena, spirali dolotowej oraz rury ssącej w postaci krzywaka. Dla celów symulacji CFD (Computer Fluid Dynamics) został opracowany model 3D instalacji. Modelowanie zostało wykonane w oprogramowaniu Flow3D firmy Flow Science z wykorzystaniem równań Naviera-Stokes'a z modyfikacją Reynoldsa. W pracy przeanalizowano najbardziej dotkliwe problemy pracy instalacji hydroenergetycznych: kawitację, wirowość, obciążenia hydrodynamiczne i pulsację ciśnień. Wykonano analizę spektralną pozwalającą wskazać dominujące częstotliwości pulsacji ciśnień. Ze względu na największą szkodliwość instalacji hydroenergetycznych dla populacji ryb, dla zdefiniowanych wymogów środowiskowych zaprezentowano identyfikację obszarów niekorzystnych, w których wartości graniczne kryteriów są przekroczone. Dla opracowanego modelu ryby wykonano analizy biomechaniczne przy zastosowaniu teorii FSI. Pokazano wartości naprężeń w ciele ryby oraz opisano związek regresyjny pomiędzy naprężeniami oraz ciśnieniem. W ostatniej części artykułu przedstawiono pulsacje ciśnienia oraz prędkości jakie występują w obszarach przepływu ryby od spirali wlotowej przez turbinę, kończąc na rurze ssącej.

Słowa kluczowe: turbina Aldena, kawitacja, rdzeń wiru, obciążenia hydrodynamiczne, biomechanika

Eco-friendly Alden turbine system analysis

Abstract

This study discusses multiple aspects of operating characteristics of an Alden system, indicating its properties and parameters that adversely affect fish populations. Attention is focused on operation of the Alden turbine, the scroll inlet, and the bent draft tube. A 3D model of the system was developed for a CFD (Computer Fluid Dynamics) simulation. Modelling was conducted using the Flow3D software offered by Flow Science, using Reynolds-averaged Navier-Stokes equations. The study contains an analysis of the most acute problems in the operation of a hydroelectric system: cavitation, vorticity, hydrodynamic loads and pressure fluctuation. A spectral analysis was performed to indicate the prevailing frequencies of pressure fluctuation. Considering the disastrous adverse effect of hydroelectric systems on fish populations, unfavourable locations were identified in which limit values set in environmental protection requirements are exceeded. A fish model was constructed to perform biomechanical analyses using FSI theory. The study gives values of stresses in the fish body and describes the regression relationship between stress and pressure. The last section of the study deals with pressure and velocity fluctuations taking place in fish swimming areas, beginning with the scroll inlet, the turbine, and ending with the draft tube.

Keywords: Alden turbine, cavitation, vortex core, hydrodynamics loads, biomechanics

Przyjazna dla środowiska turbina Archimedesa – analizy

1. Wstęp

W obecnym kształcie turbina śrubowa swoje początki datuje na okres 1500-1100 p.n.e. w którym wykorzystywano podobne urządzenie do podnoszenia wody w celu nawadniania upraw. Ponad 2000 lat temu wykorzystywane było jako pompa do usuwania wody z dna statków. Dzięki niskiej rotacji urządzenie ma zastosowanie w nowoczesnych metodach produkcji, w których jest używane do przemieszczania materiału i włączania do form. Znalazło również zastosowanie w przemyśle medycznym w mechanicznym sercu. Ze względu na przyjazność dla ryb wykorzystywane jest również w bezpiecznym transporcie rybnym.

Wśród dostępnych rozwiązań turbin wodnych, śruba Archimedesa uważana jest za urządzenie najbardziej przyjazne dla ryb. Główną przyczyną są niskie prędkości obrotowe, małe amplitudy ciśnień, naprężeń ścinających oraz turbulencji [1]. Przeprowadzone badania przez Fishtek Consulting [1] potwierdziły przyjazny charakter turbiny śrubowej. Żadna z testowanych ryb, przepuszczanych przez urządzenie nie doznała długotrwałych uszkodzeń. Badania w Holandii [2] potwierdziły znaczne zmniejszenie śmiertelności dorosłych węgorzy. Ponadto, potwierdzono zalety eksploatacyjne charakteryzujące się odpornością na uszkodzenia rumowiskiem oraz niską korozją. Zalety te zwiększają gamę zastosowań turbiny np. do transportu mieszaniny mułu, drobnego rumowiska i wody.

2. Efektywność

W 1999 r. przeprowadzono w Niemczech szczegółową analizę pracy przy różnych nachyleniach turbiny Archimedesa. Uzyskano sprawność na poziomie około 80% [3]. Osiągalne wydajności wahają się od 78% do 83% [4]. Według Andritz Hydro turbina śrubowa jest w stanie osiągnąć wartość maksymalną 92% [5]. Sprawność urządzenia nie zmienia się znacznie przy odchyleniach natężenia przepływu od wartości nominalnej [6]. Urządzenie jest w stanie osiągnąć wysokie wartości sprawności w szerokim zakresie przepływu oraz może wytwarzać energię przy znacznie niższych przepływach niż turbina Kapłana. Jedną z zalet tej turbiny jest również możliwość modyfikacji kąta nachylenia turbiny.

3. Koszt

Niski koszt urządzenia oraz wyposażenia technicznego wynika z prostoty konstrukcji urządzenia oraz niewymagającej, nieskomplikowanej zabudowy koryta. Brak regulowanych łopatek kierownicy, specjalnych urządzeń doprowadzających wodę do turbiny oraz prosta budowa wirnika turbiny obniżają koszt całej elektrowni. Możli-

¹ btwarog@pk.edu.pl, Katedra Geoinżynierii i Gospodarki Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Krakowska, www.pk.edu.pl.

wości wykonania wirnika oraz koryta rynny z kompozytów daje możliwość budowy urządzeń jako monolitu co zmniejsza opory ruchu, podnosi dokładność wykonania krzywoliniowych powierzchni oraz pozwala zmniejszyć przestrzenie pomiędzy ruchomymi elementami. Co więcej, skomplikowany obiekt montażowy jest prosty w wykonaniu. Współczesne techniki dają również możliwość wykonania elementów wirujących w technologii projektowania skomplikowanych kształtów w profesjonalnym oprogramowaniu a następnie wykonaniu na drukarkach 3D (w przypadku ograniczonych wymiarów). Urządzenia elektryczne są odsunięte od części hydrotechnicznej koryta co zwiększa bezpieczeństwo i również obniża koszt izolacji.

4. Konserwacja i eksploatacja

Brak regulowanych części, solidność konstrukcji oznacza, że koszty eksploatacji i serwisu są niskie. Okres życia urządzenia oceniany jest na około 30 lat. Po około 20 letnim okresie eksploatacji wymagana jest regulacja nachylenia turbiny. Ponieważ urządzenie nie wymaga wcześniejszych ekranów zmniejszających intensywność rumowiska i zanieczyszczeń, obniża to koszty wykonania i konserwacji. Niska prędkość obrotowa i duże szczeliny między płetwami (zabierakami) śruby oznaczają, że nawet stosunkowo duże zanieczyszczenia nie spowodują uszkodzenia urządzenia [7]. Pierwszym kontaktem urządzenia z medium jest krawędź czołowa. Zabezpieczenie krawędzi nakładką gumową zabezpiecza płetwę przed agresywnym środowiskiem ewentualnych zanieczyszczeń, zmniejszając korozję i podnosząc trwałość urządzenia. Niska prędkość obrotowa i niewielkie pulsacje ciśnienia praktycznie nie powodują szkodliwych skutków zjawiska kawitacji. Jedynym utrudnieniem jest zaprojektowanie odpowiedniej skrzyni biegów umożliwiającej podłączenie do generatora/ silnika asynchronicznego.

5. Turbina śrubowa Archimedesesa

Pomysł wykorzystania pompy śrubowej jako turbiny jest technologią innowacyjną. Pierwsze działające urządzenie zostało wdrożone w Europie w 1994 roku. Ponieważ wykorzystanie urządzenia jako turbiny jest stosunkowo nowym pomysłem, wciąż trwają badania nad poprawą kształtu geometrii i innych parametrów urządzenia pod kątem zwiększenia efektywności.

5.1. Śrubowa turbina pływowa

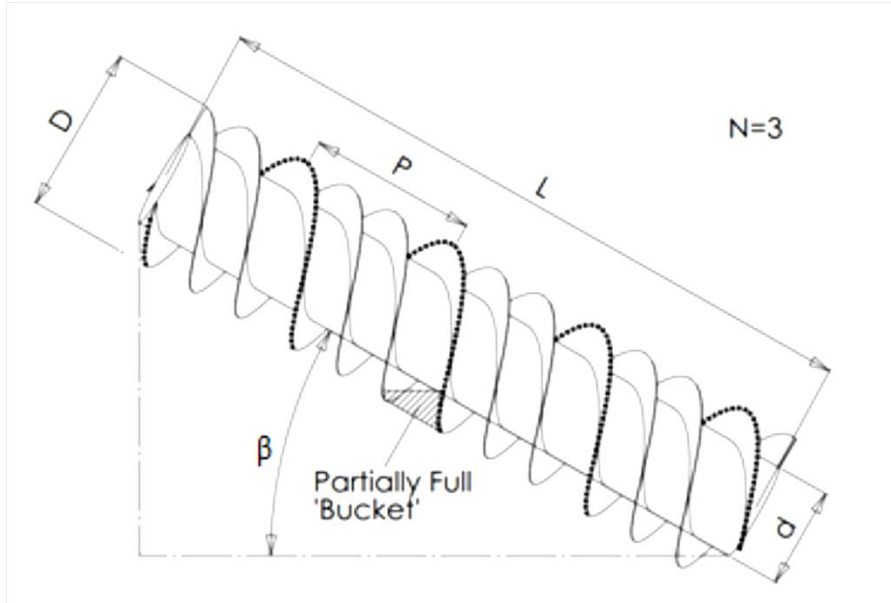
Pływowa śruba Archimedesesa to jeden z innowacyjnych projektów opracowanych w dziedzinie prądów pływowych (firma Flumill) jest obecnie w trakcie opracowywania urządzenia. Urządzenie wykorzystuje parę śrub o geometrii z symetrycznymi płetwami. Trwale przymocowane do dna morza na przegubie umożliwia urządzeniu zmianę kąta pracy i kierunku ustawienia się tak by zmaksymalizować wydajność i wykorzystać pływy.

5.2. Pozioma turbina śrubowa

Urządzenie poziome łączy cechy nachylonej turbiny oraz wersji poziomej. Konstrukcja śruby jest identyczna z wersją pochyloną, jednak urządzenie nie zawiera obudowy oraz nie potrzebuje specjalnego koryta. Turbina zamocowana na ramie pływakowej i umieszczona jest w nurcie swobodnie płynącej wody.

6. Kryteria projektowe

Maksymalna wydajność, jaką urządzenie jest w stanie osiągnąć, jest ograniczona przez połączenie geometrii turbiny i strat mechanicznych w systemie [9]. W związku z tym optymalna konstrukcja turbiny jest zawsze kompromisem między teoretycznym optimum a kosztem jego wykonania.



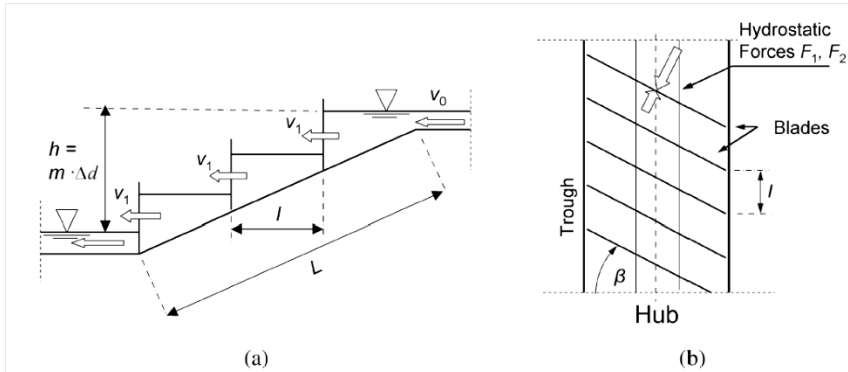
Rysunek 30. Szczegóły geometryczne turbiny śrubowej Archimedesowej [8]

Tabela 1. Parametry geometryczne turbiny śrubowej Archimedesowej [17]

Symbol	Nazwa parametru
Średnica zewnętrzna	D
Średnica wewnętrzna	d
Kąt nachylenia	β
Skok	P
Długość śruby	L
Liczba pletw (helisy)	N
Grubość profilu spiralnego (helisy)	G
Prędkość obrotowa	n
Przepływ	Q
Prędkość kątowna	ω

Tabela 2. Współczynniki projektowe dla turbiny śrubowej Archimedesowej [17]

Nazwa parametru	Współczynnik/relacja
Współczynnik średnic	$\delta = d/D$
Współczynnik skoku	$P_r = P/D$
Współczynnik długości	$L_r = L/D$
Współczynnik profilu	$\varphi = G/d$



Rysunek 31. Wytwarzanie siły hydrodynamicznej przez turbinę Archimedesa, [9]

6.1. Wewnętrzne parametry projektowe

6.1.1. Współczynnik skoku

Testy wskazują, że większe wartości współczynnika skoku odpowiadają zwiększonej wartości wydajności i mocy. Przy stałej długości, zwiększenie skoku zmniejsza liczbę przestrzeni (kubelków), ale zwiększa objętość gromadzonej wody. Ten wzrost w każdym „kubelku” oznacza, że powstaje większa siła hydrostatyczna działająca na ścianki łopatkki (płetwy) co z kolei pływa na wzrost momentu obrotowego. Badania potwierdzają, że ważniejsze jest zwiększenie objętości czyli siły hydrostatycznej niż liczby „kubelków”. Z drugiej strony zwiększanie objętości przestrzeni powoduje zwiększanie strat wskutek przecieków. Oznacza to istnienie punktu optymalnego współczynnika skoku, przekroczenie którego powoduje zmniejszenie efektywności urządzenia.

6.1.2. Obroty na minutę

Praca z niskimi prędkościami obrotowymi ma wiele zalet. Powoduje to mniejszą prędkość oraz turbulencje płynu w turbinie, co pomaga zminimalizować straty [10]. Niskie prędkości obrotowe pomagają również zmniejszyć straty spowodowane tarcieniem [12], w układach elektro-mechanicznych tarcie jest proporcjonalne do kwadratu prędkości.

6.1.3. Liczba płetw (łopatek) turbiny

Turbina śrubowa Archimedesa może mieć dużą liczbę łopatek turbiny. Uważa się [9, 11], że można osiągnąć wyższą wydajność przy użyciu ich większej liczby.

6.1.4. Współczynnik średnic

Zwiększając stosunek średnicy zewnętrznej do wewnętrznej można uzyskać większą moc i moment obrotowy. Wartościami granicznymi są parametry eksploatacyjne oraz wytrzymałościowe. Maksymalną wartość średnicy przyjmuje się 4 m, jednak zastosowanie kompozytów daje większe możliwości [13].

6.1.5. Wolna przestrzeń

Szczelina między krawędziami helisy a obudową/rynną ma wpływ na efektywność pracy. Im mniejsza szczelina tym mniejsze straty w przeciekach jednak zbyt mała szczelina może powodować powstawanie tarcia.

6.1.6. Rynna obrotowa lub nieruchoma

Badania były wykonywane dla stacjonarnych rynien i ruchomych. Wyniki pokazują że stacjonarne rozwiązania są bardziej efektywne.

6.1.7. Zmienna lub stała prędkość

Turbina śrubowa dobrze działa w zakresie dużej zmienności przepływów. Uzmienienie prędkości obrotowej poprawia efektywność do 85% [14].

6.1.8. Natężenie przepływu objętościowego

Obecne turbiny śrubowe Archimedesesa są w stanie dobrze pracować przy przepływach w zakresie od 0,1 do 50 m³/s [15]. Jeśli natężenia przepływu przekraczają ten zakres urządzenie wciąż może pracować. W praktyce spotyka się układy bliźniacze dla zwiększenia wydatku roboczego, kaskadowe dla zwiększenia spadku roboczego, lub połączenie obu rozwiązań jednocześnie.

6.1.9. Kąt nachylenia

Badania potwierdzają, że wyższą wydajność można osiągnąć wraz ze wzrostem wartości nachylenia.

6.1.10. Długość

Przy większej długości turbina jest w stanie odzyskać więcej energii z przepływającej wody [16]. Jednak istnieje wartość graniczna powyżej której następuje spadek mocy.

7. Wady i zalety instalacji

Zalety turbiny Archimedesesa głównie skupiają się wokół znacznie niższych kosztów wdrożenia przy porównywalnej sprawności do turbiny Kaplana. Równocześnie możliwość zastosowań AHS przy niskich spadach < 10 m, w potokach i kanałach derywacyjnych czyni tę turbinę bardzo polecaną.

Zalety instalacji [18]:

- nie zanieczyszczająca środowiska, przyjazna dla środowiska;
- przyjazna dla ryb;
- redukcja CO₂, wysokie natlenianie;
- utrzymanie naturalnych parametrów przepływu wody, bez wzrostu ciśnienia, turbulencji oraz naprężeń ścinających;
- pomijalna ingerencja w siedliska;
- zbędne przesiedlanie i wycinka drzew;
- możliwość wyspowego zastosowania w systemach energetycznych dla małych wiosek lub kilku rodzin;
- źródło – Odnawialne Źródła Energii (OZE);

- zastosowanie na małych kanałach, stawach, rzekach, możliwości zwiększania zasobów wodnych;
- znikome koszty utrzymania i eksploatacji;
- łatwa i szybka instalacja;
- mały zakres prac budowlanych;
- wysoka niezawodność;
- wydajna dla niskich i zmiennych wysokości podnoszenia (min. 1 m wysokości podnoszenia);
- trwałość w eksploatacji (tryb działania);
- niskie zużycie, długotrwałość;
- kawitacja i erozja nie wpływają na pracę turbiny;
- prawie stała sprawność przy zmiennych obciążeniach;
- brak konieczności stosowania systemu sterowania;
- większa wydajność w porównaniu z kołami wodnymi i małymi turbinami;
- bardzo długa żywotność, co najmniej 30 lat;
- niewrażliwa na zatykanie.

8. Parametry turbiny

W niniejszej analizie wykorzystano instalację o parametrach zestawionych w tabeli 3.

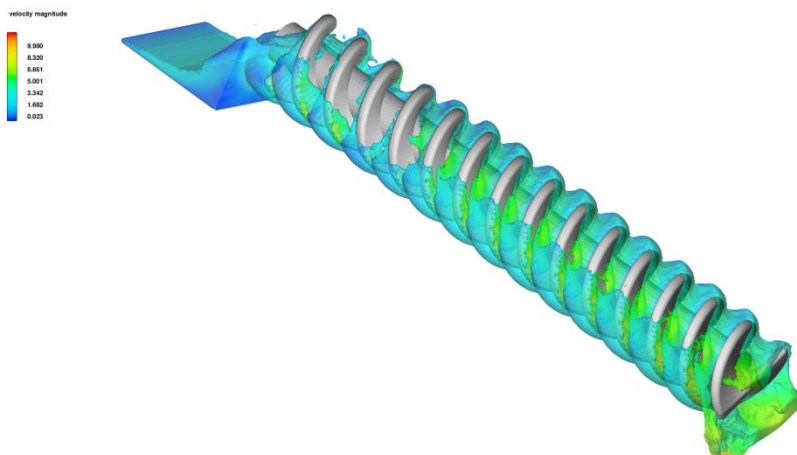
Tabela 3. Parametry geometryczne turbiny śrubowej Archimedesa

Nazwa parametru	Symbol	Wartość
Srednica zewnętrzna	D	2 m
Srednica wewnętrzna	d	0.5 m
Kąt nachylenia	β	45°
Skok (jedna helisa)	P	1.8 m
Długość śruby	L	28 m
Liczba pletw (helisy)	N	2
Grubość profilu spiralnego (helisy)	G	0.1 m (lekki materiał)

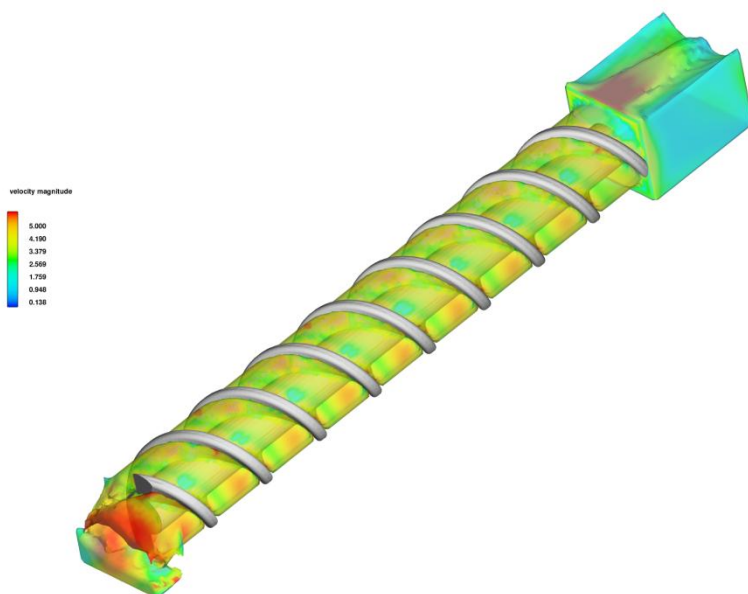
Źródło: Opracowanie własne

9. Wybrane przykłady instalacji

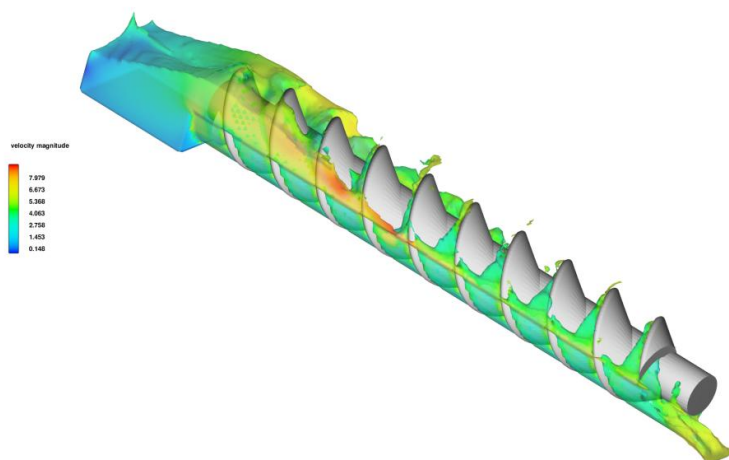
W praktyce spotyka się różne rozwiązania dostosowane do lokalnych warunków. Współczesne techniki modelowania i technologia produkcji daje możliwości wykonywania prototypów a następnie pełnej produkcji rozwiązań opracowywanych w laboratoriach z użyciem algorytmów optymalizacyjnych kształt turbiny z punktu widzenia kryteriów minimalizacji kosztów, maksymalizacji efektywności technicznej z uwzględnieniem ograniczeń środowiskowych. Na rysunkach 3-6 przedstawiono kilka rozwiązań.



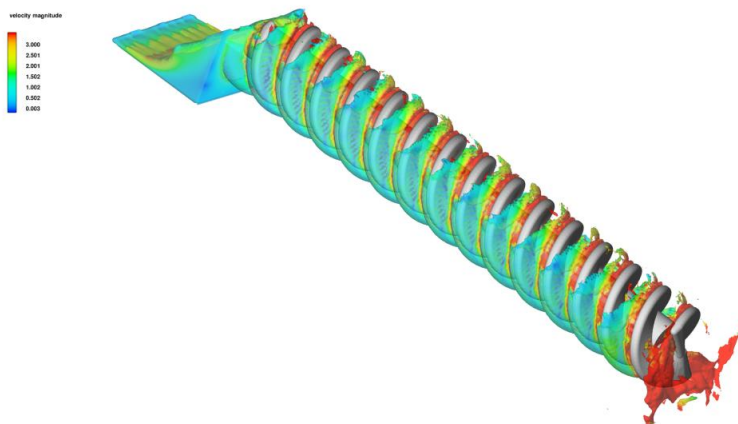
Rysunek 32. Typowe rozwiązanie z podwójną helisą o małym skoku i małym nachyleniu, często stosowane na rzekach i potokach. Źródło: Opracowanie własne



Rysunek 33. Rozwiązanie z podwójną helisą o dużym skoku i małym nachyleniu. Turbina umieszczona w obudowie o całkowitej zabudowie. Rzadko spotykana. Tutaj zaproponowane jako rozwiązanie dla rzek i potoków. Zwiększona wydajność przy zmiennych parametrach obciążenia. Źródło: Opracowanie własne



Rysunek 34. Rozwiązanie stosowane w przypadku turbin pływowych. Podwójna helisa o dużym skoku. Tutaj zaproponowane jako rozwiązanie dla rzek i potoków. Źródło: Opracowanie własne



Rysunek 35. Kompozytowe rozwiązanie zaproponowane po optymalizacji wydajności technicznej i zmniejszenia wpływu na środowisko. Zwiększona wydajność przy zmiennych parametrach obciążenia. Źródło: Opracowanie własne

10. Analizy biomechaniczne

Ingerencja człowieka w środowisko i siedliska ryb wpływa na populację gatunków i ich kondycję. Zabudowa techniczna rzek i potoków oraz obszarów przybrzeżnych morskich i oceanicznych przyczynia się do pogorszenia warunków bytowania ryb oraz ich różnorodności biologicznej. W zabudowie hydroenergetycznej główną przyczyną negatywnego oddziaływania na populację ryb są turbiny wodne. Zmienność warunków ciśnienia, prędkości, naprężeń jak również nagłe zmiany kształtu i geometrii kanałów, którymi przepływa ryba, zmniejszają jej szansę przeżycia. Uwzględnianie kryteriów i norm środowiskowych zmierzających do minimalizacji negatywnego wpływu turbin

na stan środowiska staje się jedną z podstawowych zasad stosowanych przy doborze urządzeń hydroenergetycznych.

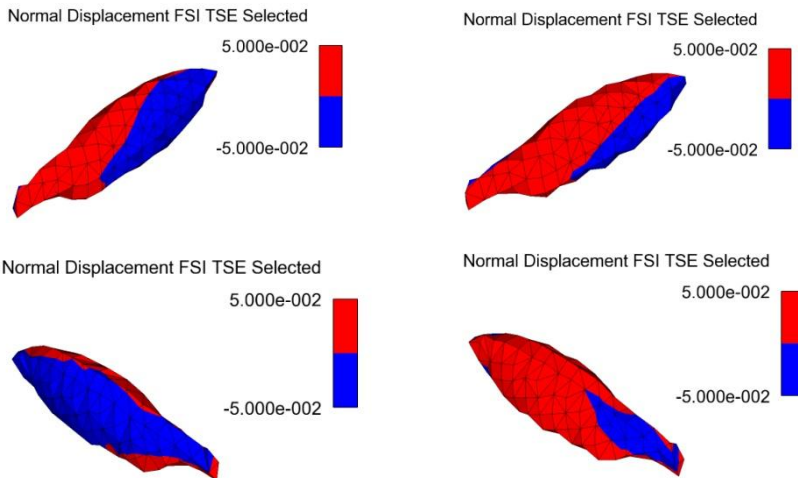
Trajektoria, jaką musi pokonać ryba przemieszczając się ze stanowiska górnego do dolnego zawiera szereg czynników negatywnie wpływających na jej kondycję. Występują obszary nagłego wzrostu i spadku ciśnienia, obszary kawitacyjne, obszary w których ryby narażone są na ścieranie, uderzanie, ścinanie, zgniatanie oraz turbulencje. Turbina Archimedesesa jest jedyną przyjazną rybom, gdzie kształt oraz sposób pracy spełnia wszystkie kryteria środowiskowe [17].

Kryteria przedstawiono poniżej:

- prędkości obwodowe wirnika powinny być mniejsze lub równe 12 m/s;
- minimalne ciśnienie w wirniku nie powinno być mniejsze niż 69 kPa;
- szybkość zmiany ciśnienia w wirniku powinna być mniejsza niż 550 kPa/s;
- szybkość zmiany prędkości w strefie ścinania nie powinna być większa niż 4,5 m/s na 2,54 mm;
- wskaźnik zmiany naprężeń ścinających powinien być mniejszy lub równy 180 m/s/m;
- odstęp między elementami obrotowymi i stacjonarnymi powinien wynosić mniej niż 2 mm;
- kanał przepływowy w wirniku powinien być jak największy;
- liczba i długość krawędzi łopatek wirnika powinny być zminimalizowane.

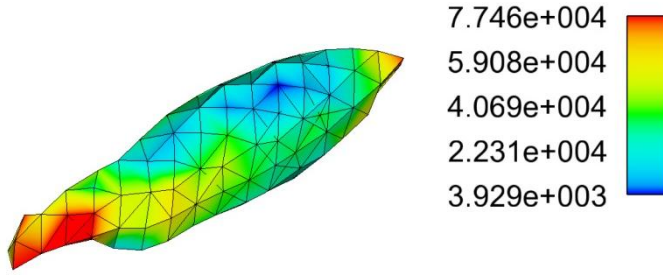
Dla określonych parametrów biomechanicznych ciała ryby zastosowano model FSI do określenia wartości naprężeń [21]. Dla analizowanych przypadków lokalizacji przyjęto następujące parametry biomechaniczne:

- materiał – ciało ryby;
- gęstość 1080 kg/m^3 ;
- moduł Younga $2,2 \text{ e}+9 \text{ Pa}$;
- współczynnik Poissone'a równy 0,4.



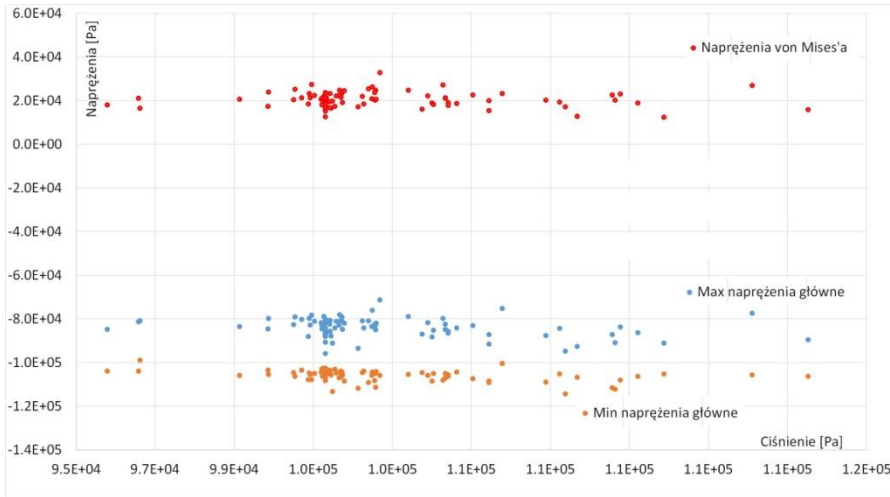
Rysunek 36. Obszary ściskane i rozciągane na ciele ryby w trakcie przepływu turbiną Archimedesesa.
Źródło: Opracowanie własne

Von Mises Stress FSI TSE Selected

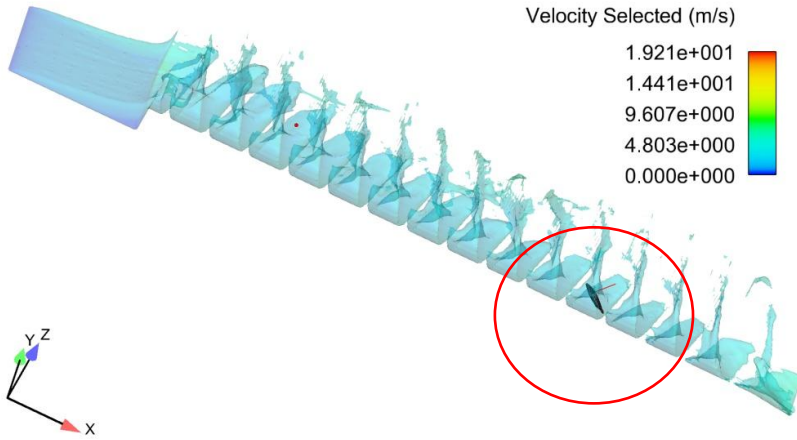


Rysunek 37. Przykładowy rozkład naprężeń von Mises’a [Pa] w ciele ryby, po ustabilizowaniu warunków pracy turbiny Archimedes, Źródło: Opracowanie własne

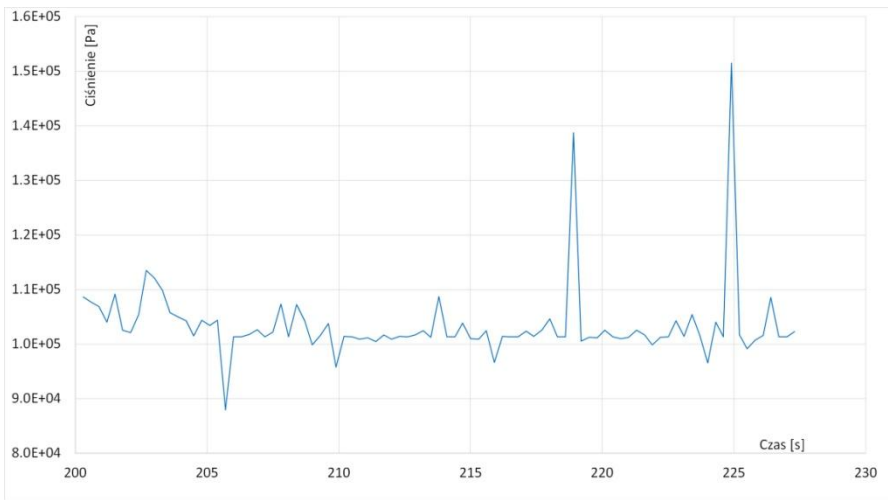
Model testowej ryby (kleń) został umieszczony w dolnej części turbiny Archimedes (rys. 6). Wykorzystując mechanizmy dyskretyzacji edytora FSI, opisany został czworobocznymi elementami skończonymi. Następnie we wskazanym punkcie w ciele ryby określono ekstremalne wartości tensora naprężeń Couchy’ego. Na wykresach przedstawiono zmienność wartości maksymalnych oraz minimalnych naprężeń głównych tensora naprężeń oraz naprężenia wg teorii wyężeniowej von Misesa.



Rysunek 38. Przykładowy rozkład naprężeń von Mises’a [Pa], po ustabilizowaniu warunków pracy turbiny Archimedes. Źródło: Opracowanie własne



Rysunek 39. Położenie analizowanej ryby. Źródło: Opracowanie własne



Rysunek 40. Pulsacja ciśnienia w obszarze położenia ryby. Źródło: Opracowanie własne

11. Podsumowanie

Najodpowiedniejszym podsumowaniem niniejszego artykułu jest podkreślenie kolejny raz zalet prezentowanego urządzenia. Przyjazność dla środowiska, szczególnie dla ryb i innych organizmów, redukcja dwutlenku węgla oraz natlenianie, utrzymanie naturalnych warunków przepływu oraz minimalna ingerencja w siedliska ryb rekomendują turbinę Archimedesesa jako innowacyjną turbinę o szerokim zastosowaniu (zróżnicowane parametry pracy: przepływu i spadu) [19-22]. Możliwość zastosowań AHS przy niskich spadach < 10 m, w potokach i kanałach derywacyjnych, wysoki wskaźnik sprawności oraz wyspowe możliwości zastosowań w systemach energetycznych podnosi walory jej użyteczności.

Literatura

1. Fishtek Consulting, *Fish Monitoring and Live Fish Trials. Archimedes Screw Turbine, River Dart*, Fishtek Consulting, 2008.
2. Buysse D., Mouton A.M., Stevens M. Neucker T.V.D., *Mortality of European eel after downstream migration through two types of pumping stations*, Fisheries Management and Ecology, vol. 21, 2014, s. 13-21.
3. Brada K., *Hydraulic screw generates electricity from micro hydropower stations* (translated from German), Maschinenmarkt Wurzburg, Mitteilung, vol. 14, 1999, s. 52-56.
4. Papadopoulou D., Coronopoulos C., *Back to the Future: Rediscovering 171 the Archimedean Screws as Modern Turbines for Harnessing Greek Small Hydropower Potential*, 2011, s. 597-603.
5. Andritz, *Andritz Atro hydrodynamic screw turbines*, online 2021/06/01.
6. Nuernbergk D.M., Rorres C., *Analytical Model for Water Inflow of an Archimedes Screw Used in Hydropower Generation*, Journal of Hydraulic Engineering, 2013, s. 213-220.
7. Renewables First, Archimedean Screw, <http://www.renewablesfirst.co.uk/hydro-learning-entre/archimedean-screw/>, 2021-05-31.
8. Lyons M., Lubitz W.D., *Archimedes screws for microhydro power generation*, in Proceedings of the ASME 2013 7th International Conference on Energy Sustainability & 11th Fuel Cell Science, Minneapolis, 2013.
9. Müller G., Senior J., *Simplified theory of Archimedean Screws*, Journal of Hydraulic Research, vol. 47, no. 5, 2009, s. 666-669.
10. Lyons M.W.K., *Lab Testing and Modeling of Archimedes Screw Turbines*, University of Guelph, Guelph 2014.
11. Fiardi E., *Preliminary Design of Archimedean Screw Turbine Prototype for Remote Area Power Supply*, Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace, vol. 5, 2014, s. 30-33.
12. Nuernbergk D.M., Rorres C., *Experimental Evaluation of Advanced Archimedes Hydrodynamic Screw Geometries*, Journal of Hydraulic Engineering, 144(8) DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001479, 2018.
13. Raza A., Mian M.S., Saleem Y., *Modeling of Archimedes Turbine for Low Head Hydro Power Plant in Simulink MATLAB*, International Journal of Engineering Research & Technology, vol. 2, no. 7, 2013, s. 2471-2477, <https://www.aquaticcontrol.co.uk>, 2021-06-02.
14. Stergiopoulou A., Kalkani E., *Towards a First C.F.D. Study of Innovative Archimedean Inclined Axis Hydropower Turbines*, International Journal of Engineering Research & Technology, vol. 2, no. 9, 2013, s. 193-199.
15. Webber G.M., *Screw turbine and method of power generation*, 11 July 2013, <http://www.google.com/patents/US20130177424>.
16. Cook T.C., Hecker G.E., Amaral S.V., Stacy P.S., Lin F., Taft E.P., *Final report – pilot scale tests Alden/Concepts NREC Turbine. Prepared for U.S. Department of Energy*, Washington, DC, Contract No. DE-AC07-99ID13733, 2003.
17. Waters, S.R., Aggidis G.A., *Over 2,000 years in Review: Revival of the Archimedes Screw from Pump to Turbine*, Lancaster University Renewable Energy Group and Fluid Machinery Group, Engineering Department, Lancaster LA1 4YW, United Kingdom 2015.
18. Twaróg B., *Przykład analizy lokalizacyjnej pod hydroenergetyczne inwestycje małej skali*, Energetyka Wodna 02/2014, Towarzystwo Rozwoju Małych Elektrowni Wodnych, 2014.
19. Twaróg B., *Przykład analizy lokalizacyjnej pod hydroenergetyczne inwestycje małej skali – lokalizacja instalacji oraz optymalizacja parametrów hydroenergetycznych*, Energetyka Wodna 04/2014, Towarzystwo Rozwoju Małych Elektrowni Wodnych, 2014.
20. Twaróg B., *CFD analysis for an eco-friendly AHS turbine*, 3rd International Conference on the Sustainable Energy and Environmental Development, Krakow, Poland, October 16-

18, 2019, book of abstracts. Kraków : Institute of Sustainable Energy – Publishing House, 2019. ISBN 978-83-954975-3-7.

21. Twaróg B., *Interaction between hydraulic conditions and structures – fluid structure interaction problem solving*, Technical Transactions, DOI: 10.4467/2353737XCT.18.029.8002, ISSN 0011-4561, Vol. 115, Iss. 2, 2018, s. 187-209.

Przyjazna dla środowiska turbina Archimedesa – analizy

Streszczenie

W ostatniej dekadzie nastąpił znaczny wzrost zastosowań turbin Archimedesa (AHS). Głównie zalety tej turbiny skupiają się wokół znacznie niższych kosztów wdrożenia przy porównywalnej sprawności do turbiny Kaplana. Równocześnie możliwość zastosowań AHS przy niskich spadach < 10 m, w potokach i kanałach derywacyjnych czyni tę turbinę bardzo polecaną. Jej wzrost popularności może spowodować wzmocnienie i rozwój polityki -2

rozproszonych źródeł energii. W pracy wykonano analizę pracy turbiny AHS. Całość analizy została wykonana z zastosowaniem CFD w oprogramowaniu Flow3D z wykorzystaniem równań Reynoldsa. Dla turbiny o najlepszej geometrii wykonano analizy biomechaniczne modelu ryby przy zastosowaniu teorii FSI przy różnych jej położeniach w obszarze pracy turbiny. Pokazano wartości naprężeń w ciele ryby oraz opisano związek regresyjny pomiędzy naprężeniami oraz ciśnieniem. W ostatniej części artykułu przedstawiono pulsacje ciśnienia oraz prędkości jakie występują w obszarach przepływu ryby przez AHS

Słowa kluczowe: turbina Archimedesa, hydrodynamika, biomechanika

Eco-friendly AHS turbine analysis

Abstract

The last decade has seen a growing number of applications of the Archimedean turbine (AHS). The principal advantages of this turbine include significantly lower costs of implementation than in the case of Kaplan turbine at a comparable efficiency. The AHS is also highly recommendable because it may be installed under low-head conditions (< 10 m), in creeks and flumes – artificial channels of hydroelectric plants. Its growing popularity may strengthen the policy of distributed generation and contribute to a growth in the number of small plants. The study contains an analysis of the AHS turbine. The analysis was fully performed using CFD in the Flow3D software and Reynolds equations. Biomechanical analyses of a fish model placed in various locations of the turbine operation area were made for the best turbine geometry, using FSI theory. The study gives values of stresses in the fish body and describes the regression relationship between stress and pressure. The last section of the study deals with pressure and velocity fluctuations taking place in various areas when fish swim through the AHS.

Keywords: AHS turbine, hydrodynamics, biomechanics

Poligeneracyjny układ dla karbonizacji biomasy i wytwarzania biowęgla

1. Wstęp

Niepożądane zmiany klimatyczne naszej planety – wynikające w znacznej mierze z negatywnego oddziaływania na środowisko przemysłu, transportu, sektora komunalno-bytowego oraz energetyki i skutkujące m.in. zwiększoną emisją dwutlenku węgla do atmosfery – wymagają pilnego podjęcia działań w celu znaczącego ograniczenia skutków tej niepożądanego działalności antropogenicznej i przywrócenia stanu równowagi klimatycznej [1].

W tym celu należy znacząco ograniczyć zużycie paliw kopalnych i zastąpić je w możliwie jak największym stopniu odnawialnymi źródłami energii (OZE). Energetyka odnawialna charakteryzuje się mniejszym wpływem na środowisko naturalne, a wpływ ten w wielu wypadkach wynika jedynie z procesu wytwarzania urządzeń i elementów/układów energetyki odnawialnej lub z konieczności ich utylizacji. Pomimo tych korzyści energetyka oparta o OZE poza kilkoma przypadkami (energetyka wodna, geotermia) cechuje się niestety stochastycznym charakterem dostarczania energii (np. energetyka słoneczna i wiatrowa). Opierając w dużym stopniu rozwój energetyki odnawialnej o wykorzystanie energii słońca i wiatru staje się więc przed problemem w jaki sposób zapewnić stabilne dostawy energii elektrycznej do różnych odbiorców. Pomimo ogromnego rozwoju technologii OZE w ostatnich dwóch dekadach realizacja wymogu stabilnych dostaw energii wymaga niestety nadal wykorzystywania energetyki konwencjonalnej, która pokrywa zapotrzebowanie w przypadkach braku lub niedoborów w nasłonecznieniu lub energii wiatru dla zasilania paneli fotowoltaicznych lub turbin wiatrowych.

Interesującym rozwiązaniem tego problemu wydaje się być obecnie wykorzystanie biomasy jako odnawialnego źródła energii o praktycznie zerowej emisji CO₂. Potwierdzeniem tej tezy jest szereg instalacji do współspalania lub spalania biomasy, które w ostatnich latach weszły do portfolio majątkowego i pracują w energetyce zawodowej.

Mimo iż biomasa towarzyszy ludzkości od niepamiętnych czasów i służyła jako pierwsze źródło ciepła, do chwili obecnej trudno jest realizować proces efektywnego jej spalania w kotłach energetycznych, wskutek czego spalanie biomasy (zwłaszcza pochodzenia rolnego) przyczynia się do intensyfikacji szeregu problemów technicznych, takich jak szlakowanie i zanieczyszczanie powierzchni ogrzewalnych, spiekanie i aglomeracja złoża w kotłach fluidalnych czy korozji związanej z obecnością chloru w biomacie [2-5].

¹ robert.zarzycki@pcz.pl, Katedra Zaawansowanych Technologii Energetycznych, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Politechnika Częstochowska.

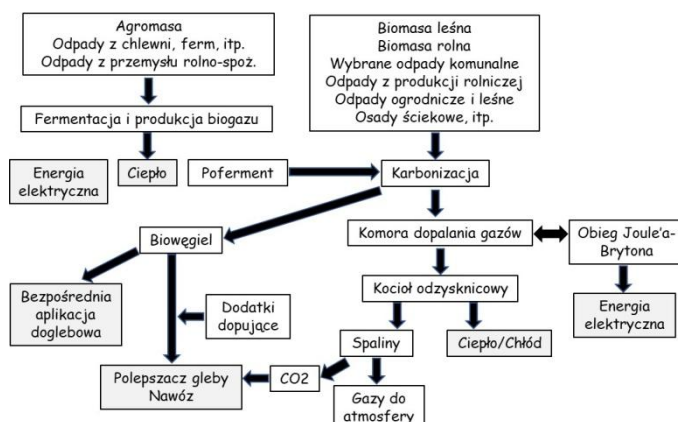
² rafal.kobylecki@pcz.pl, Katedra Zaawansowanych Technologii Energetycznych, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Politechnika Częstochowska.

³ zbigniew.bis@pcz.pl, Katedra Zaawansowanych Technologii Energetycznych, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Politechnika Częstochowska.

W porównaniu do innych krajów Europy Zachodniej polskie zasoby biomasy są – póki co – znaczne, lecz niekontrolowana, rabunkowa gospodarka tym surowcem może skutkować utratą tego kruchoego stanu równowagi pomiędzy dostępnymi zasobami do gospodarczego wykorzystania (strumienie pozyskiwanej ze środowiska biomasy), a tempem (np. rocznym) przyrostu nowej masy biologicznej wskutek np. realizacji nowych nasadzeń, gospodarki rolnej, itp. Z tego też względu należy myśleć o zrównoważonym długofalowym sposobie wykorzystania biomasy, tak aby z jednej strony właściwie spożytkować jej potencjał energetyczno-fizyczno-chemiczny, z drugiej zaś ograniczyć negatywne aspekty towarzyszące np. spalaniu surowej biomasy. Autorzy niniejszej pracy uważają, że efektywną poprawę wykorzystania potencjału biomasy uzyskać można poprzez ograniczenie jej bezpośredniego spalania na rzecz termicznego przetwarzania, pozwalającego wyekstrahować z surowca różne cenne komercyjnie produkty, takie jak np. bio-oleje, dziegieć, kwasy karboksylowe, alkohole, fenole, kreozot farmaceutyczny, estry, aldehydy, ketony (np. hydroksyaceton), itp. Nieskomplikowane technologie w tym zakresie były w wielu przypadkach znane i stosowane od setek lat, lecz szybki rozwój przemysłu chemicznego w XX wieku doprowadził do zaprzestania ich stosowania – jedyną stosowaną obecnie na szerszą skalę formą termicznego przetwarzania biomasy jest produkcja węgla drzewnego, na określenie którego używa się także terminu biowęgiel. Powstaje on w wyniku kontrolowanego termicznie ogrzewania biomasy w atmosferze ubogiej w tlen lub beztlenowej – w takich warunkach produktem termicznego przetwarzania (termolizy) biomasy jest mieszanina części lotnych (gazów palnych) oraz stała pozostałość (karbonizat – biowęgiel). Technologicznie możliwe jest oczyszczanie frakcji gazowej z substancji niepożądanych i wykorzystanie jej do zasilania np. silników spalinowych, ewentualnie ochładzanie gazu i wykraplanie tzw. składników kondensujących w celu otrzymania np. octu drzewnego. Produkt stały, biowęgiel (karbonizat), stanowić może w określonych warunkach (tzw. proces wolnej termolizy – ang. *slow pyrolysis*) największy masowy udział w produktach procesu termicznej obróbki biomasy, a możliwości jego zastosowania są bardzo szerokie [1, 6-8]. Celem niniejszej pracy jest skrótowne przedstawienie koncepcji oraz analiza energetyczna układu przetwarzania termicznego biomasy i produkcji biowęgla z dodatkową możliwością wytwarzania ciepła oraz energii elektrycznej – zarówno na potrzeby podtrzymywania procesu, jak i sprzedaży na rynku.

2. Termoliza biomasy do biowęgla w układach poligeneracyjnych

Powstający w procesie obróbki termicznej substancji organicznych biowęgiel jest bardzo stabilną środowiskowo formą węgla C, charakteryzującą się długookresową odpornością na mineralizację, czyli rozkład materii organicznej do form przyswajalnych przez rośliny. Z tego punktu widzenia biowęgiel stanowi niewątpliwie obiecujący rezerwuuar pierwiastka węgla, który pobierany jest z atmosfery w postaci CO₂ i wiązany w materii organicznej (fotosynteza), a po karbonizacji (wskutek termolizy) może być długookresowo składowany poza atmosferą, stanowiąc w ten sposób swoistą „pompę węglową” i przyczyniając się do ograniczania ilości CO₂ w atmosferze ziemskiej [1, 6]. W zależności od ceny i uwarunkowań rynkowych biowęgiel może być komercyjnie stosowany albo w tzw. generacji rozproszonej poprzez lokalne klastry energetyczne, albo wytwarzany „na miejscu” np. przez rolników z lokalnie dostępnego surowca, który stanowić mogą resztki roślinne lub odpady z zakładów przetwórczych (poferment, wytloki i pestki z owoców, itp.). Możliwy ciąg oraz układ technologiczny w tym zakresie pokazano na rysunku 1.



Rysunek 1. Schemat ideowy przykładowego układu poligeneracyjnego, w którym możliwa jest jednoczesna produkcja energii elektrycznej, ciepła (ewentualnie chłodu), biowęgla oraz CO₂ zintegrowanego z produkcją polepszaczy gleby lub nawozów

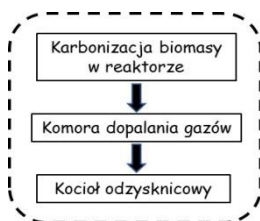
Należy zwrócić uwagę, że jeśli zastąpiono by mało efektywną produkcję z biomasy energii elektrycznej i ciepła w siłowniach zawodowych, bądź w elektrociepłowniach, proponowanym na rysunek 1 wytwarzaniem biowęgla w rozproszonych instalacjach (zakładach) poligeneracyjnych rozlokowanych np. w lokalnych ciepłowniach, uzyskano by szereg wymiernych korzyści, takich jak ograniczenie skutków środowiskowych (transport paliwa i emisja zanieczyszczeń), czy też obniżenie kosztów wytwarzania ciepła wskutek szybkiego w ostatnim okresie wzrostu cen certyfikatów unikniętej emisji CO₂ (obecnie ponad 50 euro za 1 tonę CO₂) i perspektywy dalszego zwiększania ceny uprawnień do emisji ditlenku węgla.

Najbardziej efektywnym sposobem produkcji biowęgla jest jego wytwarzanie w tzw. procesie autotermicznym [9-11] w którym ciepło do ogrzewania i karbonizacji wsadu pochodzi ze spalania (całości lub części) gazów palnych wydzielanych w procesie termicznego rozkładu biomasy.

Najprostszy układ do autotermicznej karbonizacji biomasy i wytwarzania biowęgla pokazano na rysunek 2 i składa się on z:

- reaktora do termolizy wsadu w którym realizowany jest proces suszenia, nagrzewania, odgazowania oraz uwęglania biomasy;
- komory dopalania gazów w której realizowany jest proces dopalania części lotnych powstałych w procesie ogrzewania wsadu oraz
- kotła odzysknicowego, stanowiącego swoisty wymiennik ciepła w którym przekazywane jest ciepło od gorących spalin do czynnika roboczego – np. w postaci wody lub pary.

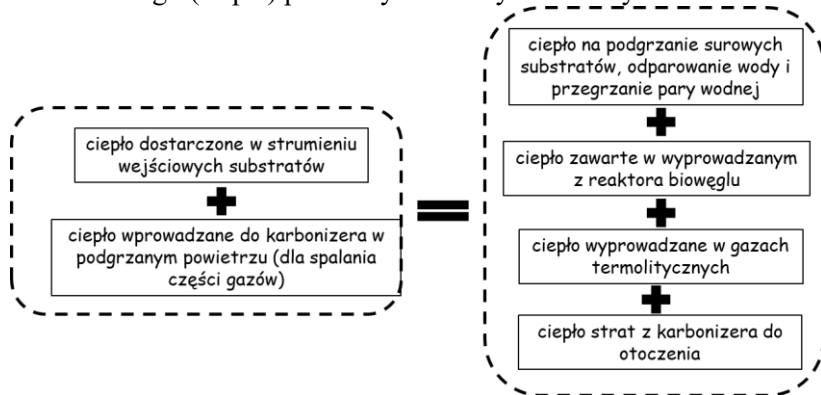
Oprócz wymienionych powyżej elementów układ do karbonizacji biomasy musi posiadać również niezawodną instalację stabilnego doprowadzania biomasy do reaktora oraz układ efektywnego chłodzenia i wyprowadzania stałego produktu poprocesowego (biowęgla). Dla stabilnej pracy całego układu niezbędne są również odpowiednie wentylatory zapewniające nieprzerwane doprowadzanie powietrza do spalania części lotnych w reaktorze i w komorze dopalania.



Rysunek 2. Schemat układu karbonizera zintegrowanego z komorą dopalania gazów oraz kotłem odzysknicowym (wymyennik ciepła)

Należy mieć na uwadze, że aktualne wymogi niskoemisyjnego spalania, szczególnie w zakresie niskiej emisji tlenków azotu, tlenu węgla oraz pyłów powodują, że rozwiązanie konstrukcyjne układu reaktora do karbonizacji (uwęglania) powinno – w części przewidzianej dla realizacji spalania gazów – pozwalać na dwu- lub trójstopniowe dostarczanie powietrza – zarówno do reaktora jak i do komory dopalania [10-11]. Tak nowoczesnie rozwiązany proces autotermicznej produkcji biowęgla generuje znaczne ilości ciepła w postaci gorących spalin (ok. 50% energii chemicznej substratów w odniesieniu do ich ciepła spalania) – część lub praktycznie całość tego ciepła może być wykorzystana bądź do produkcji energii elektrycznej, bądź też do podsuszania substratów, wytwarzania ciepłej wody użytkowej, lub do ogrzewania. Implementacja technologii chłodziarek absorpcyjnych do opisywanego układu pozwala na jeszcze większą elastyczność pracy poprzez zamienne wytwarzanie ciepła lub chłodu. W ten sposób produkcja biowęgla z substratów biomasowych staje się produkcją poligeneracyjną, która z założenia jest znacznie bardziej efektywna w porównaniu do bezpośredniego spalania (wyższa całkowita sprawność przetwarzania energii), pozwalając tym samym na uzyskanie wyższej stopy zwrotu zainwestowanego kapitału niż w układzie ko- lub trigeneracyjnym – przede wszystkim poprzez szersze portfolio oferowanych do sprzedaży produktów.

Dla niezawodnej realizacji procesów przedstawionych na rysunkach 1-2 kluczowe jest zapewnienie autotermiczności procesu uwęglania (karbonizacji) w reaktorze. Dla wstępnej oceny rozdziału strumienia energii w takim reaktorze posłużyć może ogólny bilans strumieni energii (ciepła) pokazany schematycznie na rysunek 3.



Rysunek 3. Bilans strumieni energii (ciepła) dla procesu uwęglania (karbonizacji) biomasy

Jeśli proces uwęglania prowadzony będzie zgodnie z założeniami bilansu (por. rys. 3), to proces karbonizacji wsadu biomasowego realizowany będzie w stałej temperaturze, wynikającej z bilansu cieplnego dla danej instalacji – jeśli strumień ciepła niezbędnego dla zapewnienia stanu równowagi będzie zbyt mały nastąpi spadek intensywności uwęglania i przerwanie procesu (spadek temperatury), zaś w przeciwnym przypadku nastąpić może wzrost temperatury w reaktorze, który może w konsekwencji doprowadzić do jego uszkodzenia lub zniszczenia. W obu przypadkach skutkiem nierównowagi bilansowej może być przerwanie procesu uwęglania (karbonizacji) biomasy.

3. Analiza termodynamiczna układu karbonizera z kotłem odzysknicowym oraz turbiną gazową

Zapewnienie efektywnej realizacji termicznej obróbki wsadu biomasowego w karbonizerze wymaga – praktycznie w przypadku każdego rodzaju biomasy o wilgotności < 30% – zintegrowania reaktora uwęglania z wodnym lub parowym kotłem odzysknicowym, pozwalającym na wykorzystanie i zagospodarowanie nadmiarowego ciepła z procesu. Doświadczenia praktyczne autorów niniejszej pracy wskazują, że taka integracja jest niezbędna w przypadku wytwarzania biowęgla ze speletyzowanej biomasy leśnej lub agro (np. słoma, łuska słonecznika, trociny), gdyż wsad tego rodzaju charakteryzuje się wilgotnością rzędu 10-15%. Wyprodukowanie biowęgla w takiej konfiguracji karbonizera (zagospodarowanie ciepła) wymaga schłodzenia spalin do temperatury bliskiej punktowi rosy w celu ich oczyszczenia z zanieczyszczeń stałych i gazowych do poziomu wymaganego odpowiednimi regulacjami prawnymi – bez możliwości zagospodarowania nadmiarowego ciepła (okres letni) termiczne przetwarzanie biomasy i produkcję biowęgla należy zawiesić.

Efektywne wykorzystanie energii chemicznej zawartej w biomacie wymusza również praktycznie generację energii elektrycznej – niezbędnej dla zaspokojenia tzw. potrzeb własnych (napęd przenośników substratów i produktu, dozowników, transporterów substratów wewnątrz reaktora, wentylatorów powietrza i spalin, itp.), której koszt zwiększa koszty OPEX. Dlatego też wymieniony wyżej układ najprostszej kogeneracji, ukierunkowany na produkcję ciepła i biowęgla, najlepiej przekształcić w układ poligeneracyjny poprzez dodanie modułu wytwarzającego dodatkowo prąd elektryczny i z zachowaniem maksymalnego stopnia wykorzystania energii chemicznej zawartej w strumieniu przetwarzanej biomasy (wysoka sprawność). Najbardziej opanowany technicznie sposób wytwarzania energii elektrycznej obejmuje wykorzystanie generatora napędzanego energią mechaniczną (np. silnik tłokowy). Niestety, wytwarzanie energii mechanicznej, a następnie elektrycznej w efekcie zgazowania lub pirolizy biomasy i spalania wytworzonego gazu (po jego wcześniejszym oczyszczeniu) w silniku tłokowym lub w komorze spalania turbiny gazowej [11, 12] wciąż nie jest realną opcją techniczną mimo zachęcającej, wysokiej teoretycznej sprawności takich układów. Powodem takiej sytuacji jest brak niezawodnych rozwiązań technicznych w zakresie efektywnego oczyszczania gazu ze smół i innych zanieczyszczeń stałych, osadzających się na ścianach przewodów przesyłowych i doprowadzających w konsekwencji w krótkim czasie do odstawienia i konieczności kosztownego czyszczenia instalacji [13-19].

Wiele siłowni przemysłowych (elektrownie, elektrociepłownie) bazuje więc na dotychczasowym własnym doświadczeniu i spalaniu jako na technicznie sprawdzonej

i dojrzałej technologii efektywnej konwersji energii chemicznej paliw stałych. Przy spalaniu biomasy do rozważenia są więc praktycznie trzy możliwości techniczne realizacji procesu [3-5, 20-22]:

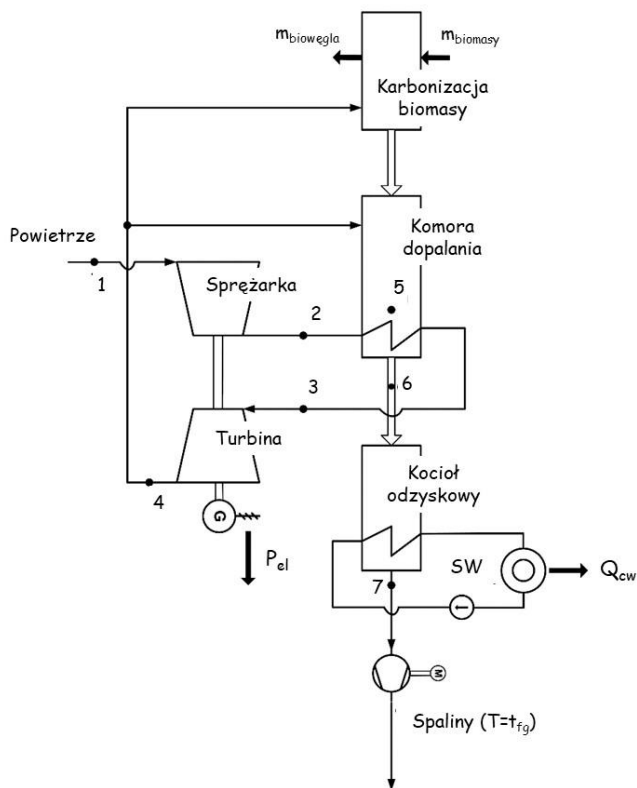
- Układy parowe (cykl wodny lub z czynnikiem organicznym) – bardzo złożone ale ekonomicznie wykonalne dla mocy $> 500 \text{ kW}_e$ (moc cieplna powyżej $4\,000 \text{ kW}$);
- Układy Stirlinga (z helem, wodorem, azotem lub powietrzem) – teoretycznie skuteczne i proste, w praktyce jednak mało wydajne i wymagające w kwestiach materiałowych oraz paliwowych (niewiele istniejących układów wykorzystuje biomasę) i charakteryzujące się dość krótkimi okresami eksploatacji (zużycie),
- Układy z turbiną gazową lub silnikiem tłokowym (obieg *Joule’a–Braytona* w skrócie obieg J-B) ze spalaniem zewnętrznym (EFGT, *externally-fired gas turbine*) w którym czynnikiem roboczym jest gorące suche lub wilgotne powietrze – układy te są stosunkowo proste i wykonalne w przypadku systemów o mocy powyżej 50 kW_e .

Najbardziej korzystne w układzie karbonizacji biomasy wydaje się trzecie rozwiązanie. Takiemu wyborowi sprzyja – pokazany na rys. 2 – schemat zabudowy układu reaktora do uwęglania, gdzie pomiędzy karbonizerem a wodnym kotłem odzyskowym zaproponowano implementację komory dopalania gazów powstałych w procesie termolizy (termicznego przetwarzania biomasy). W przypadku cylindrycznej konfiguracji komory, można w niej łatwo rozmieścić panele rur spiętych kolektorami i pełniących rolę wymiennika ciepła np. dla podgrzania powietrza zasilającego turbinę gazową. Przewiduje się, że gorące powietrze po rozprężeniu na łopatkach turbiny będzie w całości wykorzystane do spalania gazów termolitycznych (zarówno składników kondensujących, jak i niekondensujących). Gazy te spalane będą częściowo w reaktorze (w ilości niezbędnej dla stabilizacji temperatury retorty karbonizera, a tym samym procesu uwęglania zapewniającego odpowiednią jakość i ilość biowęglu), zaś reszta gazów podlegać będzie utlenianiu w komorze dopalającej. W zaproponowanej konfiguracji można odpowiednią część tego powietrza zmieszać z recykulowanymi spalinami z kotła odzysknicowego i wykorzystać m.in. do kontroli ilości tlenu w gazach wprowadzanych do karbonizera lub do podsuszania biomasy przed wprowadzeniem jej do reaktora uwęglania.

Układ reaktora uwęglania, komory dopalania oraz kotła odzyskowego jest elastyczny i może być łatwo rozbudowywany o kolejne moduły, np. o chłodziarkę absorpcyjną, której implementacja poprawi nie tylko sprawność przetwarzania lecz przede wszystkim stopień wykorzystania potencjału produkcyjnego układu poligeneracyjnego i jego bilans ekonomiczny, gdyż wykorzystanie tylko ciepła na cele grzewcze ma charakter sezonowy.

Na rysunku 4 pokazano schemat proponowanego układu poligeneracyjnego konwersji energii biomasy. Jak widać na rysunku 4 układ składa się z reaktora uwęglania, komory dopalania gazów pirolitycznych, kotła wodnego, sprężarki powietrza, turbiny powietrznej oraz generatora prądu. Do reaktora wprowadzana jest biomasa, która ulega w jego wnętrzu odgazowaniu. Z reaktora wyprowadzana jest pozostałość stała (biowęgiel), a powstałe podczas odgazowania gazy są częściowo spalane dzięki doprowadzeniu części strumienia powietrza opuszczającego turbinę. Strumień gazów termolitycznych i spalin z reaktora przepływa do komory dopalania gdzie ulega spalaniu z wykorzystaniem pozostałej części strumienia powietrza (4). Powstałe w komorze

dopalanania spaliny o temperaturze rzędu 1100-1300°C podgrzewają sprężone w sprężarce powietrze (2) przepływające w płaszczu komory dopalania stanowiącym jednocześnie wymiennik ciepła. Powietrze to jest następnie kierowane do turbiny powietrznej, a po rozprężeniu przepływa do reaktora i komory dopalania, gdzie wykorzystywane jest dla realizacji spalania gazów. Po spaleniu w komorze dopalania gazy te przepływają następnie do kotła wodnego gdzie przekazują ciepło czynnikowi obiegowemu (wodzie). Stanowiąca element układu turbina powietrzna napędza generator prądu pozwalając na wytwarzanie energii elektrycznej dla celów pokrycia potrzeb własnych lub dla celów komercyjnych.



Rysunek 4. Proponowany schemat poligeneracyjnego układu umożliwiającego produkcję biowęgla, ciepła oraz energii elektrycznej z biomasy różnego rodzaju (oznaczenia na rysunku: G-generator prądu, SW-wymiennik ciepła, $m_{biomasy}$ -strumień surowej biomasy, $m_{biowęgla}$ -strumień biowęgla, Q_{cw} -ciepło w wodzie układu centralnego ogrzewania, P_{el} -moc elektryczna do sieci)

Dane uzyskane przez autorów z instalacji przemysłowej wskazują, że z 1 kg peletu np. z łuski słonecznika o składzie jak w tabeli 1 po karbonizacji uzyskujemy średnio 0,27 kg biowęgla o zawartości pierwiastka C ponad 85%. Pozostała masa wsadu wyprowadzana jest z układu w postaci mieszaniny pary wodnej oraz kondensujących i niekondensujących gazów z termicznego przetwarzania biomasy (tzw. gazy termolityczne). Gazy te są częściowo spalane w reaktorze, a pozostała ich część ulega spalaniu w komorze dopalania. Całość ciepła zawartego w gorących spalinach kierowana jest następnie do kotła odzysknicowego.

Z bilansu ciepłno-masowego oraz danych eksperymentalnych (tab. 1) wynika, że wprowadzając do reaktora (karbonizera) 1 kg peletu o wartości opałowej 16,4 MJ/kg (stan suchy), uzyskać można 0,27 kg biowęgla o wartości opałowej 31,9 MJ/kg. W takim przypadku wyprodukowany biowęgiel zawiera około 8,7 MJ energii zawartej w 1 kg wprowadzonej do reaktora biomasy. Zakładając brak strat do otoczenia pozostała energia (7,7 MJ) wyprowadzana jest w gazach termolitycznych. Wynika z tego, że strumień energii chemicznej wsadu rozdzielany jest na fazę stałą i gazową następująco: 53% energii zawarte jest w biowęglu, a 47% w gazach termolitycznych.

Tabela 1. Parametry biomasy (pelet z łuski słonecznika) oraz wyprodukowanego z niego biowęgla (wartości w stanie suchym)

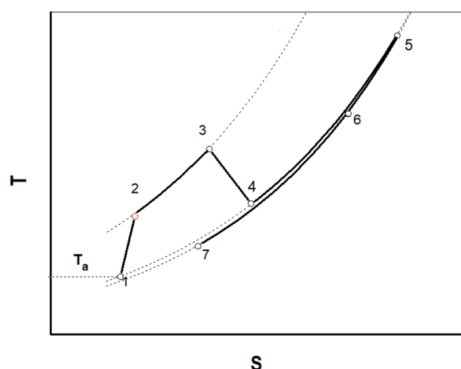
Parametr	Jednostka	Biomasa	Biowęgiel
Wilgość	[% masowy]	9,4	0
Popiół	[% masowy]	2,6	9,3
Części lotne	[% masowy]	72,7	8,8
Wartość opałowa	[MJ/kg]	16,4	31,9
Pierwiastek C	[% masowy]	49,3	85,6
Pierwiastek H	[% masowy]	6,1	2,6
Pierwiastek N	[% masowy]	0,4	0,9
Pierwiastek S	[% masowy]	0,1	0,1
Pierwiastek O	[% masowy]	41,5	1,6

Na podstawie powyższych danych można stwierdzić, że energia zawarta w biomacie rozdziela się praktycznie po równo pomiędzy biowęgiel i gazy termolityczne – dokładne udziały zależą od rodzaju i parametrów fizykochemicznych wsadu oraz od warunków prowadzenia procesu uwęglania (karbonizacji). Doświadczenia autorów wskazują, że energię zawartą w strumieniu spalin można przekazać w kotle odzysknicowym gorącej wodzie lub parze ze sprawnością około 85-90%.

Dla porównania, w ciepłowni opalanej biomasa z 1kg analizowanego peletu po spalaniu w kotle o sprawności około 90% (duży kocioł energetyczny) można uzyskać do zagospodarowania 16,4 MJ*0,9=14,8 MJ ciepła. W procesie uwęglania z 1 kg tego samego peletu uzyskuje się mniej energii (tylko 7,7MJ*0,9=6,9 MJ ciepła w kotle odzysknicowym – może być podobnego typu jak kocioł energetyczny w ciepłowni biomasowej) lecz dodatkowo wytwarzane jest także około 0,27 kg biowęgla, stanowiącego cenny produkt stały do szerokiego zastosowania gospodarczego (paliwo, dodatek do gleb, sorbent, itp.), którego wartość opałowa to około 31,9 MJ/kg. Uwzględniając strumień wytwarzanego biowęgla, zawarta w nim energia chemiczna wejściowej biomasy to 8,7 MJ energii (odniesionej do 1kg wsadowego peletu), lecz cena rynkowa takiego produktu to obecnie nawet 2500 \$/t [23].

Przyjmując taką cenę biowęgla oraz średnie jednostkowe ceny ciepła w Polsce około 9-12 euro/GJ (dane bezpośrednio sprzed pandemii COVID) i powyższe wskaźniki uzysku ciepła w gazach i biowęglu można oszacować efektywność ekonomiczną dla przypadku zastąpienia produkcji ciepła w efekcie bezpośredniego spalania biomasy w kotle proponowanym nieskomplikowanym układem poligeneracyjnym, ukierunkowanym na wytwarzanie ciepła oraz biowęgla. Produkując ciepło poprzez bezpośrednie spalanie biomasy uzyskuje się (zakładając powyższe ceny ciepła i sprawność spalania około 90%) przychód w wysokości około 178 euro/t substratów. Natomiast produkując jednocześnie ciepło i biowęgiel poprzez termiczne przetwarzanie biomasy w układzie

jak na rys. 2 z 1 tony substratów uzyskuje się w sumie przychód w wysokości około 218 euro. Iloraz tych dwóch przychodów daje wartość około 1,2 jasno świadcząc, że zastępując standardowe spalanie biomasy dla produkcji ciepła proponowanym układem poligeneracyjnym uzyskać można znacząco wyższe przychody (wzrost o ponad 20%). Przychody te mogą ulec dalszemu zwiększeniu jeśli układ poligeneracyjny rozbudowany byłby o moduł pozwalający na zamianę części ciepła na energię elektryczną (rys. 4) oraz – np. w sezonie letnim – o moduł umożliwiający produkcję chłodu. Przykład obiegu dla układu ze schematu na rys. 4 pokazano na rys 5 we współrzędnych T-s (temperatura-entropia).



Rysunek 5. Obieg z turbiną gazową (EHGT) współpracującą z komorą dopalania karbonizera w układzie T-s (ciepło między punktami 5-6 to ciepło pobrane przez czynnik w obiegu EFGT, zaś ciepło pomiędzy punktami 6-7 to ciepło pobrane przez wodę w kotle odzyskowym; oznaczenia jak na rys. 4)

Projektowanie takiego układu należy rozpocząć od ustalenia wymaganej mocy cieplnej kotła odzyskowego, gdyż konsumpcja produkowanego w nim ciepła będzie wyznacznikiem zdolności wytwarzania biowęgla oraz energii elektrycznej. Po określeniu wymaganego stopnia uwęglenia biowęgla (zawartość pierwiastka C oraz czas pobytu i temperatura termolizy – najczęściej około 400-600°C) w zależności od jego planowanego przeznaczenia należy dokonać wyboru odpowiedniego wsadu (w wyborze tym istotną rolę odgrywa także aktualna sytuacja rynkowa i cena biomasy).

Następnie należy wykonać stosowne analizy fizykochemiczne wsadu, wstępnie założyć parametry biowęgla oraz przeprowadzić obliczenia stechiometryczne procesu spalania gazów termolitycznych. Założyć należy wstępnie sprawność wewnętrzną sprężarki oraz turbiny gazowej dla powietrza jako czynnika roboczego. W oparciu o wybraną konfigurację wymiennika oraz obliczenia wymiany ciepła wyznacza się parametry obiegu (por. dane w tab. 2), zakładając temperatury w charakterystycznych punktach obiegu (rys. 4-5).

Tabela 2. Zestawienie wybranych parametrów powietrza dla obiegu turbiny gazowej

Parametr	Jednostka	Nr punktu wg rys. 5			
		1	2	3	4
Ciśnienie bezwzględne	[MPa]	0,1	1,1	1,05	0,11
Temperatura	[°C]	20	352	652	293
Entalpia	[kJ/kg]	293	634	962	572
Entropia	[kJ/(kg·K)]	6,8	6,9	7,4	7,5

W oparciu o iteracyjne obliczenia bilansowe, przy zadanej dokładności obliczeń dokonano należy następnie estymacji poszczególnych strumieni. Dla przykładowego wybranego układu odpowiednie obliczone wartości zestawiono w tabeli 3 – dla analizowanego układu estymację zapotrzebowania mocy sprężarki i mocy uzyskiwanej na wale turbiny gazowej, jak i innych charakterystycznych wielkości dla całego układu (np. przepustowości reaktora) przeprowadzono przy założeniu, że całość powietrza jako czynnika roboczego w układzie EFGT, po opuszczeniu turbiny wykorzystywana jest do spalania gazów termolitycznych przy założonej stechiometrii spalania.

Tabela 3. Zestawienie wybranych wartości charakteryzujących proponowany w pracy układ dla jednoczesnego wytwarzania biowęgla, energii elektrycznej i ciepła

	Jednostka	Wartość
Wielkości zakładane		
Gęstość powietrza w 20°C	kg/m ³	1,2
Moc kotła wodnego	MW	5
Sprawność kotła wodnego	%	85
Sprawność wewnętrzna turbiny	%	85
Sprawność wewnętrzna sprężarki	%	85
Sprawność mechaniczna turbiny	%	99
Sprawność mechaniczna sprężarki	%	99
Spadek ciśnienia przy przepływie powietrza przez wymiennik ciepła	bar	0,5
Przyrost temperatury powietrza podczas przepływu przez wymiennik ciepła	K	300
Wymagane ciśnienie za turbiną pozwalające na wykorzystanie powietrza do zasilania reaktora i komory dopalania	mbar	50
Wielkości wyliczone		
Strumień masy peletu do reaktora dla uzyskania mocy termicznej kotła 5 MW i zasilania turbiny powietrznej	kg/s	0,8
Strumień produkowanego biowęgla	kg/s	0,2
Strumień ciepła zawarty w spalinach dla uzyskania zakładanej mocy kotła	MW	5,9
Zapotrzebowanie powietrza do spalania części lotnych	m ³ /kg peletu	3,6
Wartość opałowa części lotnych	MJ/(kg peletu)	7,7
Sumaryczny strumień ciepła wydzielanego podczas spalania części lotnych	MW	6,4
Strumień powietrza do reaktora i komory dopalania	m ³ /s	2,9
Strumień masy powietrza do reaktora i komory dopalania	kg/s	3,4
Moc sprężarki	MW	1,2
Moc turbiny	MW	1,4
Moc użyteczna netto (elektryczna)	MW	0,2
Sprawność obiegu turbiny powietrznej bez uwzględnienia rekuperacji ciepła	%	15
Sprawność obiegu turbiny powietrznej po uwzględnieniu rekuperacji ciepła	%	33
Strumień ciepła pobierany z wymiennika ciepła przez powietrze	MW	1,2
Strumień ciepła przekazywany do reaktora i komory dopalania w powietrze opuszczającym turbinę	MW	0,6
Strumień ciepła netto pobierany przez turbinę powietrzną	MW	0,5

4. Wnioski

Termiczne przetwarzanie (termoliza) biomasy do postaci biowęgla, zintegrowana z jednoczesnym wytwarzaniem ciepła oraz energii elektrycznej w zaproponowanym w niniejszej pracy układzie poligeneracyjnym, stanowi interesującą i zdaniem autorów perspektywiczną opcję dla efektywnego ekonomicznie i środowiskowo wykorzystania energii chemicznej biomasy oraz dla szerszego implementowania technologii OZE w układach rozproszonych w Polsce. Przedstawione wyniki obliczeń pokazały korzyści wytwarzania biowęgla zwłaszcza z biomasy odpadowej.

Omówiony w pracy układ poligeneracyjny pozwala na wydatne (co najmniej o 20%) zwiększenie kwoty przychodów już tylko w przypadku zastąpienia standardowej produkcji ciepła wskutek spalania biomasy produkcją zintegrowaną, t.j. jednoczesnym wytwarzaniem ciepła i biowęgla. Opłacalność produkcji ulegnie zwiększeniu po implementacji modułu generacji energii elektrycznej. Oszacowana sprawność wytwarzania energii elektrycznej może dochodzić do 30% przy umiarkowanych parametrach w charakterystycznych punktach obiegu Joule'a-Braytona (por. dane temperatury w tab. 2). Poprawę sprawności układu EFGT uzyskać można stosując rekuperację ciepła.

Wytwarzana w układzie energia elektryczna (0,2 MW – por. tab. 3) może być w dużej części odsprzedana do systemu, gdyż proponowany układ nie wymaga zabudowy dodatkowych wentylatorów powietrza doprowadzanego do karbonizera i komory dopalania (zapotrzebowanie ok. 25 kW) w efekcie wykorzystania sprężonego, gorącego powietrza opuszczającego turbinę gazową – taka konfiguracja wydatnie ogranicza tym samym potrzeby własne układu.

Należy zwrócić uwagę, że w proponowanej konfiguracji można w łatwy sposób kontrolować ilość produkowanej energii elektrycznej (m.in. poprzez zmianę ilości ciepła przekazywanego z wymiennika do nagrzewania powietrza zasilającego turbinę gazową oraz kontrolę ilości powietrza w zależności od wymaganej wydajności reaktora oraz stechiometrii spalania). Dodatkowo, masa reaktora i komory dopalającej (szczególnie wyłożyń ceramicznych) oraz ładunek zawartej w układzie biomasy zapewniają znaczną akumulację ciepła, stabilizując pracę układu oraz wyrównując ewentualne wahania wydajności spowodowane zmianami jakości wsadu, nierównomiernościami w zasilaniu biomasa, itp.

Podziękowania

Praca powstała dzięki współfinansowaniu w ramach subwencji statutowej Politechniki Częstochowskiej (Wydział Infrastruktury i Środowiska) oraz realizacji projektu NCBR BIOSTRATEGG3/345940/7/NCBR/2017, „Woda w glebie – monitoring satelitarny w poprawie retencji wodnej przy użyciu biowęgla” (Water in soil: satellite monitoring to improve water retention using biochar, project acronym: SoilAqChar).

Literatura

1. Kobyłecki R., *Środowiskowe aspekty termolizy biomasy*, Monografia nr 290, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2014, ISBN 978-83-7193-612-8, ISSN 0860-5017.
2. Opydo M., Dudek A., Kobyłecki R., *Characteristics of solids accumulation on steel samples during cocombustion of biomass and coal in a CFB boiler*, Biomass and Bioenergy, 120, 2019, s. 291-300. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.027>.

3. McKendry P., *Energy production from biomass (Part 1): Overview of biomass*, Bioresource Technology, 83, 2002, s. 37-46.
4. McKendry P., *Energy production from biomass (Part 2): Conversion technologies*, Bioresource Technology, 83, 2002, 47-54.
5. McKendry P., *Energy production from biomass (Part 3): Gasification technologies*, Bioresource Technology, 83, 2002, 55-63.
6. Bis Z., Kobylecki R., Ścisłowska M., Zarzycki R., *Biochar – Potential tool to combat climate change and drought*, Ecohydrology & Hydrobiology, 18, 2018, s. 441-453, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.11.005>.
7. Bis Z., *Biowęgiel - powrót do przeszłości, szansa dla przyszłości*, Czysta Energia, 6, 2012, s. 28-31.
8. Bis Z., *Czy węgiel będzie dzieckiem Europy?* Nowa Energia, 2(32), 2013, s. 4-10.
9. Bis Z., Gajewski W., *Piec do wytwarzania rozdrobnionego węgla drzewnego*, 1994, Patent PL 163747.
10. Bis Z., Kobylecki R., Zarzycki R., Kuźnicki F., *Sposób i urządzenie do pirolizy biomasy, odpadów*, 2019, patent PL 231128.
11. Pantea H.J., Farshad K., *Thermoeconomic comparison between the performance of small-scale internal combustion engines and gas turbines integrated with a biomass gasifier*, Energy Equipment and Systems, 2, 2014, s. 57-82.
12. Blondeau J., Jeanmart H., *Biomass pyrolysis at high temperatures: Prediction of gaseous species yields from an anisotropic particle*, Biomass & Bioenergy, 41, 2012, s. 107-121.
13. Kobylecki R., Bis Z., *Autotermiczna termoliza jako efektywna technologia produkcji czystych i wysokoenergetycznych paliw*, Archiwum Spalania, 6/1-4, 2006, s. 114-119.
14. Kobylecki R., Ścisłowska M., Bis Z., *The carbonization of biomass - an efficient tool to decrease the emission of CO₂*, Archives of Thermodynamics, 34, 3, 2013, s. 185-195.
15. Prins M.J., Ptasinski K.J., Janssen F.J.J.G., *Torrefaction of wood, Part 1, Weight loss kinetics*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 77, 2006, s. 28-34.
16. Prins M.J., Ptasinski K.J., Janssen F.J.J.G., *Torrefaction of wood, Part 2. Analysis of products*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 77, 2006, s. 35-40.
17. Prins M.J., Ptasinski K.J., Janssen F.J.J.G., *More efficient biomass gasification via torrefaction*, Energy, 31, 2006, s. 3458-3470.
18. Prins M.J., Ptasinski K.J., Janssen F.J.J.G., *From coal to biomass gasification: Comparison of thermodynamic efficiency*, Energy 32, 2007, s. 1248-1259.
19. Prochnow A., Heiermann M., Plochl M., Amon T., Hobbs P., *Bioenergy from permanent grassland - A review: 2. Combustion*, Bioresource Technology, 100, 21, 2009, s. 4945-4954.
20. Polesek-Karczewska S., Wardach-Święcicka I., Kardaś D., Turzyński T., *Application of a Lumped Multi-Section Model for Analyzing the Thermal Performance of a Small-Scale Biomass Boiler*, J. Thermal Science, 30(3), 2021, DOI:10.1007/s11630-021-1385-8.
21. Organ A.J., *Stirling Cycle Engines – Inner Workings and Design*, J. Wiley & Sons, Inc., 2014, ISBN13 (EAN): 9781118818435.
22. De Jong W., *Biomass as a Sustainable Energy Source for the Future Fundamentals of Conversion Processes*, J. Wiley & Sons, Inc., 2013, ISBN13 (EAN): 9781118304914.
23. <https://farm-energy.extension.org/biochar-prospects-of-commercialization/>.

Poligeneracyjny układ dla karbonizacji biomasy i wytwarzania biowęgla

Streszczenie:

W niniejszej pracy przedstawiono propozycję poligeneracyjnego zintegrowanego układu dla efektywnego i ekonomicznie korzystnego wytwarzania ciepła, energii elektrycznej oraz biowęgla z termicznie przetwarzanej (karbonizowanej) biomasy. Dokonano omówienia uproszczonego bilansu cieplno-masowego dla wybranej biomasy – peletu z łusek słonecznika. Wyniki obliczeń dla zaproponowanego układu poligeneracyjnego wykazały duży potencjał nawet dla najprostszej jego konfiguracji, t.j. połączenia karbonizera i wodnego kotła odzysknicowego. Stwierdzono, że zastąpienie standardowego układu produkcji ciepła wskutek spalania biomasy układem, w którym wytwarzane jest ciepło oraz biowęgiel pozwala oczekiwać zwiększenia przychodów w wysokości co najmniej 20%. Przychody te można zwiększyć w efekcie implementacji modułu wytwarzającego energię elektryczną, a także z tytułu sprzedaży certyfikatów unikniętej emisji CO₂ (w efekcie zastąpienia spalania biomasy wytwarzaniem biowęgla).

Słowa kluczowe: Biowęgiel, poligeneracja, karbonizacja, uwęglanie, biomasa

Polygeneration System for the carbonization of biomass and the production of biochar

Abstract:

This paper presents a proposal of an integrated polygeneration system for effective and economically advantageous production of heat, electricity and biochar from the thermally processed (carbonized) biomass. The simplified thermal and mass balance for a selected biomass (sunflower husk pellets) was discussed. The calculation results for the proposed polygeneration system indicated its great potential even for the most simple configuration, i.e. the combination of a carbonizer and a water recovery boiler. It was found that the replacement of a standard heat production system focused on biomass combustion with a system that generates heat and produces biochar allows to expect at least 20% increase of the revenues. The revenues may be increased by the implementation of electricity generating module, as well by the sale of CO₂ certificates (avoided CO₂ emission) obtained as a result of the replacement of biomass combustion with the production of the biochar.

Keywords: Biochar, polygeneration, carbonization, charring, biomass

Skroplony bio-gaz jako jeden z czynników osiągnięcia neutralności klimatycznej

1. Wprowadzenie

Unia Europejska (UE) dąży do pełnej dekarbonizacji będącej podstawą osiągnięcia neutralności klimatycznej. Wymaga to całkowitej przebudowy systemu energetycznego i jego infrastruktury do 2050 r. Cel ten leży u podstaw Europejskiego Zielonego Ładu (European Green Deal) [1], który obejmuje szeroki wachlarz planów zintensyfikowania polityki w sprawie łagodzenia zmian klimatu. UE zamierza doprowadzić do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych (GHG) o co najmniej 55% do 2030 r. Ścieżkę prowadzącą do osiągnięcia takiego poziomu redukcji gazów cieplarnianych i osiągnięcia neutralności klimatycznej przedstawia rysunek 1.

Przejęcie do społeczeństwa neutralnego dla klimatu jest zarówno pilnym wyzwaniem, jak i szansą na zbudowanie lepszej przyszłości dla wszystkich. Będzie to wymagało znacznych inwestycji w efektywność energetyczną, energię odnawialną, nowe niskoemisyjne technologie i infrastrukturę sieciową [2]. Kluczową rolę w tym działaniu odegrają zarówno społeczeństwa, jak i sektory gospodarki - od energetyki po przemysł, transport, gospodarkę mieszkaniową, usługi, rolnictwo i leśnictwo, które będą musiały ograniczyć emisję gazów cieplarnianych, m.in. poprzez zaprzestanie stosowania paliw kopalnych. W połączeniu z istniejącą infrastrukturą gazową, gazy odnawialne i niskoemisyjne mogą pomóc w osiągnięciu przejścia na system energetyczny o zerowej emisji gazów cieplarnianych netto przy najniższych kosztach społecznych [3]. Jednakże jest to transformacja wieloaspektowa i składa się z wielu wzajemnie powiązanych zmian rynkowych, technologicznych oraz prawnych.

Obecne prawodawstwo UE nie uwzględniło zróżnicowanych ambicji klimatycznych poszczególnych krajów, co grozi opóźnieniem wdrożenia działań i zagraża osiągnięciu neutralności klimatycznej w 2050 r. Dodatkową kwestią związaną z regulacjami klimatycznymi jest to, że obecnie nie obejmują one wszystkich źródeł emisji gazów cieplarnianych, podczas gdy cel neutralności klimatycznej do 2050 r. jest celem ogólnogospodarczym, obejmującym wszystkie emisje [4]. Dotyczy to m.in. emisji metanu do atmosfery, który pozostaje krócej w atmosferze niż CO₂ i charakteryzuje się znacznie większym od CO₂ potencjałem tworzenia efektu cieplarnianego (GWP – *Global Warming Potential*) ocenianym na 28-36 w okresie 100 letnim [5]. Metan przy-

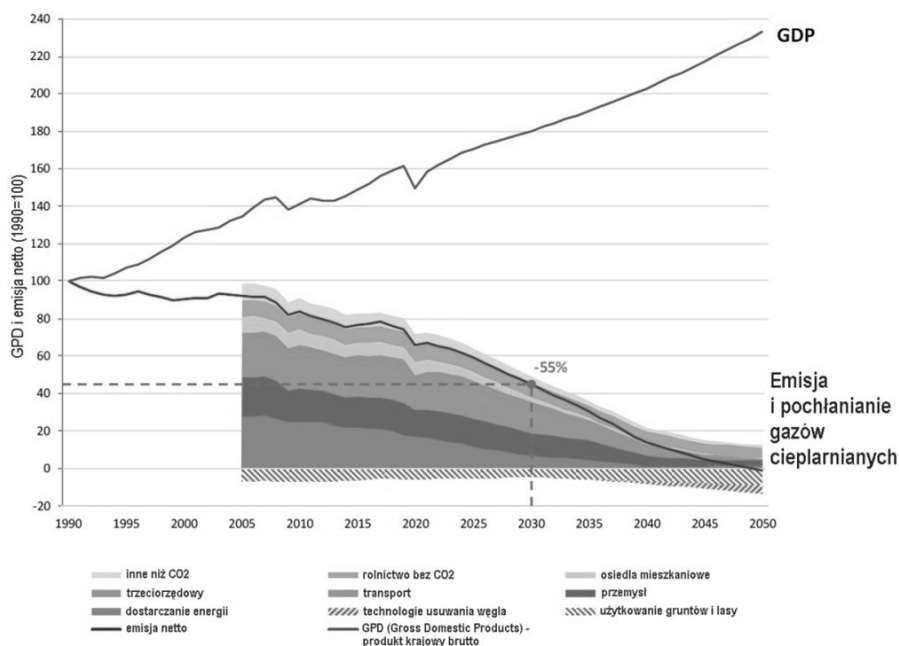
¹ Grażyna.Pazikowska-Sapota@im.umg.edu.pl, Zakład Ochrony Środowiska, Instytut Morski, Uniwersytet Morski w Gdyni, www.umg.edu.pl.

² Grażyna.Dembska@im.umg.edu.pl, Zakład Ochrony Środowiska, Instytut Morski, Uniwersytet Morski w Gdyni, www.umg.edu.pl.

³ pawel.warszycki@hie-ro.de, Hanseatic Institute for Entrepreneurship and Regional Development at the University of Rostock (HIE-RO), www.hie-ro.de.

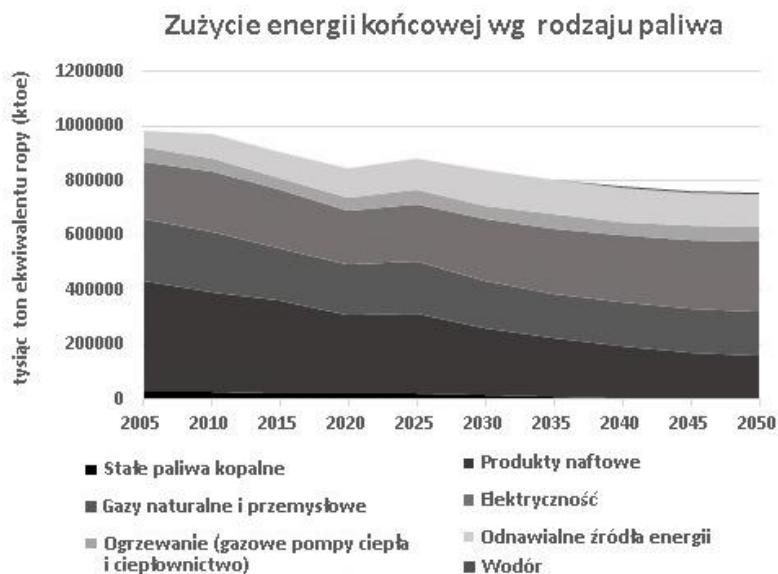
⁴ Katarzyna.Galer-Tatarowicz@im.umg.edu.pl, Zakład Ochrony Środowiska, Instytut Morski, Uniwersytet Morski w Gdyni, www.umg.edu.pl.

czynią się także do tworzenia ozonu w troposferze oraz silnego lokalnego zanieczyszczenia powietrza [6]. Zmniejszenie emisji metanu jest jednym z czynników, które mogą służyć do osiągnięcia celów klimatycznych [7]. Metan może mieć zastosowanie jako paliwo alternatywne w stosunku do tradycyjnych paliw. Zwłaszcza biometan jest postrzegany jako źródło energii wspierające wysiłki krajów Unii Europejskiej w tym zakresie, bowiem stosowanie skroplonego biogazu (LBG lub inaczej bio-LNG), czyli biometanu lub gazu ziemnego (LNG) jako paliwa wpływa znacząco na redukcję emisji gazów cieplarnianych [7-11]. Korzyści klimatyczne wynikające ze stosowania biometanu są podobne do tych związanych ze stosowaniem odnawialnej energii elektrycznej i syntetycznego oleju napędowego (e-paliwa). Wykorzystanie do produkcji biogazu lub biometanu odpadów poprodukcyjnych pochodzących głównie z produkcji rolniczej (gnojowica), rolno-spożywczej czy usług komunalnych może nawet spowodować tzw. ujemne emisje [8, 9].



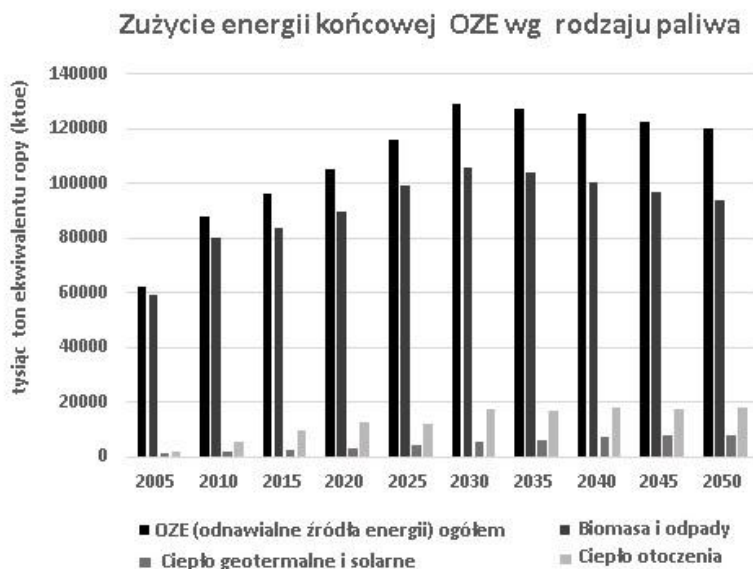
Rysunek 1. Ścieżka prowadząca do 55% redukcji emisji gazów cieplarnianych i osiągnięcia neutralności klimatycznej [4]

Prognozę zmian źródeł energii do 2050 na obszarze UE ilustruje rysunek 2. Prognoza ta zakłada spadek udziału produktów naftowych, znaczący spadek udziału stałych paliw kopalnych oraz wzrost udziału OZE (odnawialnych źródeł energii) w strukturze miksu energetycznego. Prognoza przewiduje również, że wykorzystanie LNG pozostanie stosunkowo stabilne w czasie z tendencją nieznacznie malejącą [12].



Rysunek 2. Prognoza zmian źródeł energii w UE do 2050 r. [12]

Prognozę zmian w zakresie odnawialnych źródeł energii do 2050 na obszarze UE przedstawiono na rysunku 3. Prognoza zakłada przede wszystkim przeważający udział biomasy i odpadów w pozyskiwaniu energii [12].



Rysunek 3. Prognoza zmian źródeł OZE w UE do 2050 r., opracowanie własne na podstawie [12]

Do tej pory obliczenia w kwestii wpływu bio-LNG na redukcję emisji zanieczyszczeń bazowały przede wszystkim na założeniach zastosowania tego paliwa w transporcie drogowym i morskim do napędu ciągników siodłowych oraz dużych jednostek pływających. Wynikało to głównie z ograniczeń stosowanych dotychczas rozwiązań technicznych, które wymagały stosunkowo dużych przestrzeni np. do zamontowania pojemników kriogenicznych (do przechowywania lub transportowania paliwa), bazujących na zastosowaniu próżni, jako czynnika utrzymującego bio-LNG w odpowiedniej temperaturze. To w oczywisty sposób determinowało ograniczenia i redukowało potencjał komercyjnego zastosowania bio-LNG, a co za tym idzie, pozytywnego wpływu skroplonego metanu na redukcję zanieczyszczeń.

Znacznie szersze wykorzystanie skroplonego metanu będzie wymagało m.in.:

- zmiany paradygmatu w kreowaniu miksu energetycznego w szerszej i dłuższej perspektywie, poprzez stopniowe odchodzenie od stosowania paliw kopalnych;
- wzrostu znaczenia biogazu jako paliwa kontrybuującego do wdrożenia strategii gospodarki niskoemisyjnej.

Na osiągnięcie tego celu będzie wpływać struktura wytwarzania biogazu (specyfika ilościowo-czasowa) oraz kwestie tworzące ramy do szerszego zastosowania bio-LNG, a składające się m.in. z:

- istniejących technicznych rozwiązań potrzebnych do szerokiego zastosowania bio-LNG, wychodzącego poza dotychczas znany rynek;
- systemu legislacyjno-prawnego, definiującego i/lub ograniczającego możliwość stosowania poszczególnych rozwiązań;
- finansowych instrumentów ograniczających lub wspierających otwieranie się nowych segmentów rynku (instrumenty fiskalne oraz stosowane „zachęty”);
- elementów strategii oraz modeli biznesowych po stronie podaży zarówno dostawców technologii, jak i przedsiębiorstw handlujących paliwem;
- akceptacji po stronie popytowej oraz czynników behawioralnych wśród potencjalnych odbiorców.

Jest to zatem kwestia kompleksowego systemu, którego poszczególne elementy odgrywają znaczącą rolę oraz są w określonym zakresie czynnikami determinującymi czy też ograniczającymi potencjał stosowania bio-LNG.

Celem pracy jest przedstawienie sytuacji sektora produkcji biometanu na rynku europejskim oraz pokazanie dróg rozwoju elementów tworzących ramy do szerszego stosowania bio-LNG jako paliwa w praktyce na przykładzie założeń oraz wstępnych rezultatów projektu Liquid Energy, realizowanego w przez międzynarodowe konsorcjum w ramach Interreg South Baltic Programme 2014-2020.

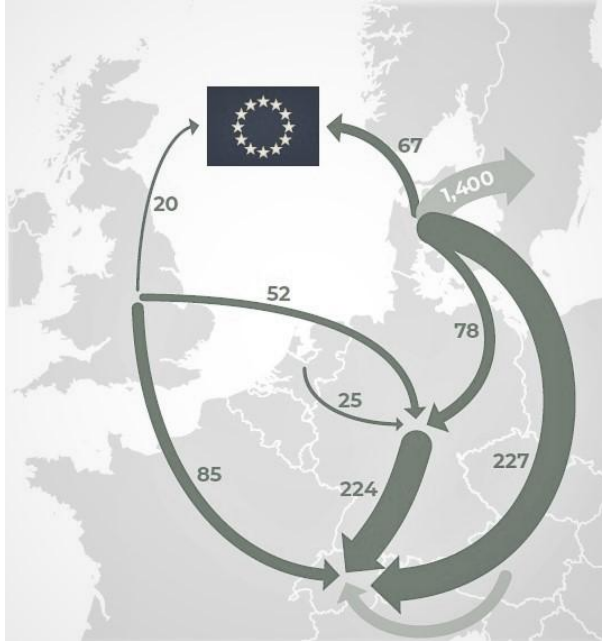
2. Europejski rynek biometanu

W każdym kraju w Europie istnieje mniejszy lub większy sektor produkcji biometanu. Jednak rynek dużej przemysłowej produkcji biometanu (1000 m³/h i więcej) ogranicza się do kilku firm, w tym [4]:

- Nature Energy (siedem zakładów w Danii);
- Gasum (sześć zakładów w Szwecji);
- VERBIO Vereinigte BioEnergie AG (trzy zakłady w Niemczech);
- E.ON (trzy zakłady w Niemczech/Szwecji).

Tylko niewielka liczba rolników jest zaangażowana w te duże projekty. Zaangażowane są natomiast firmy zajmujące się recyklingiem i zagospodarowaniem odpadów, które dostarczają surowca do produkcji biometanu.

Jednym z kluczowych elementów umożliwiających ustanowienie ram wspólnej polityki w zakresie produkcji i użycia biopaliw jest stworzenie europejskiego rynku dla wszystkich rodzajów energii odnawialnej. UE opracowała już dobrze sprawdzające się warunki wymiany handlowej dla rynku odnawialnej energii elektrycznej. Sektor gazowy i paliwowy potrzebuje podobnych ułatwień w odniesieniu do transgranicznego handlu wolumenami oraz gwarancjami pochodzenia (GP) dotyczącymi gazów odnawialnych. Odnotowuje się wzrost zarówno harmonizacji i współpracy w sprawie certyfikacji biometanu między członkami państw UE, jak i handlu transgranicznego [13]. Poza transgranicznym handlem gwarancjami pochodzenia (GP), całkowity handel biometanem w Europie obejmuje również dwustronne umowy handlowe między krajami, zwłaszcza tam, gdzie nie działa schemat GP [14]. Międzynarodowe transfery biometanu (stan na kwiecień 2020 r.) przedstawiono na rysunku 4. Z analizy tych danych wynika, że największym importerskim certyfikatów biometanowych (głównie z Niemiec, Danii i Wielkiej Brytanii) jest Szwajcaria (ponad 500 GWh) [12].



Rysunek 4. Międzynarodowe transfery biometanu w (GWh) (stan na kwiecień 2020) [13]

3. Transformacja energetyczna

Zakładając, że transformacja energetyczna zdefiniowana w European Green Deal [1], wymaga przyspieszonego wykorzystania różnych zasobów energetycznych, ze szczególnym uwzględnieniem zasobów regionalnych, należy zintensyfikować wysiłki na rzecz tworzenia systemów i rozwiązań, które z jednej strony oznaczać będą zwiększoną dywersyfikację źródeł energii, z drugiej zaś umożliwią maksymalne wykorzystanie

istniejącego potencjału w regionach. Szczególnym wyzwaniem technicznym związanym z transformacją energetyczną jest magazynowanie i dystrybucja dużej ilości energii, na przykład w postaci skroplonego biometanu (bio-LNG) lub gazu ziemnego (LNG).

Transformacja energetyczna wymaga również szerokiej zmiany paradygmatu w myśleniu o miksie energetycznym, o rynku stosowania bio-LNG jako źródła energii oraz zmiany modeli biznesowych firm działających na tym rynku. Dodatkowo, pociąga to za sobą także konieczność dostosowania ram prawnych i finansowych w celu akceleracji procesu szerszego stosowania bio-LNG, a także wypracowania nowych rozwiązań umożliwiających szersze i powszechne stosowanie bio-LNG jako źródła energii. Wiele wskazuje, że tylko takie podejście, pozwoli myśleć o osiągnięciu założonych celów i dodatkowo może dać impuls do tworzenia i komercjalizacji rozwiązań na poziomie produktowym lub usługowym.

4. Projekt Liquid Energy

Projekt nr STHB.02.02.00-22-0151/18 pn. „Skroplony bio-gaz, jako siła napędowa rozwoju i wykorzystania technologii zielonej energii” (Liquefied (bio-) gas as a driving force for development and use of green energy technology, akronim Liquid Energy) jest finansowany przez Interreg South Baltic Programme 2014-2020. Projekt jest realizowany w okresie od 01.01.2020 do 30.06.2023 przez czterech partnerów z Polski, trzech partnerów z Niemiec i jednego partnera z Litwy, wspomaganym przez 22 partnerów stowarzyszonych – głównie przedsiębiorstwa.

Zamysł projektu Liquid Energy wywodzi się z analizy rynku bio-LNG w skali europejskiej w kontekście możliwości otwierania nowych obszarów rynkowych, dotychczas nie zagospodarowanych lub zagospodarowanych w stopniu niedostatecznym (przykład pierwszych zastosowań kogeneracji). Opracowanie czy zastosowanie nowych rozwiązań umożliwiających szersze stosowanie bio-LNG jako źródła energii stanowią specyficzny problem techniczny oraz biznesowy, którym zajmuje się wdrażany projekt Liquid Energy. Dodatkowo, ponieważ rynek bio-LNG jest rynkiem stosunkowo młodym i znajdującym się nadal w fazie stabilizowania się, relatywnie niejednorodna struktura podaży technicznych rozwiązań z niskim poziomem ustalonych norm i parametrów, wymaga szerszego partnerstwa pod kątem geograficznym i kompetencyjnym.

Projekt zajmuje się opracowaniem rozwiązań w celu stworzenia innowacyjnej techniczno-technologicznej platformy dla szerszego i bardziej uniwersalnego wykorzystania bio-LNG w skali mikro i nano (np. w zdecentralizowanym systemie zaopatrzenia w energię).

5. Cele projektu

Główne cele projektu Liquid Energy zostały zdefiniowane jako:

- prezentacja nowych i/lub innowacyjnych rozwiązań technicznych związanych z bio-LNG poprzez wdrożenie inwestycji pilotażowych mających na celu wpływ na świadomość potencjalnych grup odbiorców, co w założeniu partnerów projektu ma w efekcie wnieść wkład w otwarcie nowego rynku dla użytkowników bio-LNG jako źródła energii w skali mikro i nano;
- promowanie współpracy transgranicznej na rzecz rozwoju przyjaznych środowisku technologii, usług, produktów i norm co wynika z bardzo rozproszonego i zdominowanego przez małe i średnie przedsiębiorstwa rynku po stronie podaży

rozwiązań technicznych. Będzie się to odbywało za pośrednictwem stworzonej w ramach projektu platformy B2B (Business to Business) (on-line). Docelowo będzie to „miejsce“, w którym zaprezentowane zostaną przedsiębiorstwa i organizacje aktywne na rynku bio-LNG z uwzględnieniem zakresu ich działania oraz oferowanych produktów na różnych etapach łańcucha wartości dodanej.

5.1. Inwestycje pilotażowe

W ramach projektu realizowane są cztery inwestycje pilotażowe:

- modernizacja małej jednostki pływającej i przystosowanie silnika na zasilanie bio-LNG – ta inwestycja ma za zadanie przetestowanie oraz zaprezentowanie możliwości stosowania bio-LNG na jednostkach, które do tej pory nie były w centrum zainteresowania;
- budowa mobilnej stacji tankowania bio-LNG na bazie pojazdu o całkowitej masie doduszanej 3,5 t jako tryb dostawy do użytkownika końcowego – inwestycja ta ma za zadanie przełamanie barier odnośnie przebudowy struktury logistycznej i skali dostarczanego paliwa (miniaturyzacja dostaw) oraz zmian modelu biznesowego zakładającego szersze wykorzystanie bio-LNG;
- budowa innowacyjnej stacji paliw dla lokomotywy zasilanej bio-LNG, co ma na celu pokazanie zmiany skali ilościowej dostarczanego surowca (downscaling) do aplikacji tzw. hot-spots typu stacje czy porty przeładunkowe;
- budowa systemu opartego na ogniwie paliwowym wykorzystującym bio-LNG do dostarczania energii elektrycznej i/lub ciepła w budynkach biurowych czy mniejszych zakładach produkcyjnych – tutaj założeniem jest dalsze wzmacnianie kogeneracji, stosowanej dotychczas w niewielkim zakresie.

Realizacja zamierzonych zadań będzie oparta o zastosowanie innowacyjnych rozwiązań, np. zastosowanie nowej generacji pojemników kriogenicznych charakteryzujących się:

- brakiem technologii próżniowej;
- zastosowaniem innowacyjnych materiałów izolacyjnych;
- większą odpornością na uszkodzenia;
- pracą przy standardowym ciśnieniu ok. 1,0-3,5 bar, co zapewni łatwiejszą i bezpieczniejszą obsługę;
- możliwością produkcji pojemników o różnych kształtach i pojemnościach (od ok. 150 dm³/70 kg do 800 dm³/370 kg).

5.2. Osiągnięte rezultaty projektu

Na obecnym etapie realizacji projektu najbardziej zaawansowaną inwestycją pilotażową jest modernizacja dawnej motorówki inspekcyjnej Magda I (rys. 5 i 6). Jednostka jest własnością jednego z partnerów projektu – Towarzystwa Krzewienia Wiedzy o Morzu z siedzibą w Szczecinie. Magda I będzie unikatową małą jednostką zasilaną paliwem gazowym. W przyszłości jednostka posłuży do prowadzenia szkoleń oraz promocji ekologicznego zasilania jednostek śródlądowych.



Rysunek 5. Jednostka Magda I (podstawowe dane: długość – 18 m; szerokość – 4,28 m; zanurzenie – 2,83 m; GT – 42,71; NT – 7,51; nośność – 5,5 t) [opracowanie własne]





Rysunek 6. Etapy przebudowy Magdy I [opracowanie własne]

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono możliwości wykorzystania bio-LNG jako paliwa na przykładzie rozwiązań technicznych proponowanych w projekcie Liquid Energy, omówiono zagadnienia związane z wykorzystaniem bio-LNG, w kwestii osiągnięcia neutralności klimatycznej, jak również wskazano kierunki działań, które należy podjąć, aby upowszechnić stosowanie tego paliwa.

Zakładana w ramach European Green Deal [1] pełna dekarbonizacja gospodarki Unii Europejskiej (UE) oraz transformacja energetyczna będzie wymagała podjęcia wielu działań w celu zniwelowania barier utrudniających rozwój sektora wykorzystania biogazu w transporcie. Takie działania obejmują m.in.:

- zwiększenie udziału bio-LNG w miksie energetycznym, który będzie miał znaczący wpływ na zmiany struktury rynku energetycznego i będzie wymuszać daleko idące zmiany modeli biznesowych firm z tego sektora;
- otwarcie nowych rynków odbiorców oraz lokalnych systemów podaży i popytu, które jest jednym z kluczowych wyzwań na nadchodzące lata;
- dostosowanie rynku podaży, wymagające transformacji myślenia, planowania i działania, która z jednej strony będzie wywierała „negatywną“ presję z punktu widzenia biznesowego na obecnie działające firmy, z drugiej zaś strony będzie szansą na wzmacnianie innowacyjności i przedsiębiorczości;
- ułatwienie rozwoju nowych technologicznych i nie technologicznych rozwiązań, dostosowanych do potrzeb nowego rynku podaży (np. budowa ciężarówki 3,5 t z systemem tankowania małych ilości bio-LNG jako ważny element logistyki, zwłaszcza dla użytkownika końcowego);

- wspólne działanie w ramach struktur sieciowych skupiających zarówno dostawców, odbiorców jak i organizacje okołobiznesowe (włączając w to jednostki naukowe) będące istotnym elementem wzmacniania procesu transformacji;
- szerokie wsparcie zarówno przy komercjalizacji nowych rozwiązań technologicznych, jak i przy kreowaniu zmian behawioralnych uczestników rynku.

Uwagi ogólne

Projekt nr STHB.02.02.00-22-0151/18 pn. „Skroplony bio-gaz, jako siła napędowa rozwoju i wykorzystania technologii zielonej energii” (Liquefied (bio-) gas as a driving force for development and use of green energy technology) jest finansowany przez Interreg South Baltic Programme 2014-2020. Projekt jest realizowany w okresie od 01.01.2020 do 30.06.2023.

Literatura

1. *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal, COM(2019), 640 final, 2019.*
2. Wouters C., Buseman M., van Tilburg J., Berg T., Cihlar J., Lejarreta A.V., Jens J., Wang A., Peters D., van der Leun K., *Market state and trends in renewable and low-carbon gases in Europe. A Gas for Climate report*, Guidehouse Netherlands B.V., 2020.
3. Gas for Climate Consortium, <https://gasforclimate2050.eu>, dostęp 29.04.2021.
4. Commission Staff Working Document. Impact Assessment Accompanying the Document Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Stepping up Europe’s 2030 climate ambition. Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people, SWD(2020) 176 final, part 1/2, 2020.
5. Understanding Global Warming Potentials, EPA (United States Environmental Protection Agency), <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>, 23.08.2021.
6. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on an EU strategy to reduce methane emissions, COM(2020), 663 final, 2020.
7. Woźniakowski P., *Biogaz w polityce Europejskiego Zielonego Ładu*, [w:] *Raport biogaz w Polsce*, Wyd. Biomasa Media Group Sp. z o.o., Poznań 2020, s. 25-27.
8. Piłuta M., *Biometan – stan obecny i perspektywy rozwoju*, [w:] *Raport Biogaz w Polsce*, Wyd. Biomasa Media Group Sp. z o.o., Poznań 2020, 81-93.
9. European Biogas Association (EBA), *Smart CO₂ standards for negative emissions mobility*, EBA, Bruksela, 2020, s. 1-14.
10. Wodołażski A., Rejman -Burzyńska A., Jędrasik E., *Wykorzystanie biometanu jako paliwa w transporcie samochodowym efektywnym sposobem ograniczenia emisji zanieczyszczeń do powietrza*, Journal of Ecology and Health, vol. 17, nr 4, 2013, s. 169-175.
11. Ahman M., *Biomethane in the transport sector – An appraisal of the forgotten option*, Energy Policy, 38, 2010, s. 208-217.
12. EU Reference Scenario 2020 Energy, transport and GHG emissions - Trends to 2050, Publication Office of the EU, ISBN 978-92-76-39356-6, doi:10.2833/35750, MJ-02-21-816-EN-N, 2021.
13. DENA, dena-ANALYZE: Branchenbarometer Biomethan 2020, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2020/Branchenbarometer_Biomethan_2020.pdf, 29.04.2021.

14. CertifHy. Towards a new Hydrogen market – CertifHy Green Hydrogen Guarantees of Origin are launched, 2019, <https://www.certifhy.eu/news-events/169-towards-a-new-hydrogen-market-certifhy-green-hydrogen-guarantees-of-origins-are-launched.html>, 29.04.2021.

Skroplony bio-gaz jako jeden z czynników osiągnięcia neutralności klimatycznej

Streszczenie

Unia Europejska (UE) dąży do pełnej dekarbonizacji będącej podstawą osiągnięcia neutralności klimatycznej, która wymaga całkowitej przebudowy systemu energetycznego i jego infrastruktury do 2050 r. Przejście do społeczeństwa neutralnego dla klimatu jest zarówno pilnym wyzwaniem, jak i szansą na zbudowanie lepszej przyszłości dla wszystkich. Będzie to wymagało znacznych inwestycji w efektywność energetyczną, energię odnawialną, nowe niskoemisyjne technologie i infrastrukturę sieciową. W połączeniu z istniejącą infrastrukturą gazową, gazy odnawialne i niskoemisyjne mogą pomóc w osiągnięciu przejścia na system energetyczny o zerowej emisji gazów cieplarnianych netto przy najniższych kosztach społecznych. Jednakże jest to transformacja wieloaspektowa i składa się z wielu wzajemnie powiązanych zmian rynkowych i technologicznych. Nowe rozwiązania umożliwiające szersze stosowanie bio-LNG jako źródła energii stanowią specyficzny problem techniczny, którym zajmuje się projekt pn. „Skroplony bio-gaz, jako siła napędowa rozwoju i wykorzystania technologii zielonej energii” (akronim: Liquid Energy). Celem projektu jest promowanie współpracy transgranicznej B2B (Business to Business) na rzecz rozwoju przyjaznych środowisku technologii, usług, produktów i norm oraz prezentacja nowych rozwiązań technicznych związanych z bio-LNG obejmująca wdrożenie czterech inwestycji pilotażowych: modernizacja małej łodzi i przystosowanie silnika na zasilanie bio-LNG; budowa mobilnej stacji tankowania bio-LNG jako tryb dostawy do użytkownika końcowego; budowa innowacyjnej stacji paliw dla lokomotywy zasilanej bio-LNG; budowa systemu opartego na ogniwie paliwowym wykorzystującym bio-LNG do dostarczania energii elektrycznej i/lub ciepła w budynku.

Zwiększający się udział bio-LNG w miksie energetycznym będzie miał znaczący wpływ na strukturę rynku energetycznego i będzie wymuszać daleko idące zmiany modeli biznesowych firm z tego sektora. Proces dostosowania rynku podaży wymaga transformacji myślenia, planowania i działania. Z jednej strony będzie wywierał „negatywną” presję z punktu widzenia biznesowego na obecnie działające firmy, z drugiej zaś strony będzie to szansa na wzmocnienie innowacyjności i przedsiębiorczości.

Słowa kluczowe: dekarbonizacja, transformacja energetyczna, bio-LNG

Liquefied bio-gas as one of the factors in achieving climate neutrality

Abstract

The European Union (EU) is committed to full decarbonisation as the basis for achieving climate neutrality, which requires a complete overhaul of the energy system and its infrastructure by 2050. The transition to a climate neutral society is both an urgent challenge and an opportunity to build a better future for all. This will require significant investments in energy efficiency, renewable energy, new low carbon technologies and grid infrastructure. Combined with the existing gas infrastructure, renewable and low carbon gases can help to achieve the transition to a net-zero GHG energy system with the lowest social cost. However, it is a multi-faceted transformation and consists of many interrelated market and technological changes. New solutions enabling the wider use of bio-LNG as an energy source constitute a specific technical problem addressed by the project entitled "Liquefied bio-gas as a driving force for the development and use of green energy technology" (acronym: Liquid Energy). The aim of the project is to promote cross-border B2B (Business to Business) cooperation for the development of environmentally friendly technologies, services, products and standards, and to present new technical solutions related to bio-LNG, including the implementation of four pilot investments: modernization of a small boat and adaptation of the engine to power bio-LNG; construction of a mobile(bio-LNG refuelling station as a delivery mode to the end user; construction of an innovative fuel station for a locomotive powered by bio-LNG; construction of a fuel cell system that uses bio-LNG to supply electricity and / or heat in the building.

The increasing share of bio-LNG in the energy mix will have a significant impact on the structure of the energy market and will force far-reaching changes to the business models of companies in this sector. The process of adjusting the supply market requires a transformation of thinking, planning and acting. On the one hand, it will exert a "negative" pressure from the business point of view on currently operating companies, on the other hand, it is an opportunity to strengthen innovation and entrepreneurship.

Keywords: decarbonisation, energetic transformation, bio-LNG

Wpływ historycznych ukształtowań szklarniowych na rozwój architektury energooszczędnej

1. Wprowadzenie

We współczesnej architekturze rola szkła w tworzeniu całkowicie przeszklonych budynków jest dominująca. *Szczególny podziw wśród tego rodzaju struktur szklarniowych wzbudzają budynki palmiarni, ogrodów zimowych, laboratoriów roślinności, w których pokrycie szklane pełni funkcję nie tylko zewnętrznej przegrody budowlanej, ale daje wyraz fascynacji tym materiałem, jako obraz artystycznego ujęcia bryły i formy. W ich strukturze ściany i dach stanowią całkowicie przeszkloną przegrodę zewnętrzną a problemy utrzymania właściwych warunków mikroklimatycznych w tych budynkach spowodowanych efektem szklarniowym, podporządkowanym prawom fizyki wydają się niezwykle istotne.*

Ogrzewanie się szklarni następuje w wyniku konwekcyjnej i turbulentnej wymiany ciepła. Słoneczne promieniowanie krótkofalowe przepuszczane jest przez przegrody przezroczyste, a następnie pochłaniane na powierzchni gruntu, elementów wyposażenia szklarni o dużej pojemności cieplnej. Pochłonięte promieniowanie krótkofalowe powoduje wzrost temperatury – element nagrzewa się i zaczyna emitować długofalowe promieniowanie podczerwone (cieplne). Ze względu na właściwości osłon przezroczystych promieniowanie cieplne częściowo odbijane jest wstecz, co skutkuje dalszym wzrostem temperatury w pomieszczeniu o dużym stopniu przeszklenia oraz jego elementów budowlanych.

W strukturach szklarniowych wielkoskalowych problemów przysparzają względy nadmiernego oświetlenia promieniami słonecznymi w ciągu dnia, wymagające regulacji dostępu, a także kontrola temperatury i naturalnej wymiany powietrza. Ogrody zimowe XIX i początku XX wieku zapoczątkowały rozwój architektury bioklimatycznej, nazywanej inaczej słoneczną. Wykorzystanie struktur szklarniowych jako przestrzeni przepelnionych światłem słonecznym i naturalnie ogrzewanych wpisuje się w kontekst współczesnych poszukiwań proekologicznych i energooszczędnych. Celem pracy jest uwytklenie znaczenia doświadczeń, zgromadzonej wiedzy na temat zjawisk naturalnych zachodzących w obrębie przestrzeni hodowlanej historycznych ogrodów zimowych, znajdując zastosowanie w procesie ewaluacji współczesnych struktur szklarniowych do funkcji użytkowej przeznaczonej na pobyt ludzi. Praca ma charakter przeglądu i analityczny, oparta jest o badania literaturowe. Poczynając od rysu historycznego ogrodów zimowych XIX i XX w., chronologię rozwiązań przestrzennych działających jako elementy pasywne pozyskujące energię lub wykorzystujące naturalne procesy fizyczne w strukturach przeszklonych budynków, do podsumowania, w którym wskazano potrzebę projektowania struktur szklarniowych z uwzględnieniem procesów energetycznych wg współczesnych technologii wspartych rozwiązaniami tradycyjnymi, optymalnie wykorzystującymi warunki klimatyczne.

¹ joanna.biedronska@polsl.pl, Wydział Architektury, Politechnika Śląska, Gliwice.

2. Rys historyczny

Już w XVI wieku w Europie zwrócono uwagę na duże oddziaływanie promieni słonecznych w procesie ogrzewania oranżerii. Nazywane cieplarniami, ogrodami zimowymi, kryte szkłem i zorientowane na południe pomieszczenia, rozpowszechniane były już w XVII wieku w wielu krajach, szczególnie w Holandii, Francji, Anglii, co umożliwiła produkcja płaskich tafli szkła. „XIX wiek odrodził w Europie model architektury słonecznej i do jego końca ogrody zimowe stanowiły ważny element architektoniczny, uzupełniający od południa bryłę budynków mieszkalnych, szczególnie wiejskich rezydencji. Przyjmowały one też charakter wolno stojącego elementu w ogrodach publicznych. Jako przykład wymienić tu można Crystal Palace” [1]. Zaprojektowanie tego obiektu wystawowego autorstwa Sir Josepha Paxtona w postaci szklarni o olbrzymiej skali było przełomem w architekturze i budownictwie XIX wieku. Budynek został wybudowany w konstrukcji tymczasowego budynku wystawienniczego, prezentującego najnowsze technologie i innowacje z całego świata z przeznaczeniem na Wielką Wystawę w maju 1851 roku – stanowił manifest możliwości i osiągnięć budownictwa „ery przemysłowej” XIX wieku. Konstrukcja opierała się na module o wymiarach 10 cali x 49 cali, wielkości największej dostępnej wówczas szklanej tafli. System modułowy składał się z powtarzalnych trójkątów i prostokątów, wspartych na siatce żeliwnych belek i słupów. Metoda budowy była przełomem w technologii i wzornictwie i utorowała drogę do bardziej wyrafinowanego projektu prefabrykowanego. Wraz z tym arcydziełem konstruktorskiej śmiałości i poetyckiego liryzmu narodził się najbardziej sugestywny archetyp nowoczesnej architektury. Inne przykłady budowli historycznych szklarni pokazują kunszt sztuki budowlanej z zastosowaniem żelaza i szkła jak na tamte czasy wyniesiony na wysoki poziom. Przetrwały do dzisiaj i służą zwiedzającym spełniając funkcje wystawiennicze jak choćby Palmiarnia w Schönbrunn mieszcząca się w ogrodzie francuskim przy Pałacu Schönbrunn w Wiedniu. Została wzniesiona na życzenie cesarza Franciszka Józefa i według projektu Franza Xavera Segenschmida w 1882 r (rys. 1). Eksponatami jest tu roślinność różnych stref klimatycznych. Trudność polega na zapewnieniu roślinom odpowiedniego klimatu i utrzymaniu go w różnych porach roku. Jeszcze do niedawna szklarnie o światowej renomie i historycznym znaczeniu pochłaniały ogromne ilości paliw naturalnych w celu utrzymania odpowiednich warunków bioklimatycznych we wnętrzach w okresie np. zimy.

Należy podkreślić, że przykłady historyczne, piękne, ulotne, zachowane do dziś, odrestaurowane budowle świadczą o dążeniu architektów do urzeczywistnienia idei, myśli twórczej „szklanych domów” wykorzystując osiągnięcia techniki, właściwości szkła zarówno wówczas jak i dzisiaj.



Rysunek 1. Palmiarnia w Schönbrunn Wiedeń, Austria, (rok powstania 1882). Konstrukcja żeliwna.
Fot. J. Biedrońska

3. Współczesna szklarnia jako model zrównoważonego rozwoju

Ogrody zimowe XIX i początku XX wieku zapoczątkowały rozwój architektury bioklimatycznej w postaci struktur szklarniowych wykorzystujących efekt szklarniowy do rozważań na temat zjawisk zachodzących we wnętrzu, przy udziale słońca i wiatru, w celu zapewnienia roślinom i użytkownikom właściwego mikroklimatu. Wszelkie niedogodności natury użytkowej pojawiające się w szklarniach w wyniku przegrzania czy niedostatecznej wymiany powietrza miały podkreślić silne związki pomiędzy kształtowaniem struktur szklarniowych a komfortem użytkowania przeszklonego wnętrza. W obecnych czasach zmuszających nas do energooszczędności, do poszanowaniu środowiska, konieczne stały się rozwiązania wykorzystujące energię słoneczną, jako źródło energii odnawialnej, gdy bierny sposób pozyskiwania energii ze słońca okazał się godny uwzględnienia.

„Ogrody współczesne przyjmują też, podobnie jak w wieku XIX, postać wielko-przestrzennych, transparentnych, klimatycznych struktur, które kontynuują m.in. śmiałe konstrukcje J. Paxtona (Crystal Palace, 1851), a także R.B. Fullera (kopuła geodezyjna, futurystyczna wizja przekrycia Manhattanu)” [3,10].

Powstają śmiałe projekty w zakresie których zastosowano nowatorskie, prototypowe rozwiązania architektoniczne zmierzające do wykorzystania przestrzeni szklarniowej zapewniającej komfortowe środowisko i mikroklimat wnętrza. Charakterystyczne jest również to, że zadania tego podejmują się znani architekci by ze sztabem ludzi powstały te spektakularne, prestiżowe obiekty. Świadczą o tym także przykłady The Great Glasshouse w Walii projektu Normana Fostera (uznana za szklarnię XXI wieku – wizytówkę zrównoważonego rozwoju) oraz Glasshaus RHS Garden w Wisley, w Anglii zaprojektowany przez holenderskiego architekta Petera van der Toorn Vrijthoff.

Cechą wspólną tych obiektów jest całkowite przeszklenie ich bryły oraz przeznaczenie funkcjonalne. Są to budynki o cechach szklarni pełniące funkcje wymagające wysokiej jakości środowiska atmosferycznego i świetlnego, zapewnienia odpowiedniego

klimatu wewnątrz. W każdym przypadku konieczne jest myślenie o budynku w sposób holistyczny tak, by rozwiązania przestrzenne konsekwentnie łączyły przyjętą strategię projektową z łączeniem systemów zorientowanych na optymalne wykorzystanie energii słonecznej. Zarówno jedna jak i druga szklarnia jest innowacyjnym projektem w zakresie nowych technologii podwójnie szklonych ścian. Duże płaszczyzny szkła zastosowane w elewacjach wykorzystują energię słońca i wiatru w celu zrekompensowania strat energii w procesie eksploatacji budynku. Budynki te są demonstracją dobrze pojętej architektury ekologicznej i energooszczędnej. Te spektakularne, wielkoskalowe obiekty architektury bioklimatycznej nazwane zostały ogrodami aktywnymi energetycznie. Zdobywają uznanie i rozgłos w środowisku inżynierów i architektów, ale też dowodzą, jakim wartościom podporządkowana zostaje współczesna architektura niezależnie od skali i przeznaczenia budynków zawierających w swej strukturze czy w swym obrysie przeszklone struktury.

Doświadczenia i wciąż pogłębiana wiedza w dziedzinie rozwijającej się techniki i technologii wytwarzania szkła nadaje tej przegrodzie specyficzne właściwości. Dzięki temu stworzona została możliwość kontynuacji idei szklanych struktur architektonicznych w XX i XXI wieku. Dzisiaj jest to postrzegane, jako ponowny renesans rozwiązań szklarniowych, które z przestrzeni hodowli egzotycznych roślin rozszerzyły swoją funkcję na przestrzeń przeznaczoną na pobyt ludzi z zapewnieniem jej komfortu użytkowego [4].

Dokumentują to przykłady szklarni o charakterze ogrodów botanicznych (rys. 2, 4) charakteryzujące się wymagającym dla roślin mikroklimatem wnętrza i ich odniesienia – struktury szklarniowe o innej funkcji użytkowej (rys. 3, 5).



Rysunek 2. Palmiarnia Gliwice. Fot. J. Biedrońska



Rysunek 3. Dworzec przesiadkowy metra Lizbona. Fot. J. Biedrońska



Rysunek 4. Ogród Zimowy Praga. Fot. J. Biedrońska



Rysunek 5. Przeszklona struktura dachowa dworca w Berlinie. Fot. J. Biedrońska

Podobieństwa tylko na pozór wynikają z rodzaju konstrukcji czy ukształtowania przeszklonej bryły. Przykład ogrodu zimowego w Pradze nawiązuje nieprzypadkowo do przeszklonej struktury dachowej budynku o funkcji użytkowej przeznaczonej na pobyt ludzi w strefie wzmoczonej insolacji i konieczności naturalnego wietrzenia w porze letniej (rys. 4, 5). W wielu przypadkach zewnętrzne przegrody szklane stanowią składnik pasywnego systemu pozyskiwania energii ze słońca a „efekt szklarniowy” został uwzględniony w gospodarce energetycznej na podstawie doświadczeń w projektowaniu architektury bioklimatycznej i zjawisk tam zachodzących w porze dnia i nocy, latem i zimą.

4. Pasywny sposób pozyskiwania energii w odniesieniu do struktur szklarniowych

Wieloletnie doświadczenia w projektowaniu szklanych struktur oraz rozwój nowoczesnych technologii produkcji szkła skłoniły architektów do analizy wpływu ukształtowania zewnętrznej powłoki szklanej na gospodarkę energetyczną budynku. Zbadano i udowodniono, w jakim stopniu struktura szklana determinuje charakter architektury świadczący o niskim zapotrzebowaniu na energię. Obudowa zewnętrzna budynku nie może opierać się tylko na walorach estetycznych jej uformowania, ale przede wszystkim musi odpowiadać parametrom przestrzenno – technicznym zapewniającym zastosowanie zasad racjonalnej gospodarki energetycznej. Najprostszym sposobem jest wykorzystanie zjawisk fizycznych, jakie określają bierny sposób pozyskiwania energii ze słońca i wiatru bez konieczności używania urządzeń zasilanych energią zewnętrzną. Bierny nazywany często pasywnym sposobem pozyskiwania energii zaliczany jest do strategii bazującej na rozwiązaniach zmniejszających zapotrzebowanie budynku na energię grzewczą w okresie zimy przy wykorzystaniu do tego celu słońca. Natomiast chłodzenie budynku w porze letniej odbywa się przy udziale wiatru, gdy wykorzy-

stywany jest ruch powietrza w sposób niewymuszony mechanicznie a odpowiednią ochronę przed przegrzewaniem stanowią regulowane osłony przeciwsłoneczne. „W przypadku stosowania rozwiązań pasywnych szczególnie istotny jest dobór odpowiednich materiałów i rozwiązań architektoniczno-budowlanych pozwalających wykorzystać strukturę budynku do pochłaniania, magazynowania oraz rozprowadzania pozyskanej energii promieniowania słonecznego” [6]. Przykładem są ściany i stropy, stanowiące konstrukcję budynku, które mogą pełnić funkcję magazynu ciepła, a w konfiguracji ze szklaną strukturą tworzą rodzaj pasywnego kolektora ciepła. Aby uzyskać jak największe zyski solarne zimą konieczne staje się ukierunkowanie struktur przeszklonych na południe.

5. Ogólne zasady funkcjonowania systemów szklarniowych

Bazując na charakterystycznych cechach pasywnego systemu słonecznego określamy funkcjonowanie przestrzeni szklarniowej we współczesnej architekturze proekologicznej, jako:

5.1. Przestrzeń szklarniowa otwarta

Stanowi na ogół wnętrze wielkoprzestrzenne budowli wolnostojącej, wewnątrz, której umożliwiony zostaje swobodny przepływ powietrza, wykorzystujący efekt szklarniowy. Nagrzane słońcem ciepłe powietrze unosi się, a w wyniku podciśnienia zasysa chłodne powietrze w dolnych partiach obiektu do wnętrza. Ciepłe powietrze zostaje wyprowadzone ze szklarni na zewnątrz. Wymiana powietrza odbywa się tu w wyniku naturalnej wentylacji wyporowej [6]. Było to charakterystyczne rozwiązanie dla historycznych cieplarni i ogrodów zimowych z XVI-XIX wieku, zanim ewaluowały wyposażone w techniczne i technologiczne nowości.

5.2. Przestrzeń szklarniowa jako pasywny kolektor ciepła

Przestrzeń tą stanowią elementy uzupełniające bryłę budynku w konfiguracji przylegającej do jego obrzeża lub w formie arkady słonecznej skierowanej na stronę najbardziej nasłonecznioną. Promieniowanie słoneczne dociera tu do przestrzeni szklarniowej a uzyskana energia termiczna magazynowana jest w elementach wewnętrznych: w masywnej posadzce wewnętrznej oraz ścianach oddzielających szklarnię od przestrzeni wewnętrznej. W przestrzeni szklarniowej musi być zachowana naturalna wymiana powietrza tak by z równym skutkiem pełniło rolę nie tylko kolektora ciepła, ale także modyfikatora klimatu we wnętrzu. Występowanie w obrzeżnej strefie nagromadzonego ciepła ma zasięg lokalny i dotyczy stref przyległych.

Zastosowana zasada ukształtowania południowej elewacji w formie słonecznej arkady w budynkach administracyjnych Fabryki Ogniw Słonecznych w Gelsenkirchen oraz podobna w swych założeniach projektowych Solar Fabrik we Freiburgu była przytaczana często literaturowo realizacją w latach 90-tych XX wieku [11]. Szklany system osłonowy nachylony jest pod kątem najbardziej efektywnym w stosunku do kierunku prostopadłego kąta padania promieni słonecznych zimą. W okresie tym arkada pełni rolę bufora termicznego chroniąc przed przemarzaniem a zarazem rolę kolektora ciepła, gdy efekt szklarniowy umożliwia pasywne zyski ciepła magazynowane w żelbetowych elementach konstrukcyjnych. W lecie zaś w systemie pasywnym istotną rolę odgrywa przewietrzanie termicznie oddzielonej od budynku przestrzeni

przeszkłonej oraz ochrona przeciwsłoneczna wykorzystująca elementy skutecznie chroniące przed przegrzaniem. Zasysane przez dolne otwory chłodne powietrze dostaje się do środka a następnie ogrzane przez słońce powietrze unosi się do góry i wyprowadzone zostaje na zewnątrz górnymi otworami. Następuje wymiana powietrza oraz naturalny ruch jego mas ku górze bez zewnętrznych urządzeń wymuszających.

5.3. Przestrzeń szklarniowa jako bufor termiczny

Przestrzeń szklarniowa jako przylegająca część budynku, znajdująca się po zacięnionej jego stronie, do której nie dochodzi bezpośrednio promieniowanie słoneczne, stanowi bufor termiczny pomiędzy środowiskiem zewnętrznym a mikroklimatem wnętrza powodując np. ograniczenie strat nagromadzonego ciepła w okresie zimy (rys. 6). Choć promienie słoneczne nie docierają bezpośrednio do tej przestrzeni to jednak w postaci rozproszonej powodują jej ogrzanie. Tak utworzona „poduszka powietrzna” chroni budynek przed utratą nagromadzonego ciepła zmniejszając tym samym wymagania izolacyjne znajdujących się za tą kurtyną powietrzną fasad. W warunkach klimatu umiarkowanego zamknięcie przeszklonym buforem powoduje wzrost temperatury o min. 5°C.[4]. W okresie letnim konieczne jest wentylowanie takiej przestrzeni przy pomocy dolnych otworów nawiewnych i umieszczonych na górze otworów wywiewnych jak widoczne to jest na przykładzie przeszklonej klatki schodowej (rys. 7).



Rysunek 6. Struktura szklarniowa pełniąca rolę termobuforową: ściana północna budynku, Berlin.
Fot. J. Biedrońska



Rysunek 7. Struktura szklamiowa pełniąca rolę termobuforową: wertykalna obudowa klatki schodowej, Drezno. Fot. J. Biedrońska

6. Możliwości i problemy naturalnego chłodzenia i wentylacji struktur szklarniowych

Biorąc pod uwagę charakterystyczne cechy pasywnego systemu słonecznego przypisane do typologii przestrzennej struktur szklarniowych rozróżniamy ich podział ze względu na rzut poziomy i przekrój pionowy. Są to atria i rozwiązania szklarniowe wpisane w obiekt w różnych układach. To, co jest istotne we wszystkich przypadkach to możliwość naturalnego wentylowania. Trzeba też pamiętać, że w przypadku budynków wieloprzestrzennych jest zagadnieniem niezwykle trudnym ze względu na złożoność problemów architektonicznych i konstrukcyjnych. Efektywność naturalnego wentylowania ograniczają warunki pogodowe. Działanie jest efektywne, gdy warunki temperaturowe zewnętrzne są niższe od tych panujących w pomieszczeniach.

Wymiana powietrza w pomieszczeniach jest jednym z podstawowych wymogów dotyczących zachowania w nich odpowiednich warunków higienicznych. Szczególnie budynki o charakterze przeszklonej struktury otwartej, ich projektowanie i budowa, wywołały potrzebę dokładnej analizy ruchu powietrza, zjawisk fizycznych zachodzących przy udziale efektu szklarniowego. Koncepcje naturalnego wentylowania budynków znane są od najdawniejszych czasów. Jak istotne miało to znaczenie w przeszłości potwierdza przykład Palmiarni Schönbrunn w Wiedniu gdzie najprostszym rozwiązaniem okazało się otwieranie okien w dolnej partii po to, aby w momencie ogrzania cieplej masy powietrza w ciągu letniego dnia znalazło ono ujście przez otwory w górnej partii przeszklania (rys. 8).



Rysunek 8. Naturalny sposób wentylacji otwieranych okien Palmiarni w Schönbrunn Wiedeń.
Fot. J. Biedrońska

Potwierdzeniem tej logiki działania jest przykład współczesnej szklarni należącej do sektora Palmiarni w Gliwicach gdzie zastosowano ten sam system wentylowania naturalnego poprzez otwieranie dolnej i górnej partii okien (rys. 9).



Rysunek 9. Naturalny sposób wentylacji otwieranych okien sektora Palmiarni w Gliwicach. Fot. J. Biedrońska

Współcześnie powstaje wiele energooszczędnych form architektonicznych, które wykorzystują lokalne warunki bioklimatyczne przy kształtowaniu budowli wg najnowszych rozwiązań technologicznych. Posiadają one charakterystyczne rozwiązania przestrzenne, które wykorzystują przeszklone atria w układzie linearnym, zewnętrznym, szczelinowym, rdzeniowym, gdzie efekt szklarniowy zostaje wykorzystany w koncepcji naturalnej wentylacji wyporowej. Ogrzane powietrze jest wyprowadzone przez górną przeszkloną część dachową, powstaje podciśnienie, które powoduje zasysanie powietrza z dolnych otworów, czyli tworzy się tzw. efekt kominowy. Przepływ powietrza ku górze sprawia, że świeże powietrze zostaje wprowadzone do środka przez otwierane okna w elewacjach. Przykład Centrum Nowych Technologii przy Politechnice Śląskiej w Gliwicach (rys.10 i 11).



Rysunek 10. Atrium i przeszklona narożna struktura w Centrum Nowych Technologii przy Politechnice Śląskiej w Gliwicach. Fot. J. Biedrońska



Rysunek 11. System otwieranych okien w dolnej partii budynku w Centrum Nowych Technologii przy Politechnice Śląskiej w Gliwicach. Fot. J. Biedrońska

7. Podsumowanie

Nie da się dzisiaj zaprzeczyć jak duży wpływ wywarły historyczne ogrody zimowe na rozwój współczesnej architektury energooszczędnej. Świadomość użytkowych walorów przestrzeni szklarniowej i umiejętność ich wydobyć, daje dzisiaj znaczne możliwości stworzenia komfortowych warunków użytkowego wnętrza, niezależnie czy tworzy je szklarnia autonomiczna czy też część składowa budynku o określonej funkcji. Rozwój zagadnień związanych z komfortem termicznym prowadził w przeszłości do błędnych rozwiązań. Skutkiem przesadnego uszczelniania budynków był w niedległej historii SBS (ang. *Sick Building Syndrom*). Obecnie problemy związane z bezpieczeń-

stwem sanitarnym i komfortem użytkowników skłaniają do korekty strategii. W dobie wysoko rozwiniętych technologii grzania i chłodzenia budynku o dużej strefie przeszklenia być może pomocną staje się próba implementacji rozwiązań stosowanych w architekturze historycznej, gdy pewne rozwiązania dyktowały zjawiska natury: słońca i wiatru. Udział przestrzeni szklarniowej w kształtowaniu środowiska atmosferycznego wnętrza budynku, poddane analizie, powinno wskazywać na priorytetowe potrzeby użytkowe a w konsekwencji przyjęcie odpowiedniej koncepcji projektowej i rozwiązań w zakresie m.in. formy przestrzennej, konfiguracji względem bryły budynku, zorientowania wobec stron świata jej szklanych przegród zewnętrznych, technologii i rodzaju szklenia tych przegród. O tyle, że dzisiaj kształtowanie obudowy zewnętrznej budynku nie może opierać się tylko na walorach estetycznych jej uformowania, ale przede wszystkim musi odpowiadać parametrom przestrzenno – technicznym zapewniającym zastosowanie zasad racjonalnej gospodarki energetycznej. W przypadku pasywnego sposobu pozyskiwania energii szkło jak i inne elementy budynku, odgrywające dużą rolę, powinny prowadzić konsekwentnie do strategii projektowej, w której tworzyć będą system zorientowany na optymalne wykorzystanie energii słonecznej, jako jednego z najistotniejszych czynników, kształtujących naturalny mikroklimat wnętrza.

Literatura

1. Wehle-Strzelecka S., *Wykorzystanie odnawialnej energii słonecznej w architekturze – geneza i rozwój*, Czasopismo Techniczne, Wyd. Pol. Krakowskiej, 2007.
2. Marchwiński J., *Aspekt użytkowy przestrzeni szklarniowych w budynkach biurowych i przemysłowych Część 2*, Świat Szkła, 3/2005.
3. Wehle-Strzelecka S., *Architektura ogrodów zimowych otwarta na światło słoneczne*, DOI: 10.4467 / 25438700SM.17.043.7664.
4. Biedrońska J., *Możliwości kształtowania przylegających struktur szklarniowych i ich wpływ na gospodarkę energetyczną budynku*, Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury, XXXII, z. 62, 2/15, 2015.
5. Chwieduk D., *Energetyka słoneczna budynku*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 2011.
6. Zielonko-Jung K., Marchwiński J., *Łączenie zaawansowanych i tradycyjnych technologii w architekturze proekologicznej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
7. Celadyn W., *Przegrody przeszklone w architekturze energooszczędnej*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2004.
8. Marchwiński J., *Możliwości i problemy naturalnego chłodzenia i wentylacji budynków biurowych*, Chłodnictwo & Klimatyzacja, Tom nr 10, 2005.
9. Wala E., *Szkło we współczesnej architekturze*, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 2017.
10. Majerska-Pańbicka B., *Zintegrowane projektowanie architektoniczne w kontekście zrównoważonego rozwoju*, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 2014.
11. Marchwiński J., Zielonko-Jung K., *Współczesna architektura proekologiczna*, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2012.
12. Freewan A., *Advances in Passive Cooling Design: An Integrated Design Approach, Zero and Net Zero Energy*, Getu Hailu, IntertechOpen, 2019, DOI:10.5772/intechopen.87123, <https://www.intechopen.com/chapters/69228>, 17.08.2021.
13. Lara R.L., *Map of approach to sustainable architecture: A critical look at their concepts and trends*, Publisher: EUMED-Juan Carlos Martinez Coll-Universidad de Málaga España, 2018.

14. Aghimien E.I., Li D.H.W., Tsang E.K.-W. *Bioclimatic architecture and its energy-saving potentials: a review and future directions*, Engineering, Construction and Architectural Management, 2021, <https://doi.org/10.1108/ECAM-11-2020-0928> 17.08.2021.
15. <https://www.yankodesign.com/2021/05/10/greenhouses-that-promote-sustainable-urban-farming-push-the-boundaries-of-innovative-architecture>, 17.08.2021.
16. Barber D.A.. *Modern Architecture and Climate: Design before Air Conditioning*, Princeton University Press 2020.

Wpływ historycznych ukształtowań szklarniowych na rozwój architektury energooszczędnej

Streszczenie

Ogrody zimowe XIX i XX wieku zapoczątkowały rozwój architektury bioklimatycznej. Szereg rozwiązań technicznych i technologicznych zastosowanych na przestrzeni lat w budynkach o charakterze szklarni, dało napęd poznawczy i rozwojowy w kierunku architektury energooszczędnej. Analiza zjawisk zachodzących w budynku w porze dnia i nocy, w procesie ogrzewania, chłodzenia, wentylacji, wyznaczyła kierunek badań nad wykorzystaniem energii słonecznej, jako źródła energii odnawialnej, a tym samym określiła możliwości uzyskania oszczędności energetycznych dzięki pasywnemu systemowi jej pozyskiwania.

Słowa kluczowe: struktury szklarniowe, architektura bioklimatyczna, energooszczędność

The influence of historical greenhouse design on the development of energy-saving architecture

Abstract

Winter gardens of the 19th and 20th centuries initiated the development of a bioclimatic architecture. A number of technical and technological solutions proposed and applied in greenhouse buildings over the years set an example followed by the development of energy-saving architecture. The analysis of the phenomena occurring in these buildings during the day and night cycle, including heating, cooling and ventilation, set the directions for the specific research studies focused on the use of solar energy as a source of renewable energy. The performed analysis identified a possibility of obtaining significant energy savings due to passive nature of solar renewable energy.

Keywords: greenhouse structures, bioclimatic architecture, energy efficiency

Odzysk pierwiastków ziem rzadkich z gleb oraz odpadów w procesie fitoekstrakcji

1. Wstęp

Pierwiastki ziem rzadkich (REE – *rare earth element*) obejmują grupę 15 pierwiastków, w skład których wchodzi lantanowce oraz itr i skand. Pierwiastki te występują powszechnie w glebach na całym świecie, a określenie ich jako „rzadkie” odnosi się do braku dużych złóż bądź rud, które są charakterystyczne dla innych pierwiastków, na przykład dla srebra czy złota. Pierwiastki ziem rzadkich są szeroko rozpowszechnione w przyrodzie, jednak tylko bardzo mała ilość może być pozyskiwana do celów ekonomicznych i gospodarczych. W ostatnich latach wzrasta zapotrzebowanie na wykorzystywanie pierwiastków ziem rzadkich. Dzięki ich specyficznym właściwościom znalazły swoje zastosowanie w nowoczesnych technologiach, przemyśle, medycynie, a także w rolnictwie. Około 90% wszystkich pierwiastków ziem rzadkich wchodzących na rynek światowy jest produkowanych w Chinach. W roku 2019 globalna produkcja REO (ang. rare earth oxides), czyli tlenków metali ziem rzadkich osiągnęła poziom 210000 ton. Według Komisji Europejskiej REE są uważane za materiały krytyczne ze względu na ryzyko związane z dostawą, a także znaczenie dla czystej energii i zaawansowanych technologii. Według najnowszych badań neodym (Nd), europ (Eu), dysproz (Dy), terb (Tb) i itr (Y) są najbardziej krytyczne ze wszystkich REE, ze względu na ich zastosowanie w produkcji magnezów i fosforu [1].

Jednocześnie występuje ryzyko związane z uwalnianiem pierwiastków ziem rzadkich do środowiska, które jest wynikiem wydobycia, przetwarzania, jak również powodem niewłaściwego usuwania materiałów zawierających niniejsze metale. Kumulacja pierwiastków ziem rzadkich w glebie, osadach czy wodzie może wywierać szkodliwy wpływ na organizmy żywe. REE nie stanowią dla roślin niezbędnych elementów odżywczych i w niektórych przypadkach w wyniku podobieństwa ich jonów do jonów wapnia mogą być pobierane przez rośliny i wywierać toksyczny wpływ. Z kolei długa ekspozycja człowieka na wpływ REE może powodować zmiany w układach: nerwowym, krążenia czy immunologicznym. Dlatego ważnym aspektem jest dążenie do opracowywania metod rekultywacji środowiska. Zarówno rosnące zapotrzebowanie na REE, jak i konieczność zmniejszenia zanieczyszczenia środowiska REE powodują zainteresowanie skutecznymi metodami fitoekstrakcji gleb.

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie procesu oczyszczania gleb oraz odpadów z pierwiastków ziem rzadkich, czyli fitoekstrakcji oraz warunków skutecznijających niniejszą metodę.

¹ dgmur@iung.pulawy.pl, Zakład Gleboznawstwa Eroзии i Ochrony Gruntów, Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy.

² gs@iung.pulawy.pl, Zakład Gleboznawstwa Eroзии i Ochrony Gruntów, Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy.

2. Charakterystyka pierwiastków ziem rzadkich

Pierwiastki ziem rzadkich to grupa 15 pierwiastków, w skład których wchodzi lantanowce: lantan (La), cer (Ce), prazeodym (Pr), neodym (Nd), promet (Pm), samar (Sm), europ (Eu), gadolin (Gd), terb (Tb), dysproz (Dy), holm (Ho), erb (Er), tul (Tm), iterb (Yb) i lutet (Lu) oraz skandowce: itr (Y) i skand (Sc). Wyżej wymienione pierwiastki mają podobne właściwości chemiczne i fizyczne. Ze względu na różnice w masie atomowej dzieli się je na lekkie pierwiastki ziem rzadkich (LREE) i ciężkie pierwiastki ziem rzadkich (HREE). Pierwszą grupę stanowią metale od La do Gd, natomiast drugą od Tb do Lu, a także itr [2]. LREE charakteryzują się niższą liczbą atomową, większymi promieniami jonowymi, wyższym poziomem rozpuszczalności i zasadowości niż HREE [3].

Metale ziem rzadkich występują głównie w formie węglanów, tlenków, krzemianów i fosforanów. Tworzą grupę litofilnych pierwiastków koncentrujących się w skorupie ziemskiej. Wchodzi w skład minerałów bardzo trwałych i odpornych na wietrzenie. Występują zbiorczo, ponieważ są trójwartościowe (wyjątkiem są cer i europ, które mogą występować także odpowiednio w postaci Ce^{4+} i Eu^{2+}) oraz mają podobne promienie jonowe, dzięki czemu mogą być wzajemnie zastępowane w różnych strukturach krystalicznych. Lantanowce o parzystej liczbie atomowej są bardziej rozpowszechnione w przyrodzie niż te o nieparzystej liczbie atomowej [4].

REE są wykorzystywane w wielu nowoczesnych technologiach, przede wszystkim znajdują one wykorzystanie w energii odnawialnej. Są stosowane między innymi do produkcji magnesów o wysokiej wytrzymałości znajdujących się w turbinach wiatrowych, sprzęcie elektronicznym, pojazdach elektrycznych oraz w komputerach. Są więc wykorzystywane w przemyśle, elektronice, medycynie, a także w rolnictwie. Wskutek zwiększonego poziomu ich wydobycia, co raz to większe ilości są uwalniane do środowiska. Ich zwiększony poziom w środowisku jest wynikiem wydobycia i przetwarzania, jak również niewłaściwego usuwania materiałów zawierający REE. Ponadto wskutek używania do produkcji nawozów fosforanowych skał monazytowych i ich późniejszego stosowania przyczyniają się do zakażenia terenu [5].

Jednak coraz większą uwagę koncentruje się wokół pozyskiwania metali ziem rzadkich z różnego typu surowców wtórnych czy odpadowych, uważanych jako źródła alternatywne. Dzięki temu potencjalnym źródłem mogą być fosfogipsy, zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny czy popioły lotne ze spalania węgla kamiennego. Dlatego alternatywne źródła są rozproszone w miejscach składowania odpadów przemysłowych, obszarach rolniczych lub miejskich, głównie nieużytkach, na których gromadzą się odpady hutnicze (żużle i odpady poflotacyjne) czy węglowe, jak również w osadach dennych czy ściekowych. Analizując odpady przy elektrowniach ze spalania węgla kamiennego stwierdzono występowanie niektórych metali ziem rzadkich, wśród których dominowały: europ, lantan, neodym oraz itr [6].

3. Fitoekstrakcja

Fitoekstrakcja to metoda dążąca do oczyszczania skażonych terenów z wykorzystaniem roślin. Polega na wykorzystaniu zdolności roślin do akumulacji wysokich stężeń metali w nadziemnych częściach.

Początkowym etapem fitoekstrakcji jest wytypowanie miejsca, na którym znajdują się dane metale. Do takich terenów należą naturalnie zawierające pierwiastki gleby lub gleby skażone, na przykład tereny górnicze czy tereny przemysłowe. Następnie należy dobrać odpowiedni gatunek rośliny oraz możliwe dodatki doglebowe, które wspomogą pobieranie metali z podłoża czy ogólny rozwój rośliny. Przykładami takich dodatków mogą być fitohormony, nawozy czy materia organiczna. Ostatnim etapem jest zbiór plonu dojrzałej rośliny. Biomasa może zostać zredukowana poprzez kompostowanie czy zabiegi termiczne lub wykorzystana do odzysku danych pierwiastków [7,8].

Natomiast sam proces pobierania pierwiastka z gleby przez organizm roślinny obejmuje następujące etapy: solubilizacja metalu z matrycy gleby, zakwaszenie ryzosfery i wydzielanie ligandów w jej obrębie, absorpcja metali przez korzenie i transport do pędów, dystrybucja, sekwestracja jonów metali. Stopień wchłaniania i transportu metali jest zależny od stopnia utlenienia metali. Metale ziem rzadkich w roślinach mogą być przechowywane w różnych miejscach komórek, takich jak: tkanka apoplastyczna, naskórek, ściana komórkowa, mezofil, w miejscach gdzie pierwiastki nie wpływają toksycznie na ważne procesy komórkowe. Natomiast sekwestracja, ostatni etap prowadzący do akumulacji zachodzi w wakuoli, gdzie metal lub jego kompleks z ligandem jest transportowany przez błonę wakuolarną [9].

Obecnie w procesie fitoekstrakcji używa się:

- roślin o naturalnej zdolności akumulacji metali – hiperakumulatory;
- roślin uprawnych o dużej biomacie (np.: kukurydza, ryż, groch, owies) zazwyczaj wspomaganych przez związki chemiczne [10].

Główne różnice pomiędzy stosowaniem strategii wyboru roślin zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Cechy charakterystyczne dwóch strategii fitoekstrakcji

Fitoekstrakcja wspomagana chemicznie	Naturalna fitoekstrakcja
Rośliny potrzebują odpowiednich warunków aby móc akumulować metale	Rośliny naturalnie hiperakumulują metale
Szybki wzrost, wysoka biomasa	Powolny wzrost, niski przyrost biomasy
Wzmocnienie pobierania metali przez dodatek syntetycznych chelatorów czy kwasów organicznych	Naturalna zdolność ekstrakcji metali
Niski poziom tolerancji na metale, mogą być toksyczne dla rośliny	Wysoki poziom tolerancji, możliwość akumulacji wysokich stężeń metali bez toksycznego wpływu na rośliny
Ryzyko uwolnienia chelatów metali do środowiska	Brak ryzyka dla środowiska

Źródło: [10]

Rośliny stosowane w omawianym procesie powinny charakteryzować się cechami takimi jak: tolerancja dla wysokiego poziomu metali, możliwością gromadzenia wyższych poziomów pierwiastków w nadziemnych organach, produkcją wysokiej biomasy, szybkim tempem wzrostu oraz dobrze rozwiniętym systemem korzeniowym. Ponadto powinny być odporne na niekorzystne warunki środowiska, na przykład suszę, wahania temperatury czy deficyt związków odżywczych. Dzięki takim cechom rośliny są w stanie przetrwać na terenach charakteryzujących się skrajnymi warunkami otoczenia [11, 7].

Stężenia pierwiastków ziem rzadkich w roślinach są zależne od ich zawartości w środowisku podłożu oraz od gatunku rośliny. LREE charakteryzują się większą mobilnością w glebie i dzięki temu są łatwiej przyswajalne przez rośliny, skutkuje to zwiększoną ich zawartością w tkankach roślinnych niż HREE. W związku z tym zawartość REE występująca w różnych organach roślin może przebiegać w kolejności: korzenie > łodygi > liście > kwiaty > owoce > nasiona. Wydajność pobierania REE z podłoża zależy również od formy występowania metali. Jedynie część pierwiastków jest biodostępna dla roślin. Wskutek tego należy nie tylko skupiać uwagę na wpływ na czynniki związane z roślinami, lecz także na modyfikacje związane z glebą. Wpływ na to może mieć szereg procesów fizyko-chemicznych wpływających na rozpuszczalność związków [12].

Do najważniejszych zmiennych gleby, które wpływają na biodostępność należą między innymi pH, potencjał redoks, tekstura gleby i zawartość materii organicznej. Udowodniono, że REE są bardziej mobilne w rozwiązaniach podłożach bogatych w jony F^- , Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} . Izomorficzne zastąpienie wapnia przez REE następuje z powodu ich podobnego promienia jonowego, co sprawia, że węglany są preferowaną formą REE w glebach. Natomiast w celu zwiększenia biomasy roślin ważne jest nie tylko utrzymanie optymalnego pH, ale również nawożenie, które wspomaga prawidłowy rozwój i wzrost roślin. Przykładami takich nawozów mogą być nawozy azotowe i potasowe, które dodawane do gleby powodują obniżenie pH, zwiększają mobilność większości pierwiastków śladowych, a także przyczyniają się do wzrostu roślin, gdyż w ich skład wchodzi ważne pierwiastki biogenne. Zostało udowodnione, że dodatek takich substancji przyczynia się do zwiększenia akumulacji pierwiastków. Z kolei, pod względem właściwości wiązania z materią organiczną gleby REE zachowują się podobnie do innych pierwiastków śladowych. Materia organiczna ma fundamentalne znaczenie w adsorpcji pierwiastków ziem rzadkich, ponieważ dostarcza ujemnych ładunków do zwietrzałych gleb. W badaniach prowadzonych przez Lihong i wsp. (1999) analizowano wpływ ligandu EDTA na bioakumulację REE przez pszenicę. Zaobserwowano, że dodatek EDTA przyczynił się do zwiększenia biodostępności pierwiastków ziem rzadkich poprzez desorpcję z gleby, a dane stężenie chelatu było skorelowane ilością desorpcji REE [13].

Natomiast stabilność wiązania REE z substancjami humusowymi zmienia się w zależności od stosunku molowego REE do rozpuszczonego węgla organicznego. Wykazano, że w obecności jonów węglanowych zwiększenie odczynu pH z obojętnego do zasadowego prowadzi do zmniejszenia adsorpcji REE, a więc w tych warunkach stężenia REE w roztworze są odwrotnie skorelowane z pH gleby. Natomiast obecność jonów węglanowych o niskich stężeniach początkowych, na przykład 10 $\mu\text{g}/\text{kg}$ może wpływać na zwiększoną absorpcję REE co jest bezpośrednio skorelowane ze stężeniami rozpuszczonego węgla organicznego [14].

3.1. Rośliny hiperakumulatorowe

Wskutek wzrastającego zapotrzebowania na metody rekultywacji gleb poszukuje się roślin zdolnych do pobierania i gromadzenia pierwiastków. Do tego celu stosuje się rośliny nazywane hiperakumulatorami. Rośliny hiperakumulujące to rośliny, które są w stanie pobierać z gleby dużą ilość metali, a następnie gromadzić je w nadziemnych częściach do około 0,1% w suchej masy części nadziemnych rośliny. Sam proces hiper-

akumulacji definiuje się jako możliwość akumulowania wysokich stężeń metali wewnątrz tkanek roślinnych bez negatywnego wpływu na wzrost i rozwój organizmu [15].

W badaniach prowadzonych z udziałem hiperakumulatorów najważniejszymi parametrami są współczynnik bioakumulacji (EF – *enrichment factor*) oraz współczynnik translokacji (TF – *translocation factor*). Wartość tych współczynników dla omawianych roślin powinna być większa niż 1. Współczynnik bioakumulacji jest definiowany jako wydajność akumulacji, gdzie obliczany jest stosunek ilości metali zakumulowanych w biomasie części nadziemnych do ilości metali zawartych w glebie. Z kolei współczynnik translokacji oznacza wydajność przemieszczania się metali, jest to stosunek stężenia metali w organach nadziemnych rośliny do stężenia metali w korzeniach [16, 17].

Aktualnie 21 gatunków roślin zostało zakwalifikowanych jako hiperakumulatory REE, przy czym największą część stanowią paprocie. Cztery najważniejsze gatunki roślin hiperakumulatorów pierwiastków ziem rzadkich zostały przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Zawartość pierwiastków ziem rzadkich w różnych komponentach środowiska na terenach górniczych Chin

Gatunek	Rodzina	Maksymalna zawartość REE w liściach [mg/g^{-1}]	Źródło
<i>Pronephrium simplex</i>	<i>Thelypteridaceae</i>	1,200	Lai i wsp. (2006)
<i>Cary tomentosa</i>	<i>Juglandaceae</i>	0,859	Yuan i wsp. (2018)
<i>Blechnum orientale</i>	<i>Blechnaceae</i>	1,022	Xiao i wsp. (2003)
<i>Dicranopteris dichotoma</i>	<i>Gleicheniaceae</i>	3,358	Xiao i wsp. (2003)

Źródło: [18,19]

Warto zwrócić uwagę, że największą ilość REE uzyskano w hiperakumulatorze *Dicranopteris dichotoma* – $3,358 \text{ mg/g}^{-1}$. Gatunek ten jest uważany za jeden z najważniejszych hiperakumulatorów pierwiastków ziem rzadkich. *Dicranopteris dichotoma* to wieloletnia paproć występująca w kwaśnych glebach w południowych Chinach. W badaniach Shan i in. (2013) aby zwiększyć intensywność pobierania lekkich pierwiastków ziem rzadkich z podłoża zastosowali aminokwasy o niskiej masie cząsteczkowej: histydynę, która sprzyjała sekwestracji LREE w komórkach oraz kwasy organiczne takie jak cytrynowy czy jabłkowy, które zwiększyły desorpcję LREE z gleby, zwiększając pobieranie pierwiastków z gleby przez system korzeniowy paproci. Z zastosowaniem mikroskopii elektronowej zaobserwowano akumulację LREE m.in. w ścianie komórkowej czy wakuolach endodermi korzenia. Ponadto zjawisko zaobserwowano także w łyku oraz ksylemie kłącza [20].

Aktualnie prowadzonych jest wiele badań nad poszukiwaniem nowych roślin umożliwiających ekstrakcję metali ziem rzadkich z gleb. Mleczek i in. (2018) w swojej pracy skupili się na ocenie efektywności fitoekstrakcji oraz rozmieszczeniu lekkich i ciężkich pierwiastków ziem rzadkich przez trzy gatunki roślin zielnych: *Artemisia vulgaris* L., *Taraxacum officinale* FH Wigg., *Trifolium repens* L., rosnące w odległości 1, 10 i 25 m od skraju uczęszczanej drogi w Polsce. Badane gatunki roślin zielnych były w stanie skutecznie pobierać tylko LREE. Podsumowując rośliny, które są powszechnie obecne w pobliżu dróg, mogą być użytecznym narzędziem do usuwania tej grupy pierwiastków ziem rzadkich z zanieczyszczonej gleby [21].

4. Podsumowanie

Powszechne stosowanie pierwiastków ziem rzadkich prowadzi do zwiększonego ich poziomu w środowisku. Wskutek tego ważne jest poszukiwanie metod umożliwiających rekultywację terenów skażonych takich jak fitoekstrakcja. Jednym z przykładów roślin hiperakumulujących jest *Dicranopteris dichotoma* wykazująca potencjał akumulacji REE. Odpowiednie warunki środowiska oraz modyfikacje związane z glebą przyczyniają się do uskutecznienia fitoekstrakcji. Jednakże nadal istnieje potrzeba dalszych badań dotyczących zrozumienia mechanizmów frakcjonowania i akumulacji REE w roślinach.

Literatura

1. Ji. B., Li Q., Zhang W. *Leaching recovery of rare earth elements from calcination product of a coal coarse refuse using organic acids*, Journal of rare earths, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jre.2020.11.021>.
2. Małecka K. *Geochemiczna zmienność pierwiastków ziem rzadkich i metali ciężkich w osadach profundalu i litoralu wybranych jezior Polski*, Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 450, 2020, s. 63-74.
3. Tang S., Zheng C., Chen M., Xu X. *Geobiochemistry characteristics of rare earth elements in soil and ground water: a case study in Baotou, China*, Scientific Reports volume, 2020, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68661-4>.
4. Burchard-Dziubińska M. *Strategiczna rola metali ziem rzadkich w gospodarce opartej na wiedzy*, Gospodarka w Praktyce i Teorii, 1, 2014, s. 21-33.
5. Carpenter D., Boutin C., Allison J.E., Parsons J.L., Ellis D.M. *Uptake and effects of six rare earth elements (REEs) on selected native and crop species growing in contaminated soils*, PLoS One, 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0129936.
6. Całus Moszko J., Białecka B., *Potencjał i zasoby metali ziem rzadkich w świecie oraz w Polsce. Artykuł przeglądowy*, Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko, Główny Instytut Górnictwa, 4, 2012, s. 61-72.
7. Grobelak A., Kacprzak M., Fijałkowski K. *Fitoremediacja - niedoceniony potencjał roślin w oczyszczaniu środowiska*, Journal of Ecology and Health, 14(6), 2010, s. 276-280.
8. Krzciuk K., *Fitogórnictwo pierwiastków ziem rzadkich jako metoda zrównoważonego gospodarowania nieodnawialnymi zasobami Ziemi*, Kosmos - Problemy nauk przyrodniczych, 68(3), 2019, s. 443-449.
9. Opare E.O., Struhs E., Mirkouei A., *A comparative state-of-technology review and future directions for rare earth element separation*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 143, 2021, s. 1364-0321.
10. Nascimento C.W.A., Xing B. *Phytoextraction: A review on enhanced metal availability and plant accumulation*, Science Agriculture, 63(3), 2006, s. 299-311.
11. Hernández-Allica J., Becerril J.M., Garbisu C. *Assessment of the phytoextraction potential of high biomass crop plants*, Environmental Pollution, 152 (1), 2008, s. 32-40.
12. Ramos J.R., Dinali G.S., Oliviera C., Martins G.C., Moreira C.G., Siqueria J.O., Guilherme L.R.G., *Rare Earth Elements in the Soil Environment*, Current Pollution Reports, 2, 2016, s. 28-50.
13. Lihong Y., Xiaorong W., Hao S., Haishi Z., *The effect of EDTA on rare earth elements bioavailability in soil ecosystem*, Chemosphere, 38(12), 1999, s. 2825-2833.
14. Tang J., Johannesson K.H., *Rare earth elements adsorption onto Carrizo sand: Influence of strong solution complexation*, Chemical Geology, 279, 2010, s. 120-133.
15. Kovaříková M., Tomášková I., Soudek P. *Rare earth elements in plants*, Biologia plantarum, 63, 2019, s. 20-32.

16. Szarek-Łukaszewska G. *Rośliny hiperakumulujące metale*, Kosmos- problemy nauk biologicznych, 63(3), 2014, s. 443-453.
17. Krzciuk K. *Hiperakumulatory roślinne - charakterystyka, badania i znaczenie praktyczne*, Kosmos – problemy nauk biologicznych, 64(2), 2015, s. 293-304.
18. Grosjean N., Blaudez A.B.D., Chalot B.M., Maria Gross C.D.E., Le Jean M. *Identification of new hardy ferns that preferentially accumulate light rare earth elements: a conserved trait within fern specie*, Environmental Chemistry, 17, 2020, s. 191-200.
19. Liang T., Li K., Wang L., *State of rare earth elements in different environmental components in mining areas of China*, Environmental Monitoring and Assessment, 186, 2014, s. 1499-1513.
20. Shan X., Zhang H., Zhou S., Zheng H., Yu Y., Wen H., *Accumulation and uptake of light rare earth elements in a hyperaccumulator Dicropteris dichotoma*, Plant Science, 165, 2013, s. 1343-1353.
21. Mleczek P., Borowiak K., Budka A., Niedzielski P. *Relationship between concentration of rare earth elements in soil and their distribution in plants growing near a frequented road*, Environmental science and pollution research international, 2018, <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2428-x>.

Odzysk pierwiastków ziem rzadkich z gleb oraz odpadów w procesie fitoekstrakcji

Streszczenie

Pierwiastki ziem rzadkich (REE – *Rare Earth Element*) występują powszechnie na całym świecie. Są wykorzystywane w przemyśle, technologiach, rolnictwie, a także w medycynie. Wskutek zwiększonego zainteresowania, coraz większe ilości są uwalniane do środowiska. Aktualnie nie ma zbyt wielu konkretnych danych o ich potencjalnym zagrożeniu, jednak niektóre badania wskazują na szkodliwy wpływ na osoby pracujące w obecności REE. Pierwiastki te mogą wywierać również szkodliwy wpływ na rośliny. Wskutek tego poszukuje się nowych, alternatywnych metod umożliwiających odzysk REE z podłoża. Jedną z takich metod może być fitoekstrakcja. Jest to proces biologicznego usuwania szkodliwych metali z środowiska z wykorzystaniem roślin. Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie procesu oczyszczania gleb oraz odpadów z pierwiastków ziem rzadkich, czyli fitoekstrakcji oraz potrzebnych warunków skuteczniających niniejszą metodę.

Słowa kluczowe: pierwiastki ziem rzadkich, fitoekstrakcja, lantanowce

Recovery of rare earth elements from soil and waste in the phytoextraction

Abstract

Rare earth elements (REE – *Rare Earth Element*) are common all over the world. They are used in industry, technology, agriculture and medicine. As a result of increased interest, ever greater amounts are released into the environment. Currently, there is not much specific data about their potential risk, but some studies indicate that they are harmful to people working in the presence of REE. These elements can also have a detrimental effect on plants. As a result, new, alternative methods to recover REE from the substrate are being sought. One such method may be phytoextraction. It is a process of biological removal of harmful metals from the environment with the use of plants. The aim of this study is to present the process of soil and waste purification from rare earth elements, i.e. phytoextraction, as well as the necessary conditions for this method.

Keywords: rare earth elements, phytoextraction, lanthanides

Dobowa i godzinowa zmienność stężeń Pb, Ni, Zn, Mn i V w powietrzu atmosferycznym: badania pilotażowe w wybranym receptorze centralnej Polski

1. Wstęp

Obecnie zanieczyszczenie powietrza jest jednym z najczęściej podnoszonych tematów na świecie a pył zawieszony (*Particulate Matter*, PM) jest najpoważniejszym i najczęściej badanym zanieczyszczeniem powietrza w niemal wszystkich zurbanizowanych krajach świata [1, 2]. Pomimo iż stan jakości powietrza w Polsce w ostatnich latach się poprawia, wciąż znajduje się wśród najbardziej zanieczyszczonych państw Europy [3, 4]. Pył zawieszony to drobne cząsteczki stanowiące część aerozolu atmosferycznego. Problem pyłu zawieszonego w powietrzu dotyczy niemal wszystkich większych miast w Polsce jak również rejonów podmiejskich, w których sposób ogrzewania jak również emisja z transportu drogowego stanowią podstawowe źródła zanieczyszczenia powietrza [5, 6].

Wiele instytucji i ośrodków naukowych, również w Polsce bada jakość powietrza pod kątem stężenia pyłu i jego składników [7, 8]. Niemniej brakuje wciąż informacji na ten temat w wielu miejscach i rejonach. Są dwa tego główne powody:

- monitorowanie ilości i jakości pyłu zawieszonego odbywa się wciąż w zbyt rzadkiej siatce pomiarowej (w Polsce dotąd stały monitoring jakości powietrza pod względem stężenia PM prowadzony jest w ponad 500 punktach pomiarowych, rzadziej niż 1 punkt na 650 km²);
- monitorowanie pyłu zarówno ilościowe, jak i jakościowe ma zbyt małą rozdzielczość czasową (zwłaszcza w przypadku monitorowania jakości – składu chemicznego pyłu stosuje się w najlepszym przypadku dobowe, a często średniotygodniowe próbki), co powoduje konieczność prowadzenia badań ukierunkowanych na ocenę pochodzenia pyłu, w jednym punkcie pomiarowym, przez wiele miesięcy [9].

Obecnie najczęściej stosowanym podziałem pyłu ze względu na rozmiar jego cząstek jest podział na:

- pył PM₁₀ – frakcja pyłu zawieszonego o średnicach zastępczych cząstek poniżej 10 μm;
- pył PM_{2,5} – frakcja pyłu zawieszonego o średnicach zastępczych cząstek poniżej 2,5 μm, zwana także pyłem drobnym.

W literaturze spotykane jest określanie cząstek o średnicach mniejszych od 2,5 μm pyłem drobnym (ang. fine), a cząstek o wymiarach pomiędzy 2,5 μm i 10 μm pyłami

¹ tomasz.mach@pwr.edu.pl, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska, <https://wis.pwr.edu.pl/>.

² joanna_bihalowicz@sggw.edu.pl, Katedra Sztuki Krajobrazu, Instytut Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, <https://iis.sggw.edu.pl/instytut-inzynierii-srodowiska/o-instytucie/katedry/katedra-sztuki-krajobrazu/>.

³ jbihaliowicz@sghsp.edu.pl, Instytut Inżynierii Bezpieczeństwa, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, <https://www.sghsp.edu.pl/>.

grubymi (ang. *coarse*). Te dwa rodzaje pyłu – pył drobny oraz pył gruby ze względu na swoje powiązania z różnymi zjawiskami środowiskowymi i oddziaływaniem na elementy środowiska są dwiema najczęściej badanymi frakcjami [10]. Początkowo wydawało się, iż ustalenie dopuszczalnych wartości dla frakcji PM_{10} będzie wystarczające na cele ochrony środowiska, jednak wraz z rozszerzeniem zakresu badań nad pyłem, zaczęto dowodzić silniejszych korelacji między zachorowalnością na choroby górnych dróg oddechowych, a stężeniami $PM_{2,5}$. W jego skład wchodzi przede wszystkim sadza oraz inne produkty powstałe w procesach spalania, a ze względu na niewielkie rozmiary cząstek może przenikać do najgłębszych części układu oddechowego, do pęcherzyków płucnych i dalej do krwiobiegu – cząsteczki są bardziej respirabilne [11-13].

W powietrzu atmosferycznym, a konkretnie w pyłe zawieszonym może występować około 40 pierwiastków śladowych. Osiem z nich, tj. arsen As, kadm Cd, chrom Cr, rtęć Hg, mangan Mn, nikiel Ni, ołów Pb i wanad V – Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) umieściła na liście 35 substancji szczególnie niebezpiecznych dla zdrowia człowieka [14], natomiast według klasyfikacji Międzynarodowej Agencji Badań nad Nowotworami (IARC) pierwiastki As, Cd, Cr(VI) i Ni należą do grupy związków o potwierdzonym działaniu kancerogennym na organizm człowieka [15].

Pierwiastki śladowe w pyłe mogą pochodzić ze źródeł naturalnych, np. pył z wybuchów wulkanów czy aerozol morski oraz antropogenicznych, czyli ze spalania paliw, odpadów, a także wszelkiego rodzaju przeróbki, wytopienia i produkcji metali, stopów metali, itp. [16-18]. W zurbanizowanych obszarach Polski najpoważniejszymi źródłami pierwiastków śladowych, w tym zwłaszcza toksycznych i kancerogennych, są spalanie paliw stałych i płynnych. Szeroko rozumiana emisja komunikacyjna stanowi w wielu polskich miastach podstawowy problem zanieczyszczenia powietrza większością metali [9].

Powoduje to tym samym, że zwłaszcza ze względu na sposób emisji (kondensacja i zestalanie par metali) największy masowy udział wielu metali, w tym metali toksycznych obserwuje się w pyłe drobnym $PM_{2,5}$. We frakcji grubego pyłu udział różnych pierwiastków kształtują zazwyczaj źródła naturalne i szereg różnego rodzaju procesów mechanicznych [19].

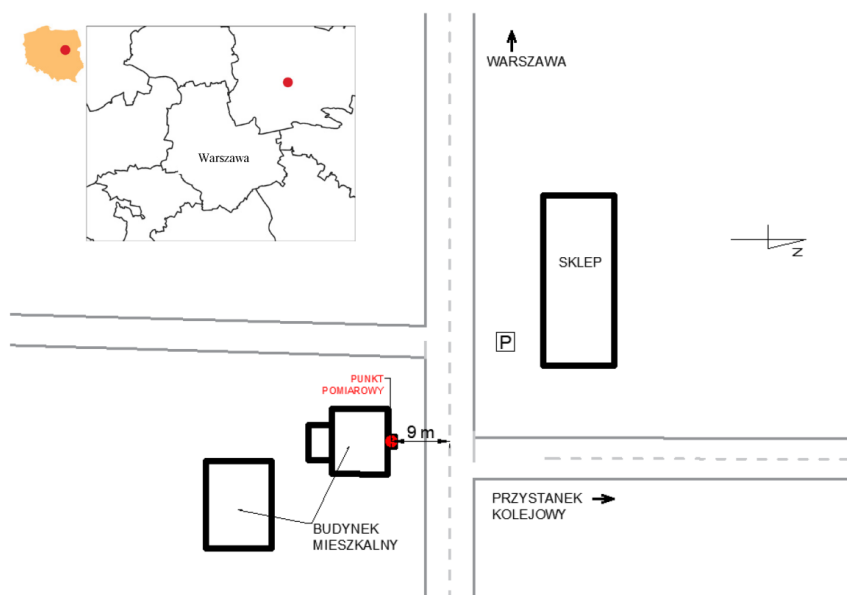
Celem głównym pracy było przeprowadzenie wstępnych badań dobowej i godzinowej zmienności stężeń pięciu wybranych pierwiastków (Pb, Ni, Zn, Mn i V) związanych z drobnym pyłem zawieszonym $PM_{2,5}$ w typowym ośrodku miejskim pod Warszawą. Wybrano pierwiastki, które zazwyczaj wskazuje się jako markery oddziaływania emisji komunikacyjnej na powietrze atmosferyczne i punkt pomiarowy, który narażony był na oddziaływanie takiej emisji [5, 19-21].

Celem dodatkowym pracy była próba wskazania możliwości wykorzystania wyników godzinowej zmienności stężenia pyłu i związanych z nim pierwiastków jako bardzo prostej i szybkiej metody wskazania wpływu konkretnego źródła emisji zanieczyszczeń oraz oceny jakościowej tego wpływu na ich stężenie w powietrzu.

2. Metodyka

2.1. Miejsce prowadzenia badań

Badanie wykonywane było przez 7 dni, w sierpniu, poza sezonem grzewczym żeby wyeliminować wpływ emisji związanej z indywidualnym ogrzewaniem gospodarstw domowych. Punkt pomiarowy zlokalizowany był w podwarszawskiej miejscowości przy skrzyżowaniu drogi wojewódzkiej 634 i dróg lokalnych (rys. 1), z których jedna prowadzi do stacji kolejowej i okolicznych wsi. Na skrzyżowaniu znajduje się sklep spożywczy do którego licznie przyjeżdżają klienci z okolicy. Skrzyżowanie jest dość ruchliwe i dochodzi na nim do częstych zatrzymań ruchu w związku z dużym natężeniem skrętów w lewo na skrzyżowaniu (do stacji) i brakiem sygnalizacji świetlnej. W godzinach szczytu komunikacyjnego korki do tego skrzyżowania mają około 1 km długości. Urządzenie usytuowane było w odległości 9 m od osi drogi, a pomiędzy nim a drogą nie było przeszkód.



Rysunek 41. Schemat lokalizacji punktu pomiarowego, który przedstawia miejsce przeprowadzonych badań względem granic Warszawy jak i usytuowanie aparatury pomiarowej przy skrzyżowaniu [opracowanie własne]

2.2. Aparatura pomiarowa

Masa pyłu $PM_{2,5}$ oraz stężenia pierwiastków V, Mn, Ni, Zn i Pb były mierzone na miejscu z częstotliwością godzinową za pomocą urządzenia Horiba PX-375 (HORIBA Ltd., Kyoto, Japonia). Urządzenie to pobiera próbkę na taśmę pomiarową, a następnie przy pomocy czujnika wykorzystującego metodę tłumienia promieniowania beta, określa całkowitą masę pyłu $PM_{2,5}$. W kolejnym etapie za pomocą nieniszczącej próbki analizy spektroskopowej EDXRF (*energy-dispersive X-ray fluorescence*) oceniane jest stężenie wybranych pierwiastków. Moduł EDXRF wyposażony jest dodatkowo w kamerę CMOS do obrazowania mierzonych próbek.

Jako taśmę pomiarową do zbierania pyłu zastosowano dwuwarstwową taśmę z włókny PTFE o bardzo dużej czystości pierwiastkowej (pozbawionej śladów metali). Przepływ powietrza do analizatora był stabilizowany regulatorem masowym i wynosił 16,7 L/min (1 m³/h), średnica zebranych próbek na taśmie wynosiła ok. 11 mm każda.

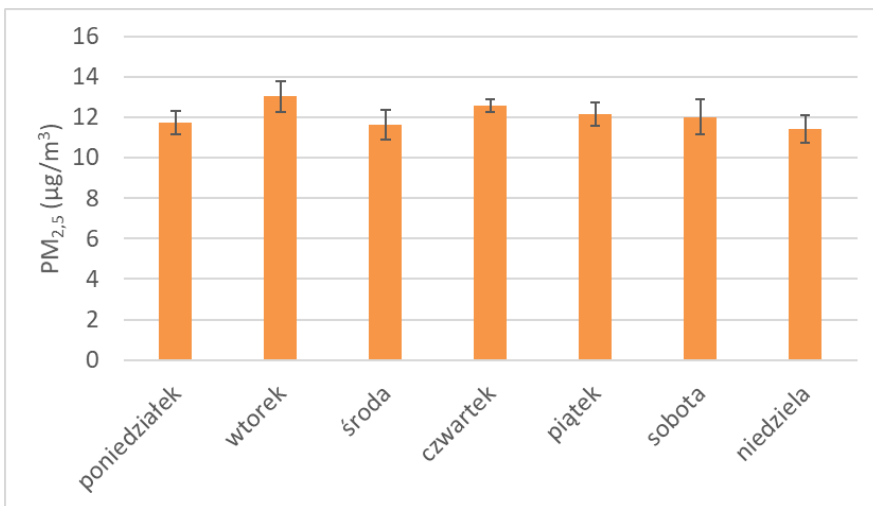
Po pobraniu pojedynczych próbek co godzinę przeprowadzono badanie masy zebranego pyłu metodą osłabiania promieniowania beta, a następnie wykonywano analizę EDXRF przez 500 s (15 kV lub 50 kV w zależności od ilości pierwiastka w próbce godzinowej). Dodatkowo sprawdzano barwę badanych próbek, co pozwoliło uzyskać bardziej wiarygodne wyniki.

Do określenia składu pierwiastkowego widm rentgenowskich i kontroli jakości wyników zastosowano materiał wzorcowy certyfikowany przez National Institute of Standards and Technology NIST (SRM 2783) w postaci pyłu osadzonego na podłożu filtracyjnym. Dolne granice wykrywalności (LDL jako podwójne odchylenie standardowe analizowanej czystej taśmy pomiarowej) dla poszczególnych pierwiastków wynosiły: V (1,7 ng/m³), Mn (1,45 ng/m³), Ni (0,9 ng/m³), Zn (1,25 ng/m³) i Pb (1,05 ng/m³).

3. Analiza wyników

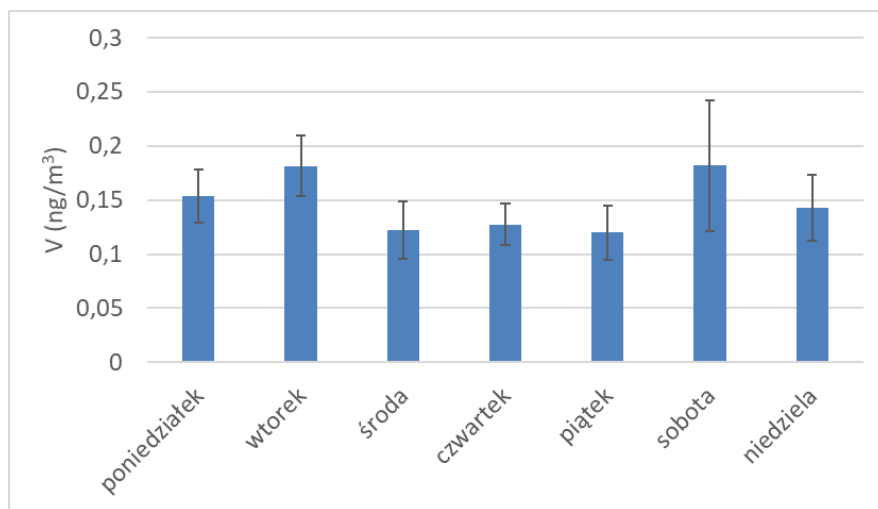
3.1. Średnie dobowe stężenia PM_{2,5} oraz analizowanych pierwiastków

W przebiegu średnich stężeń dobowych nie odnotowano znaczących różnic w odczytach w ciągu siedmiu dni pomiarów co pokazano na wykresie 1. Stężenie PM_{2,5} wynosiło w zasadzie przez cały okres pomiarowy ok. 12 µg/m³. Jedynie we wtorek i czwartek zauważono lekkie odchylenie w górę tej wartości co może mieć związek z wynikami obserwacji aktywności i zwyczajów lokalnej ludności. Przykładowo, we wtorek najwięcej osób robi zakupy spożywcze po weekendzie [22]. W czwartek natomiast na lokalnym targowisku zlokalizowanym w pobliżu punktu pomiarowego jest dzień handlowy [23].



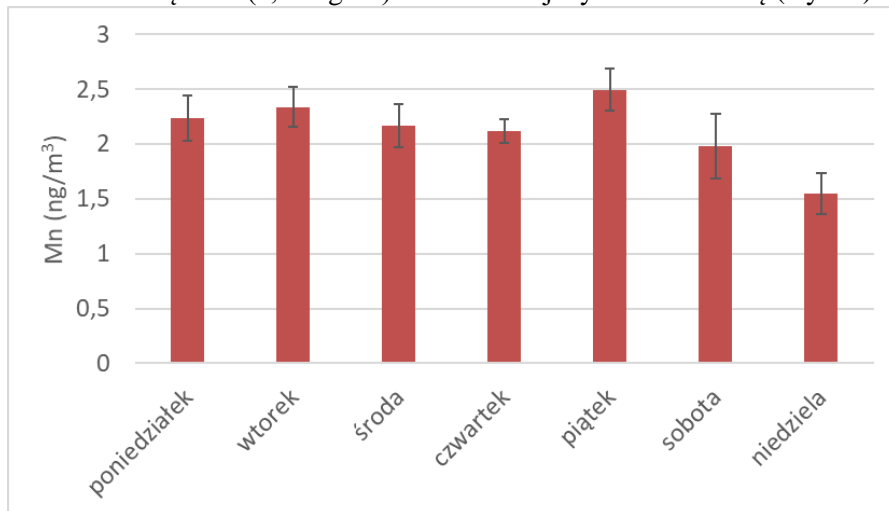
Wykres 1. Średnie dobowe stężenia pyłu PM_{2,5} [opracowanie własne]

Średnie dobowe stężenie wanadu związanego z pyłem drobnym w powietrzu w badanym punkcie pomiarowym wahało się od 0,12 do 0,18 ng/m³. Najwyższe dobowe stężenia tego pierwiastka zanotowano we wtorek i w sobotę (wyk. 2).



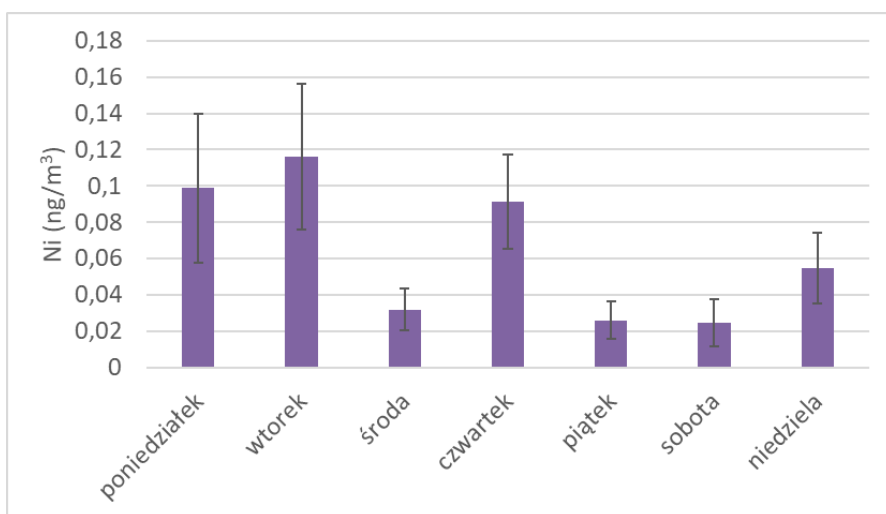
Wykres 2. Średnie dobowe stężenia wanadu [opracowanie własne]

Średnie dobowe stężenia manganu utrzymywały się na poziomie – 2-2,5 ng/m³. Wyraźnie niższe stężenie (1,55 ng/m³) zanotowano jedynie w niedzielę (wyk. 3).



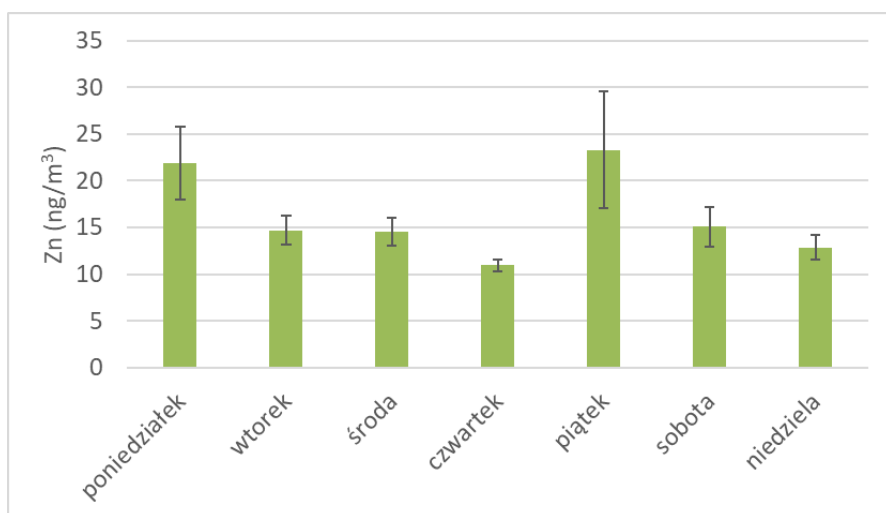
Wykres 3. Średnie dobowe stężenia manganu [opracowanie własne]

W przypadku dobowych stężeń niklu najwyższe wartości odnotowano w poniedziałek, wtorek i czwartek, kiedy oscylowały one pomiędzy 0,09 a 0,12 ng/m³. Są to znacznie wyższe wartości niż w pozostałe dni tygodnia kiedy stężenia dobowe niklu znajdowały się w przedziale od 0,02 do 0,06 ng/m³ (wyk. 4).



Wykres 4. Średnie dobowe stężenia niklu średnie [opracowanie własne]

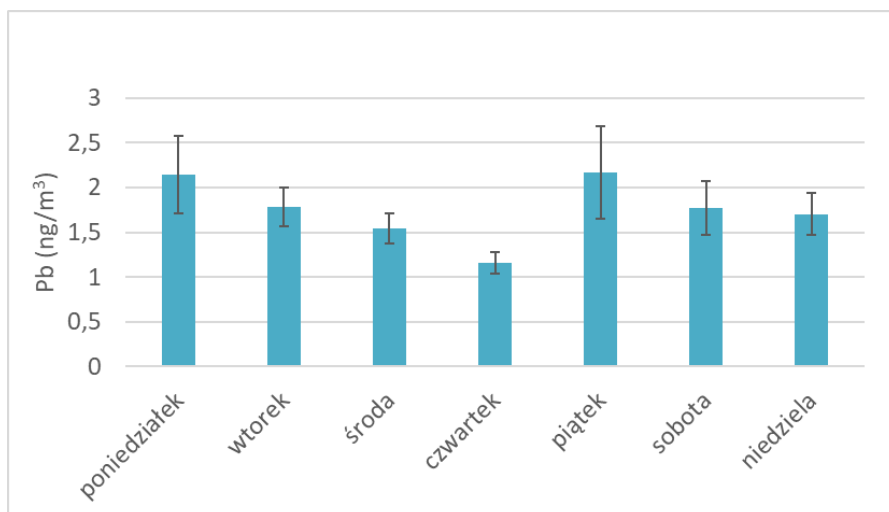
Dla cynku związanego z drobnym pyłem zawieszonym w badanym punkcie pomiarowym najwyższe dobowe stężenie, wynoszące 22 i 23 ng/m³ odnotowano w poniedziałek i piątek. W pozostałe dni tygodnia stężenia dobowe oscylowały w granicach od 11 do 15 ng/m³ (wyk. 5).



Wykres 5. Średnie dobowe stężenia cynku średnie [opracowanie własne]

Wykres 6 przedstawia średnie dobowe stężenie ołowiu w każdym dniu pomiarów. Najwyższe wartości, powyżej 2 ng/m³ wystąpiły w poniedziałek i piątek. Najniższe stężenie odnotowano we czwartek i wynosiło ono 1,15 ng/m³.

Generalnie można uznać, że stężenia dobowe wszystkich badanych pierwiastków były niższe w weekendy niż w pozostałe dni tygodnia.



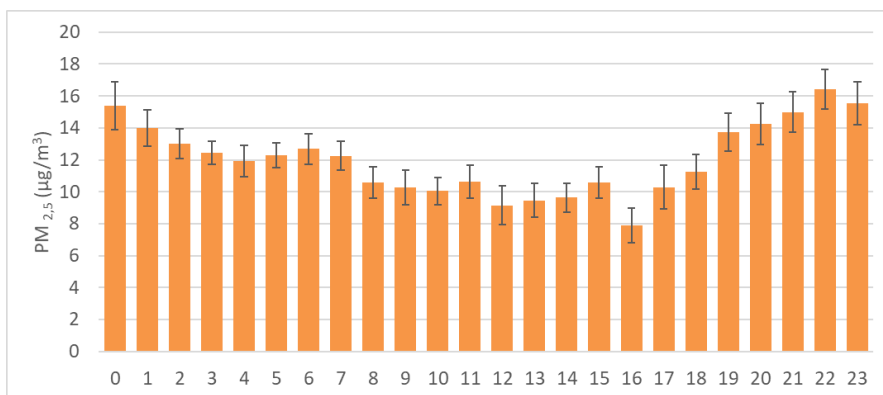
Wykres 6. Średnie dobowe stężenia ołowiu [opracowanie własne]

3.2. Średnie godzinowe stężenia PM_{2,5} oraz analizowanych pierwiastków

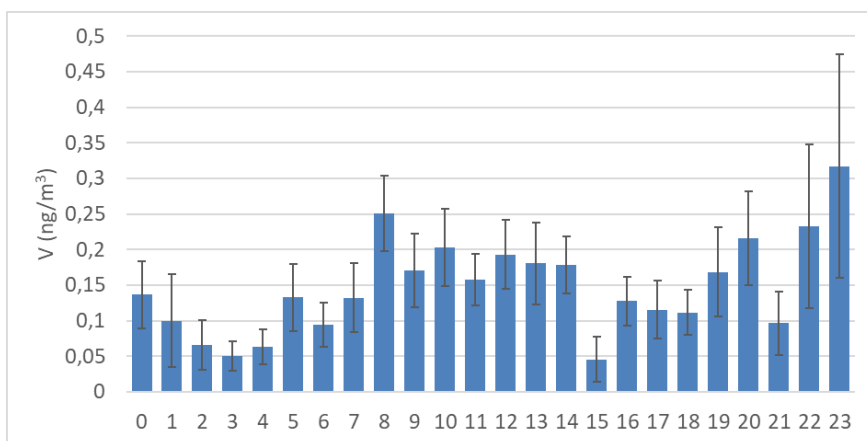
Stężenia godzinowe PM_{2,5} wahają się w ciągu doby co przedstawiono na wykresie 7. Wyniki te uzyskano poprzez uśrednienie każdorazowo wyników 7 pomiarów stężeń godzinowych (jeden pomiar dla jednej godziny każdego dnia). Słupki błędów przedstawione na wykresach są odchyleniem standardowym średniej 7 pomiarów przemnożonym przez współczynnik t-Studenta [24]. Najniższe stężenie występowało o godzinie 16:00 i wynosiło 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a najwyższe (13-17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) zanotowano w godzinach pomiędzy 19:00, a 1:00.

Mimo tego, że spodziewaliśmy się wyższych stężeń godzinowych w trakcie szczytu ruchu drogowego po południu (15:00-18:00) zaobserwowaliśmy, że najwyższe stężenia notowane są w późniejszych godzinach dnia – wieczornych i późnowieczornych. Może być to spowodowane faktem, iż w zasadzie o godzinie 16:00 na skrzyżowaniu występuje zator drogowy, a w godzinach wieczornych ruch dalej jest wzmożony ale prędkość poruszania się samochodów istotnie wzrasta. To z kolei wynika z faktu, że dopiero w godzinach wieczornych (po 18:00) rozpoczyna się powrót mieszkańców okolic z pracy w centrum Warszawy. Ten efekt może powodować pewna bezwładność stężeń drobnego pyłu, a rozkład sugeruje że stężenie związane jest z unosem wtórnym.

Poza tym zauważyć należy wyraźny skok stężeń PM_{2,5} w godzinach pomiędzy 6:00 a 7:00, kiedy to rozpoczyna się wyjazd mieszkańców podwarszawskich miejscowości do miejsc pracy zlokalizowanych w Warszawie (wyk. 7).

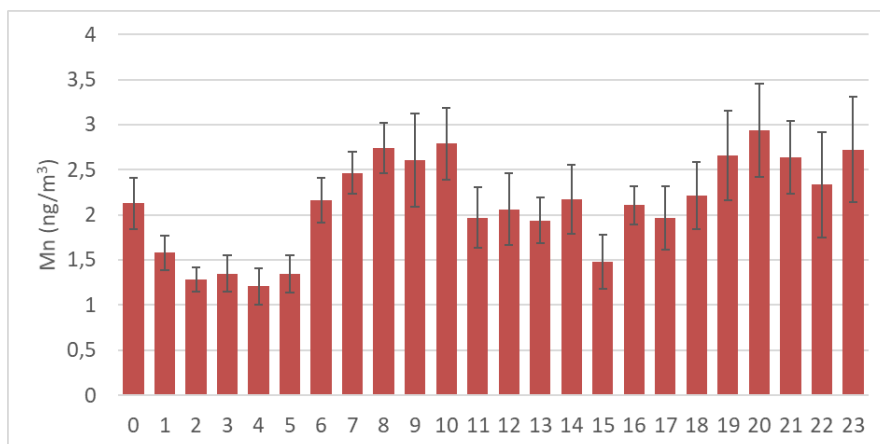
Wykres 7. Średnie godzinowe stężenia pyłu PM_{2,5} (średnia dwutygodniowa) [opracowanie własne]

Analogicznie jak w przypadku pyłu zbadano także przebieg średnich godzinowych stężeń wybranych metali. W przypadku wanadu zauważono wyraźny wzrost stężeń godzinowych w dwóch okresach doby – porannym i wieczornym co obrazuje wykres 8. Najwyższą wartość średnie stężenie godzinowe wanadu osiągało o 23:00 i wynosiło ponad 0,3 ng/m³. Najniższe wartości wynoszące około 0,05 ng/m³ zanotowano o godzinie 3:00 i 15:00.



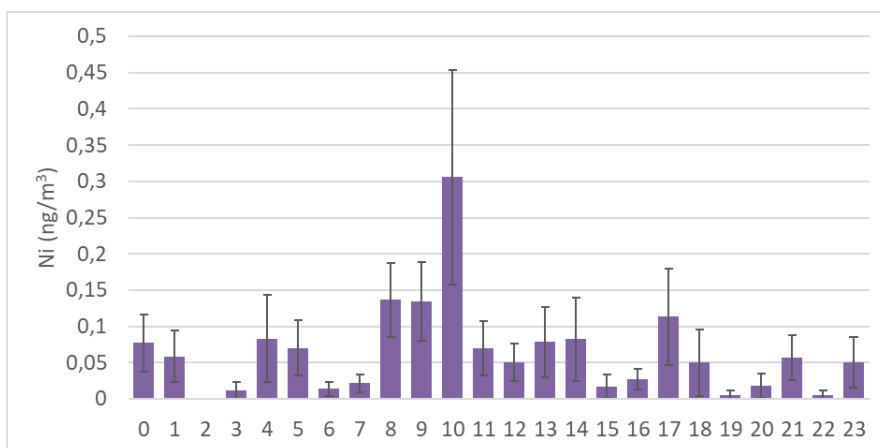
Wykres 8. Średnie godzinowe stężenie wanadu (średnia dwutygodniowa) [opracowanie własne]

Średnie stężenia manganu, przedstawione na wykresie 9, w każdej godzinie pomiarów, podobnie jak w przypadku wanadu, wzrastają w godzinach porannych i wieczornych. Poranny wzrost występuje w godzinach od 6:00 do 10:00, a wartości stężeń wahają się od 2,2 do 2,8 ng/m³. Popołudniowy skok wartości stężeń przypada na godziny od 19:00 do 00:00; stężenia w tych godzinach średnio wynoszą od 2,2 do 3 ng/m³. Najniższe średnie stężenia godzinowe (ok. 0,25 ng/m³) zanotowano w godzinach od 2:00 do 5:00 (wyk. 9).



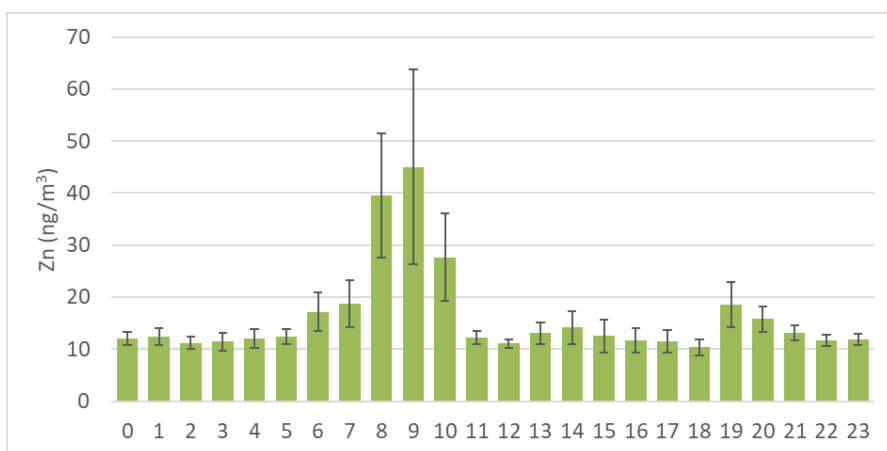
Wykres 9. Średnie godzinowe stężenie manganu (średnia dwutygodniowa) [opracowanie własne]

W przebiegu dobowym uśrednionych dla okresu pomiarowego stężeń godzinowych cynku, niklu i ołowiu (wyk. 10-12) widać komunikacyjny szczyt poranny, który trwa krócej niż szczyt popołudniowy rozkładający się na więcej godzin. Najwyższe stężenia godzinowe tych trzech pierwiastków przypadają na godziny od 8:00 do 10:00. Najwyższe stężenie niklu odnotowano dla godziny 10:00 i wynosi ono $0,3 \text{ ng/m}^3$; jest to wartość ponad dwa razy większa niż w pozostałych godzinach (wyk. 10).



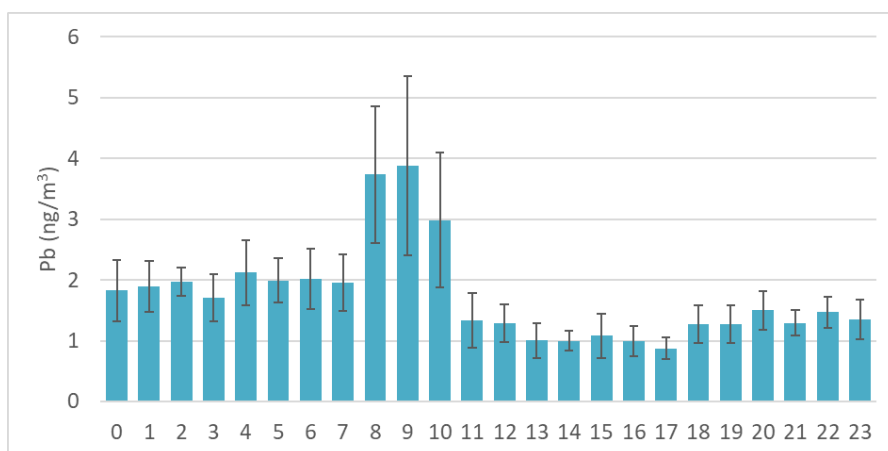
Wykres 10. Średnie godzinowe stężenie niklu (średnia dwutygodniowa) [opracowanie własne]

Średnie godzinowe stężenie cynku w okresie doby waha się od 10 do 20 ng/m^3 . Wyjątkiem jest wyraźny skok stężenia w godzinach porannych, między 8:00 a 10:00, kiedy wartości godzinowych stężeń cynku wahają się między 28 a 45 ng/m^3 (wyk. 11).



Wykres 11. Średnie godzinowe stężenie cynku (średnia dwutygodniowa) [opracowanie własne]

Średnie godzinowe stężenia ołowiu, tak jak w przypadku dwóch wcześniej omawianych pierwiastków, przez większość okresu doby są stałe i oscylują w granicach między 1 a 2 ng/m^3 . Skok tej wartości (aż do 4 ng/m^3) ma miejsce w godzinach między 8:00 a 10:00 (wyk. 12).



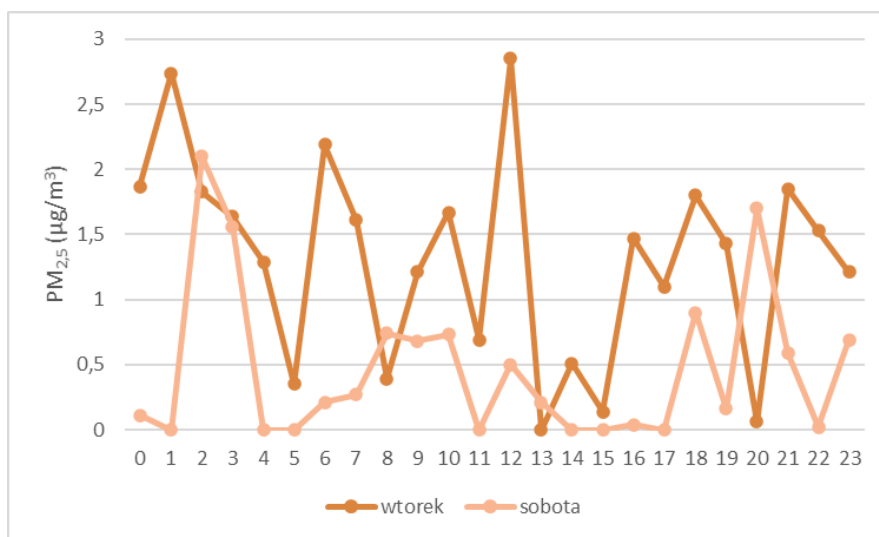
Wykres 12. Średnie godzinowe stężenie ołowiu (średnia dwutygodniowa) [opracowanie własne]

Generalnie udowodniono, że zarówno cynk, jak i nikiel są wskaźnikami oddziaływania emisji pierwiastków z ruchu drogowego na skład pyłu zawieszony [25-28]. Wiadomo też, że dotyczy to zarówno pyłu drobnego jak i grubego. W przypadku pyłu drobnego wpływ oddziaływania ruchu drogowego na skład pyłu zawieszony polega na emisji bardzo drobnych cząstek pyłu (kondensujących par) w trakcie spalania paliwa w silniku – paliwa zanieczyszczonego śladami tych metali. Również oleje i smary zawierają ślady tych metali. W przypadku pyłu grubego wpływ emisji z transportu drogowego polega na wzbogacaniu cząstek metalami ze ścierania opon, okładzin hamulcowych, karoserii i innych elementów samochodu [29-31].

Ołów do lat 90. był typowym markerem emisji pierwiastków do powietrza atmosferycznego ze spalania benzyny [21, 26, 32]. Od czasu wprowadzenia zakazu dodawania ołowiu do benzyny nie jest już typowym markerem. Niemniej nadal w wielu rejonach miejskich, w okolicach dróg i skrzyżowań, obserwuje się podwyższone stężenia ołowiu [33]. Podobnie jak w przypadku pozostałych metali, tak i w przypadku ołowiu obserwowano jego podwyższone stężenia w godzinach porannego szczytu natężenia ruchu pojazdów.

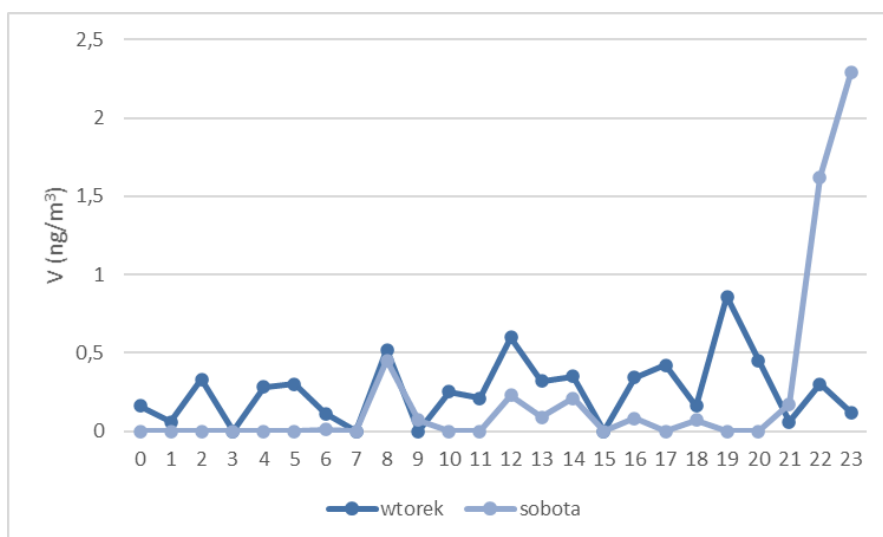
3.3. Porównanie godzinowych stężeń pomiędzy wtorkiem a sobotą

Porównując szeregi czasowe godzinowego rozkładu stężeń pyłu $PM_{2.5}$ w jeden wybrany dzień roboczy – wtorek i jeden wybrany dzień wolny od pracy – sobota widać wyraźne różnice w stężeniach godzinowych (wyk. 13). Dotyczą one zwłaszcza godzin porannych i popołudniowych, a więc tych w których natężenie ruchu pojazdów na drogach jest największe.



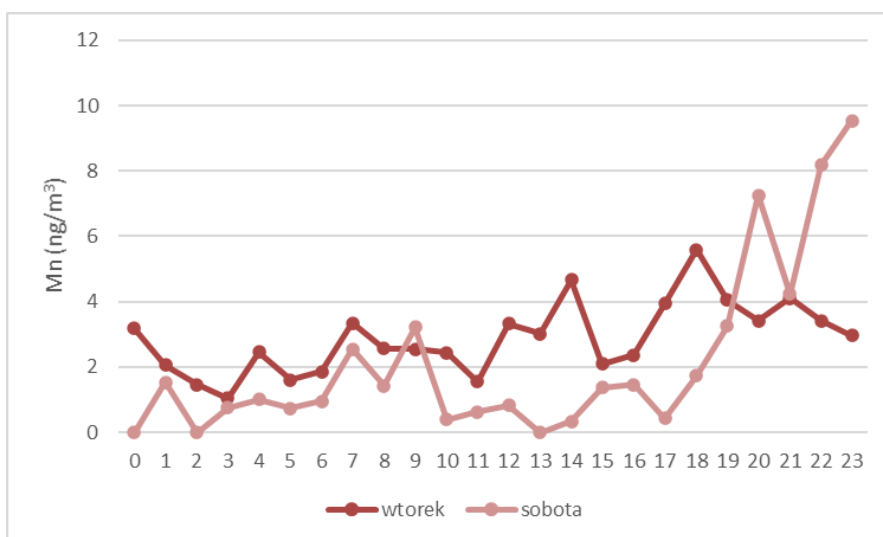
Wykres 13. Przebieg godzinowych stężeń pyłu $PM_{2.5}$ we wtorek i sobotę [opracowanie własne]

Podobnie jak w przypadku pyłu $PM_{2.5}$ dokładniejszy obraz zmienności godzinowych stężeń badanych pierwiastków śladowych pod wpływem emisji komunikacyjnej można zauważyć porównując przebiegi dobowe godzinowych stężeń tych pierwiastków w dwa wybrane dni tygodnia (sobota i wtorek). Wyraźnie widać, że godzinowe stężenia wanadu we wtorek w większości doby były wyższe niż w sobotę i oscylowały pomiędzy 0 a $1 \text{ ng}/\text{m}^3$, podczas gdy w sobotę były w granicach od 0 do $0,5 \text{ ng}/\text{m}^3$ (wyk. 14). Jedyne od godziny 21:00 w sobotę widoczny jest gwałtowny wzrost stężenia wanadu do ok. $2,3 \text{ ng}/\text{m}^3$.



Wykres 14. Przebieg godzinowych stężeń wanadu we wtorek i sobotę [opracowanie własne]

Podobnie w przypadku manganu obserwowane są wyższe stężenia godzinowe przez większość doby we wtorek niż w sobotę, poza wyraźnym wzrostem w godzinach wieczornych w sobotę. W dzień powszedni godzinowe stężenia manganu utrzymywały się w granicach od 1 do 6 ng/m^3 . Natomiast w weekend do godziny 19:00 stężenie godzinowe manganu nie przekraczały 4 ng/m^3 powietrza i wzrasta do 10 ng/m^3 o godzinie 23:00 (wyk. 15).

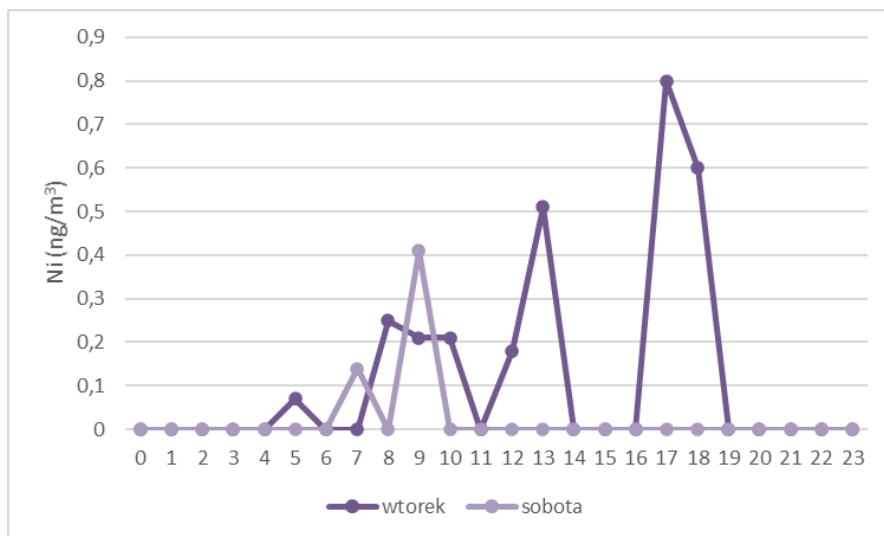


Wykres 15. Przebieg godzinowych stężeń manganu we wtorek i sobotę [opracowanie własne]

Wyższe wartości godzinowych stężeń w dzień roboczy niż w weekend dotyczą także stężeń niklu i cynku, co przedstawiono na wykresie 16 i 17, choć w przypadku

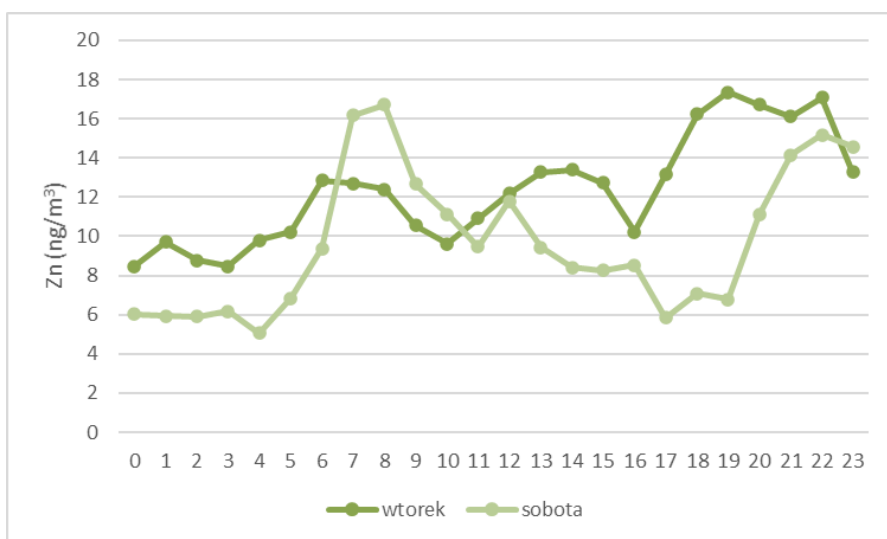
tego drugiego różnice nie są tak wyraźne. Zaobserwowano również wysokie stężenia cynku w sobotę w godzinach 7:00-9:00.

Wartości stężeń niklu w sobotę oscylowały w okolicach 0 poza skokiem pomiędzy 6:00 a 10:00 kiedy osiągają nawet 0,4 ng/m³. Najwyższą wartość godzinowego stężenia niklu – 0,8 ng/m³ zaobserwowano we wtorek o godzinie 17:00 (wyk. 16).



Wykres 16 Przebieg godzinowych stężeń niklu we wtorek i sobotę [opracowanie własne]

Wartości godzinowych stężeń cynku we wtorek rosły niewielkimi skokami przez całą dobę. Początkowo jest to około 9 ng/m³ w godzinach 0:00-4:00 do około 17 ng/m³ w godzinach 18:00-22:00. W sobotę można wyróżnić dwa skoki godzinowych stężeń cynku – jeden w godzinach 7:00-8:00 (stężenia dochodziły do 17 ng/m³), drugi w godzinach 20:00-23:00 (godzinowe stężenia osiągnęły 15 ng/m³).



Wykres 17. Przebieg godzinowych stężeń cynku we wtorek i sobotę [opracowanie własne]

Notowane stężenia ołowiu zazwyczaj były wyższe we wtorek niż w sobotę co zobrazowano na wykresie 18. W dzień roboczy wartości stężeń godzinowych wahały się od 0 do prawie 3 ng/m³. W weekend przez większość doby stężenie godzinowe nie przekraczały 1 ng/m³, poza dwoma pikami. Pierwszy z wartościami między 1,5 a 2,2 ng/m³ wystąpił w godzinach 1:00-2:00, a drugi o godzinie 20:00 (stężenie ołowiu osiągnęło 1,7 ng/m³).



Wykres 18. Przebieg godzinowych stężeń ołowiu we wtorek i sobotę [opracowanie własne]

Warto podkreślić, że generalnie stężenia badanych pierwiastków, w tym ołowiu, w badanym obszarze są bardzo niskie – znacznie niższe niż notowane w innych częściach Polski, np. na Górnym lub Dolnym Śląsku albo w Warszawie zimą [34-38].

Niemniej należy mieć na uwadze, że analiza dotyczy jednego, wybranego dnia. Takie wyniki mogą być przypadkowe i aby ocenić w pełni skalę i przyczyny zjawiska należy w przyszłości przeanalizować dane z dłuższego okresu a co najmniej porównać kilka dni roboczych i weekendowych. Jednak mimo to, stosując nowoczesne urządzenie pomiarowe jakim jest PM-375, można przy tak nawet niskich wartościach wychwycić różnice w godzinowych stężeniach pierwiastków śladowych skumulowanych w drobnym pyłu. Biorąc pod uwagę, że naważka dobową nie przekracza w analizowanych przypadkach $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a godzinowa nie przekracza kilkunastu $\mu\text{g}/\text{m}^3$ można uzmysłowić sobie jak trudne a wręcz niemożliwe byłoby wykonanie takich analiz metodami manualnymi, a więc w sposób tradycyjny – pobierając próbkę pyłu i analizując w laboratorium.

4. Podsumowanie

Zmienność zarówno dobową jak i godzinową stężeń $\text{PM}_{2,5}$ i związanych z nim 5 badanych pierwiastków nie była duża, co wynikało z faktu, że notowane w okresie pomiarowym stężenia były nieduże, a jakość powietrza była bardzo dobra [10]. Czynnikiem warunkującym wartości stężeń badanych substancji i ich zmienność w sezonie letnim była praktycznie wyłącznie intensywność emisji związanej z ruchem drogowym, a więc:

- całkowite stężenie pyłu było najmniejsze w godzinach zatorów drogowych, co może wskazywać na unos wtórny jako źródło pyłu;
- wartości stężeń metali były związane z natężeniem ruchu drogowego;
- we wtorek wartości stężeń były większe niż w sobotę ale porównanie trendów stężeń metali zaobserwowanych w trakcie tych dni (położenie maksimum, minimum) wskazuje na inną aktywność komunikacyjną mieszkańców w poszczególnych godzinach.

W pracy wykazano, że nawet w bardzo krótkim okresie pomiarowym wykorzystanie analizatora HORIBA PX-375 pozwala na jakościowe powiązanie niektórych pierwiastków śladowych w powietrzu ze źródłami emisji. Najlepsze rezultaty w tym zakresie daje analiza zmienności godzinowej stężeń tych pierwiastków w ciągu doby. Uśrednianie stężeń pierwiastków w kolejnych dobach powoduje zbyt duże wyrównanie stężeń w tak krótkich okresach pomiarowych. Nie ma wątpliwości, że zastosowanie urządzenia HORIBA PX-375 w systemie monitoringu jakości powietrza w Polsce pozwoliłoby prowadzić ten monitoring znacznie wydajniej. Zamiast wieloletnich pomiarów w pojedynczych/stałych punktach można by było w krótkich okresach pomiarowych (np. miesiąc w lecie i miesiąc w zimie) z dobrą dokładnością ocenić pochodzenie pyłu i związanych z nim priorytetowych metali w wielu obszarach/punktach pomiarowych [39-41]. Takie podejście pozwoliłoby w dalszej kolejności wyznaczyć dużo lepiej niż ma to miejsce obecnie, przestrzenne zmiany stężeń pierwiastków w powietrzu atmosferycznym w Polsce, a na tej podstawie ocenić narażenie mieszkańców wielu rejonów na zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego.

Finansowanie

Badania zostały wykonane jako część Doktoratu wdrożeniowego II edycja II, W-7 (03DW/0001/18) finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Polska.

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować firmom HORIBA oraz MLU-recordum Environmental Monitoring Solutions GmbH za udzielenie aparatury pomiarowej (PX-375 Horiba, Japan).

Dziękujemy również dr hab. inż. Wiolecie Rogula-Kozłowskiej, prof. uczelni za pomoc w interpretacji uzyskanych wyników i konsultacje.

Literatura

1. Viana M., Kuhlbusch T.A.J., Querol X., Alastuey A., Harrison R.M., Hopke P.K., Winiwarter W., Vallius M., Szidat S., Prévôt A.S.H., *Source Apportionment of Particulate Matter in Europe: A Review of Methods and Results*, J. Aerosol Sci., 39, 2008, s. 827-849, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.05.007>.
2. Belis C.A., Karagulian F., Larsen B.R., Hopke P.K., *Critical Review and Meta-Analysis of Ambient Particulate Matter Source Apportionment Using Receptor Models in Europe*, Atmos. Environ., 69, 2013, s. 94-108, doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.009>.
3. European Environment Agency, *Air Quality in Europe*, Luxembourg 2015.
4. European Environment Agency, *Air Quality in Europe*, 2020.
5. Lough G.C., Schauer J.J., Park J.-S., Shafer M.M., DeMinter J.T., Weinstein J.P., *Emissions of Metals Associated with Motor Vehicle Roadways*, Environ. Sci. Technol., 39, 2005, s. 826-836, doi:10.1021/es048715f.
6. Majewski G., Rogula-Kozłowska W., *The Elemental Composition and Origin of Fine Ambient Particles in the Largest Polish Conurbation: First Results from the Short-Term Winter Campaign*, Theor. Appl. Climatol., 125, 2016, s. 79-92, doi:10.1007/s00704-015-1494-y.
7. Rogula-Kozłowska W., Majewski G., Błaszczak B., Klejnowski K., Rogula-Kopiec P., *Origin-Oriented Elemental Profile of Fine Ambient Particulate Matter in Central European Suburban Conditions*, Int. J. Environ. Res., Public Health, 13, 2016, s. 715, doi:10.3390/ijerph13070715.
8. Rogula-Kozłowska W., Majewski G., Czechowski P.O., *The Size Distribution and Origin of Elements Bound to Ambient Particles: A Case Study of a Polish Urban Area*, Environ. Monit. Assess., 187, 2015, s. 240, doi:10.1007/s10661-015-4450-5.
9. Mach T., Rogula-Kozłowska W., Bralewska K., Majewski G., Rogula-Kopiec P., Rybak J., *Impact of Municipal, Road Traffic, and Natural Sources on PM10: The Hourly Variability at a Rural Site in Poland*, Energies, 2021, s. 14.
10. Majewski G., Rogula-Kozłowska W., Rozbicka K., Rogula-Kopiec P., Mathews B., Brandyk A., *Concentration, Chemical Composition and Origin of PM1: Results from the First Long-Term Measurement Campaign in Warsaw (Poland)*, Aerosol Air Qual. Res., 18, 2018, s. 636-654, doi:10.4209/aaqr.2017.06.0221.
11. Trojanowska M., Świetlik R., *Investigations of the Chemical Distribution of Heavy Metals in Street Dust and Its Impact on Risk Assessment for Human Health, Case Study of Radom (Poland)*, Hum. Ecol. Risk Assess. An Int. J., 26, 2020, s. 1907-1926, doi:10.1080/10807039.2019.1619070.
12. Rogula-Kozłowska W., *Environmental Characteristics of Gaseous Pollutants and Related Adverse Health Effects*, In *Synergic Influence of Gaseous, Particulate, and Biological Pollutants on Human Health*, CRC Press, 2015, s. 13-48.
13. Samek L., *Overall Human Mortality and Morbidity Due to Exposure to Air Pollution*, Int. J. Occup. Med. Environ. Health, 29, 2016, s. 417-426, doi:10.13075/ijomeh.1896.00560.

14. World Health Organization Regional Office for Europe Copenhagen, *Air Quality Guidelines for Europe Second Edition*, WHO Regional Publications, European Series, No. 91, 2000; ISBN 92 890 1358 3.
15. International Agency for Research on Cancer IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans, <https://monographs.iarc.who.int/agents-classified-by-the-iarc/>.
16. Shuhaimi-Othman M., Yakub N., Ramle N.-A., Abas A., *Toxicity of Metals to a Freshwater Ostracod: Stenocypris Major*, J. Toxicol., 2011, 2011, s. 1-8, doi:10.1155/2011/136104.
17. Chakraborty A., Gupta T., *Chemical Characterization and Source Apportionment of Submicron (PM1) Aerosol in Kanpur Region, India*, Aerosol Air Qual. Res., 10, 2010, s. 433-445, doi:10.4209/aaqr.2009.11.0071.
18. Rogula-Kozłowska W., Rybak J., Wróbel M., Bihałowicz J.S., Krasuski A., Majder-Łopátka M., *Site Environment Type – The Main Factor of Urban Road Dust Toxicity?*, Ecotoxicol. Environ. Saf., 218, 2021, s. 112290, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112290>.
19. Hwang H.-M., Fiala M.J., Park D., Wade T.L., *Review of Pollutants in Urban Road Dust and Stormwater Runoff: Part I. Heavy Metals Released from Vehicles*, Int. J. Urban Sci., 20, 2016, s. 334-360, doi:10.1080/12265934.2016.1193041.
20. Cui W., Meng Q., Feng Q., Zhou L., Cui Y., Li W., *Occurrence and Release of Cadmium, Chromium, and Lead from Stone Coal Combustion*, Int. J. Coal Sci. Technol., 6, 2019, s. 586-594, doi:10.1007/s40789-019-00281-4.
21. Deng S., Shi Y., Liu Y., Zhang C., Wang X., Cao Q., Li S., Zhang F., *Emission Characteristics of Cd, Pb and Mn from Coal Combustion: Field Study at Coal-Fired Power Plants in China*, Fuel Process. Technol., 126, 2014, s. 469-475, doi:10.1016/j.fuproc.2014.06.009.
22. Wydawnictwo Gospodarcze W Jaki Dzień Polacy Najchętniej Robią Zakupy w Skleпах? Koronawirus Sporo Zmienił w Zachowaniach Konsumentów, <https://www.wiadomoscihandlowe.pl/artykul/polacy-wciaz-najchetniej-robia-zakupy-w-sobote-ale-goni-ja-wtorek>.
23. Rada Miejska w Wołominie XXXVIII-58/2014 w Sprawie Uchwalenia Regulaminu Targowiska Miejskiego Nr 1 Przy Ul. 1-Go Maja w Wołominie, <https://wolomin.bip.net.pl/?a=8715>.
24. Szydłowski H., *Pracownia Fizyczna*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1980; ISBN 8301024879.
25. Naderizadeh Z., Khademi H., Ayoubi S., *Biomonitoring of Atmospheric Heavy Metals Pollution Using Dust Deposited on Date Palm Leaves in Southwestern Iran*, Atmosfera, 29, 2016, s. 141, doi:10.20937/ATM.2016.29.02.04.
26. Pant P., Harrison R.M., *Estimation of the Contribution of Road Traffic Emissions to Particulate Matter Concentrations from Field Measurements: A Review*, Atmos. Environ., 77, 2013, s. 78-97, doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.028>.
27. Sternbeck J., Sjödin Å., Andréasson K., *Metal Emissions from Road Traffic and the Influence of Resuspension - Results from Two Tunnel Studies*, Atmos. Environ., 36, 2002, s. 4735-4744, doi:[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00561-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00561-7).
28. Kuo C.-Y., Wang J.-Y., Liu W.-T., Lin P.-Y., Tsai C.-T., Cheng M.-T., *Evaluation of the Vehicle Contributions of Metals to Indoor Environments*, J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol., 22, 2012, s. 489-495, doi:10.1038/jes.2012.55.
29. Adamiec E., Jarosz-Krzemińska E., Wieszała R., *Heavy Metals from Non-Exhaust Vehicle Emissions in Urban and Motorway Road Dusts*, Environ. Monit. Assess., 188, 2016, s. 369, doi:10.1007/s10661-016-5377-1.

30. Duong T.T.T., Lee B.-K., *Determining Contamination Level of Heavy Metals in Road Dust from Busy Traffic Areas with Different Characteristics*, J. Environ. Manage., 92, 2011, s. 554-562, doi:10.1016/j.jenvman.2010.09.010.
31. Lee P.-K., Touray J.-C., Baillif P., Ildefonse J.-P., *Heavy Metal Contamination of Settling Particles in a Retention Pond along the A-71 Motorway in Sologne, France*, Sci. Total Environ., 201, 1997, s. 1-15, doi:10.1016/S0048-9697(97)84048-X.
32. Goix S., Resongles E., Point D., Oliva P., Duprey J.L., de la Galvez E., Ugarte L., Huayta C., Prunier J., Zouiten C., *Transplantation of Epiphytic Bioaccumulators (Tillandsia Capillaris) for High Spatial Resolution Biomonitoring of Trace Elements and Point Sources Deconvolution in a Complex Mining/Smelting Urban Context*, Atmos. Environ., 80, 2013, s. 330-341, doi:10.1016/j.atmosenv.2013.08.011.
33. Rybak J., *Accumulation of Major and Trace Elements in Spider Webs*, Water, Air, Soil Pollut., 226, 2015, s. 105, doi:10.1007/s11270-015-2369-7.
34. Widziewicz K., Rogula-Kozłowska W., Loska K., Kociszewska K., Majewski G., *Health Risk Impacts of Exposure to Airborne Metals and Benzo(a)Pyrene during Episodes of High PM10 Concentrations in Poland*, Biomed. Environ. Sci., 31, 2018, s. 23-36, doi:10.3967/bes2018.003.
35. Rogula-Kozłowska W., Błaszczak B., Szopa S., Klejnowski K., Sówka I., Zwoździak A., Jabłońska M., Mathews B., *PM2,5 in the Central Part of Upper Silesia, Poland: Concentrations, Elemental Composition, and Mobility of Components*, Environ. Monit. Assess., 185, 2013, s. 581-601, doi:10.1007/s10661-012-2577-1.
36. Rogula-Kozłowska W., Klejnowski K., Rogula-Kopiec P., Ośródko L., Krajny E., Błaszczak B., Mathews B., *Spatial and Seasonal Variability of the Mass Concentration and Chemical Composition of PM2,5 in Poland*, Air Qual. Atmos. Heal., 7, 2014, s. 41-58, doi:10.1007/s11869-013-0222-y.
37. Jabłońska M., Janeczek J., *Identification of Industrial Point Sources of Airborne Dust Particles in an Urban Environment by a Combined Mineralogical and Meteorological Analyses: A Case Study from the Upper Silesian Conurbation, Poland*, Atmos. Pollut. Res., 10, 2019, s. 980-988, doi:https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.01.006.
38. Sówka I., Chlebowska-Styś A., Pachurka Ł., Rogula-Kozłowska W., Mathews B., *Analysis of Particulate Matter Concentration Variability and Origin in Selected Urban Areas in Poland*, Sustain, 2019, s. 11.
39. Harrison R.M., Jones A.M., Gietl J., Yin J., Green D.C., *Estimation of the Contributions of Brake Dust, Tire Wear, and Resuspension to Nonexhaust Traffic Particles Derived from Atmospheric Measurements*, Environ. Sci. Technol., 46, 2012, s. 6523-6529, doi:10.1021/es300894r.
40. Pant P., Shi Z., Pope F.D., Harrison R.M., *Characterization of Traffic-Related Particulate Matter Emissions in a Road Tunnel in Birmingham, UK: Trace Metals and Organic Molecular Markers*, Aerosol Air Qual. Res., 17, 2017, s. 117-130, doi:10.4209/aaqr.2016.01.0040.
41. Thorpe A., Harrison R.M., *Sources and Properties of Non-Exhaust Particulate Matter from Road Traffic: A Review*, Sci. Total Environ., 400, 2008, s. 270-282, doi:10.1016/j.scitotenv.2008.06.007.

Dobowa i godzinowa zmienność stężeń Pb, Ni, Zn, Mn i V: badania pilotażowe w wybranym receptorze centralnej Polski

Streszczenie

W powietrzu atmosferycznym występuje około 40 pierwiastków śladowych. Osiem z nich, tj.: As, Cd, Cr, Hg, Mn, Ni, Pb i V Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) umieściła na liście 35 substancji szczególnie niebezpiecznych dla zdrowia człowieka, natomiast według klasyfikacji Międzynarodowej Agencji Badań nad Nowotworami (IARC) pierwiastki As, Cd, Cr (VI) i Ni należą do grupy związków o potwierdzonym działaniu nowotworowym na organizm człowieka. Pierwiastki śladowe mogą pochodzić ze źródeł naturalnych, np. wybuchów wulkanów i erozji gleb oraz antropogenicznych, czyli ze spalania paliw, odpadów, a także wszelkiego rodzaju przeróbki, wytopienia i produkcji metali, stopów metali, itp. W zurbanizowanych obszarach Polski najpoważniejszymi źródłami pierwiastków śladowych, w tym zwłaszcza toksycznych i nowotworowych, jest spalanie paliw stałych i płynnych. Szeroko rozumiana emisja komunikacyjna stanowi w wielu polskich miastach podstawowy problem zanieczyszczenia powietrza większością metali. W pracy przeprowadzono pilotażowe badania dobowej i godzinowej zmienności stężeń Pb, Ni, Zn, Mn i V związanych z drobnym pyłem zawieszonym $PM_{2,5}$ w typowym ośrodku miejskim pod Warszawą. Wykorzystano ciąglej analizator pierwiastków PX-375 firmy Horiba, którego zasada działania oparta jest o spektrometrię fluorescencji rentgenowskiej. Stężenia $PM_{2,5}$ i związanych z nim Pb, Ni, Zn, Mn i V mierzono przez tydzień z rozdzielczością czasową 1 godzina w lokalizacji narażonej na silne oddziaływanie emisji komunikacyjnej. Wykazano, że w zasadzie wszystkie analizowane pierwiastki, w badanym obszarze, związane są z transportem drogowym. Ponadto pokazano, że zastosowana, unikatowa w światowej skali aparatura, umożliwiła powiązanie konkretnego źródła emisji z wybranymi pierwiastkami śladowymi nawet wówczas gdy bazować można na wynikach względnie krótkich serii pomiarowych.

Słowa kluczowe: $PM_{2,5}$; spektrometr; zmienność stężeń; EDXRF

Hourly and daily variation of concentrations of Pb, Ni, Zn, Mn, and V: a pilot study in the chosen receptor central Polish

Abstract

In the atmospheric air, the circulating movements of 40 trace elements. Eight of them, i.e. As, Cd, Cr, Hg, Mn, Ni, Pb and V – the World Health Organization (WHO) placed 35 specialist work for health in forestry, while according to the classification of the international cancer research agency (IARC), the elements As, Cd, Cr (VI) and Ni rough to a group with a confirmed carcinogenic effect on the human body. Trace elements may come from natural sources, e.g. volcanic eruptions and soil erosion as well as anthropogenic ones, i.e. from the sale of fuels, waste, as well as the share of processing, metal smelting and the production of metals, alloys, etc. this toxic and carcinogenic issue are the combustion of fuels and liquids. Broadly understood traffic emission is a diagnostic problem in many Polish studies. In the pilot work, the daily and hourly variability of the study of Pb, Ni, Zn, Mn and V concentrations of lamps with $PM_{2,5}$ fine suspended dust in a typical urban center near Warsaw. The PX-375 continuous element analyzer by Horiba was used, which is based on the principle of X-ray fluorescence spectrometry. Concentrations of $PM_{2,5}$ and its release of Pb, Ni, Zn, Mn and V measured for a week with a time experience of 1 hour in damage exposed to heavy transport impact. It has been shown that in the samples all the examined elements in the studied area are transported by road. Moreover, the applied apparatus, which is unique in the scale, makes it possible to link the purchase with selected trace elements, even when the results of relatively short measurement series can be based on.

Keywords: $PM_{2,5}$; spectrometer; variability concentrations, EDXRF

Rozkład toluenu w układzie plazmowo-katalitycznym z zastosowaniem katalizatorów niklowych

1. Wstęp

Zgazowaniu biomasy towarzyszy powstawanie smół składających się z mieszaniny węglowodorów mono- i wielopierścieniowych, których zawartość może osiągać wartość nawet do 150 g/Nm³ [1]. Ich obecność może powodować uszkodzenie elementów silników spalinowych i turbin, dla których maksymalna dopuszczalna zawartość smół w gazie zasilającym wynosi kolejno 50-100 mg/Nm³ oraz 5 mg/Nm³ [2-4]. Powstawanie smół prowadzi również do strat energii pozyskiwanej z biomasy nawet do 15% [5]. W celu oczyszczenia gazu po zgazowaniu biomasy stosuje się metody mechaniczne, niekatalityczne i katalityczne w zależności od wymaganego stopnia oczyszczenia gazu [6-8]. Najczęściej stosowanymi imitatorami substancji smolistych ze względu na ich wysoką stabilność są toluen i naftalen. Ich zawartość w powstającej w procesie zgazowania biomasy mieszaninie węglowodorów, stanowi kolejno nawet 24% i 15% [9-10]. Najczęściej stosowane katalizatory niklowe wykazują wysoką aktywność w procesie rozkładu substancji smolistych oraz są mniej kosztowne w porównaniu do katalizatorów wykonanych z metali szlachetnych, takich jak pallad lub platyna. Największą wadą ich stosowania, jest szybka dezaktywacja na skutek tworzenia depozytów węglowych na ich powierzchni, blokujących dostęp do miejsc aktywnych oraz wysoka temperatura prowadzenia procesu [11-16]. Plazmowy rozkład substancji smolistych jest z powodzeniem wykorzystywany przez wiele zespołów badawczych [17-20]. Zastosowanie skojarzonego systemu plazmowo-katalitycznego pozwala na zmniejszenie temperatury procesu przy zachowaniu wysokich stopni rozkładu toluenu [21-25]. Dodatek wapnia w nośniku katalizatora może powodować wzrost stopni przemiany imitatorów smół ze względu na zmianę oddziaływania między fazą aktywną a nośnikiem i zapobieganie spiekaniu katalizatora w warunkach prowadzenia procesu [26-28].

Przeprowadzono badania rozkładu toluenu, jako imitatora smół powstających w procesie zgazowania biomasy w układzie katalitycznym, plazmowym i plazmowo-katalitycznym, z zastosowaniem wyładowania barierowego. Stosowano katalizatory niklowe w formie utlenionej i zredukowanej osadzone na dwóch nośnikach – Al₂O₃ i Al₂O₃ zawierającym dodatek CaO oraz stały skład gazu wejściowego, zawierający tlenek węgla, dwutlenek węgla, wodór i azot. Sprawdzono wpływ temperatury, obecności wyładowania oraz dodatku wapnia w nośniku na stopień przemiany toluenu, skład wyjściowy gazu i jego wartość opałową.

¹ joanna.woroszyl.dokt@pw.edu.pl, Politechnika Warszawska, Noakowskiego 3, 00-664 Warszawa, Polska.

² Politechnika Warszawska, Noakowskiego 3, 00-664 Warszawa, Polska.

³ mmlotek@ch.pw.edu.pl, Politechnika Warszawska, Noakowskiego 3, 00-664 Warszawa, Polska.

2. Część eksperymentalna

Stosowano gaz o składzie zbliżonym do składu po zgazowaniu biomasy zawierający H_2 (0.28), N_2 (0.48), CO (0.12) i CO_2 (0.12) o całkowitym przepływie 10 Nl/h . **Część strumienia azotu przepuszczano przez termostatowaną płuczkę z toluenem. Po nasyceniu parami toluenu strumień azotu dołączany był do głównego strumienia gazów przed punktem poboru próbki.** Początkowe stężenie toluenu wynosiło 3500 ppm (**14 g/Nm^3**), a moc wyładowania w układach plazmowych i plazmowo-katalitycznych miała stałą wartość 10 W. Próbkę pobierano za i przed reaktorem po ogrzaniu reaktora do temperatury kolejno: 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C i 350°C.

Do identyfikacji składu gazów przed i po reakcji, zastosowano chromatografy gazowe. Do oznaczenia N_2 , H_2 , CO , CO_2 oraz śladowych ilości CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 i C_2H_6 wykorzystano Agilent 6890N wyposażony w kolumnę ShinCarbon oraz detektory TCD i FID. Stężenie toluenu analizowano za pomocą chromatografu Chrompack 9001 z kolumną kapilarna CP-SIL 24 CB i detektorem FID. Gaz po reakcji analizowano również za pomocą chromatografu Thermo Scientific Trace 1300 z kolumną HP5 i detektorem MS.

Stożenie przemiany toluenu (1) obliczany był na podstawie stężenia toluenu przed i za reaktorem:

$$\alpha = \frac{C_o - C_z}{C_o} \cdot 100\% \quad (1)$$

Gdzie: α – stopień przemiany, C_o – stężenie toluenu przed reakcją, C_z – stężenie strumienia toluenu po reakcji.

Obliczono wartość opałową gazu (2) przed i po reakcji aby ocenić możliwość zastosowania oczyszczonego gazu w silnikach spalinowych i turbinach. Do obliczenia kaloryczności gazu zastosowano wzór [21,23]:

$$W = \frac{Q_p H_2 \cdot n_{H_2} + Q_p CO \cdot n_{CO} + Q_p CH_4 \cdot n_{CH_4} + Q_p C_2H_2 \cdot n_{C_2H_2} + Q_p C_2H_4 \cdot n_{C_2H_4} + Q_p C_2H_6 \cdot n_{C_2H_6}}{1000} \quad (2)$$

Gdzie: W – wartość kaloryczna [MJ/m^3], Q_p – ciepło spalania [kJ/m^3], n – ułamki molowe CO , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 i C_2H_6 .

Porównano wydajność energetyczną układów plazmowych (bez wypełnienia katalizatora) oraz plazmowo – katalitycznych. W tym celu wykorzystano obliczenia energii specyficznej (3) oraz sprawności energetycznej układów (4) [18]:

$$SEI = \frac{P}{Q} \quad (3)$$

Gdzie: SEI – energia specyficzna [kWh/m^3], P – moc wyładowania [kW], Q – całkowity przepływ gazu (m^3/h).

$$EE = \frac{C_o - C_z}{SEI} \quad (4)$$

Gdzie: EE – wydajność energetyczna [g/kWh], C_o – początkowe stężenie toluenu [g/m^3], C_z – stężenie końcowe toluenu [g/m^3], SEI – energia specyficzna [kWh/m^3].

2.1. Preparatyka katalizatorów

Katalizatory wykonano metodą impregnacji na mokro z zastosowaniem wodnego roztworu soli $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Zawartość wagowa niklu wynosiła 10%. Otrzymany katalizator suszony był w temperaturze 90°C przez 12 h a następnie kalcynowany w temperaturze 450°C przez 5h. Aby uzyskać fazę aktywną w postaci zredukowanego niklu, katalizator poddawano redukcji z zastosowaniem przepływu wodoru wynoszącego 14 l/h w temperaturze 400°C przez 14 h. Powierzchnia właściwa katalizatorów przed i po procesie wykonana metodą izotermy BET przy pomocy aparatu ASAP2020 (Micromeritics), była zbliżona i nie przekraczała $10 \text{ m}^2/\text{g}$ (Tabela 1. Powierzchnia właściwa katalizatorów).

Tabela 1. Powierzchnia właściwa katalizatorów wyznaczona metodą BET

Katalizator	Przed pracą [m^2/g]	Po pracy [m^2/g]
$\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}$	4,45	3,73
$\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}$	3,48	2,52
$\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$	8,81	3,83
$\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$	8,26	7,76

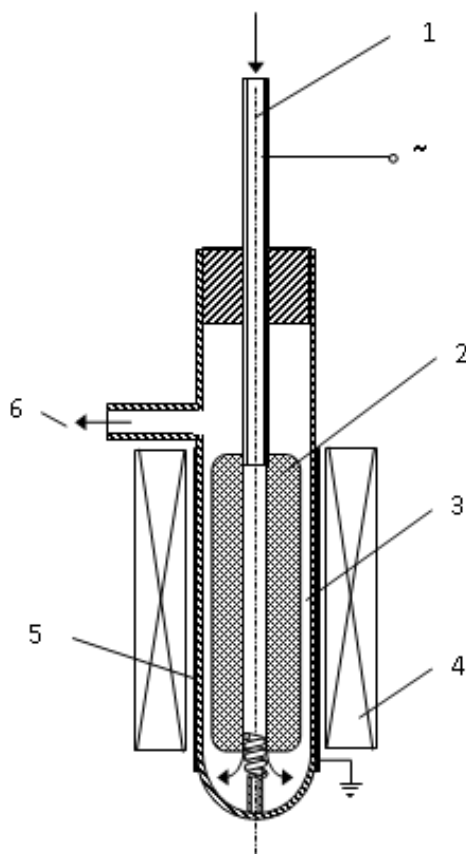
Źródło: Opracowanie własne

2.2. Reaktor wyładowania barierowego

Reaktor wyładowania barierowego (rys. 1), stosowany w badaniach składał się z dwóch metalowych elektrod – jednej wewnątrz reaktora, zasilanej napięciem 10 kV o częstotliwości 50 Hz oraz drugiej (uziemiającej), umieszczonej na zewnątrz, naniesionej w postaci warstwy srebra. Korpus reaktora zbudowany był z rurki ze szkła kwarcowego. Między elektrodami znajdowała się szczelina wyładowcza, w której w przypadku zastosowaniu układów katalitycznych i plazmowo-katalitycznych, umieszczany był katalizator. Temperatura utrzymywana była za pomocą pieca elektrycznego znajdującego się na zewnątrz reaktora.

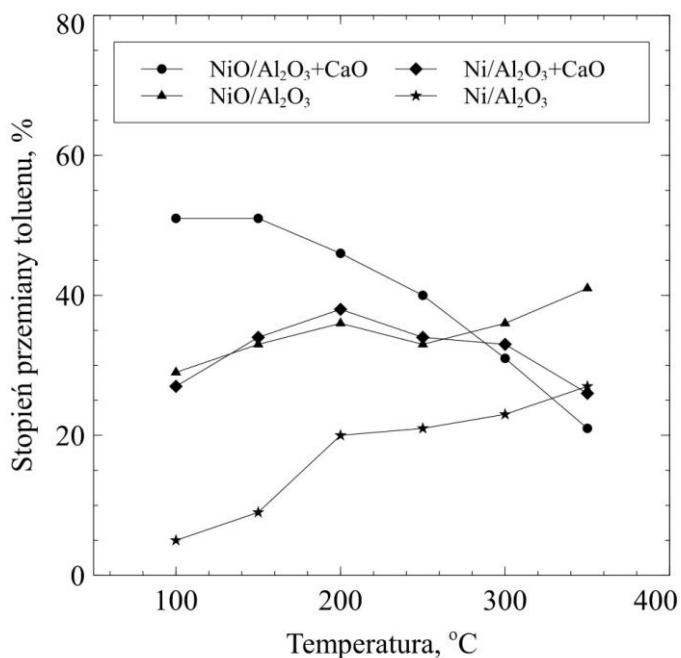
3. Analiza wyników

Najwyższe stopnie przemiany otrzymano stosując plazmę wyładowania barierowego w obecności katalizatora $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}$ i temperaturze do 150°C wynoszące 51% (wykres 1). Dla katalizatorów z dodatkiem wapnia, obserwowano spadek stopnia przemiany powyżej temperatury $150\text{-}200^\circ\text{C}$, nie był on obserwowany w układach z nośnikiem bez dodatku CaO. W układach plazmowo-katalitycznych w temperaturach do 300°C , uzyskane stopnie przemiany w obecności katalizatora na nośniku $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}$ były wyższe, niż z zastosowaniem katalizatorów bez dodatku wapnia. Katalizator NiO na nośniku Al_2O_3 , osiągał najwyższy stopień przemiany w temperaturze 350°C – 40%. **Sprawność energetyczna była zależna od stosowanego katalizatora w układach plazmowo-katalitycznych i malała wraz ze wzrostem temperatury. Najwyższa sprawność wynosząca 9,55 g/kwh uzyskano stosując katalizator $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}$ (wyk. 2).**

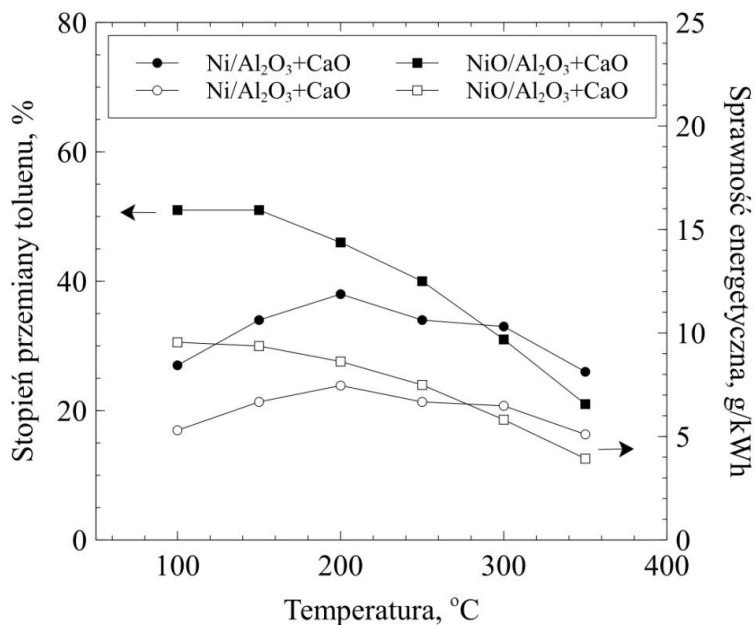


Rysunek 42. Reaktor wyładowania barierowego; 1 – wejście gazu, 2 – elektroda wewnętrzna, 3 – szczelina wyładowcza, 4 – piec elektryczny, 5 – elektroda zewnętrzna, 6 – wyjście gazu. [Opracowanie własne]

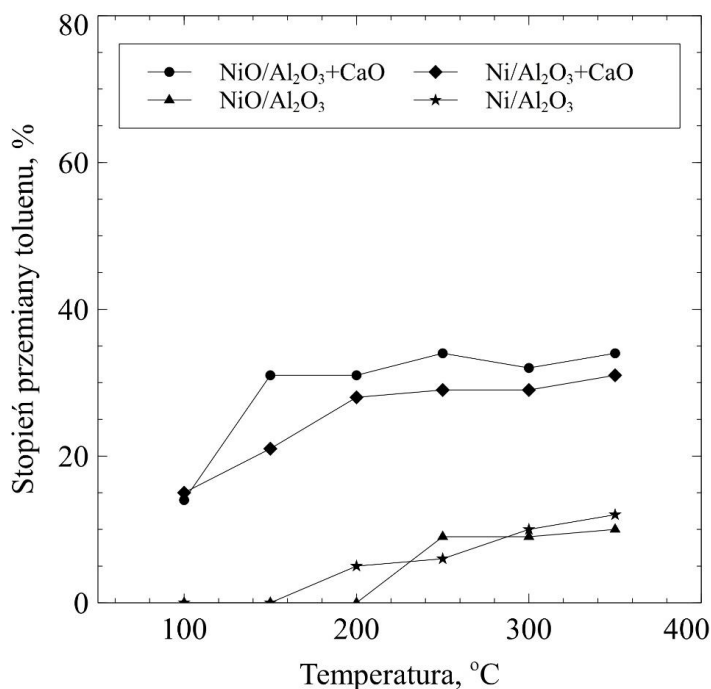
W układach katalitycznych, bez obecności wyładowania, katalizatory niklowe osadzone na nośniku Al_2O_3 nie były aktywne poniżej temperatury 200°C . Dodatek wapnia powodował obniżenie temperatury, w której katalizator był aktywny do 100°C oraz zwiększał stopnie przemiany toluenu, których najwyższe wartości uzyskano w obecności katalizatora $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}$ – 35% w temperaturze 350°C (**wyk. 3**). Katalizatory zawierające utlenioną formę niklu jako fazę aktywną były bardziej aktywne w reakcji rozkładu toluenu w układach katalitycznych oraz plazmowo – katalitycznych.



Wykres 1. Zależność stopnia przemiany toluenu od temperatury w układach plazmowo-katalitycznych. Moc wyładowania barierowego 10 W [Opracowanie własne]



Wykres 2. Zależność stopnia przemiany toluenu i sprawności energetycznej od temperatury w układach plazmowo-katalitycznych dla katalizatorów Ni/Al₂O₃+CaO i NiO/Al₂O₃+CaO [Opracowanie własne]

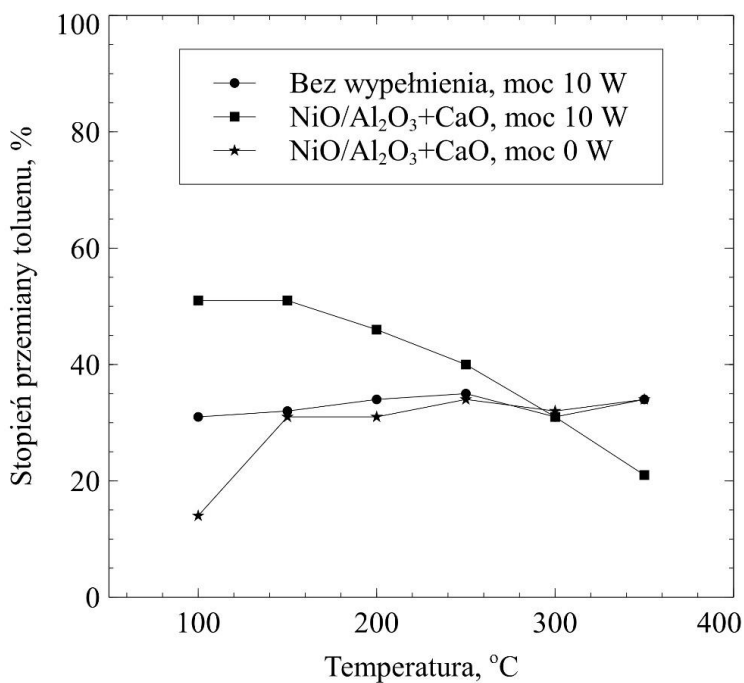


Wykres 3. Zależność stopnia przemiany toluenu od temperatury w układach katalitycznych [Opracowanie własne]

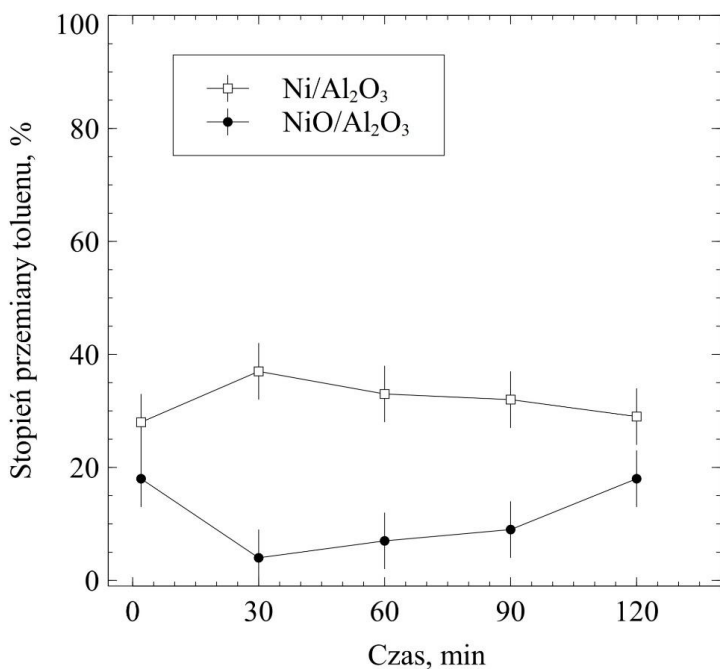
Sprawdzono wpływ działania plazmy wyładowania barierowego i temperatury bez obecności katalizatora w strefie wyładowczej na stopień przemiany toluenu. Otrzymane stopnie przemiany nie zmieniały się wraz ze wzrostem temperatury i były niższe niż otrzymane dla układu plazmowo – katalitycznego z udziałem NiO/Al₂O₃+CaO do temperatury 250°C (**wyk. 4**).

W przypadku układów z zastosowaniem katalizatorów NiO/Al₂O₃ i Ni/Al₂O₃+CaO i plazmy wyładowania barierowego, wpływ katalizatora nie jest zauważalny a stopnie przemiany są zbliżone do tych, które otrzymano stosując jedynie plazmę **wyładowania barierowego**. Negatywny wpływ obecności katalizatora obserwowany był przy zastosowaniu Ni/Al₂O₃, mogło to wynikać z jego zbyt małej aktywności i zmniejszenia przestrzeni wyładowczej, na skutek wypełnienia jej złożem katalizatora.

Zbadano stabilność katalizatorów bez dodatku wapnia podczas długotrwałych pomiarów stopnia przemiany w temperaturach 250°C i 350°C w układzie plazmowo-katalitycznym. Stopnie przemiany zmieniały nieznacznie, w granicy błęd pomiarowego, co świadczy o stabilności pracy katalizatorów w czasie (**wyk. 5**). Długość pracy, każdego z katalizatorów w trakcie trwania pomiarów wynosiła sumarycznie około 10 godzin.

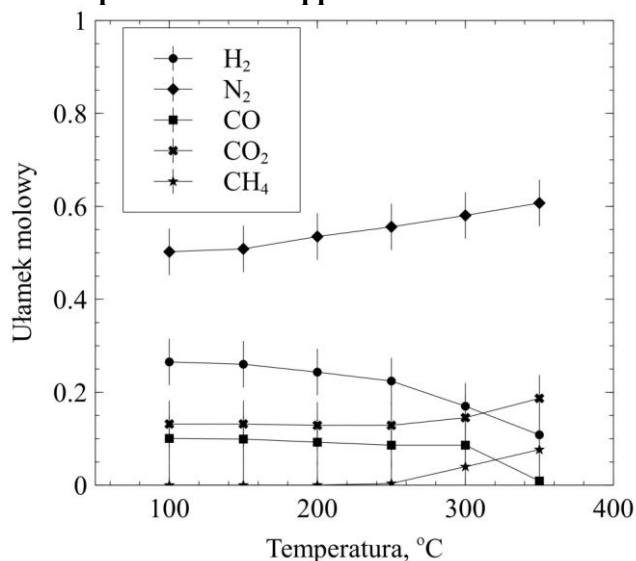


Wykres 4. Wpływ stosowanego układu i temperatury na stopień przemiany toluenu [Opracowanie własne]



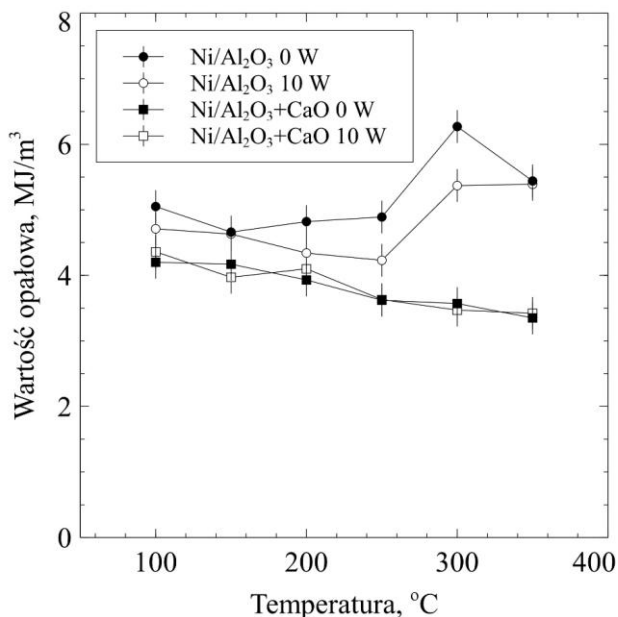
Wykres 5. Zależność stopnia przemiany toluenu od czasu prowadzenia procesu w temperaturze 250°C. Katalizatory Ni/Al₂O₃ i NiO/Al₂O₃. Moc wyładowania barierowego 10 W [Opracowanie własne]

Zmiana składu gazów w układach plazmowo-katalitycznych zależna była od zastosowanego katalizatora. Metaliczny nikiel katalizował reakcję metanizacji tlenku węgla co powodowało znaczny spadek zawartości H_2 i CO, **nawet do kolejno 54% i 74%**. **Maksymalna zawartość metanu w gazie wynosiła 800 ppm dla katalizatora Ni/Al_2O_3 w temperaturze $350^\circ C$. Poniżej $250^\circ C$ reakcja metanizacji przebiegała z mniejszą wydajnością i jego stężenie nie przekraczało 75 ppm.** W większości układów zmiana zawartości azotu wynosiła do 15%, co świadczy o zmniejszaniu się objętości gazu w trakcie reakcji. Azot jest również zużywany w reakcjach rozkładu toluenu, w gazie wylotowym obserwowano jego pochodne aminowe. Ze względu na niewielkie zmiany stężenia azotu pominięto zmianę objętości strumienia gazów w obliczaniu stężeń toluenu. W temperaturze do $250^\circ C$ skład mieszaniny gazów jest stały (wyk. 6). W niemal wszystkich układach obserwowano tworzenie się śladowych ilości węglowodorów C2 – etanu, etylenu i acetylenu, których zawartość nie przekraczała 10 ppm.



Wykres 6. Zależność ułamka molowego od temperatury w układzie plazmowo – katalitycznym dla katalizatora Ni/Al_2O_3 [Opracowanie własne]

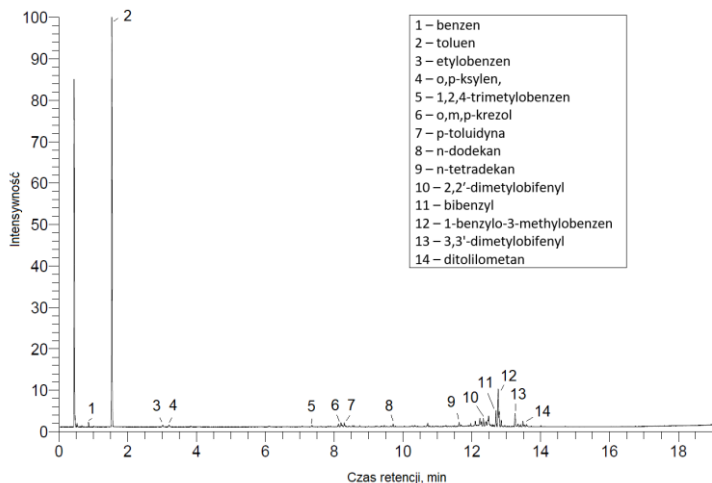
Reakcja metanizacji wpływała znacząco na wartość opałową gazu wychodzącego z reaktora. W obecności katalizatora Ni/Al_2O_3 powstawała największa ilość metanu w układach katalitycznych i plazmowo-katalitycznych, którego zawartość znacząco wzrastała powyżej $250^\circ C$. Skutkowało to podwyższeniem wartości opałowej gazu do $6,3 MJ/m^3$. Była to wartość wyższa, niż kaloryczność gazu wchodzącego do reaktora, która wynosiła $5 MJ/m^3$. Dla pozostałych układów otrzymano wartości opałowe gazów po opuszczeniu reaktora niższe niż wejściowe. Poniżej temperatury $250^\circ C$, kaloryczność gazu była zbliżona w układach plazmowo-katalitycznych i katalitycznych, dodatek wapnia w nośniku katalizatora negatywnie wpływał na wartość opałową gazu (wyk. 7).



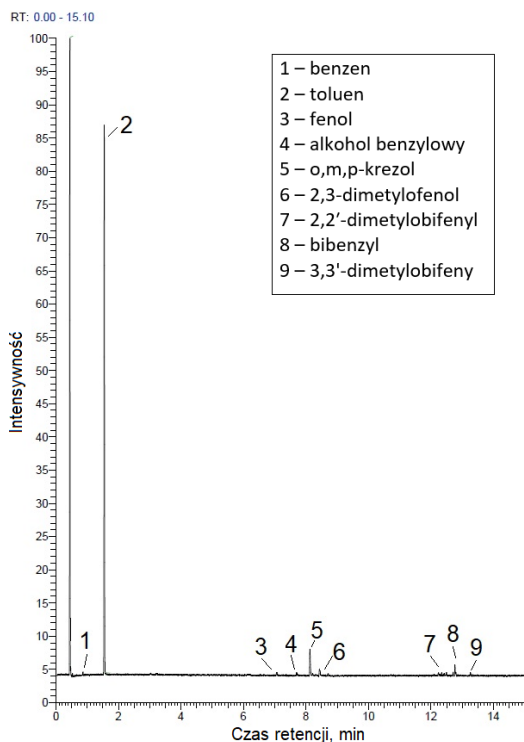
Wykres 7. Zależność wartości opałowej od temperatury w układach katalitycznych i plazmowo-katalitycznych dla katalizatorów Ni/Al₂O₃ i Ni/Al₂O₃+CaO [Opracowanie własne]

W strumieniu gazów wychodzących z reaktora zidentyfikowano **śladowe ilości półproduktów** rozkładu toluenu m.in. aldehyd benzoesowy, alkohol benzylový, benzen jak również krezole, fenole i pochodne aminowe toluenu. W temperaturach powyżej 200°C zachodziło tworzenie się wielopierścieniowych związków takich jak m.in. naftalen i bibenzyl (rys. 2 i 3), które mogą adsorbować się na powierzchni katalizatorów i prowadzić do ich dezaktywacji.

RT: 0.00 - 19.05



Rysunek 2. Chromatogram analizy chromatograficznej próbki gazu po przemianie toluenu w układzie plazmowo-katalitycznym dla katalizatora Ni/Al₂O₃ w temperaturze 300°C [Opracowanie własne]



Rysunek 3. Chromatogram analizy chromatograficznej próbki gazu po przemianie toluenu w układzie plazmowo-katalitycznym dla katalizatora Ni/Al₂O₃+CaO w temperaturze 300°C [Opracowanie własne]

4. Wnioski

Zastosowanie układu plazmowo-katalitycznego z udziałem NiO/Al₂O₃+CaO umożliwia uzyskanie wysokich stopni przemiany toluenu, wyższych niż stosując oddzielnie plazmę i katalizator. Dla katalizatorów niklowych na nośniku z tlenku glinu, stopień przemiany toluenu wzrastał wraz z temperaturą w układach plazmowo-katalitycznych. Dodatek wapnia na nośniku w tych układach, powodował spadek aktywności katalizatorów w wysokich temperaturach powyżej 150-200°C. Dodatek tlenku wapnia na nośniku Al₂O₃ obniża temperaturę w której katalizatory są aktywne w reakcji rozkładu toluenu do 100°C i pozwala uzyskać większe stopnie przemiany w porównaniu z katalizatorami bez dodatku CaO w nośniku.

W każdym z układów stwierdzono obecność śladowych ilości węglodorów C2 oraz metanu. Reakcja metanizacji ma duży wpływ na wartość kaloryczną gazu, im więcej CH₄ powstaje w procesie, tym wyższa jest wartość opałowa gazów wychodzących z reaktora.

Katalizatory wykazują stabilność podczas prowadzenia długotrwałych pomiarów. Proces powinien być prowadzony w niskich temperaturach, poniżej 200°C ze względu na tworzenie się wielopierścieniowych związków aromatycznych. Jest to również korzystne z ekonomicznego punktu widzenia, ponieważ wymaga mniejszego nakładu energii koniecznej do zasilania pieca elektrycznego.

Literatura

1. Heidenreich S., Foscolo P.U., *New concepts in biomass gasification*, Progress in Energy and Combustion Science, 46, 2015, s. 72-95.
2. Fjellerup J., Ahrenfeldt J., Henriksen U., Gobel B., *Formation, decomposition and cracking of biomass tars in gasification*, Technical University of Denmark. Department of Mechanical Engineering, Kgs. Lyngby, 2005.
3. Thapa S., Bhoi P.R., Kumar A., Huhnke R.L., *Effects of Syngas Cooling and Biomass Filter Medium on Tar Removal*, Energies, 10 (3), 2017, s. 349.
4. Asadullah M., *Biomass gasification gas cleaning for downstream applications: A comparative critical review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 40, 2014, s. 118-132.
5. Qin Y., Campen A., Wiltowski T., Feng J., Li W., *The influence of different chemical compositions in biomass on gasification tar formation*, Biomass and Bioenergy, 83, 2015, s. 77-84.
6. Bridgwater A.V., *Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading*, biomass and bioenergy, 38, 2012, s. 68-94.
7. Saleem F., Harris J., Zhang K., Harvey A., *Non-thermal plasma as a promising route for the removal of tar from the product gas of biomass gasification - A critical review*, Chemical Engineering Journal, 382, 2020, s. 122761.
8. Yu H., Liu Y., Liu J., Chen D., *High catalytic performance of an innovative Ni/magnesium slag catalyst for the syngas production and tar removal from biomass pyrolysis*, Fuel, 254, 2019, s. 115622.
9. Riosa M.L.V., Martínez González A., Silva Lora E.E., Almazán del Olmoco O.A., *Reduction of tar generated during biomass gasification: A review*, Biomass and Bioenergy, 108, 2018, s. 345-370.
10. Wang Y., Yang H., Tua X., *Plasma reforming of naphthalene as a tar model compound of biomass gasification*, Energy Conversion and Management, 187, 2019, s. 593-604.
11. Liu Y., Yu H., Liu J., Chen D., *Catalytic characteristics of innovative Ni/slag catalysts for syngas production and tar removal from biomass pyrolysis*, International Journal of Hydrogen Energy, 44, 2019, s. 11848-11860.
12. Mohamed D.K.B., Vekshac A., Lima T., Lisaka G., *Highly active and poison-tolerant nickel catalysts for tar reforming synthesized through controlled hydrothermal synthesis*, Applied Catalysis A, General, 607, 2020, s. 117779.
13. Gao X., Wang Z., Ashok J., Kawi S., *A comprehensive review of anti-coking, anti-poisoning and anti-sintering catalysts for biomass tar reforming reaction*, Chemical Engineering Science: X, 7, 2020, s. 100065.
14. Xiao X., Liu J., Gao A., Zhouyu M., Liu B., Gao M., Zhang X., Lu Q., Dong Ch., *The performance of nickel-loaded lignite residue for steam reforming of toluene as the model compound of biomass gasification tar*, Journal of the Energy Institute, 91, 6, 2018, s. 867-876.
15. Donga Q., Zhang S., Lic H., Lia X., Wang Z., *Catalytic cracking of biomass tar together with syngas production over red brick powder-supported nickel catalysts*, Fuel Processing Technology, 194, 2019, s. 106123.
16. Huang Z., Zheng A., Deng Z., Wei G., Zhao K., Chen D., He F., Zhao Z., Li H., Li F., *In-situ removal of toluene as a biomass tar model compound using NiFe₂O₄ for application in chemical looping gasification oxygen carrier*, Energy, 190, 2020, s. 116360.
17. Saleema F., Zhanga K., Harvey A., *Plasma-assisted decomposition of a biomass gasification tar analogue into lower hydrocarbons in a synthetic product gas using a dielectric barrier discharge reactor*, Fuel, 235, 2019, s. 1412-1419.
18. Liu S., Mei D., Wang L., Tu X., *Steam reforming of toluene as biomass tar model compound in a gliding arc discharge reactor*, Chemical Engineering Journal, 307, 2017, s. 793-802.

19. Sun J., Wang Q., Wang W., Wang K., *Plasma catalytic steam reforming of a model tar compound by microwave-metal discharges*, Fuel, 234, 2018, s. 1278-1284.
20. Liu Y., Song J., Diao X., Liub L., Sun Y., *Removal of tar derived from biomass gasification via synergy of nonthermal plasma and catalysis*, Science of the Total Environment, 721, 2020, s. 137671.
21. Młotek M., Woroszył J., Ulejczyk B., Krawczyk K., *Coupled Plasma-Catalytic System with Rang 19pr Catalyst for Conversion of Tar*, Scientific Reports, 9, 2019, s. 13562.
22. Młotek M., Ulejczyk B., Woroszył J., Walerczak I., Krawczyk K., *Purification of the gas after pyrolysis in coupled plasma-catalytic system*, Polish Journal of Chemical Technology, 19, 4, 2017, s. 94-98.
23. Młotek M., Ulejczyk B., Woroszył J., Krawczyk K., *Decomposition of Toluene in Coupled Plasma-Catalytic System*, Industrial & Engineering Chemistry Research, 59, 10, 2020, s. 4239-4244.
24. Liu S.Y., Mei D.H., Nahil M.A., Gadkari S., Gu S., Williams P.T., Tu X., *Hybrid plasma-catalytic steam reforming of toluene as a biomass tar model compound over Ni/Al₂O₃ catalysts*, Fuel Processing Technology, 166, 2017, s. 269-275.
25. Mei D., Liu S., Wang Y., Yang H., Bo Z., Tua X., *Enhanced reforming of mixed biomass tar model compounds using a hybrid gliding arc plasma catalytic process*, Catalysis Today, 337, 2019, s. 225-233.
26. Hou S., Yokota O., Tanaka T., Yashima T., *Characterization of Ca-promoted Ni/ α -Al₂O₃ catalyst for CH₄ reforming with CO₂*, Applied Catalysis A: General, 253, 2003, s. 381-387.
27. Ashok J., Kathiraser Y., Ang M.L., Kawi S., *Bi-functional hydrotalcite-derived NiO-CaO-Al₂O₃ catalysts for steam reforming of biomass and/or tar model compound at low steam-to-carbon conditions*, Applied Catalysis B: Environmental, 172-173, 2015, s. 116-128.
28. Zhanga Z., Oua Z., Qina Z., Rana J., Wub Ch., *Roles of alkali/alkaline earth metals in steam reforming of biomass tar for hydrogen production over perovskite supported Ni catalysts*, Fuel, 257, 2019, s. 116032.

Rozkład toluenu w układzie plazmowo-katalitycznym z zastosowaniem katalizatorów niklowych

Streszczenie

Istotnym problemem utrudniającym stosowanie gazu po zgazowaniu biomasy w silnikach spalinowych i turbinach jest powstawanie smół, które mogą prowadzić do uszkodzenia ich elementów. Połączenie plazmy wyładowania barierowego (DBD) i katalizatorów niklowych, o zawartości 10% fazy aktywnej w skojarzonym układzie plazmowo-katalitycznym, umożliwia obniżenie temperatury prowadzenia procesu oraz otrzymanie wysokich stopni przemiany toluenu, jako substancji modelowej – do 51%. Są to wartości wyższe, niż stosując układ katalityczny i plazmowy osobno. Badania prowadzono w gazie o stałym natężeniu przepływu, wynoszącym 10 NI/h i składającym się z H₂ (0.28), N₂ (0.48), CO (0.12), CO₂ (0.12). Moc wyładowania barierowego wynosiła 10 W , a napięcie na elektrodzie 10 kV. Stosowane katalizatory zachowywały stabilność w warunkach prowadzenia procesu podczas długotrwałych badań. Wartość opałowa otrzymanego gazu była wyższa niż początkowa w układach, w których zachodziła reakcja metanizacji. **Śladowe ilości węglowodorów C2 zidentyfikowano w gazie wychodzącym z reaktora.** Wysoka temperatura procesu, powyżej 200°C sprzyjała tworzeniu się wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych.

Słowa kluczowe: biomasa, wyładowanie barierowe, DBD, katalizator nikłowy

Toluene decomposition in plasma-catalytic system with use of nickel catalyst

Abstract

A significant problem that hinders the use of gas after gasification of biomass in combustion engines and turbines is the formation of tars, which may lead to their damage. The use of dielectric barrier discharge (DBD) plasma and nickel catalysts, containing 10% of the active phase in the combined plasma-catalytic system, allows to lower the process temperature and obtain high conversion rates of toluene as a model substance – up to 51%. These values are higher than while using the catalytic and plasma systems separately. The tests were carried out in a gas with a constant flow rate of 10 NL/h and consisting of H₂ (0.28), N₂ (0.48), CO (0.12), CO₂ (0.12). The power of the barrier discharge was 10 W, the voltage at the electrode was 10 kV. The used catalysts were stable in the process conditions during long-term tests. The calorific value of the obtained gas was higher than the initial one in the systems where the methanation reaction took place. **Trace amounts of C2 hydrocarbons were identified in the gas exiting the reactor.** The high temperature of the process, above 200°C, favored the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons.

Keywords: biomass, dielectric barrier discharge, DBD, nickel catalyst

Projekt Tracer i dobre praktyki w rekultywacji terenów po górnictwie węgla jako elementu transformacji energetycznej

1. Wstęp

Węgiel był głównym nośnikiem energii w Europie od połowy XIX i przez cały wiek XX. Z tego względu europejskie zagłębia węglowe, takie jak: Zagłębie Ruhry, Saary, Donieckie, Yorkshire czy Northumberland, a w Polsce: Górnśląskie i Dolnośląskie rozwinęły się do jednych z największych okręgów przemysłowych w Europie. Obecnie jeszcze w 41 regionach 12 państw członkowskich Unii Europejskiej wydobywa się węgiel. Zapewnia to zatrudnienie około 185 tys. osób oraz dodatkowe miejsca pracy w branżach pobocznych [1]. Biorąc pod uwagę trudności występujące w regionach węglowych związane z wprowadzeniem przez Unię Europejską tzw. „Europejskiego Zielonego Ładu”, konieczne jest zaproponowanie polityki energetycznej zgodnej z zadaniami związanymi z transformacją takich regionów [2]. Dlatego też wiele inicjatyw w UE odnosi się do wypracowania dobrych praktyk w zakresie transformacji regionów węglowych, których nieodłącznym elementem jest właściwe zagospodarowanie i rekultywacja terenów zdegradowanych i zdewastowanych w wyniku eksploatacji surowców energetycznych [3, 4]. Działania te mieszczą się między innymi w zakresie prac konsorcjum TRACER (*Transition in Coal Intensive Regions*), realizowanych ze środków Unii Europejskiej Horyzont 2020. W projekcie tym Katedra Ekologii i Hodowli Lasu Uniwersytetu Rolniczego i Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, jako ośrodki naukowe zajmujące się od wielu lat problematyką rekultywacji i rewitalizacji terenów poprzemysłowych znalazły się w gronie konsorcjum złożonego z 15 instytucji realizujących wieloaspektowe analizy gospodarcze, społeczne i środowiskowe związane ze zmianami zachodzącymi w wyniku transformacji energetycznej regionów węglowych w Europie.

W pracy przedstawiono przegląd literatury dotyczący dobrych praktyk w rekultywacji leśnej obiektów (hałd) po górnictwie węgla kamiennego w Polsce jako elementu transformacji regionów węglowych.

¹ b.wos@ur.krakow.pl, Katedra Ekologii i Hodowli Lasu, Wydział Leśny, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie.

² marek.pajak@urk.edu.pl, Katedra Ekologii i Hodowli Lasu, Wydział Leśny, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie.

³ chodak@agh.edu.pl, Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

⁴ justyna.likus@urk.edu.pl, Katedra Ekologii i Hodowli Lasu, Wydział Leśny, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie.

⁵ m.pietrzykowski@urk.edu.pl, Katedra Ekologii i Hodowli Lasu, Wydział Leśny, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie.

2. Europejski Zielony Ład i transformacja energetyczna

Głównym celem przyjętego przez Komisję Europejską Europejskiego Zielonego Ładu (*European Green Deal*) jest osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 roku. Dokument przedstawiający Europejski Zielony Ład zawiera plan działań umożliwiających bardziej efektywne wykorzystanie zasobów naturalnych dzięki przejściu na czystą gospodarkę o obiegu zamkniętym oraz przeciwdziałanie utracie różnorodności biologicznej i zmniejszenie poziomu zanieczyszczeń. Osiągnięcie celów zawartych w Europejskim Zielonym Ładzie będzie wymagało m.in. stworzenia sektora energetycznego bazującego w głównej mierze na źródłach odnawialnych, jednocześnie w szybkim tempie wycofując węgiel i obniżając emisyjność sektora gazu [5].

Biorąc pod uwagę te cele, niektóre z państw członkowskich UE znajdują się w niekorzystnej sytuacji ze względu na obecnie stosowane technologie i dostępne lokalne zasoby energii. W aspekcie transformacji energetycznej szczególne wyzwania stoją przed regionami węglowymi [6]. Regiony te potrzebują skutecznego planu działania, aby dokonać niezbędnego przejścia do bardziej zróżnicowanego rozwoju ekonomicznego i zrównoważonego systemu energetycznego, przy jednoczesnym zachowaniu spójności społeczeństw i regionów zależnych od produkcji węgla [7]. Wsparciem finansowym i technicznym dla nich ma być tzw. mechanizm sprawiedliwej transformacji. Dzięki niemu regiony węglowe otrzymają 100 mld euro w latach 2021-2027 [5]. Konieczne jest również stworzenie inicjatyw wspierających regiony węglowe oraz wypracowanie dobrych praktyk w zakresie transformacji takich regionów [8]. Jedną z takich inicjatyw jest projekt Tracer (*Transition in Coal Intensive Regions*).

3. Czym jest projekt TRACER

Celem programu TRACER jest wspieranie regionów europejskich, w których węgiel jest głównym źródłem energii, w celu opracowania (lub przeprojektowania) strategii w zakresie badań i innowacji, aby ułatwić przejście do zrównoważonego systemu energetycznego. W projekt zaangażowanych jest dziewięć europejskich regionów, z których siedem znajduje się w państwach członkowskich UE (Bułgaria, Czechy, Niemcy, Grecja, Polska, Rumunia, Wielka Brytania), a dwa w krajach poza UE (Serbia, Ukraina), które borykają się z podobnymi problemami co państwa członkowskie UE. Działania projektu obejmują mobilizację szerokiego grona zainteresowanych stron w dziewięciu regionach europejskich w celu omówienia i uzgodnienia wspólnej wizji i priorytetów w zakresie dekarbonizacji, identyfikację i analizę przykładów najlepszych praktyk udanych procesów transformacji w regionach intensywnie eksploatujących węgiel, ocenę wyzwań społecznych, środowiskowych i technologicznych, opracowanie wytycznych dotyczących inwestycji, wspieranie współpracy badawczo-innowacyjnej między regionami intensywnie wykorzystującymi węgiel (źródło: <https://tracer-h2020.eu/>).

Jednym z ważniejszych wyzwań transformacji regionów węglowych jest ponowne zagospodarowanie, rewitalizacja i rekultywacja terenów przemysłowych, w tym szczególnie po górnictwie surowców energetycznych (węgla brunatnego i kamiennego). Przywracanie lub nadawanie nowych funkcji terenom powstałym w wyniku działalności górniczej jest zagadnieniem ciągle aktualnym, szczególnie w epoce Antropocenu i zaistniałych współcześnie globalnych zmian stanu i funkcjonowania ekosystemów.

4. Dobre praktyki w rekultywacji leśnej jako element transformacji regionów węglowych

Jedną z najczęściej stosowanych w Polsce metod rekultywacji jest rekultywacja w kierunku leśnym [9]. W myśl obowiązujących w Polsce przepisów prawnych [10] rekultywacja gruntów polega na nadaniu lub przywróceniu gruntom zdegradowanym albo zdewastowanym wartości użytkowych lub przyrodniczych przez właściwe ukształtowanie rzeźby terenu, poprawienie właściwości fizycznych i chemicznych, uregulowanie stosunków wodnych, odtworzenie gleb, umocnienie skarp oraz odbudowanie lub zbudowanie niezbędnych dróg. Nowoczesne ujęcie rekultywacji rozszerza wyraźnie jej zakres poprzez stawianie sobie za cel nie tylko przywrócenie wartości użytkowych i przyrodniczych gruntów, ale również odtworzenie całych ekosystemów i krajobrazu [11]. W tym aspekcie rekultywacja leśna jest procesem odtworzenia warunków bioekologicznych, w których wymiana pomiędzy glebą i szatą roślinną zapewnia pozytywny przebieg sukcesji roślinnej i intensywny rozwój procesów glebotwórczych na terenach pogórnich [9]. Powyższa definicja nawiązuje do całej dziedziny zwanej „*Ecological Restoration*”. Restytucję ekosystemu nazywamy proces odtworzenia ekosystemu, który został zdegradowany lub całkowicie zniszczony [12].

Stosowanie rekultywacji leśnej w przypadku zwałowisk odpadów po górnictwie węgla kamiennego jest pożądane ze względu na ich położenie na terenach gęsto zaludnionych i zurbanizowanych. Wprowadzone zalesienia są urozmaiceniem krajobrazu oraz spełniają wiele funkcji ekosystemowych (ryc. 1). Wśród nich wymienić można funkcje: regulacyjne mikroklimatu i gospodarki wodnej, oczyszczanie powietrza z zanieczyszczeń, wpływ na sekwestrację węgla i przeciwdziałania ociepleniu klimatu oraz funkcje rekreacyjne dla lokalnej ludności [13]. Pomimo tego, że zwałowiska odpadów górniczych są elementem obcym w krajobrazie, powstające na nich ekosystemy są istotne z przyrodniczego punktu widzenia. Podczas zachodzącego tam procesu sukcesji pierwotnej notuje się często wiele rzadkich i zagrożonych gatunków fauny i flory [14].



Rycina 1. Zagospodarowanie hałdy odpadów górnictwa węgla kamiennego na Górnym Śląsku (fot. B. Bobrzyk)

Odpady składowane na zwałowiskach towarzyszące górnictwu węgla kamiennego to głównie łupki węglowe, ilowce, mułowce i piaskowce karbońskie z udziałem miazgi i pyłu węglowego oraz okruchami węgla [15, 16]. Z punktu widzenia wprowadzenia roślinności i zalesienia niekorzystnymi cechami składowanych odpadów jest duży udział szkieletu w postaci słabo zwiertzałych okruchów skalnych, punktowe, duże zakwaszenie w miejscach występowania siarczków (głównie pirytu), niskie właściwości sorpcyjne, zasolenie oraz czynność termiczna (zwały przepalone i nieprzepalone). Zwiertzelina łupków karbońskich charakteryzuje się niską zawartością wapnia, fosforu i azotu, a wysoką sodu, magnezu, potasu i siarki. Szczególnie zwały starsze charakteryzują się niekorzystnym kształtem, przez co ich strome ściany są podatne na procesy erozji wodnej (ryc. 2) [15, 17].



Rycina 2. Hałda górnictwa węgla kamiennego przed rekultywacją i wprowadzeniem roślinności (Szczygłowice, fot. M.Pietrzykowski)

Ze względu na niekorzystne właściwości odpadów składowanych na zwałowiskach stosuje się szereg zabiegów w ramach rekultywacji. W początkowej fazie rekultywacji konieczne jest właściwe ukształtowanie powierzchni terenu. W celu dostępności obiektu pogórniczego, nachylenie zboczy nie powinno przekraczać 1:4 (25%). Zaleca się pokrywanie powierzchni hałd przynajmniej 50 cm warstwą utworu potencjalnie żyzniejszego, a następnie wprowadzenie roślinności. Utwory potencjalnie żyzniejsze stanowią przede wszystkim żyzne warstwy nadkładu złoża takie jak np. wapienne gliny zwałowe oraz poziomy próchniczne gleby usuwanych podczas eksploatacji złoża. Pokrywanie powierzchni hałd utworami mineralnymi jest zadaniem praco- i kosztocłonnym. Dlatego z czasem zaistniała konieczność opracowania metod zmierzających do wytworzenia *in situ* substratów pełniących funkcje gleby na drodze polepszenia właściwości fizycznych i chemicznych składowanych odpadów, pozwalających docelowo na wprowadzenie roślinności drzewiastej [15, 16]. W tym celu stosuje się m.in. intensywne zabiegi agrotechniczne (głęboka orka i bronowanie), nawożenie mineralne NPK, nawożenie zielone poprzez cykl uprawy roślin motylkowych (lubinu żółtego, nostrzyka białego i żółtego), dodatki gleby urodzajnej do dołków sadzeniowych, hydroobsiew mieszkanką traw i motylkowych z osadami ściekowymi [9, 15-17]. Po przeprowadzeniu tych zabiegów wprowadza się roślinność drzewiastą (ryc. 3) [9].



Rycina 3. Zrekultywowane składowisko odpadów górnictwa węgla kamiennego wraz z krajobrazem zaprojektowanym przez prof. Bogdanowskiego (Bieruń Nowy, fot. M. Pietrzykowski)

Początkowo przy zalesianiu obiektów pogórnicznych preferowano gatunki drzew pionierskich (tzw. metoda gatunków pionierskich) nawiązującej do procesu sukcesji i lasu przedplonowego. W metodzie tej wykorzystywano przede wszystkim: sosnę zwyczajną (*Pinus sylvestris* L.), brzozę brodawkowatą (*Betula pendula* Roth), olszę czarną (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) oraz liczne gatunki introdukowane: robinie akacjową (*Robinia pseudoacacia* L.), dąb czerwony (*Quercus rubra* L.) i kultywary topól (*Populus* spp.) [9, 18]. Metoda ta okazała się skuteczna, a szczególnie dobre rezultaty uzyskano na substratach ubogich w składniki pokarmowe. Wprowadzane zalesienia gatunków pionierskich traktowano jako przedplon, który inicjuje proces akumulacji materii organicznej oraz wpływa na poprawę właściwości fizykochemicznych gleb pogórnicznych przed planowaną w przyszłości przebudową składu gatunkowego drzewostanów i wprowadzeniem bardziej wymagających gatunków docelowych (np. dębów). W zależności od kondycji zalesień przebudowa może mieć charakter całkowity lub też stopniowy, postępujący za rozpadającymi się pionierskimi zalesieniami. Czas rozpoczęcia przebudowy zależy m.in. od właściwości ekologicznych wprowadzanych gatunków i warunków siedliskowych, w tym głównie substratu występującego na danym terenie. Często zaleca się, aby ten proces rozpoczął się już w wieku 20-25 lat [9]. Zalecenia tej metody posłużyły do zalesienia licznych zwałowisk odpadów po wydobyciu węgla kamiennego na Górnym Śląsku [9]. Chociaż przeżywalność, jak i początkowy wzrost gatunków pionierskich na rekultywowanych obiektach pogórnicznych są wystarczające do zapewnienia rozwoju ekosystemu leśnego, bardzo często nie wykorzystują one potencjału siedlisk tworzących się na zwałowiskach. Dodatkowo konieczność przebudowy drzewostanów wpływa na zwiększenie kosztów ekonomicznych tej metody. Wieloletnie doświadczenia wskazują również, że należy unikać wprowadzania słabo przystosowanych, niestabilnych monokultur drzew iglastych. Złe doświadczenia wprowadzanych monokultur gatunków iglastych podawano również z innych krajów, np. z Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego w Niemczech. W tych

warunkach wystąpiło silne porażenie litych średniowiekowych drzewostanów sosnowych wprowadzonych na zwałowiskach górnictwa węgla brunatnego przez korzeniowca wieloletniego (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.) [19]. Ponadto wyniki wieloletnich badań nad optymalizacją metod zalesienia skłaniają do wniosku, że działania realizowane w fazie technicznej rekultywacji (szczególnie dotyczące formowania wierzchniej warstwy zalesianych obiektów pogórnicznych) stwarzają bardzo różne warunki od optymalnych po skrajnie niekorzystne dla wprowadzonej roślinności. Przesłanki te skłoniły do poszukiwania innych metod zalesiania terenów pogórnicznych [9].

Inną metodą zalesiania terenów po górnictwie węgla jest tzw. metoda gatunków głównych [20, 21]. Polega ona na zakładaniu upraw leśnych złożonych niemal wyłącznie z gatunków docelowych (późnosukcesyjnych) takich jak: dąb szypułkowy (*Quercus robur* L.), dąb bezszypułkowy (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.), buk zwyczajny (*Fagus sylvatica* L.), jesion wyniosły (*Fraxinus excelsior* L.), klon jawor (*Acer pseudoplatanus* L.) i klon zwyczajny (*Acer platanoides* L.). Metoda ta stosowana była przede wszystkim przy zalesianiu zwałowisk w Konińskim Zagłębiu Węgla Brunatnego [21]. Założenia tej metody posłużyły również do zalesienia nielicznych zwałowisk po górnictwie węgla kamiennego na Górnym Śląsku [15]. Ze względu jednak na fakt dużych wymagań ekologicznych gatunków późnosukcesyjnych niezbędne są w tej metodzie intensywne zabiegi agrotechniczne i duże dawki nawożenia mineralnego oraz występowanie potencjalnie żyznych utworów budujących powłokę rekultywowanego obiektu pogórnicznego [9, 20]. Po zaprzestaniu intensywnego nawożenia mineralnego wprowadzone drzewostany według tej metody zaczęły słabo przyrastać i rozpadać się. Dlatego metoda ta ma ograniczone zastosowanie [9].

Z tych względów opracowano tzw. biodynamiczną metodę zalesiania terenów pogórnicznych [9]. Jest to metoda pośrednia pomiędzy metodą gatunków pionierskich i głównych. Wprowadzane gatunki główne wspomagane są we wzroście przez tzw. gatunki fitomeliorycyjne, które bardzo często wchodzi w symbiozę z bakteriami brodawkowatymi wiążącymi azot atmosferyczny. W Polsce najczęściej wykorzystywanymi gatunkami fitomeliorycyjnymi są olsza: czarna i szara oraz doświadczalnie olsza zielona [22, 23]. Gatunki fitomeliorycyjne poprzez intensyfikację akumulacji azotu i glebowej materii organicznej odgrywają najważniejszą rolę w pierwszym etapie rozwoju drzewostanów. Należy je wprowadzać w zmieszaniu jednostkowym lub rzędowym w takich sposób, aby oddziaływały równomiernie na cały teren objęty rekultywacją i wprowadzone gatunki główne [24]. Celem biodynamicznej metody zalesiania jest możliwie jak najszybsze uzyskanie zwarcia koron drzew jako czynnika kształtującego mikroklimat oraz stworzenie użytecznych i stabilnych, bliskich naturze, mieszanych (rodzimych) ekosystemów leśnych, zgodnych z ekologicznym podejściem do rekultywacji. Zaletą tej metody jest możliwość uzyskania docelowego składu gatunkowego drzewostanu już w pierwszym pokoleniu oraz brak konieczności przeprowadzania szybkiej przebudowy jak w przypadku stosowania metody gatunków pionierskich (ryc. 4). Jest to obecnie najczęściej realizowana metoda zalesień terenów pogórnicznych w Polsce, której udane rezultaty możemy obserwować na zwałowiskach górnictwa węgla kamiennego na Górnym Śląsku oraz zwałowiskach górnictwa węgla brunatnego w Zagłębiu Adamowskim, Bełchatowskim czy Turosszowskim [9].



Rycina 4. Zrekultywowana w kierunku leśnym hałda odpadów węgla kamiennego na Górnym Śląsku (fot. M.Pietrzykowski)

Na obiektach pogórnicznych górnictwa węglowego pożądane jest również włączenie do odbudowy ekosystemu leśnego roślinności ze spontanicznej sukcesji [25, 26]. Zbiorowiska z sukcesji wpływają na zwiększenie bioróżnorodności i stabilności odtwarzanego ekosystemu leśnego [27, 28]. Dodatkowo, wykorzystanie zbiorowisk z sukcesji obniża koszty rekultywacji [28]. Słabą stroną tej metody jest często słaba jakość powstających drzewostanów oraz wolniejsze tempo odtwarzania ekosystemu leśnego [29]. Z tych względów, takie zbiorowiska należy włączać w przypadku stwierdzenia dużego stopnia pokrycia powierzchni przez wkraczające gatunki drzewiaste w sprzyjających warunkach siedliskowych. Pozostałe powierzchnie należy uzupełniać poprzez zalesienia (ryc. 5).



Rycina 5. Włączenie roślinności ze spontanicznej sukcesji na hałdach węgla kamiennego wpływa na zwiększenie bioróżnorodności i stabilności odtwarzanego ekosystemu leśnego (hałda Sośnica-Makoszowy; fot. B.Woś).

Jak już wspomniano, nowoczesna rekultywacja stawia sobie za cel odtworzenie całego ekosystemu i krajobrazu [11]. W celu zwiększenia bioróżnorodności i urozmaicenia krajobrazu, możliwe odtworzenie enklaw ekosystemów nieleśnych, np. łąkowych (ryc. 6) [30]. W celu stworzenia siedlisk dla płazów możliwe jest ukształtowanie niewielkich oczek wodnych i ekosystemów podmokłych [31], a gadów stosów kamiennych [30]. Z kolei, dla ułatwienia zasiedlania przez ptaki i ssaki pożądane jest zakładanie remiz złożonych z krzewów i gatunków drzew owocowych [32].



Ryc. 6. Enklawy ekosystemów łąkowych są istotnym elementem wzbogacającym walory krajobrazowe i bioróżnorodność odtwarzanych ekosystemów na hałdach węgla kamiennego (hałda Sośnica-Makoszowy; fot. B.Woś)

5. Podsumowanie

- Jednym z wyzwań transformacji regionów węglowych jest ponowne zagospodarowanie i rekultywacja terenów zdegradowanych lub zdewastowanych działalnością górnictwem. Rekultywacja leśna jest dobrym sposobem przywrócenia wartości użytkowych i przyrodniczych terenów pogórnictwa ze względu na różnorodne funkcje ekosystemowe spełniane przez zalesienia. Jest to szczególnie istotne w gęsto zaludnionych i zurbanizowanych regionach przemysłowych;
- W rekultywacji leśnej terenów pogórnictwa najszerzej powinna być stosowana biodynamiczna metoda zalesień, w której decydującą rolę odgrywają gatunki fitomelioracyjne zmieszane w odpowiedniej proporcji z gatunkami głównymi. Stosowanie tej metody przyczynia się do odtwarzania zróżnicowanych, użytecznych i stabilnych ekosystemów leśnych. Przy zastosowaniu tej metody możliwe

jest uzyskanie docelowego drzewostanu już w pierwszym pokoleniu, bez konieczności przebudowy;

- W celu zwiększenia bioróżnorodności i walorów krajobrazowych zaleca się włączanie do zalesień fragmentów pochodzących z naturalnej sukcesji, odtwarzanie siedlisk sprzyjających zasiedlaniu terenów pogórnicznych przez różne gatunki fauny oraz niewielkich enklaw innych typów ekosystemów (np. łąkowych).

Podziękowania

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 836819. The sole responsibility for the content of this report lies with the authors. It does not necessarily reflect the opinion of the European Union. Neither the INEA nor the European Commission are responsible for any use that may be made of the information contained therein.

Literatura

1. Alves Dias P., Kanellopoulos K., Medarac H., Kapetaki Z., Miranda-Barbosa E., Shortall R., Czako V., Telsnig T., Vazquez-Hernandez C., Lacal Arántegui R., Nijs W., Gonzalez Aparicio I., Trombetti M., Mandras G., Peteves E., Tzimas E., *EU coal regions: opportunities and challenges ahead*, EUR 29292 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg 2018.
2. Claeys G., Tagliapietra S., Zachmann G., *How to make the European Green Deal work*, Policy Contribution, 14, 2019.
3. Marot N., Harfst J., *Post-mining landscapes and their endogenous development potential for small- and medium-sized towns: Examples from Central Europe*, *The Extractive Industries and Society*, 8, 2021, s.168-175.
4. Schulz S., Schwartzkopff J., *European Lignite-Mining Regions in Transition. Challenges in the Czech Republic and Germany*, Prague Office of the Heinrich-Böll-Stiftung and Deutsche Umwelthilfe, 2018.
5. *Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Europejski Zielony Ład*, Komisja Europejska, Bruksela 2019.
6. Egenhofer C., Ferrer J.N., Kustova I., Popov J., *The time for rapid redevelopment of coal regions is now*, *Policy Insights*, 13, 2020, s. 1-8.
7. Kustova I., Egenhofer C., Ferrer J.N., Popov J., *From coal to low carbon. Coal region development opportunities under EU Recovery programmes*, CEPS Policy Insights, Bruksela 2021.
8. Heyen D.A., Menzemer L., Wolff F., Beznea A., William R., *Just transition in the context of EU environmental policy and the European Green Deal*, Oeko-Institut, Technical Paper, 2020.
9. Krzaklewski W., *Podstawy rekultywacji leśnej*, Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2017.
10. *Ustawa z dnia 3 lutego 1995 r. o ochronie gruntów rolnych i leśnych*, Dz.U. 1995 nr 16 poz. 78.
11. Pietrzykowski M., *Ecological Engineering and Restoration of Mine Ecosystems*, [w:] Prasad M.N.V. (red.), *Handbook of ecological and ecosystem engineering*, John Wiley & Sons Ltd, 2021.
12. Holl K.D., *Primer of ecological restoration*, Island Press, 2020.
13. Krieger D.J., *Economic value of forest ecosystem services: a review*, The Wilderness Society, Washington 2001.

14. Prach K., *Vegetation development in Central European Coal mining sites*, [w:] Frouz J. (red.), *Soil Biota and ecosystem development in post mining sites*, CRP Press, Taylor & Francis Group, 2013.
15. Strzyszczyński Z., Harabin Z., *Rekultywacja i biologiczne zagospodarowanie odpadów górnictwa węgla kamiennego ze szczególnym uwzględnieniem centralnych zwalowisk*, Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii nauk, Zabrze 2004.
16. Pietrzykowski M., Krzaklewski W., *Chapter 27 – Reclamation of mine lands in Poland*, [w:] Prasad M.N.V., de Campos Favas, Maiti S.K. (red.), *Bio-Geotechnologies for mine site rehabilitation*, Elsevier Inc., 2018.
17. Pietrzykowski M., Krzaklewski W., Pająk M., Socha J., Ochał W., *Analiza i optymalizacja metod klasyfikacji siedlisk i kryteriów oceny rekultywacji leśnej na wybranych terenach pogórnich w Polsce*, Pietrzykowski M. (red.), Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2010.
18. Greszta J., Morawski S., *Rekultywacja nieużytków przemysłowych*, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa, 1972.
19. Knoche D., Ertle C., *Infection of Scots pine afforestations (Pinus sylvestris L.) by Annosum root rot (Heterobasidion annosum (Fr.) Bref.) in the Eastern German Lignite District*, Civil and Environmental Engineering Reports, 4, 2010, s. 35-45.
20. Bender J., *Osiągnięcia w rekultywacji gruntów pogórnich w górnictwie węgla brunatnego*, II Krajowe Sympozjum „Ochrona powierzchni przed szkodami górnictwami”, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Górnictwa, Katowice 1985, s. 301-310.
21. Gilewska M., *Rekultywacja leśna terenów pogórnich konińsko-Tureckiego Zagłębia Węgla Brunatnego*, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Zielonogórskiego, Inżynieria Środowiska, 17, 2010, s. 94-101.
22. Pietrzykowski M., Woś B., Pająk M., Wanic T., Krzaklewski W., Chodak M., *Reclamation of a lignite combustion waste disposal site with alders (Alnus sp.): assessment of tree growth and nutrient status within 10 years of the experiment*, Environmental Science and Pollution Research, 25, 2018, s. 17091-17099.
23. Chodak M., Sroka K., Woś B., Pietrzykowski M., *Effect of green alder (Alnus viridis) and black alder (Alnus glutinosa) on chemical and microbial properties of sandy mine soils*, Geoderma, 356, 2019, s. 113924.
24. Krzaklewski W., Pająk M., Pietrzykowski M., Wójcik J., *Rozwój metod rekultywacji leśnej zwalowiska zewnętrznego Pola Eksploatacyjnego Belchatów*, [w:] Sierpień M. (red.), *Węgiel brunatny gwarantem bezpieczeństwa energetycznego*. Agencja Wydawniczo-Poligraficzna ART-TEKST, 2016.
25. Stolarska M., Stolarski R., Harabin Z., Krzaklewski W., Pietrzykowski M., *Sosna zwyczajna (Pinus sylvestris L.) z sukcesji na centralnym zwalowisku odpadów górnictwa węgla kamiennego*, Roczniki Gleboznawcze, 62, 2006, s. 183-191.
26. Pietrzykowski M., *Reclamation and reconstruction of terrestrial ecosystems on mine sites – ecological effectiveness assessment*, [w:] Sivakumar S., Sharma U.C., Prasad R. (red.), *Energy Science and Technology 2, Coal Energy*. Studium Press LLC, New Dehli, Houston 2015, s. 121-151.
27. Prach K., Lencová K., Řehouňková K., Dvořáková H., Jírová A., Konvalinková P., Mudrák O., Novák J., Trnková R., *Spontaneous vegetation succession at different central European mining sites: a comparison across seres*, Environmental Science and Pollution Research, 20, 2013, s. 7680-7685.
28. Prach K., Pyšek P., *Using spontaneous succession for restoration of human-disturbed habitats: Experience from Central Europe*, Ecological Engineering, 17, 2001, s. 55-62.
29. Pietrzykowski M., *Soil and plant communities development and ecological effectiveness of reclamation on a sand mine cast*, Journal of Forest Science, 54, 2008, s. 554-565.

30. Hendrychová M., Svobodova K., Kabrna M., *Mine reclamation planning and management: Integrating natural habitats into post-mining land use*, Resources Policy 69, 2020, s. 101882.
31. Doležalová J., Vojar J., Smolová D., Solský M., Kopecký O., *Technical reclamation and spontaneous succession produce different water habitats: A case study from Czech post-mining sites*, Ecological Engineering, 43, 2012, s. 5-12.
32. Stiles R.M., Swan J.W., Klemish J.L., Lannoo M.J., *Amphibian habitat creation on postindustrial landscapes: a case study in a reclaimed coal strip-mine area*, Canadian Journal of Zoology, 1, 2017.
33. Borucka A., Mikosz B., *Polskie poligony w aspekcie realizowanych działań militarnych i rekultywacji terenów popolygonowych*, Leśne Prace Badawcze, 73, 2012, s. 159-165.

Projekt Tracer i dobre praktyki w rekultywacji terenów po górnictwie węgla jako element transformacji energetycznej

Streszczenie

Węgiel jest obecnie wydobywany w 41 regionach dwunastu krajów UE, co czyni go wciąż ważnym paliwem kopalnym, a górnictwo znaczącą gałęzią gospodarki w wielu krajach. Projekt Tracer wspiera dziewięć europejskich regionów, w których węgiel jest głównym źródłem energii. Celem projektu jest wypracowanie strategii badań i rozwoju regionów węglowych w celu ułatwienia transformacji w kierunku zrównoważonego systemu energetycznego. Jednym z wyzwań transformacji energetycznej jest właściwe zagospodarowanie i rekultywacja terenów zdegradowanych i zdewastowanych działalnością górniczą. Na terenach tych najczęściej stosowanym rodzajem rekultywacji jest rekultywacja leśna. W pracy przedstawiono przykłady rozwiązań i dobrych praktyk w zakresie rekultywacji leśnej terenów po górnictwie węgla kamiennego. Pokreślono korzyści płynące z wykorzystania tzw. gatunków fitomelioracyjnych do zalesień, przyczyniających się do odtwarzania stabilnych gleb i zrównoważonych ekosystemów leśnych.

Słowa kluczowe: Transformacja energetyczna, rekultywacja, węgiel, tereny pogórnice

Tracer project and best practices in reclamation of areas after coal mining as an element of energy transition

Abstract

Coal is currently mined in 41 regions across 12 EU countries, making it the most abundant fossil fuel in the EU and a significant source of economic activity. TRACER supports nine coal-intensive regions around Europe to design (or redesign) their Research and Innovation (R&I) strategies to facilitate their transition towards a sustainable energy system. One of the challenges of the energy transition is the proper management and reclamation of areas after energy resources mining. One of the most frequently used types of reclamation is reclamation to forestry. The paper presents examples of solutions and good practices in the field of reclamation of areas after hard coal mining. The benefits of using the so-called phytomelioration species for afforestation, contributing to the restoration of stable soils and sustainable forest ecosystems.

Keywords: Energy transition, reclamation, coal, post-mining sites

Maksymalizacja mocy otworów geotermalnych z wykorzystaniem innowacyjnych receptur zaczynów uszczelniających

1. Wprowadzenie

W związku z rosnącymi cenami i malejącymi rezerwami konwencjonalnych źródeł energii, coraz dokładniej bada się alternatywne rozwiązania, które mogłyby stanowić ich substytut. Równie istotną jest potrzeba chronienia środowiska naturalnego.

Jednym z tzw. odnawialnych źródeł jest energia geotermalna, która jest ciepłem pochodzącym z wnętrza Ziemi, zgromadzonym w skałach, a także w płynach wypełniających pory i szczeliny skalne. Wraz z coraz częściej poruszaną w artykułach naukowych tematyką pozyskiwania energii geotermalnej, dyskutuje się również maksymalizację strumienia i ilości pozyskiwanej energii, czyli wzrost efektywności energetycznej. Jest to szczególnie ważny temat ze względu na opłacalność inwestycji, ponieważ znaczną część kosztów (najczęściej 40-60% nakładów inwestycyjnych ciepłowni geotermalnej) przeznaczane jest na wiercenia. Najczęściej podejmowanym tematem jest intensyfikacja wydajności otworów przez zwiększanie strumienia objętości wydobywanej wody geotermalnej. Jednym z czynników zwiększających moc otworów geotermalnych może być także właściwie dobrany zaczyn uszczelniający. Obniżenie przewodności cieplnej stwardniałych zaczynów uszczelniających otwory wiertnicze zredukuje przesyłowe straty ciepła podczas przepływu wody od warstwy geotermalnej do głowicy otworu na powierzchni. Straty te wynikają z radialnej różnicy temperatury wody geotermalnej i temperatury otaczającego górotworu.

2. Zaczyny uszczelniające

Zaczyn uszczelniający w procesie wiercenia pełni szereg istotnych funkcji. Do najważniejszej z nich zalicza się uszczelnienie przestrzeni pierścieniowej, czyli przestrzeni między ścianą otworu a rurami okładzinowymi. Zadaniem tych rur jest m.in. zabezpieczenie ściany otworu przed płuczką wiertniczą podczas wiercenia, utrzymaniem wyrobiska przed zaciskaniem się skał górotworu oraz przed dopływem wód podziemnych. Oprócz tego zaczyn cementowy (zaczyn uszczelniający) stosuje się w celu izolacji, stabilizacji oraz wzmocnienia ośrodka geologicznego, w którym przeprowadzane są wiercenia [1]. Dobrze dobrany zaczyn cementowy po stwardnieniu cechuje się odpornością na działanie korozyjne mocno zmineralizowanych agresywnych wód

¹ sliwa@agh.edu.pl, Laboratorium Geoenergetyki AGH, Katedra Wiertnictwa i Geoinżynierii; Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu; AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, <https://geotermia.agh.edu.pl/> – autor do korespondencji.

² ciepielowska@agh.edu.pl, Laboratorium Geoenergetyki AGH, Katedra Wiertnictwa i Geoinżynierii; Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu; AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, <https://geotermia.agh.edu.pl/>.

³ bulinski@agh.edu.pl, Laboratorium Geoenergetyki AGH, Katedra Wiertnictwa i Geoinżynierii; Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu; AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, <https://geotermia.agh.edu.pl/>.

geotermalnych, małą przepuszczalnością wody i gazu oraz odpowiednią wytrzymałością mechaniczną. Powinien charakteryzować się też niedużym skurczem (zmniejszeniem objętości zaczynu podczas jego wiązania i twardnienia) [2].

Najważniejszym składnikiem zaczynu uszczelniającego jest spoiwo hydrauliczne. Rolę spoiwa mogą pełnić np. mielone granulowane żużle wielkopiecowe, jednak najczęściej spoiwo stanowią cementy, z których można wyróżnić dwa następujące rodzaje [1]:

- cementy wiertnicze;
- cementy powszechnego użytku.

Cementy wiertnicze są to specjalne cementy dedykowane przemysłowi wiertniczemu. Cementy tego typu najczęściej stosowane są w otworach eksploatacyjnych [1]. Amerykański Instytut Naftowy (API – *American Petroleum Institute*) dzieli cementy wiertnicze na:

a) gatunki

- (*Ordinary*) – zwykłe;
- MSR (ang. *Medium Sulphate Resistant*) – średnio odporne na siarczany;
- HSR (ang. *High Sulphate Resistant*) – odporne na siarczany;

b) klasy

- A – przeznaczone do płytkich otworów, czyli do głębokości 1 830 m, wytwarzane wyłącznie z gatunku O;
- B – przeznaczone do płytkich otworów, czyli do głębokości 1 830 m, produkowany z gatunku MSR oraz HSR;
- C – przeznaczone do płytkich otworów, czyli do głębokości 1 830 m, cement szybkotwardniejący o gatunku O, MSR i HSR;
- D – odporne na siarczany, z opóźnionym czasem wiązania, stosowane w interwale 1 830 – 3 050 m;
- E – odporne na siarczany, z opóźnionym czasem wiązania, stosowane w interwale 3 050 – 4 270 m;
- F – odporne na siarczany, z opóźnionym czasem wiązania, stosowane w interwale 4 270 – 4 880 m;
- G – odporne na siarczany, o małej zawartości wodnego wapna, stosowane na różnych głębokościach;
- H – odporne na siarczany, o małej zawartości wodnego wapna, stosowane na różnych głębokościach.

Cementy klasy G i H różnią się od siebie współczynnikiem wodno-cementowym. Ponadto cement klasy H jest cementem grubiej mielonym [1].

Współczynnik wodno-cementowy (w/c) to stosunek masy wody do masy cementu. Współczynnik w/c znacząco wpływa na parametry zaczynów uszczelniających.

Według Rosyjskiej Normy GOST-1581-63 stosowane cementy tzw. tamponażowe, charakteryzujące się niewielkim czasem wiązania w wysokiej temperaturze, dzielą się na następujące gatunki:

- cementy do otworów zimnych, w których temperatura nie przekracza 22°C;
- cementy do otworów gorących, w których temperatura nie przekracza 75°C;
- cementy do otworów bardzo gorących, w których temperatura dna wynosi 100-120°C;

- cementy do otworów nadzwyczaj gorących, w których temperatura przekracza 120°C.

Według normy PN-EN-197-1 spośród cementów powszechnego użytku wyszczególnić można:

- a) CEM I – cementy portlandzkie – najpopularniejsze rodzaje cementów, wyróżniające się dużą wytrzymałością oraz krótkim czasem wiązania, podstawą tego rodzaju cementów jest klinkier cementu portlandzkiego (od 95 do nawet 100%) [1];
- b) CEM II – cementy portlandzkie wieloskładnikowe – inaczej cementy mieszane, to cementy portlandzkie, których cechą charakterystyczną jest zawartość dużej ilości dodatków, wpływających na zwiększenie odporności na korozję oraz obniżenie ceny wytworzenia cementu [1], CEM II dzieli się na:
 - cement portlandzki żuźlowy;
 - cement portlandzki krzemionkowy;
 - cement portlandzki pucolanowy;
 - cement portlandzki popiołowy;
 - cement portlandzki łupkowy;
 - cement portlandzki wapienny;
 - cement portlandzki żuźlowo-popiołowy;
- c) CEM III – cement hutniczy – cement portlandzki z dodatkiem zmielnego granulowanego żuźla wielkopieczowego, wyróżnia się dużą odpornością na działanie czynników agresywnych [1];
- d) CEM IV – cement pucolanowy – w odróżnieniu do cementu portlandzkiego pucolanowego zawiera w sobie jeszcze więcej pucolany, czyli czystej krzemionki w postaci bardzo drobnego popiołu, charakteryzuje się wolniejszym czasem twardnienia oraz wysoką odpornością na niekorzystne działanie soli siarczanowych [1];
- e) CEM V – cement wieloskładnikowy – to najnowocześniejszy rodzaj cementów powszechnego użytku. CEM V występuje w dwóch rodzajach [1]:
 - CEM V/A;
 - CEM V/B.

W wiertnictwie kładzie się duży nacisk na opracowywanie nowych receptur zaczynów uszczelniających. Odpowiednio dopasowany do warunków zaczyn ma niebagatelny wpływ na efektywność przeprowadzanych prac. Właściwości zaczynów cementowych (w stanie płynnym i po związaniu) reguluje się wprowadzaniem tzw. domieszek lub dodatków.

Domieszki to produkty chemiczne, których zadaniem jest zmiana parametrów zaczynu cementowego. Domieszkami nazywa się takie materiały, które są dodawane do zaczynu w ilości mniejszej niż 5% masy suchego cementu. Domieszki stosuje się głównie w celu redukcji wody w zaczynie uszczelniającym oraz do regulacji czasu wiązania [1].

Dodatki to materiały o takiej samej sypkości co suchy cement, dodawane do zaczynu w ilości większej niż 5% masy suchego cementu. Dodatki stosuje się przede wszystkim do regulacji gęstości zaczynu, obniżenia jego filtracji, jak również do poprawy struktury i tekstury stwardniałych zaczynów [1].

3. Energia geotermalna i otwory geotermalne

Energia geotermalna to ciepło skumulowane w skałach i wodach podziemnych. Energia ta pochodzi zarówno z okresu powstawania Ziemi (szacowana na 20%) oraz powstaje w wyniku rozpadu niektórych pierwiastków promieniotwórczych (80%) takich jak uran, tor czy potas [3]. Jest to, obok energii atomowej i energii pływów, jedyna postać energii, która nie pochodzi od promieniowania Słońca. Energię geotermalną można pozyskiwać z:

- górotworu;
- gorących suchych skał (ang. *HDR od Hot Dry Rock*);
- wód złożowych.

Do pozyskiwania energii geotermalnej stosuje się dwa rodzaje otworów geotermalnych (poza naturalnymi ujęciami):

- otworowe wymienniki ciepła;
- odwierty geotermalne.

Otworowe wymienniki ciepła (ang. *BHE, Borehole Heat Exchangers*) pozyskują niskotemperaturowe ciepło z górotworu, które kierowane jest do geotermalnych pomp ciepła. Transfer energii cieplnej jest możliwy dzięki tzw. nośnikowi ciepła, który przepływając w rurach otworowego wymiennika ciepła pobiera energię niskotemperaturową z górotworu. Otworowe wymienniki ciepła mogą osiągać do 300 m głębokości, jednak ze względów prawnych otworowe wymienniki ciepła wierce się z reguły do 100 m. W takim przypadku, aby możliwe było pobranie jak największej ilości ciepła, zaczyn uszczelniający powinien charakteryzować się wysoką przewodnością cieplną. Warto także dodać, że ciepło można pobierać również z otworów głębszych. Takie otwory noszą nazwę głębokich otworowych wymienników ciepła (ang. *DBHE, Deep Borehole Heat Exchangers*) i mogą mieć głębokość nawet kilku kilometrów [4]. Głębokie otworowe wymienniki ciepła mogą dostarczać ciepło o temperaturze, która umożliwia ogrzewanie pasywne (nie jest konieczne używanie geotermalnych pomp ciepła). Jednak wtedy ilość tego ciepła jest zdecydowanie mniejsza, niż w przypadku zastosowania pomp ciepła i obniżenia temperatury nośnika ciepła. Pod względem konstrukcyjnym głębokie otworowe wymienniki ciepła są zbliżone do otworów geotermalnych, jednak istotnym czynnikiem, który powinien różnić głębokie otworowe wymienniki ciepła i otwory geotermalne jest zaczyn uszczelniający.

HDR (ang. *Hot Dry Rocks* – gorące suche skały) zwana także *EGS* (ang. *Enhanced Geothermal System* – ulepszony system geotermalny) jest to stosunkowa nowa technologia, która polega na wytworzeniu, za pomocą szczelinowania hydraulicznego lub za pomocą materiałów wybuchowych, szczelin w gorących suchych skałach. Do powstałych szczeliny wtłacza się wodę, która ogrzewa się od zakumulowanego w skałach ciepła. Gdy woda osiągnie spodziewaną temperaturę, jest następnie wydobywana na powierzchnię i kierowana do elektrowni. Para czynnika roboczego w elektrowni porusza turbiny i generator, wytwarzając prąd elektryczny. Natomiast schłodzona woda jest zatłaczana do złoża (wytworzonych szczelin) przez otwory chłonne. Proces jest powtarzany w cyklu zamkniętym, choć często zdarzają się dopływy wód lub utraty części zatłaczanego strumienia. Gorące suche skały mogą zalegać głęboko, stąd, aby wydobywana woda nie straciła swojej temperatury (ciepła), powinno się stosować jak najbardziej izolacyjną konstrukcję otworów. Elementem tej konstrukcji są zaczyny

uszczelniające o obniżonej przewodności cieplnej, podobnie jak powinno to mieć miejsce w wydobywczym odwiertach geotermalnych.

Dzięki odwiertom geotermalnym możliwe jest pozyskanie geotermalnych wód głębszych. Odwierty geotermalne mogą pracować w systemie jednootworowym, w systemie dubletu geotermalnego lub w systemie wielootworowym. Po wydobyciu na powierzchnię, woda geotermalna kierowana jest do wymiennika ciepła, gdzie oddaje swoje ciepło. Po oddaniu ciepła woda w systemie jednootworowym może być wykorzystywana do celów przemysłowych, pitnych, rolniczych lub być zrzucana do rzeki. W systemie dubletu geotermalnego oraz w systemie wielootworowym woda jest zatłaczana z powrotem do złoża za pomocą odwiertu chłonnego (*dublet geotermalny*) lub odwiertów chłonnych (system wielootworowy). Systemy geotermalne są dużo bardziej efektywne od otworowych wymienników ciepła, jednak są również zdecydowanie droższe, z uwagi na znacznie większą głębokość wiercenia.

Jednym z istotnych problemów, nie uwzględnianych przez projektantów otworów, szczególnie w przypadku głębokich otworów, jest schładzanie się wody geotermalnej w trakcie wydobywania jej na powierzchnię. Dlatego też w otworach eksploatujących wodę geotermalną zaczyn cementowy powinien pełnić rolę izolacyjną. Im większe właściwości izolacyjne ma zaczyn uszczelniający, tym większą moc osiąga wydobywczy otwór geotermalny. Opracowanie receptury zaczynów o takiej charakterystyce jest wyzwaniem dla naukowców i inżynierów z całego świata, zajmujących się tematyką geotermalną i wiertnictwem. Opracowanie optymalnych receptur znacząco poprawi moce ciepłowni i elektrowni geotermalnych.

4. Przewodnictwo cieplne stwardniałego zaczynu uszczelniającego

Przewodnictwo cieplne (inaczej przewodność cieplna lub współczynnik przewodności cieplnej) to właściwość fizyczna, która określa zdolność danej substancji do przekazywania energii wewnętrznej. W ostatnich latach w literaturze naukowej coraz częściej poruszany jest koncept doboru właściwości termicznych (w szczególności współczynnika przewodności cieplnej) stwardniałego zaczynu uszczelniającego [5, 6] w celu maksymalizacji mocy otworów geotermalnych. Popularność tej tematyki związana jest ze zwiększaniem potencjału ekonomicznego inwestycji geotermalnych oraz z pojawianiem się coraz głębszych systemów geotermalnych ze względu na ograniczone rozmieszczenie geograficzne najkorzystniejszych zasobów.

Jedną z metod dyskutowanych w literaturze [7] jest zastosowanie zaczynu o podwyższonej przewodności cieplnej w całym otworze w celu pozyskania jak największej ilości ciepła, w typowych otworowych wymiennikach ciepła. W przypadku tych głębokich równocześnie zastosowanie zaczynu o obniżonej przewodności cieplnej w górnej partii otworu w celu ograniczenia strat ciepła umożliwi bardziej korzystną eksploatację (np. otwór w Akwizgranie, RWTH).

4.1. Składniki receptur obniżające przewodność cieplną

W celu identyfikacji składników receptur zaczynów uszczelniających, które spowodują obniżenie współczynnika przewodności cieplnej λ , warto zwrócić się do literatury naukowej z zakresu budownictwa, gdzie problem izolacji termicznej jest badany od dawna. Wśród opisywanych badań znajdują się:

- beton lekki (ang. LWC – *Lightweight Concrete*) – to beton, którego ciężar objętościowy waha się w granicy 800-2000 kg/m³. Wykonany z cementu, wody, piasku oraz środków pianotwórczych. Istnieją także unowocześnione receptury, gdzie tradycyjne kruszywo zastąpione jest mieszanką lekkich kruszyw gruboziarnistych takich jak pumeks, perlit, łupek czy keramzyt [8]. Takie rozwiązanie powoduje obniżenie przewodnictwa cieplnego, nie ma jednak zastosowania przy wiertniczych zaczynach uszczelniających, ponieważ nie używa się w nich kruszywa.
- beton komórkowy – jest to materiał budowlany zaliczany do betonów lekkich, który powstaje dzięki wprowadzeniu powietrza do mieszanki cementowej pod odpowiednim ciśnieniem. Cechą charakterystyczną tego typu betonu są komórki, czyli jednorodne pory. Wprowadzenie do zaczynu uszczelniającego powietrza w celu obniżenia przewodności cieplnej jest jednym z oczywistych rozwiązań, ponieważ powietrze jest dobrym izolatorem. Wartość współczynnika przewodności cieplnej powietrza przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym wynosi około 0,02 W/(m·K) [9]. Niestety, istnienie porów i pustek w kamieniu cementowym na skutek wprowadzenia do niego powietrza (lub innego gazu) powoduje zmniejszenie jego wytrzymałości mechanicznej [10], więc rozwiązanie to nie będzie miało zastosowania w przypadku głębokich otworów geotermalnych.
- mikrosfery szklane (ang. HGB – *Hollow Glass Beads*) – to wytworzone na bazie szkła sferyczne drobiny, o rozmiarach mierzonych w mikrometrach. Są obecnie stosowane w przemyśle naftowym i gazowniczym jako środek modyfikujący właściwości reologiczne płynów wiertniczych [11]. Obniżają przewodność cieplną stwardniałego zaczynu uszczelniającego ze względu na ich sferyczną budowę, natomiast ulegają zniszczeniu przy zbyt wysokim ciśnieniu [12].
- cenosfery popiołu lotnego (ang. FAC – *Fly Ash Cenospheres*) – są to sferyczne cząstki będące produktem ubocznym spalania węgla w elektrowniach ciepłych. Ze względu na swoją pustą strukturę mają one niską przewodność cieplną, a ich kulista powłoka wykazuje częściową rekatywność pucolanową, która wspomaga wiązanie ze spoiwem cementowym. Według literatury naukowej, użycie cenosfer pozwoliło na wytworzenie materiałów kompozytowych o współczynniku przewodności cieplnej mniejszym niż 0,4 W/(m·K) [13].
- guma z recyklingu opon – użyta jako dodatek do cementu pozwoliła na zmniejszenie współczynnika przewodności cieplnej stwardniałego kamienia cementowego z 0,3 do 0,09 W/(m·K). Ze względu na nienawilżający charakter gumy, negatywny efekt wilgoci na przewodnictwo cieplne został zmniejszony [14].

4.2. Składniki podwyższające przewodność cieplną

Oprócz dodatków zmniejszających przewodność cieplną zaczynu uszczelniającego istnieją również dodatki, powodujące wzrost przewodności. Należy jednak pamiętać, że zaczyny o wysokiej przewodności cieplnej nie nadają się do odwiertów geotermalnych, ale do otworowych wymienników ciepła (zarówno płytkich, jak i w głębokich). Najważniejszymi tego typu dodatkami są:

- grafen – to stworzony z atomów węgla tzw. nanomateriał, czyli materiał, którego jedna jednostka mieści się w przedziale od 1 do 100 nanometrów. Sam grafen jest

bardzo dobrym przewodnikiem ciepła, jego przewodność cieplna może osiągać nawet 5 300 W/(mK) [15]. Grafen do zaczynów uszczelniających dodawać można w formie utlenionej, czyli w postaci tlenku grafenu. W wiertnictwie tlenek grafenu znajduje swoje zastosowanie również jako dodatek do płuczki wiertniczej [16]. Tlenek grafenu znacząco poprawia właściwości smarne płuczek wiertniczych, a także przyczynia się do zwiększenia odporności na zużycie tych płuczek [16]. Jednak działanie grafenu zarówno jako dodatek do płuczek i zaczynów uszczelniających jest na razie przedmiotem intensywnych badań eksperymentalnych [17-18]. Grafen i tlenek grafenu są obecnie stosunkowo drogimi dodatkami [16].

- grafit – jest to minerał, będący jednocześnie alotropową odmianą węgla. Charakteryzuje się wysoką odpornością na działanie temperatury oraz dobrym przewodnictwem prądu elektrycznego oraz energii cieplnej. Grafit jest dodatkiem, powodującym zwiększenie przewodności cieplnej stwardniałego zaczynu uszczelniającego [19-22]. Jego wpływ na parametry zaczynu nie jest jeszcze w pełni udowodniony, ale dotychczasowe wyniki badań są bardzo obiecujące. Dodanie grafitu do cementu poprawiło przepływ energii w głębokim otworowym wymienniku ciepła o 14,4% [23].

4.3. Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne zostały przeprowadzone na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie zgodnie z normą PN-EN ISO 10426-2. Ich celem było zbadanie wpływu dodatku mikrosfer szklanych na współczynnik przewodności cieplnej stwardniałego zaczynu uszczelniającego. Badaniom zostało poddane 4 receptury o zmiennej zawartości dodatku mikrosfer szklanych (tab. 1). Do sporządzenia zaczynów użyto cementu CEM I 42,5R.

Tabela 1. Próbkę mikrosfer szklanych

	Rec0	Rec1	Rec2	Rec3
w/c	0,6	0,6	0,6	0,6
BWOC	0%	1,5%	3%	6%

Źródło: Opracowanie własne

Zbadano współczynnik przewodności cieplnej, próbek stwardniałego zaczynu uszczelniającego o kształcie cylindrycznym (średnica około 55 mm, grubość około 20 mm) przedstawionych na rys. 2. Były one przechowywane zanurzone w wodzie przez 28 dni celem symulacji warunków otworopodobnych (nie uwzględniając jednak ciśnienia). Następnie badane za pomocą miernika przepływu ciepła LaserComp FOX 50 (ISO 8301) skalibrowanego do pomiarów próbek cementowych (rys. 1). Przedstawione wyniki pomiaru współczynnika przewodności cieplnej są średnią arytmetyczną pomiarów trzech próbek utworzonych z danej receptury zaczynu.



Rysunek 1. Aparat LaserComp FOX 50 [24]

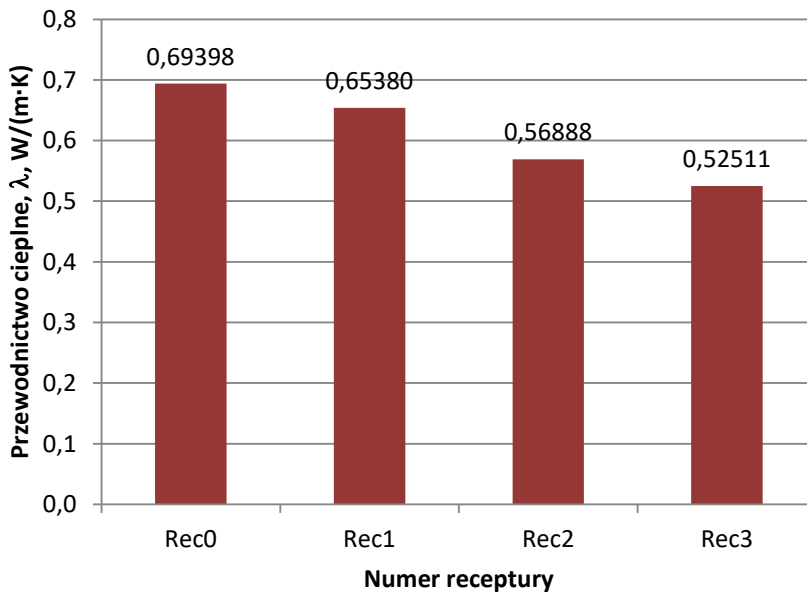


Rysunek 2. Próbką do badań zaczynów cementowych z mikrosferami szklanymi [opracowanie własne]

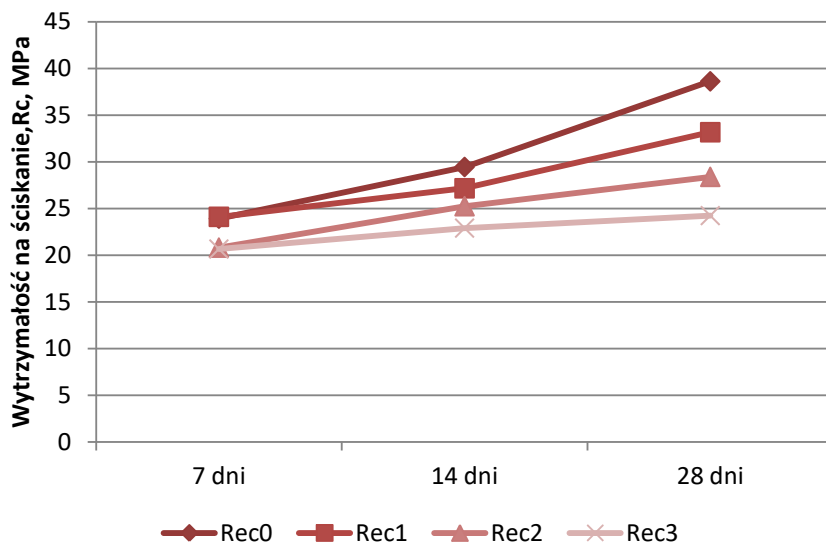
Jak można zaobserwować na wykresie z rys. 4 współczynnik przewodności cieplnej próbki maleje wraz ze wzrostem zawartości dodatku mikrosfer szklanych. Zbadano również wytrzymałość mechaniczną stwardniałego zaczynu uszczelniającego po 7, 14 i 28 dniach. W tym celu wykorzystano prasę Matest E183N przedstawioną na rysunku 3. Wykres na rysunku 5 przedstawia wyniki badań.



Rysunek 3. Prasa Matest E183N [opracowanie własne]



Rysunek 4. Wykres wpływu zawartości mikrosfer szklanych na współczynnik przewodności cieplnej stwardniałego zaczynu uszczelniającego [opracowanie własne]



Rysunek 5. Wykres przedstawiający wpływ zawartości mikrosfer szklanych i czasu dojrzewania próbek na wytrzymałość na ściskanie stwardniałego zaczynu uszczelniającego [opracowanie własne]

4.3.1. Dodatki zwiększające wytrzymałość na ściskanie

Aby zrównoważyć niekorzystny wpływ mikrosfer szklanych oraz innych dodatków obniżających przewodność cieplną na wytrzymałość na ściskanie, należy zastosować dodatki zwiększające wytrzymałość na ściskanie zaczynu uszczelniającego. Do tego typu dodatków zaliczyć można:

- żużel wielkopiecowy – jest to produkt uboczny wytopienia rudy żelaza. Nazwa wielkopiecowy nawiązuje do urządzenia, w którym wytopiana jest ruda żelaza, czyli do wielkiego pieca. Zastosowanie żużla wielkopiecowego z cementem portlandzkim w stosunku 30 do 70 zapewnia zwiększoną wczesną i końcową wytrzymałość na ściskanie stwardniałego zaczynu uszczelniającego [25].
- hydroksyetylocelulozę (HEC) – jest to produkt reakcji tlenku etylu z celulozą. Jest środkiem żelującym, stosowanym powszechnie w kosmetykach i środkach czyszczących. HEC stosowany jako dodatek do zaczynów, oprócz poprawy wytrzymałości na ściskanie działa jako środek, kontrolujący utratę płynu oraz zwiększający jego lepkość [26].

5. Wnioski

Zwiększenie mocy otworów geotermalnych można osiągnąć dzięki nowym recepturom zaczynów uszczelniających. Receptury te można otrzymać za pomocą wzbogacania zaczynów uszczelniających o różnego rodzaju dodatki. Aby uzyskać zaczyn o podwyższonym współczynniku przewodności cieplnej, stosowany przy wykonywaniu otworowych wymienników ciepła, należy zastosować grafen lub grafit. Natomiast materiały stosowane w budownictwie są jednymi z najbardziej sprawdzonych dodatków izolujących. Do najważniejszych dodatków tego typu można zaliczyć cenosfery popiołu lotnego, gumę z recyklingu opon oraz mikrosfery szklane. Dodanie mikrosfer

szklanych obniża przewodność cieplną stwardniałego zaczynu cementowego. Oprócz tego mikrosfery szklane zmniejszają wytrzymałość zaczynu uszczelniającego na ściskanie mierzone po 28 dniach. Aby określić optymalny stosunek między przewodnością cieplną a wytrzymałością na ściskanie konieczne są dalsze badania. Negatywny wpływ na wytrzymałość na ściskanie można złagodzić poprzez użycie innych dodatków.

Praca powstała w ramach dofinansowania z funduszy norweskich 2014-2021 za pośrednictwem Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu POLNOR 2019 Call nr NOR/POLNOR/BHEsINNO/0018/2019.

Literatura

1. Praca zbiorowa, Poradnik górnika naftowego Tom II, *Stowarzyszenie Nauko-Techniczne Inżynierów i Techników Przemysłu Naftowego i Gazowniczego*, 2015.
2. Habrat S., Raczkowski J., Zawada S., *Technika i technologia cementowań w wiertnictwie*, Wydawnictwa Geologiczne, 1980.
3. Sapińska-Śliwa A., *Odnawialne źródła energii w Małopolsce*, Stowarzyszenie Gmin Polska Sieć „Energie Cites”, Kraków 2007, s. 72-74.
4. Śliwa T., Kruszewski M., Assadi M., Sapińska-Śliwa A., *The application of Vacuum Insulated Tubing in Deep Borehole Heat Exchangers*, AGH Drilling, Oil, Gas, 2017, 34.
5. Li L., *Study on properties and testing methods of thermo-responsive cementing system for well cementing in heavy oil thermal recovery*, AIP Conference Proceedings, Vol. 1864, No. 1, p. 020064, AIP Publishing LLC, 2017.
6. Jimenez W.C., Pang X., Urdaneta J.A., Sørensen E., Lende G., Nimane S., *Thermo-mechanical properties of annular sealants—A path to optimized wellbore integrity and economics*, SPE Kuwait Oil & Gas Show and Conference, Society of Petroleum Engineers, 2017.
7. Ichim A., Teodoriu C., Falcone G., *Estimation of cement thermal properties through the three-phase model with application to geothermal wells*, Energies, 11(10), 2018, s. 2839.
8. Zhou H., Brooks A.L., *Thermal and mechanical properties of structural lightweight concrete containing lightweight aggregates and fly-ash cenospheres*, Construction and Building Materials, 198, 2019, s. 512-526.
9. Lasance C.J., *Technical data: the thermal conductivity of air at reduced pressures and length scales*, Electronics Cooling, 8, 2002, 10-11.
10. Remesar J.C., Vera S., Lopez M., *Assessing and understanding the interaction between mechanical and thermal properties in concrete for developing a structural and insulating material*, Construction and Building Materials, 132, 2017, s. 353-364.
11. Lumsden S., Singh J.P., Morgan R.G., Hundt G., *Development and Rheological Characterization of Suspension of Hollow Glass Beads*, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, September, 2016.
12. Tan B.C.H., Lang M.J., Sheth D.H.R., *High-strength, low-density cement pumped on-the-fly using volumetric mixing achieves cement to surface in heavy loss coal seam gas field*, SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, January, 2012.
13. Zhou H., Brooks A.L., *Thermal and mechanical properties of structural lightweight concrete containing lightweight aggregates and fly-ash cenospheres*, Construction and Building Materials, 198, 2019, s. 512-526.
14. Záleská M., Pavlík Z., Čítek D., Jankovský O., Pavlíkova M., *Eco-friendly concrete with scrap-tyre-rubber-based aggregate—Properties and thermal stability*, Construction And Building Materials, 225, 2019, s. 709-722.

15. Balandin A.A., Ghosh S., Bao W., Calizo I., Teweldebrhan D., Miao F., Lau C.N., *Superior thermal conductivity of single-layer graphene*, Nano letters, 8(3), 2008, s. 902-907.
16. Zheng Y., Asif A., Amiri A., Polycarpou A.A., *Graphene-Based Aqueous Drilling Muds as Efficient, Durable, and Environmentally Friendly Alternatives for Oil-Based Muds*, ACS Applied Nano Materials, 4(2), 2021, s. 1243-1251.
17. Zhao R., Zhu W., Zhang S., *The Effect of Graphene Nanoplatelets on Chloride Binding and Chloride Migration in Cement Paste*, Journal of Testing and Evaluation, 50(1), 2020.
18. Chintalapudi K., Pannem R.M.R., *Enhanced Strength, Microstructure, and Thermal properties of Portland Pozzolana Fly ash-based cement composites by reinforcing Graphene Oxide nanosheets*, Journal of Building Engineering, 42, 2021, s. 102521.
19. Sapinska-Sliwa A., Sliwa T., Wisniowski R., *Graphite and diatomite as additives for grouts for boreholes in geothermics*, Przemysł Chemiczny, 96(8), 2017, s. 1723-1725.
20. Sliwa T., Stryczek S., Wysogład T., Skakuj A., Wiśniowski R., Sapińska-Sliwa A., Bieda A., Kowalski T., *Wpływ grafitu i diatomitu na parametry wytrzymałościowe stwardniałych zaczynów cementowych*, Przemysł Chemiczny, 96(5), 2017, s. 960-963.
21. Stryczek S., Sowa M., Śliwa T., Gonet A., Sapińska-Sliwa A., *Badania świeżych zaczynów cementowych z dodatkiem grafitu*, Wiertnictwo, Nafta, Gaz, 28, 2011, s. 749-757.
22. Śliwa T., Kowalski T., Stryczek S., Wiśniowski D., Bieda A., Piwowarczyk S., Beszlej J., Naklicki M., Sapińska-Sliwa A., *The impact of graphite impact on the thermal conductivity of the solidified grout*, AGH Drilling, Oil, Gas, 34(4), 2017.
23. Doran H.R., Renaud T., Falcone G., Pan L., Verdin P.G., *Modelling an unconventional closed-loop deep borehole heat exchanger (DBHE): sensitivity analysis on the Newberry volcanic setting*, Geothermal Energy, 9(1), 2021, s. 1-24.
24. Fox50 110 C Instrument Manual, LaserComp – TA Instruments, 2002-2016.
25. Hole H., *Geothermal well cementing*, Petroleum Engineering Summer School, Dubrovnik, Croatia 2008, s. 1-6
26. Shah M., Anirbid S., Mahesh M., Dwijen V., *Cement slurry design for geothermal exploratory well in dholera field using a novel concept of multifunctional additives*, Asian Journal of Science and technology, 8(09), 2017, s. 5812-5816.

Maksymalizacja mocy otworów geotermalnych z wykorzystaniem innowacyjnych receptur zaczynów uszczelniających

Streszczenie

Zakres tematyczny pracy dotyczy roli zaczynów uszczelniających w kontekście wierceń geotermalnych. Celem pracy było przedstawienie sposobu na maksymalizację mocy otworów geotermalnych przy użyciu nowych receptur zaczynów uszczelniających. W pracy opisano znaczenie zaczynów uszczelniających w procesie wiercenia oraz przedstawiono klasyfikację cementów, które stanowią spoiwo dla tych zaczynów. Opisano także rodzaje oraz właściwości dodatków do zaczynów uszczelniających, które stosuje się w celu zwiększenia efektywności otworów wydobywających wody geotermalne. Przedstawiono również wyniki badań, przeprowadzonych na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, dotyczących zastosowania dodatku obniżającego przewodność cieplną, czyli mikrosfer szklanych. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz przeglądu literatury światowej stwierdzono, że przez zmianę receptury zaczynu uszczelniającego można zwiększyć moc otworu geotermalnego oraz że materiały stosowane w budownictwie mogą znaleźć swoje zastosowanie w wierceniach geotermalnych jako dodatki do zaczynów uszczelniających.

Słowa kluczowe: energia geotermalna, otwory geotermalne, zaczyny uszczelniające, przewodność cieplna

Maximizing the power of geothermal boreholes using new formulas of sealing slurries

Abstract

The thematic scope of the work concerns the role of sealing slurries in the context of geothermal drilling. The work aimed to present a method of maximizing the power of geothermal wells using new formulations of sealing slurries. The paper describes the importance of sealing slurries in the drilling process and presents the cement classification, which serve as a binder for slurries. The types and properties of sealing slurry additives, which are used to increase the efficiency of boreholes exploiting geothermal water, are also described. The results of research carried out at the AGH University of Science and Technology in Krakow concerning the use of glass microspheres as an additive reducing the thermal conductivity are also presented. Based on the conducted research and a literature review, it was found that changing the sealing slurry formula can increase the power of the geothermal borehole, and that the materials used in the construction industry can find their application in geothermal drilling as additives to the sealing slurries.

Keywords: geothermal energy, geothermal boreholes, drilling slurry, thermal conductivity

Wytwarzanie wodoru z mieszaniny wody i etanolu w wyładowaniu z barierą dielektryczną

1. Wprowadzenie

Rozwój gospodarczy jest związany ze wzrostem zapotrzebowania na energię, szczególnie na energię elektryczną. Obecnie większość energii jest pozyskiwana z paliw kopalnych, ale ich zasoby są ograniczone, a eksploatacja szkodliwa dla środowiska. Nie udaje się w skali globalnej ograniczyć konsumpcji energii i należy oczekiwać, że zużycie i produkcja energii będą wzrastać wraz z rozwojem gospodarczym Świata. Pozostaje znaleźć metodę produkcji energii w sposób nieszkodliwy dla środowiska albo minimalnie wpływający na nie. Szczególnie istotne jest zapobieganie zmianom klimatycznym, czyli ograniczenie emisji dwutlenku węgla do atmosfery. Dlatego intensywnie rozwijane są metody produkcji energii ze źródeł odnawialnych np. energetyka słoneczna, wiatrowa, geotermalna, wodorowa. Energetyka słoneczna i wiatrowa zależy od pogody i nie jest stabilnym źródłem energii. Energetyka geotermalna może być rozwijana tylko w miejscach z odpowiednimi warunkami geologicznymi, które zazwyczaj nie występują przy dużych skupiskach ludności. Energetyka wodorowa bazująca na ogniach paliwowych byłaby niezależna od tych czynników.

Wodór może spowodować przełom w energetyce i wyeliminować paliwa kopalne. Jednak na razie jest on surowcem deficytowym, szczególnie „zielony wodór” pozyskiwany z surowców odnawialnych. Obecnie głównym źródłem wodoru jest gaz ziemny, ale ten wodór jest zużywany w przemyśle chemicznym np. do syntezy amoniaku. Drugim dużym źródłem wodoru jest ropa naftowa, ale wodór pozyskiwany z ropy naftowej jest zużywany w rafineriach w procesie hydrokrakingu. Generalnie stosowanie wodoru pozyskiwanego z paliw kopalnych zawierających węgiel nie będzie przyjazne dla środowiska, ponieważ węgiel zamknięty w skorupie ziemskiej będzie uwalniany w postaci dwutlenku węgla do atmosfery. Dlatego intensyfikuje się badania nad metodami pozyskiwania wodoru z wody czy biomasy. W przypadku wody pracuje się nad poprawieniem efektywności elektrolizy. W przypadku biomasy rozwiązaniem może być przetworzenie jej w etanol, metanol albo biogaz, a następnie wytworzenie z nich wodoru.

Wodór trudno się transportuje i magazynuje, dlatego najlepiej wytwarzać go w miejscu jego zużycia. Etanol i metanol są cieczami i dlatego są łatwiejsze w transporcie i przechowywaniu niż biogaz. Metanol jest trucizną i jego wytworzenie z biomasy jest trudniejsze niż etanolu. Etanol jest bezpieczny w użytkowaniu, można go pozyskiwać z niemal wszystkich surowców zawierających cukry (ziemniaki, zboża), w tym

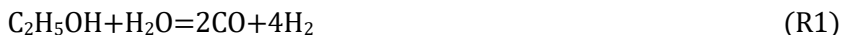
¹ bulejczyk@ch.pw.edu.pl, Katedra Technologii Chemicznej, Wydział Chemiczny, Politechnika Warszawska, www.ch.pw.edu.pl.

² michal.mlotek@pw.edu.pl, Katedra Technologii Chemicznej, Wydział Chemiczny, Politechnika Warszawska, www.ch.pw.edu.pl.

³ kraw@ch.pw.edu.pl, Katedra Technologii Chemicznej, Wydział Chemiczny, Politechnika Warszawska, www.ch.pw.edu.pl.

biomasy odpadowej (serwatka, melasa), dlatego etanol byłby znakomitym substratem do produkcji wodoru.

Wodór z etanolu i wody powstaje w procesie parowego reformingu etanolu (R1) i parowej konwersji tlenku węgla (R2).



W rezultacie z 1 mola etanolu (46 g) i 3 moli wody (54 g) teoretycznie można wytworzyć 6 moli wodoru (12 g) i 2 mole CO₂ (88 g).

Wytworzony CO₂ zostanie wychwycony przez rośliny i w procesie fotosyntezy przetworzony w cukier (R3).



Następnie w procesie fermentacji zebranych roślin i niewykorzystanych ich części cukier przetwarza się w etanol (R4).



W rezultacie nie występuje akumulacja CO₂ w atmosferze, ponieważ w cyklu R1-R4 ilość wytwarzanego i zużywanego CO₂ jest taka sama.

R1, R3 i R4 są reakcjami endotermicznymi (Tab. 1). Najwięcej energii zużywane jest w procesie fotosyntezy, ale jest to energia pochodząca od słońca. R2 jest reakcją egzotermiczną. Utlenianie wodoru (R5) również jest reakcją egzotermiczną.



Tabela 1. Charakterystyka energetyczna reakcji chemicznych

Reakcja	ΔH° , kJ	Ilość energii, kJ/mol C ₂ H ₅ OH
R1	-256	-256
R2	41	82
R3	-423	-1269
R4	-171	-86
R5	242	1452

Źródło: Opracowanie własne

Gdyby należało wyprodukować energię dla każdej reakcji endotermicznej, to proces produkcji wodoru z mieszaniny wody i etanolu byłby nieopłacalny energetycznie. Jednakże energia w procesie fotosyntezy (R3) to energia słoneczna i dzięki temu ~77% energii z utleniania wodoru (R5) może być zyskiem energetycznym.

Produkcja wodoru z mieszaniny wody i etanolu nie została dotychczas dobrze opanowana. Problem stanowi duża ilość reakcji konkurencyjnych, które mogą zmniejszać produkcję wodoru np.:



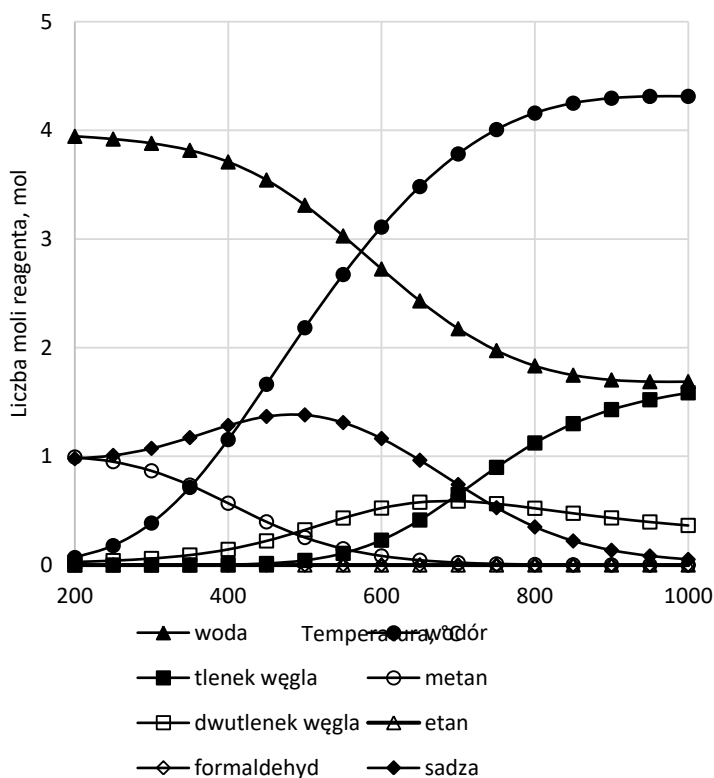


W reakcji konwersji etanolu woda nie reaguje w całości. W warunkach równowagi termodynamicznej (rys. 1) woda jest obecna nawet w temperaturze 1000°C.

Brak taniej i wydajnej technologii produkcji wodoru z mieszaniny wody i etanolu utrudnia rozwój energetyki wodorowej. Badania nad tym procesem są cały czas prowadzone i dotyczą zarówno metod katalitycznych jak i plazmowych [1-9].

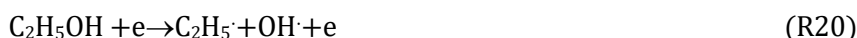
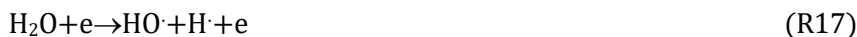
Plazma to gaz, w którym stężenie jonów i elektronów jest na tyle duże, że gaz nabywa właściwości przewodzących prąd elektryczny. Cząstki obdarzone ładunkiem oddziałują na siebie wzajemnie siłami elektrostatycznymi. Plazma może być równowagowa lub nierównowagowa. W plazmie równowagowej energia elektronów, jonów i cząstek elektrycznie obojętnych jest taka sama lub zbliżona do siebie. Natomiast w plazmie nierównowagowej energia elektronów jest wielokrotnie większa od energii pozostałych składników plazmy, których energia jest zbliżona do siebie. Plazma nierównowagowa jest bardzo interesującym środowiskiem do prowadzenia reakcji chemicznych ponieważ ma ona szczególne właściwości związane z obecnością wysokoenergetycznych elektronów. W plazmie nierównowagowej reakcje chemiczne są inicjowane zazwyczaj w zderzeniach z wysokoenergetycznymi elektronami. Zderzenia te prowadzą do wzbudzenia i dysocjacji cząsteczek, powstawania rodników i atomów. W takim środowisku mogą być prowadzone reakcje chemiczne, które w innych warunkach byłyby niemożliwe do przeprowadzenia.

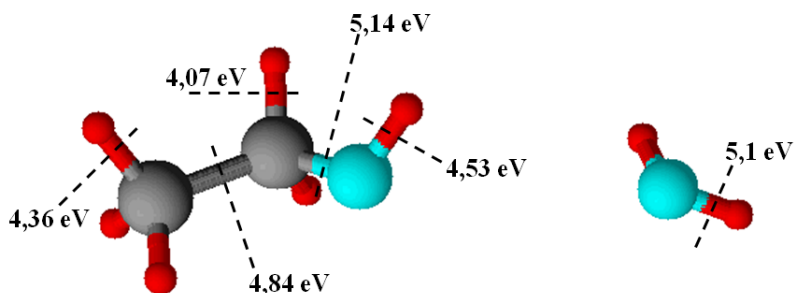
Plazmę można wytwarzać na wiele sposobów, ale w technologii najczęściej wytwarzana jest w wyładowaniach elektrycznych. Plazmę równowagową można wytwarzać w wyładowaniu łukowym, zaś nierównowagową np. w wyładowaniu z barierą dielektryczną, koronowym, iskrowym czy ślizgowym.



Rysunek 1. Skład mieszaniny, przy której swobodna energia Gibbsa jest minimalna.
Początkowa ilość wody – 3 mole, etanolu – 1 mol [opracowanie własne]

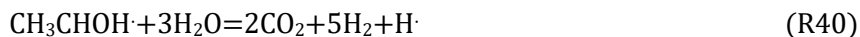
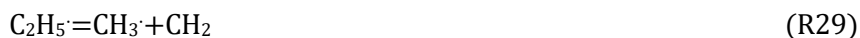
Wyładowanie z barierą dielektryczną jest stosowane na skalę przemysłową do syntezy ozonu. Technologie budowy reaktorów plazmowych oraz zasilaczy elektrycznych są dobrze opanowane. Wyładowanie z barierą dielektryczną składa się z wielu mikrowyładowań. Czas trwania pojedynczego mikrowyładowania wynosi od 1 do 10 ns. Średnica mikrowyładowania wynosi około 0,1 mm. Gęstość elektronów w mikrowyładowaniu wynosi od 10^{14} do 10^{15} elektronów na cm^{-3} . Energia elektronów wynosi od 1 do 10 eV [9, 10]. Taka energia jest wystarczająca do rozerwania wiązań chemicznych w etanolu i wodzie (rys. 2). Dlatego w czasie trwania mikrowyładowania z etanolu i wody powstają bardzo reaktywne rodniki:

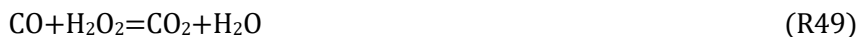




Rysunek 2. Energia wiązań [opracowanie własne, 11-13]

Kolejne reakcje przebiegają aż do powstania trwałych cząsteczek:





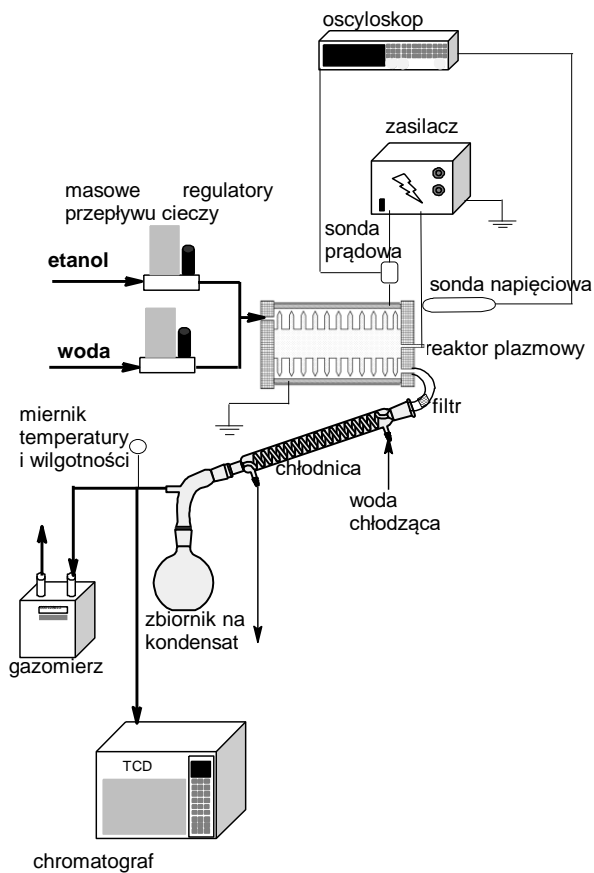
W przypadku zderzeń cząsteczek z elektronami o energii zbyt małej by doprowadzić do dysocjacji wiązania, cząsteczki są wzbudzone. Takich zderzeń statystycznie jest więcej niż zderzeń prowadzących do dysocjacji i powstawania rodników [14]. Wzbudzone cząsteczki, w kolejnych zderzeniach mogą uzyskać energię umożliwiającą dysocjację.

2. Metodyka badań

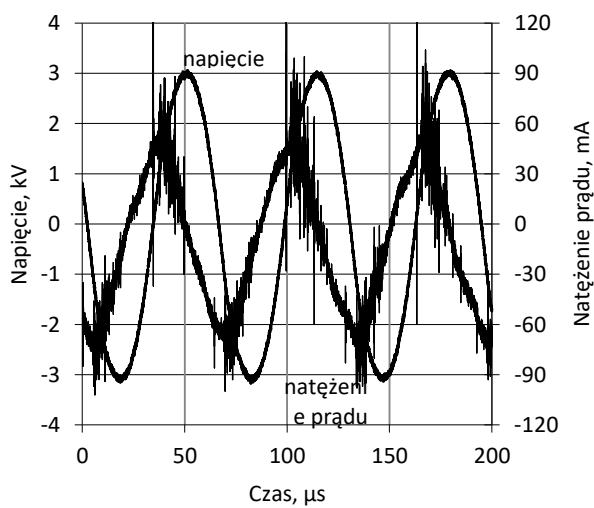
2.1. Aparatura

Schemat aparatury stosowanej w badaniach przedstawiono na Rys. 3. Natężenie przepływu wody i etanolu regulowano masowymi regulatorami przepływu cieczy (Bronkhorst/EIEWIM) wykalibrowanymi na wodę i etanol. Reaktor zbudowany był ze żłobionej, duraluminiowej, elektrody wysokonapięciowej. Całkowita długość elektrody wysokonapięciowej wynosiła 88 mm. Elektroda wysokonapięciowa znajdowała się w kwarcowej obudowie, o grubości ścianki 3 mm. Zewnętrzna ścianka obudowy kwarcowej pokryta była warstwą aluminium, która stanowiła elektrodę uziemioną. Najmniejsza szerokość szczeliny wyładowczej, między szczytami karbów, a obudową kwarcową, wynosiła 1,5 mm. Objętość reaktora wypełniona gazem wynosiła 96 cm³.

Reaktor zasilano prądem przemiennym o częstotliwości 15,3 kHz. Zasilacz wykonany został na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. W trakcie wyładowania rejestrowano co 15 minut, przebiegi zmian napięcia i natężenia prądu, oscyloskopem Tektronix 3032 z sondą napięciową Tektornix 6015A i sondą prądową Tektornix TCP312 ze wzmacniaczem Tektronix TCP A300. Charakterystykę prądowo-napięciową przedstawiono na rysunku 4.



Rysunek 3. Schemat aparatury



Rysunek 4. Charakterystyka prądowo-napięciowa wyładowania z barierą dielektryczną

Natężenie przepływu gazów mierzono gazomierzem Illmer-Gasmesstechnik, temperaturę i zawartość wody mierzono rejestratorem Apar AR236/2. Stężenie pozostałych gazów mierzono chromatografem gazowym HP6890 z detektorem konduktometrycznym. Skład kondensatu badano chromatografem gazowym Thermo-Scientific Trace 1300 z kwadropolowym spektrometrem masowym.

2.2. Procedura badawcza

Do reaktora plazmowego wprowadzano wodę i etanol. W czasie badań zmieniano moc, natężenie przepływu substratów oraz stosunek molowy wody do etanolu.

Substraty wprowadzano do reaktora w postaci ciekłej. W reaktorze substraty były ogrzewane, parowały i reagowały. Wyładowanie włączano jednocześnie z rozpoczęciem wprowadzania substratów do reaktora.

Gazy po wyjściu z reaktora kierowane były do filtra z włókna kwarcowego, w którym usuwano sadzę, i dalej do chłodnicy, w której wykraplano część wody i etanolu. Gazy były schładzane w chłodnicy do temperatury 18-20°C i kierowane do gazomierza. Ze strumienia schłodzonych gazów pobierano próbkę do analizy chromatograficznej.

2.3. Obliczenia

Moc obliczano według wzoru:

$$P = f \cdot \int_{t_1}^{t_2} U(t) \cdot I(t) dt \quad (1)$$

gdzie: P – moc [W], f – częstotliwość [Hz], U – napięcie [V], I – natężenie prądu [A], t – czas [s].

Stopień przemiany etanolu obliczano według wzoru:

$$x = \frac{W_e[\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}] - W[\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}]}{W_e[\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}]} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie: x – stopień przemiany etanolu, $W_e[\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}]$ – natężenie przepływu etanolu na wejściu do reaktora [mol/h], $W[\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}]$ – natężenie przepływu etanolu na wyjściu z reaktora [mol/h].

Natężenie przepływu etanolu na wyjściu z reaktora wyznaczono metodą bilansowania pierwiastków.

Natężenie przepływu produktów gazowych obliczano według wzoru:

$$W[i] = \frac{a_i \cdot q}{22,4} \quad (3)$$

gdzie: $W[i]$ – natężenie przepływu produktu [mol/h], a_i – zawartość produktu w strumieniu gazu, q – natężenie przepływu schłodzonego gazu [Nl/h].

Wydajność energetyczną wytwarzania wodoru obliczano według wzoru:

$$Y = \frac{W[\text{H}_2] \cdot M}{P} \cdot 1000 \quad (4)$$

gdzie: Y – wydajność energetyczna wytwarzania wodoru [$\text{g}(\text{H}_2)/\text{kWh}$], $W[\text{H}_2]$ – natężenie przepływu wodoru [mol/h], M – masa molowa wodoru [g/mol].

Strumień energii związany z reakcjami chemicznymi przebiegającymi w reaktorze obliczono według wzoru:

$$Q_r = \sum W_e[\text{sub}] \cdot \Delta H_{\text{sub}} - \sum W[i] \cdot \Delta H_i - \sum W[\text{sub}] \cdot \Delta H_{\text{sub}} \quad (5)$$

gdzie: Q_r – strumień energii związany z reakcjami chemicznymi [kJ/h], $W_e[\text{sub}]$ – natężenie przepływu substratu na wejściu do reaktora [mol/h], $W[\text{sub}]$ – natężenie przepływu substratu na wyjściu z reaktora [mol/h], ΔH_{sub} – entalpia tworzenia substratu [kJ/mol], ΔH_i – entalpia tworzenia produktu [kJ/mol].

Strumień energii związany z ogrzewaniem substratów obliczono według wzoru:

$$Q_o = \Delta T \cdot \sum W_e[\text{sub}] \cdot C_p[\text{sub}] \quad (6)$$

gdzie: Q_o – strumień energii związany z ogrzewaniem [kJ/h], $c_p[\text{sub}]$ – średnie ciepło molowe [$\text{kJ}/(\text{K} \cdot \text{mol})$], ΔT – zmiana temperatury [K].

Strumień energii związany z parowaniem substratów obliczono według wzoru:

$$Q_p = \sum W_e[\text{sub}] \cdot \Delta H_p[\text{sub}] \quad (7)$$

gdzie: Q_p – strumień energii związany z parowaniem [kJ/h], $\Delta H_p[\text{sub}]$ – entalpia parowania substratu [kJ/mol].

3. Wyniki i analiza

Produktami, które występowały w schłodzonych gazach były wodór, metan, etan, etylen, tlenek węgla i dwutlenek węgla. Na filtrze osadzała się sadza. Kondensat był mieszaniną wody i etanolu.

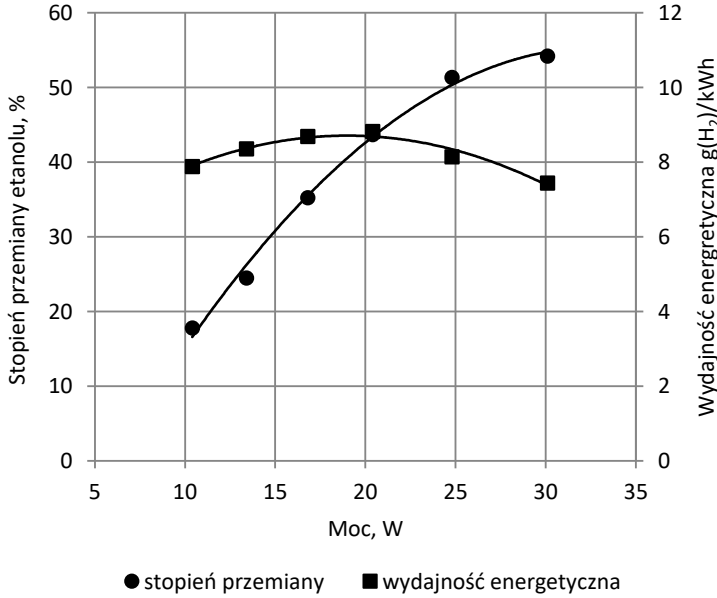
3.1. Moc

Moc jest podstawowym parametrem, który wpływa na przebieg procesów plazmowych. W badaniach nad wpływem mocy na proces wytwarzania wodoru zastosowano stałe natężenie przepływu wody i etanolu. Natężenie przepływu wody wynosiło 0,464 mol/h. Natężenie przepływu etanolu wynosiło 0,155 mol/h.

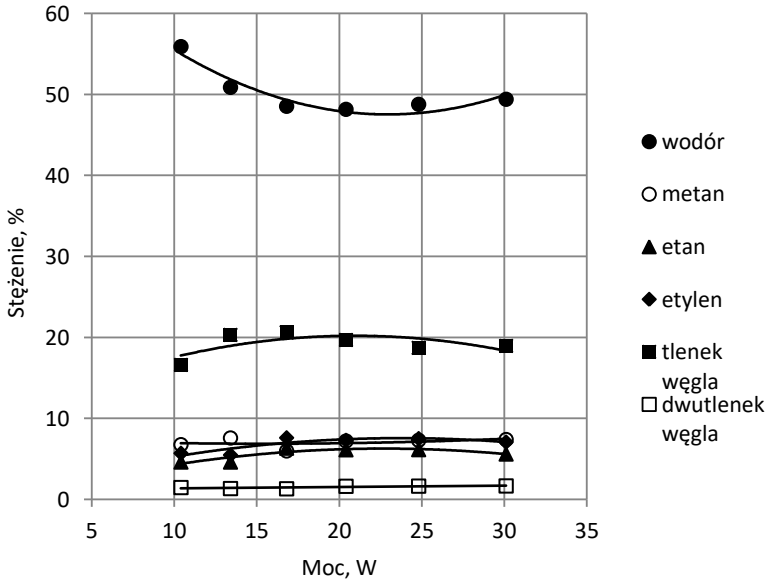
Na Rys. 5 przedstawiono wpływ mocy wyładowania na stopień przemiany etanolu i wydajność energetyczną wytwarzania wodoru. Stopień przemiany etanolu wzrastał od 18 do 54% wraz ze wzrostem mocy wyładowania od 10 do 30 W. Natomiast wydajność energetyczna wytwarzania wodoru w niedużym stopniu zależała od mocy. Maksymalna wielkość wydajności energetycznej osiągnięta została przy mocy 20 W i wynosiła 8,8 g(H_2)/kWh.

Wpływ mocy na stężenie produktów w schłodzonych gazach przedstawiono na rysunku 6. Stężenie wodoru zmniejszało się z 56 do 49% wraz ze wzrostem mocy z 10 do 17 W. Dalszy wzrost mocy, do 30 W, nie powodował już zmian stężenia wodoru. Odwrotnie zmieniało się stężenie węglowodorów (CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6). Najmniejsze, 17,1%, uzyskiwane było przy mocy 10 W i wzrastało do 20% przy mocy 17 W. Następnie przy wyższych mocach utrzymywało się na poziomie około 20%. Stężenie tlenków węgla nie zmieniało się znacząco w badanym zakresie zmian mocy.

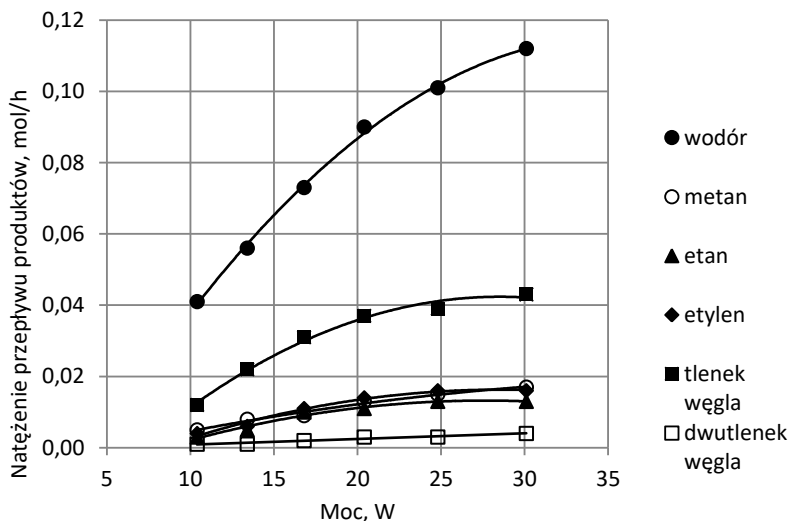
Zmniejszenie stężenia wodoru nie spowodowało zmniejszenia produktywności wodoru (rys. 7). Produktywność wzrastała wraz ze wzrostem mocy. Efekt ten wynikał ze wzrostu stopnia przemiany etanolu.



Rysunek 5. Wpływ mocy na stopień przemiany etanolu i wydajność energetyczną wytwarzania wodoru. Natężenie przepływu wody 0,464 mol/h. Natężenie przepływu etanolu 0,155 mol/h



Rysunek 6. Wpływ mocy na stężenie produktów w schłodzonym gazie. Natężenie przepływu wody 0,464 mol/h. Natężenie przepływu etanolu 0,155 mol/h



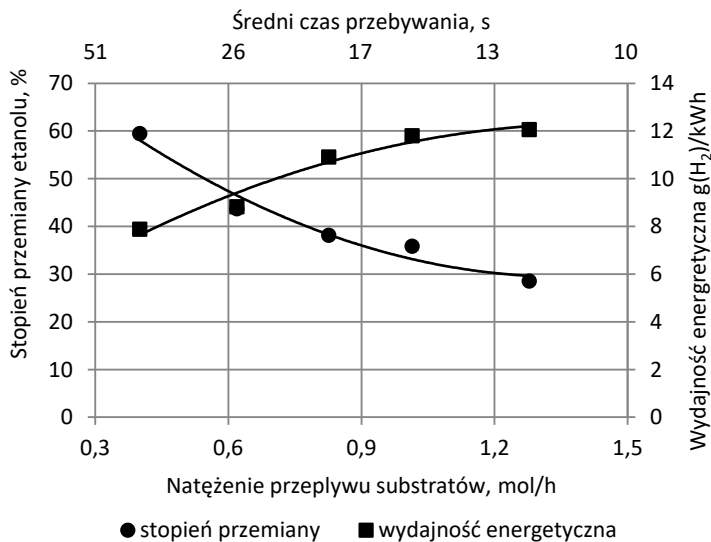
Rysunek 7. Wpływ mocy na produktywność. Natężenie przepływu wody 0,464 mol/h.
Natężenie przepływu etanolu 0,155 mol/h

3.2. Natężenie przepływu substratów

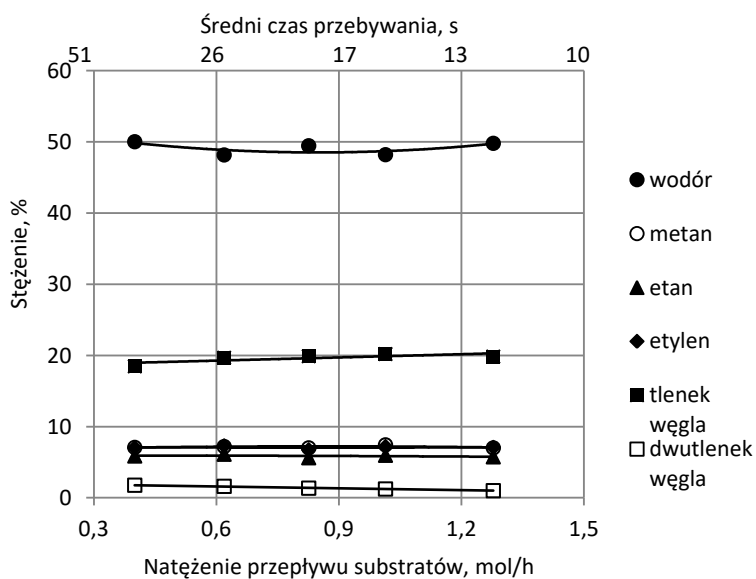
Badania nad wpływem natężenia przepływu substratów na proces wytwarzania wodoru przeprowadzono przy stałej mocy wynoszącej 20 W i stałym stosunku mowym wody do etanolu wynoszącym 3.

Natężenie przepływu substratów jest ściśle powiązane z czasem przebywania reagentów w reaktorze. Im dłuższy czas przebywania reagentów w reaktorze tym wyższy stopień przemiany można osiągnąć. Potwierdzenie tej zasady można zaobserwować na rysunku 8. Stopień przemiany etanolu zmniejszał się wraz ze wzrostem natężenia przepływu strumienia substratów. W układach, w których zachodzi wiele reakcji chemicznych skrócenie czasu przebywania często wpływa na skład gazów poreakcyjnych. W badanym procesie plazmowym dwutlenek węgla jest produktem reakcji następczych i dlatego jego stężenie wzrastało z 1 do 1,77% wraz ze wzrostem średniego czasu przebywania reagentów w reaktorze (rys. 9).

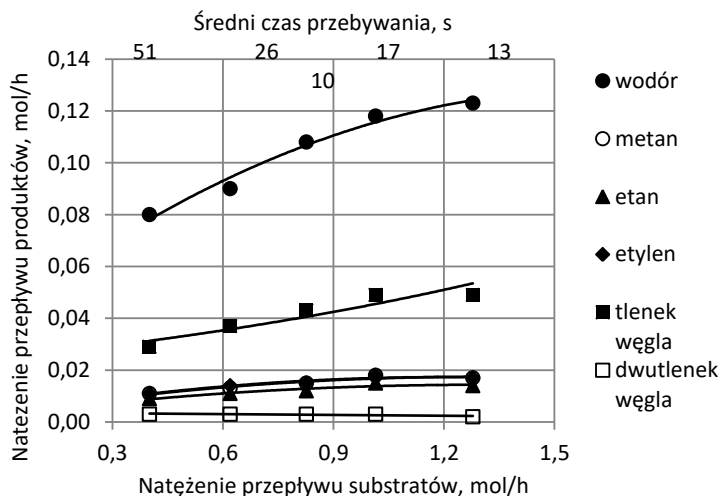
Zwiększenie natężenia przepływu substratów powoduje wzrost produktywności i efektywności energetycznej wytwarzania wodoru (rys. 10 i 8). Jest to powiązane ze stopniem przemiany etanolu. Im większy strumień substratów był wprowadzany do reaktora, tym stopień przemiany etanolu był mniejszy i tym bardziej skład chemiczny oddalony był od stanu równowagi termodynamicznej. W rezultacie szybkość reakcji chemicznych była większa i lepsze było wykorzystanie energii doprowadzonej do reaktora. Niedogodnością takiej sytuacji było uzyskiwanie niskiego stopnia przemiany etanolu.



Rysunek 8. Wpływ natężenia przepływu substratów na stopień przemiany etanolu i wydajność energetyczną wytwarzania wodoru. Moc 20 W. Stosunek molowy wody do etanolu 3:1



Rysunek 9. Wpływ natężenia przepływu substratów na stężenie produktów w schłodzonym gazie. Moc 20 W. Stosunek molowy wody do etanolu 3:1



Rysunek 10. Wpływ natężenia przepływu substratów na produktywność. Moc 20 W. Stosunek molowy wody do etanolu 3:1

3.3. Skład mieszaniny reakcyjnej

Badania wpływu składu mieszaniny reakcyjnej na proces wytwarzania wodoru przeprowadzono przy stałej mocy wynoszącej 20 W i stałym natężeniu przepływu substratów wynoszącym 0,62 mol/h. Odpowiadało to 25 s średniego czasu przebywania reagentów w reaktorze. Zmiana składu mieszaniny reakcyjnej polegała na zmianie stosunku molowego wody do etanolu w zakresie od 1 do 5.

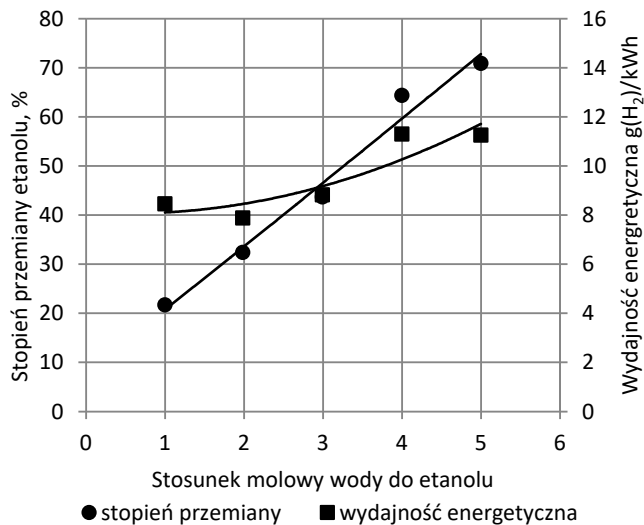
W przemysłowym katalitycznym procesie reformingu parowego metanu praktykowane jest stosowanie nadmiaru wody. Nadmiar wody ma zmniejszać ilość depozytów węglowych osadzających się na katalizatorze. W procesie plazmowym powstawanie depozytów węglowych nie jest czynnikiem krytycznym prowadzącym do zahamowania procesu reformingu parowego, jednak zmniejszenie ilości depozytów węglowych może spowodować zwiększenie ilości wyprodukowanego wodoru.

Na rysunku 11 przedstawiono wpływ stosunku molowego wody do etanolu na stopień przemiany etanolu i wydajność energetyczną wytwarzania wodoru. Stopień przemiany etanolu wzrastał od 22 do 71% wraz ze wzrostem stosunku molowego wody do etanolu od 1 do 5. Również wydajność energetyczna wytwarzania wodoru wzrastała wraz ze wzrostem stosunku molowego wody do etanolu. Stężenie wodoru w schłodzonych gazach także wzrastało i największa wartość (52%) osiągnięta została przy największym stosunku molowym wody do etanolu (rys. 12). Stężenie węglowodorów i tlenku węgla zmniejszało się wraz ze wzrostem stosunku molowego wody do etanolu. Największe zmiany zaobserwowano dla metanu, którego stężenia zmniejszyły się z 8,8 do 5,7%. Natomiast zgodnie z oczekiwaniami stężenie dwutlenku węgla wzrosło z 0,6 do 4,3% wraz ze wzrostem stosunku molowego wody do etanolu od 1 do 5.

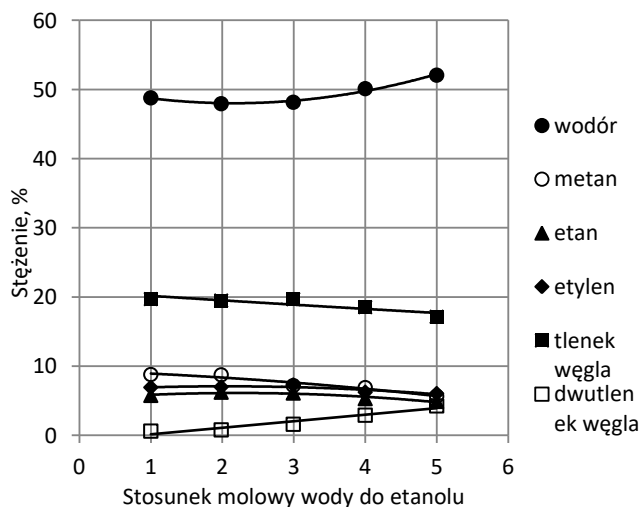
Zmiany stężeń i całkowitego stopnia przemiany etanolu mają przełożenie na produktywność (rys. 12). Wraz ze wzrostem stosunku molowego wody do etanolu od 1 do 5 natężenie przepływu dwutlenku węgla wzrastało 9-krotnie. W tym czasie natężenie przepływu wodoru wzrastało o 32%. Natężenia przepływu tlenku węgla, etylenu

i etanu wzrastały o 8-10%. Natomiast natężenie przepływu metanu zmniejszało się o 20%.

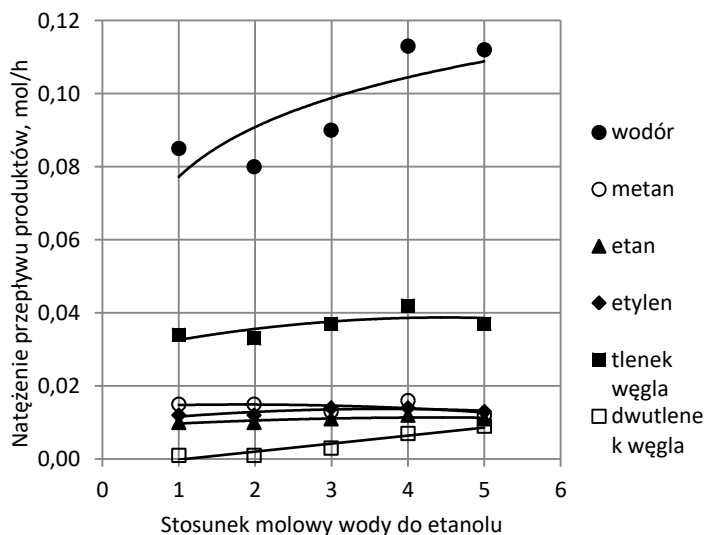
Zwiększenie produktywności dwutlenku węgla jest korzystne ponieważ reakcja prowadząca do powstania CO_2 (R2) odpowiada za 1/3 teoretycznej wydajności produkcji wodoru w procesie wytwarzania wodoru z etanolu. Niespodziewanie produktywność tlenku węgla także nieznacznie wzrosła wraz ze wzrostem stosunku molewogo wody do etanolu. Wskazuje to, że warunki panujące w wyładowaniu z barierą dielektryczną nie są korzystne dla reakcji parowej konwersji tlenku węgla (R2).



Rysunek 11. Wpływ składu mieszaniny wprowadzanej do reaktora na stopień przemiany etanolu i wydajność energetyczną wytwarzania wodoru. Moc 20 W. Natężenie przepływu substratów 0,62 mol/h



Rysunek 12. Wpływ składu mieszaniny wprowadzanej do reaktora na stężenie produktów w schłodzonym gazie. Moc 20 W. Natężenie przepływu substratów 0,62 mol/h



Rysunek 13. Wpływ składu mieszaniny wprowadzanej do reaktora na produktywność. Moc 20 W. Natężenie przepływu substratów 0,62 mol/h

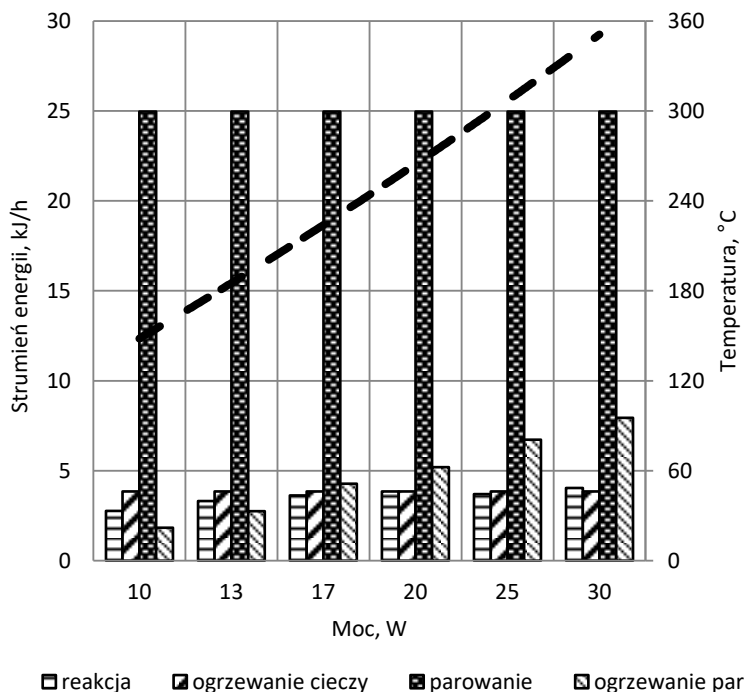
3.4. Energetyka procesu

W reaktorze plazmowym substraty wprowadzone w fazie ciekłej są ogrzewane, parują i reagują. Ogrzewanie i parowanie wymaga dostarczenia energii, natomiast reakcje chemiczne są endotermiczne albo egzotermiczne. Z uwagi na ilość reakcji chemicznych i niecałkowite przereagowanie substratów efekt cieplny procesu można określić na podstawie równania (5).

Na rysunku 14 przedstawiono zapotrzebowanie na energię dla procesu prowadzonego przy ustalonym natężeniu przepływu substratów i ustalonym składzie mieszaniny wprowadzanej do reaktora.

Energia zużyta w reakcjach chemicznych jest mniejsza niż energia zużyta na ogrzanie i parowanie substratów. Najwięcej energii zużywanej jest na parowanie wody i etanolu. Oznacza to, że korzystanie z ciekłych substratów jest bardzo wygodne, lecz energetycznie kosztowne. W dużych instalacjach pracujących w ruchu ciągłym można odzyskiwać ciepło przez wstępne ogrzewanie lub odparowywanie substratów, ale w małych urządzeniach odzysk ciepła będzie problematyczny.

Zaletą reaktorów plazmowych jest ich elastyczność. Łatwo je włączać i wyłączać. Mogą być zasilane różnymi substratami. Dlatego mogłyby być stosowane do zasilania w wodór niedużych ogniw paliwowych pracujących okresowo. W tego typu układach odzysk ciepła jest mało efektywny, dlatego koszt wytwarzania wodoru w niedużych instalacjach będzie wymagał większych nakładów energetycznych. Jednakże ich zaletą będzie małe ryzyko wypadków z ciężkimi skutkami, ponieważ wodór będzie wytwarzany na miejscu i od razu zużywany w ogniwie paliwowym.



Rysunek 14. Wpływ mocy na temperaturę gazów i zapotrzebowanie na energię. Natężenie przepływu wody 0,464 mol/h. Natężenie przepływu etanolu 0,155 mol/h. Linia przerywana – temperatura

4. Podsumowanie

W wyładowaniu barierowym wytworzono wodór z mieszaniny wody i etanolu bez wprowadzania dodatkowych gazów ułatwiających przebieg elektryczny. Wodór był głównym produktem procesów zachodzących w reaktorze. W dużych ilościach powstawał także tlenek węgla. Powstawały także metan, etylen oraz etan. Ich stężenie w gazach było dość wysokie i zawierało się w zakresie od 4,6 do 8,8%. Bardzo mało powstawało dwutlenku węgla.

Stężenie wodoru jest wystarczające by gazem zasilać ogniwa paliwowe typu SOFC, w którym funkcjonowania nie zakłóca obecność tlenku węgla i węglowodorów. W wysokiej temperaturze pracy ogniwa SOFC związki te będą utleniane i ciepło pozyskane z ich utleniania może ogrzewać ogniwo.

Na przebieg procesu wytwarzania wodoru w wyładowaniu z barierą dielektryczną wpływały moc, stosunek molowy wody do etanolu oraz natężenie przepływu substratów. W zależności od wartości tych parametrów zmieniały się całkowity stopień przemiany etanolu, wydajność energetyczna wytwarzania wodoru i produktywność. Natomiast stężenie wodoru i tlenku węgla nie zmieniały się znacząco.

Najwyższy stopień przemiany etanolu wyniósł 71% i uzyskany był przy mocy 20 W, natężeniu przepływu substratów 0,6 mol/h i stosunku molowym wody do etanolu wynoszącym 5. Jednakże najwyższą wydajność energetyczną wytwarzania wodoru

uzyskano przy takiej samej mocy, ale przy natężeniu przepływu substratów 1,3 mol/h i stosunku molowym wody do etanolu wynoszącym 3. W takich warunkach wydajność energetyczna wytwarzania wodoru wynosiła 12 g(H₂)/kWh.

Energia zużywana na ogrzewania i parowanie substratów była 9-11 razy większą niż energia zużywana w reakcjach chemicznych. Najbardziej energochłonnym etapem było parowanie substratów.

Podziękowania

Praca finansowana ze środków Politechniki Warszawskiej.

Literatura

1. Banach B., Machocki A., Rybak P., Denis A., Grzegorzczak W., Gac W., *Selective production of hydrogen by steam reforming of bio-ethanol*, Catalysis Today, 176, 2011 s. 28-35, DOI: 10.1016/j.cattod.2011.06.006.
2. Machocki A., Ioannides T., Papadopoulou E., Banach B., *Hydrogen-rich Ga generation from alcohols over cobalt-basis catalysts for fuel cell feeding*, Fuel Processing Technology, 148, 2016, s. 341-349, DOI: 10.1016/j.fuproc.2016.03.015.
3. Grzybek G., Gora-Marak K., Patulski P., Greluk M., Rotko M., Slowik G., Kotarba A., *Optimization of the potassium promotion of the Co vertical bar alpha-Al₂O₃ catalyst for the effective hydrogen production via ethanol steam reforming*, Applied Catalysis A-General, 614, 2021, s. 118051, DOI: 10.1016/j.apcata.2021.1.118051.
4. Greluk M., Gac W., Rotko M., Slowik G., Turczyniak-Surdacka S., *Co/CeO₂ and Ni/CeO₂ catalyst for ethanol steam reforming: Effect of the cobalt/nickel dispersion on catalysts properties*, Journal of Catalysis, 393, 2021, s. 159-178, DOI: 10.1016/j.cat.2020.11.009.
5. Miotk R., Jasiński M., Mizeraczyk J., *Electromagnetic optimization of a 2.45GHz microwave plasma source operated at atmospheric pressure and designed for hydrogen production*, Plasma Sources Science and Technology, 27, 2018, s. 035011, DOI: 10.1088/1361-6595/aab39a.
6. Czyłkowski D., Hrycak B., Jasiński M., Dors M., Mizeraczyk J., *Hydrogen production by direct injection of ethanol microdroplets into nitrogen microwave plasma flame*, International Journal of Hydrogen Energy, 43, 2018, s. 21196-21208, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.143.
7. Ulejczyk B., Nogal Ł., Młotek M., Krawczyk K., *Hydrogen production from ethanol using dielectric barrier discharge*, Energy 174 (2019) 261-268, DOI: 10.1016/j.energy.2019.02.180.
8. Ulejczyk B., Nogal Ł., Młotek M., Falkowski P., Krawczyk K., *Hydrogen production from ethanol using a special multi-segment plasma-catalytic reactor*, Journal of the Energy Institute, 95, 2021, s. 179-186, DOI: 10.1016/j.joei.2021.01.001.
9. Hnatiuk E., Aatanei D., Ursache M., Hnatiuc B., Brisset J., *A review over the cold plasma reactor and their applications*, International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, 2012, s. 497-502, DOI: 10.1109/ICEPE.2012.6463884.
10. Kogelschatz U., Eliasson B., Egli W., *Dielectric-Barrier Discharges. Principle and Applications*, Journal de Physique IV Proceedings, 7, 1997, s. C4-47-C4-66, DOI: 10.1051/jp4:1997405.jp4-00255561.
11. Oguri T., Shimamura K., Shibuta Y., Shimoje F., Yamaguchi S., *Bond dissociation mechanism of ethanol during carbon nanotube synthesis via alcohol catalytic CVD technique: Ab initio molecular dynamics simulation*, Chemical Physics Letters, 595-596, 2014, s. 185-191, DOI: 10.1016/j.cplett.2014.02.002.

12. Matus M.H., Nguyen M.T., Dixon D.A., *Theoretical prediction of the heats of formations of C₂H₃O• radicals derived from ethanol and of the kinetics of β-C-C scission in the ethoxy radical*, The Journal of Physical Chemistry A, 111, 2007, s. 113-126, DOI: 10.1021/jp064086f.
13. Maksyutenko P., Rizzo T.R., Boyarkin O.V., *A direct measurement of the dissociation energy of water*, The Journal of Chemical Physics, 125, 2006, s. 181101, DOI: 10.1063/1.2387163.
14. Fridman A., Kennedy L.A., *Plasma physics and engineering*, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton 2011.

Wytwarzanie wodoru z mieszaniny wody i etanolu w wyładowaniu z barierą dielektryczną

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań nad produkcją wodoru z mieszaniny wody i etanolu prowadzoną w plazmie nierównowagowej. Plazma wytwarzana była w wyładowaniu z barierą dielektryczną. Do reaktora plazmowego wprowadzane były tylko woda i etanol. Wodór powstawał w procesie inicjowanym w wyładowaniu elektrycznym. W czasie badań stosowano moc w zakresie od 10 do 30 W, natężenie przepływu substratów w zakresie od 0,4 do 1,3 mol/h, stosunek molowy wody do etanolu w zakresie od 1 do 5.

Badania wykazały, że w reaktorze plazmowym wodór może być wytwarzany. Stężenie wodoru w gazie wynosiło od 48 do 56%. Oprócz wodoru w gazie obecne były CO, CO₂, CH₄, C₂H₄ i C₂H₆.

Najwyższa wydajność energetyczna wytwarzania wodoru wynosiła 12 g(H₂)/kWh.

Słowa kluczowe: plazma, wodór, wyładowanie, etanol

Hydrogen production from a mixture of water and ethanol in a dielectric barrier discharge

Abstract

This paper presents results of hydrogen production from a mixture of water and ethanol in non-equilibrium plasma reactor. Plasma was produced in a dielectric barrier discharge. Only water and ethanol were introduced into the reactor, and hydrogen was generated as a result of the processes initiated in the electric discharge. During the tests the power ranged from 10 to 30 W, the flow rate of substrates ranged from 0.4 to 1.3 mol/h, the molar ratios of water to ethanol ranged from 1 to 5.

The study showed that in the plasma reactor hydrogen can be produced. The hydrogen concentration in the gas ranged from 48 to 56%. In addition to hydrogen, CO, CO₂, CH₄, C₂H₄ and C₂H₆ were present in the gas.

The best energy yield for hydrogen production was 12 g(H₂)/kWh.

Keywords: plasma, hydrogen, discharge, ethanol

Indeks Autorów

Bara M.	39, 61	Krawczyk K.....	201
Biedrońska J.....	125	Likus-Cieślik J.....	177
Bihałowicz J.....	145	Mach T.....	145
Bihałowicz J.S.	145	Młotek M.....	164, 201
Bis Z.....	101	Pająk M.....	177
Buliński P.....	188	Pazikowska-Sapota G.....	114
Buliński Z.....	39, 61	Pietrzykowski M.....	177
Chodak M.	177	Siebielec G.....	138
Ciepielowska M.....	188	Stasch A.....	19
Dembska G.	114	Śliwa T.....	188
Eliasz P.....	39, 61	Twaróg B.	73, 88
Galer-Tatarowicz K.	114	Ulejczyk B.	201
Gmur D.	138	Warszycki P.....	114
Kawka K.	164	Woroszył-Wojno J.....	164
Kobyłecki R.	101	Woś B.	177
Korzeniowska J.....	7	Zarzycki R.	101